

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18724 N und 17328 N

Thema

Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung

Teilprojekt 3: Parameterentwicklung und SEA-Modellierung

Berichtszeitraum

01.04.2015 – 31.03.2017

Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. - iVTH

Forschungsstelle

Hochschule Rosenheim

Fakultät für Angewandte Natur- und Geisteswissenschaften

Labor für Schallmesstechnik LaSM

Projektbearbeitung

Simon Mecking M.Eng.

Tobias Kruse M.Eng.

Christoph Winter M.Sc.



Rosenheim, 30.06.2017

Prof. Dr. Ulrich Schanda

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation zum Schallschutz im Hochbau	1
1.2 Motivation zum Forschungsprojekt	3
1.3 Zielsetzung und Umsetzung der Arbeitspakete	4
1.3.1 Bauteil- und Messdatensammlung	7
1.3.2 Material- und Komponentenmessung	8
1.3.3 Stoßstellenmodellierung	10
1.3.4 SEA basierte Luft- und Trittschallberechnung	11
1.3.5 Experimentelle Power Injection Methode und Stoßstellendämm-Maße	12
1.3.6 Validierungsmessungen zur Auswirkung elastischer Zwischenschichten	13
2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse	15
2.1 Methodik der Statistischen Energie-Analyse	15
2.1.1 Einteilung von Subsystemen	19
2.1.2 Eingangsadmittanz einer Platte	20
2.1.3 Schallabstrahlung von Platten	21
2.2 Anwendung in einer kommerziellen Software	26
2.2.1 Modellbeschreibung für einen L-förmigen Bauteilstoß	27
2.2.2 Vergleich der Methode mit der Energieflussanalyse	33
2.2.3 Validierung der Anregbarkeit einer Brettsperrholzplatte	37
2.3 Anwendung bei der Luft- und Trittschallberechnung nach EN 12354	38
2.3.1 Adaption der Dämpfung der Eingangswerte auf die Bausituation	40
2.3.2 Prognose der Schallübertragung des direkten Übertragungsweges	41
2.3.3 Prognose der Schallübertragung der indirekten Übertragungswege	41
2.4 Anbindung der Planung an den Gesamtplanungsprozess	45
2.4.1 Kategorisierung der Bausituation für die Schallschutzprognose	46
2.4.2 Kennwertverwaltung in der Datenbank VaBDat	49
3 Experimentelle Untersuchungen	55
3.1 Prüfstand	55
3.1.1 Einrichtung zur Pressung des Bauteilstoßes	55
3.1.2 Ausbildung der gelenkigen Bauteilauflager	57
3.2 Messtechnik	57

Inhaltsverzeichnis

3.3	Messobjekte	62
3.3.1	Brettsperrholz-Elemente	62
3.3.2	L- und T-förmige Bauteilverbindungen	64
3.4	Methoden	68
3.4.1	Stoßstellendämm-Maß	68
3.4.2	Verlustfaktoren	71
3.4.3	Betriebsschwinganalyse	72
3.4.4	Power Injection Methode	75
3.5	Resultate der Messungen	76
3.5.1	Elastomechanische Kenngrößen	76
3.5.2	Vibroakustische Kenngrößen einzelner Bauteile	81
3.5.3	Betriebsschwinganalysen	91
3.5.4	Power Injection Method	99
3.5.5	Stoßstellendämm-Maße in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	107
4	Zusammenfassung und Ausblick	125
5	Projektbewertung und Transferkonzept	129
5.1	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	129
5.2	Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzeptes	130
5.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	133
A	Zeichnung zur Ausbreitungsdämpfung	135
B	Schwingformen des frei hängenden Wandelementes	137
C	Materialkennwerte von Baumaterialien	141
D	L-Stoß	145
D.1	Zeichnungen	145
D.2	Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung	153
D.2.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	153
D.2.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	156
D.2.3	Schwingformen	158
D.3	Stoßfuge S1 mit stirnseitiger Verschraubung unter zusätzlicher Stoßpressung	167
D.3.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	167
D.3.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	170
D.4	Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer	173
D.4.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	173
D.4.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	176
D.4.3	Schwingformen	178
D.5	Stoßfuge S4 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	195
D.5.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	195
D.5.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	198

D.6	Stoßfuge S5 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	201
D.6.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	201
D.6.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	204
D.7	Stoßfuge S6 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	207
D.7.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	207
D.7.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	210
D.8	Stoßfuge S7 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	213
D.8.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	213
D.8.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	216
D.9	Stoßfuge S8 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	219
D.9.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	219
D.9.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	222
D.10	Stoßfuge S9 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung	225
D.10.1	Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848	225
D.10.2	Kennwerte aus experimenteller SEA	228
E	T-Stoß mit unterbrochener Wand	231
E.1	Zeichnungen	231
E.2	Stoßfuge S21 mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung	237
E.3	Stoßfuge S21a mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung	241
E.4	Stoßfuge S22 mit stirnseitiger, elastisch gelagert Verschraubung unten und elastisch gelagerten Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung	245
E.5	Stoßfuge S23 mit Elastomeren und stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und elastisch gelagerten Bauwinkeln unter zusätzl. Stoßpressung	249
F	T-Stoß mit durchlaufender Wand	253
F.1	Zeichnungen	253
F.2	Stoßfuge S11 mit verschraubter Stahlkonsole	257
F.3	Stoßfuge S12 mit verschraubter Stahlkonsole und Elastomer	261
	Danksagung	265
	Literatur	267

Abbildungsverzeichnis

1	Messung der Trittschallübertragung einer Decke bei Anregung durch Begehen	2
2	Gesamtplanungsablauf für ein Bauwerk in Geschossbauweise.	4
3	Aufgabenverteilung der Projektpartner im Gesamtprojekt	5
4	Arbeitspakete dieses Teilprojektes im Zusammenhang zu den anderen Teilprojekten	6
5	SEA-Modell mit zwei gekoppelten Systemen.	16
6	Näherungslösungen für das Abstrahlmaß einer endlichen, isotropen Rechteckplatte bei gelenkiger Lagerung und punktförmiger Anregung	23
7	Abstrahlmaß in Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse einer Platte	25
8	Einfache Näherungsmodelle für Abstrahlmaße und Abstrahlverlustfaktoren orthotroper Platten im Vergleich am Beispiel von Bauteilen aus Brettsperrholz	26
9	Modale Eigenschaften der Subsysteme des L-Stoßes berechnet mit VAONE [®] im Vergleich zu Messungen	29
10	SEA Modell des L-STOSSES NR. S3	29
11	Abweichung der Konsistenz zwischen berechneten modalen Dichten und experimentellen Kopplungsverlustfaktoren	30
12	Kopplungsverlustfaktoren und Energiepegeldifferenzen zwischen Subsystemen des L-Stoßes - Berechnung im Vergleich zu Messungen	32
13	Energieeinflusskoeffizienten aus der Statistischen Energie-Analyse, Energieflussanalyse und Messung	36
14	Abweichung der Energieeinflusskoeffizienten zwischen SEA- und EFA-Berechnung	38
15	Realteile der gemessenen mittleren Eingangsdmittanz der unteren Wand im Vergleich mit Berechneten.	39
16	Beiträge zur Schallübertragung im Holzbau.	40
17	Eingangsgrößen zur Berechnung des Flankendämm-Maßes bei Luftschallanregung und zur Flankenübertragung bei Trittschallanregung	42
18	Angestrebter Berechnungsablauf im Planungsprozess für ein Bauwerk in Geschossbauweise.	46
19	Grundelemente von Decken in Massivholz- und Holzrahmenbauweise	48
20	Zugriff auf Bauteildaten der Datenbank über die Homepage.	53
21	Zeichnung zum Messaufbau des L-Stoß	55
22	Fotos vom L-förmigen Messaufbau im Prüfstand der Hochschule Rosenheim.	56
23	Decken- und Wandaufleger des Prüfstandes	58
24	Anbindung des Impedanzmesskopfes an die Struktur.	59
25	Messkette der Hardware	61
26	Schichtaufbau und Breitenverbindung der Brettsperrholzelemente	65

Abbildungsverzeichnis

27	Varianten der gemessenen L-förmigen Bauteilstöße mit STOSS NUMMERN. . .	69
28	Varianten der gemessenen T-förmigen Bauteilstöße mit STOSS NUMMERN. . .	70
29	Verlustfaktoren aus einer Vergleichsmessung mit unterschiedlichen Messsystemen und Anregungssignalen	73
30	Übersichtsschema zur Messung von Verlustfaktoren	74
31	Messsituationen zur Ermittlung der E-Moduln der Brettsperrholz-Elemente.	78
32	Richtungsabhängige Wellenlängen im Brettsperrholz.	81
33	Verlustfaktoren bei unterschiedlichen Randbedingungen	83
34	Verlustfaktoren bei unterschiedlicher Lagerung	84
35	Verlustfaktoren in Abhängigkeit der Vorspannung	84
36	Experimentell ermittelte Abstrahlmaße im Vergleich zu Näherungslösungen	85
37	Gemessener und theoretischer Schnellepegel in Abhängigkeit der Entfernung zum Kraffteinleitungsort.	89
38	Abweichungen zwischen gemessenen und prognostizierten Schnellepegeln	90
39	Anzahl der Biegemoden im Terzband und der modale Überlappungsfaktor der Wand in x -Richtung.	91
40	Messpositionen und Befestigungen der Sensoren für die Bestimmung der relativen Stoßstellenbewegung	97
41	Stoßstellenbewegung und Schwingformen am T-STOSS S23	98
42	Stoßstellenbewegung und Phasendifferenzen zwischen Transferakzeleranzen am T-STOSS S23	99
43	Energieeinflusskoeffizienten auf Basis gemessener Schnellen und Schwingformen am L-STOSS NR. S3	101
44	Konditionszahl der Matrix der Energieeinflusskoeffizienten aus dem Experiment von L-STOSS NR. S3	102
45	Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren aus <i>Power Injection Method</i> am L-Stoß	104
46	Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren aus <i>Power Injection Method</i> am T-Stoß	106
47	Varianten der Bauteilverbindungen	111
48	Gesamtverlustfaktoren der Bauteile und der Stoßstellendämm-Maße bei Variation der Schraubverbindung an L-STOSS NR. S4-S7 <i>mit Elastomer</i>	112
49	Gesamtverlustfaktoren von Massivholzbauteilen in Stoßsituationen	115
50	Stoßstellendämm-Maße bei unterschiedlicher Bezugsfläche zur Bildung der mittleren Schnellepegel	116
51	Stoßstellendämm-Maße drei verschiedener Messwege für ein Übertragungsweg	118
52	Gesamtverlustfaktoren der Bauteile und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS NR. S1 und S3 <i>ohne Elastomer</i>	120
53	Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen aus der Vergleichsmessung zwischen HS Ro und ift Ro	121
54	Stoßstellendämm-Maße aus der Vergleichsmessung zwischen HS Ro und ift Ro am L-Stoß	122

55	Verlustfaktoren und Körperschall-Nachhallzeiten des Vergleichs zwischen der Messtechnik und -methodik der HS Ro und dem ift Ro an den Bauteilen des L-STOSSES NR. S3	123
56	Abmessungen des L-förmigen Bauteilstoßes im Prüfstand	145
57	Detailabbildung des L-STOSSES S3.	153
58	S3 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	155
59	S3 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	157
60	Detailabbildung des L-STOSS S1 mit direkter Verschraubung und zusätzlicher Last auf die Stoßfuge.	167
61	S1 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	169
62	S1 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	171
63	Detailabbildung des L-STOSSES S2 mit Elastomer SYLODYN ND und direkter Verschraubung.	173
64	S2 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	175
65	S2 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße aus experimenteller SEA bzw. PIM	177
66	Detailabbildung des L-STOSS S4 mit Elastomer SYLODYN ND und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	195
67	S4 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	197
68	S4 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	199
69	Detailabbildung des L-STOSS S5 mit Elastomer SYLODYN ND und elastisch gelagerter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	201
70	S5 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	203
71	S5 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	205
72	Detailabbildung des L-STOSS S6 mit Elastomer SYLODYN NC und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	207
73	S6 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	209
74	S6 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	211
75	Detailabbildung des L-STOSS S7 mit Elastomer SYLODYN NC und elastisch gelagerter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	213
76	S7 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	215
77	S7 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	217
78	Detailabbildung des L-STOSS S8 mit Elastomer SYLODYN NE und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	219
79	S8 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	221

Abbildungsverzeichnis

80	S8 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	223
81	Detailabbildung des L-STOSS S9 mit Elastomer REGUFOAM 570PLUS und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge.	225
82	S9 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	227
83	S9 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	229
84	Abmessungen des T-förmigen Bauteilstoßes mit durchlaufender Wand im Prüfstand der HS Rosenheim.	231
85	Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S21 mit direkt verschraubten Winkel an der oberen Wand und mit durchgehender Verschraubung an der unteren Wand.	237
86	S21 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	239
87	Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S21A mit direkt verschraubten Winkel an der oberen Wand und mit durchgehender Verschraubung an der unteren Wand.	241
88	S21a - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	243
89	Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S22 mit elast. gelagerten Winkel an der oberen Wand und mit durchgehender, elast. gelagerter Verschraubung an der unteren Wand.	245
90	S22 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	247
91	Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S23 mit optimierten Winkeln an der oberen Wand und mit durchgehender optimierter Verschraubung an der unteren Wand.	249
92	S23 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	251
93	Abmessungen des T-förmigen Bauteilstoßes mit durchlaufender Wand im Prüfstand der HS Rosenheim.	253
94	Detailabbildung des durchlaufenden T-STOSS S11 mit verschraubter Stahlkonsole.	257
95	S11 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	259
96	Detailabbildung des durchlaufenden T-STOSS S12 mit direkt verschraubten Winkel auf gesamter Wandbreite.	261
97	S12 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	263

Tabellenverzeichnis

1	Arbeitspakete	6
2	Bauteilbeschreibung einer Trenndecke mit Zementestrich	49
3	Verwendete Messtechnik bei den Labormessungen	60
4	Abmessungen der zusammengesetzten Bauteile aus Brettsper Holz.	64
5	Übersicht zu den Messungen an den Stoßvarianten von L- und T-Stößen. . .	65
6	E-Moduln der dreischichtigen Brettsper Holz-Elemente	77
7	E-Moduln der sechsschichtigen Brettsper Holz-Elemente	79
8	Materialparameter für die drei Hauptrichtungen der Brettsper Holz-Platten	80
9	Biege-Schwingformen eines freihängenden Wandelementes 3S	92
10	Schwingformen von Wand- und Deckenelement im L-STOSS S3 aus der Betriebsschwinganalyse	94
11	L-Stöße - Einzahlangaben von Stoßstellendämm-Maßen	108
12	T-Stöße mit durchlaufender Flanke - Einzahlangaben von Stoßstellendämm- Maßen	109
13	T-Stöße mit unterbrochener Flanke - Einzahlangaben von Stoßstellendämm- Maßen	110
14	Durchgeführte und noch geplante* Maßnahmen zum Ergebnistransfer in Projektphase I und II. Die Projektphase II startete am 01.04.2015.	131
15	Schwingformen bis 100 Hz des frei hängenden Wandelementes	137
16	Elastomechanische Kennwerte von Baumaterialien	142
17	Elastomechanische Kennwerte von Holz- und Holzwerkstoffen	143
18	Quasi-longitudinale Schallgeschwindigkeiten von Baumaterialien	144
19	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S3	153
20	S3 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktor- en und modale Überlappungsfaktoren	154
21	S3 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	156
22	S3 - Schwingformen bis 200 Hz aus der Betriebsschwinganalyse	158
23	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S1	167
24	S1 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktor- en und modale Überlappungsfaktoren	168
25	S1 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	170
26	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S2	173
27	S2 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktor- en und modale Überlappungsfaktoren	174
28	S2 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	176
29	S2 - Schwingformen bis 200 Hz aus der Betriebsschwinganalyse	178
30	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S4	195

Tabellenverzeichnis

31	S4 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	196
32	S4 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	198
33	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S5	201
34	S5 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	202
35	S5 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	204
36	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S6	207
37	S6 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	208
38	S6 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	210
39	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S7	213
40	S7 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	214
41	S7 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	216
42	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S8	219
43	S8 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	220
44	S8 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	222
45	Dokumentation zur Messung des L-STOSS S9	225
46	S9 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und modale Überlappungsfaktoren	226
47	S9 - Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße	228
48	Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S21	237
49	S21 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	238
50	Dokumentation zur Raster-Messung des durchlaufenden T-STOSS S21A	241
51	S21a - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	242
52	Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S22	245
53	S22 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	246
54	Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S23	249
55	S23 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	250
56	Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S11	257
57	S11 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	258
58	Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S12	261
59	S12 - Stoßstellendämm-Maße, Schnellepegeldifferenzen, Gesamtverlustfaktoren und die modalen Überlappungsfaktoren der Bauteile	262

Abkürzungsverzeichnis

3S	Brettsperrholz aus drei Schichten
5S	Brettsperrholz aus fünf Schichten
6S	Brettsperrholz aus sechs Schichten
APos	Lastangriffsposition
BIM	Bauwerksinformationsmodell
LfB	Lehrstuhl für Baumechanik der Technischen Universität München
BSA	Betriebsschwinganalyse
CiE	Lehrstuhl für Computation in Engineering der Technischen Universität München
CSTB	<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Frankreich</i>
DAGA	Tagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik
EFA	Energieflussanalyse
FEM	Finiten Elemente Methode
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
HS Ro	Hochschule Rosenheim
IEPE	<i>Integrated Electronics Piezo Electric</i>
ift Ro	ift Rosenheim
ILZ	Impulslaufzeit
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
MMF	Metra Mess- und Frequenztechnik
MPos	Messposition
NRC	<i>National Research Council - Construction, Kanada</i>
PIM	<i>Power Injection Method</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
SEA	Statistische Energie-Analyse

Symbolverzeichnis

δ	Ausbreitungsdämpfung	dB/m
Δf	Frequenzbandbreite	Hz
η_{ji}	Kopplungsverlustfaktor	-
η_{int}	interner Verlustfaktor	-
η_{rad}	Abstrahl-Verlustfaktor	-
η_{coupl}	Rand-Verlustfaktor	-
η_{fric}	Reibungsverlustfaktor	-
η_{tot}	Gesamtverlustfaktor	-
λ_{air}	Wellenlänge der Luft	m
λ_{B}	Biegewellenlänge	m
ν	Querkontraktionszahl	-
ν_R	empirischer Quartilsdispersionskoeffizient	-
ρ	Rohdichte	kg/m ³
τ	Transmissionsgrad	-
σ	Abstrahlgrad	-
A	Energie, normiert auf eingebrachte Leistung	s
a	äquivalente Absorptionslänge	m
A_{H}	Amplitude für bildliche Darstellung der Schwingform	(m/s ²)/N
A_{F}	Amplitudenfaktor normiert auf die maximale Amplitude des angeregten Bauteils	-
B	Plattenbiegesteifigkeit	N/m
B_{eff}	effektive Plattenbiegesteifigkeit einer orthotropen Platte	N/m
c_{air}	Schall-Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft	m/s
c_{B}	Phasengeschwindigkeit von Biegewellen	m/s
c_{g}	Gruppengeschwindigkeit	m/s
c_{L}	quasi-longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit in einer Platte	m/s

Symbolverzeichnis

E	Energie	J
E_x	Elastizitätsmodul in der Haupttragrichtung (\parallel Faser Deckschicht)	N/mm ²
f	Frequenz	Hz
f_c	Koinzidenz-Grenzfrequenz	Hz
f_{ref}	Referenzfrequenz, hier $f_{\text{ref}} = 1000$ Hz	Hz
F	Kraft	N
F'	Linienlast	N/m
I	Intensität	W/m ²
H_{aF}	Akzeleranz	(m/s ²)/N
K_{ij}	Stoßstellendämm-Maß zwischen Bauteil i und j	dB
k_B	Biegewellenzahl	1/m
$_{\text{lab}}$	Größe für die Laborsituation	
l_{ij}	gemeinsame Kopplungslänge von Bauteil i und j	m
L_a	Beschleunigungspegel	dB
ΔL	Verbesserung des Trittschallpegel durch Bodenaufbau	dB
$\Delta L_{v, mn}$	Schnellepegeldifferenz zwischen Position m und n	dB
L_n	Norm-Trittschallpegel im Prüfstand	dB
L'_n	Norm-Trittschallpegel in der Bausituation	dB
m'	flächenbezogene Masse	kg/m ²
M	modaler Überlappungsfaktor	-
N	Anzahl der Moden je Frequenzband	-
N_B	Anzahl der Biegemoden je Frequenzband	-
n_B	modale Dichte der Biegewellen	-
P_{in}	Eingebrachte Leistung	W
P_{rad}	Leistung	W
p_{St}	Stoßstellenpressung	N/mm ²
r	Radius vom Krafteinleitungsort	m
R	Luftschalldämmung im Prüfstand	dB
R'	Luftschalldämmung in der Bausituation	dB
R_{ij}	Flankendämm-Maß zwischen Bauteil i und j	dB
r_H	Hallradius	m

r_m	Abstand von Position m zur Schallquelle	m
$\overline{D_{v,ij}}$	richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz von Bauteil i und j	dB
S	Bauteilfläche	m ²
S_S	Bauteilfläche des Trennbauteils	m ²
$_{,situ}$	Größe für die Bausituation	
T_s	Körperschall-Nachhallzeit	s
u	Holzfeuchte	%
V	Volumen	m ³
v	Schnelle	m/s
x	Länge (\parallel Faser Deckschicht)	mm
y	Breite (\perp Faser Deckschicht)	mm
\underline{Y}_{in}	Eingangsadmittanz	(m/s)/N
$Y_{in,\infty}$	Eingangsadmittanz einer unendlichen, akustisch dünnen Platte	(m/s)/N
z	Dicke	mm
Z_{air}	Impedanz der Luft	kg/(s m ²)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation zum Schallschutz im Hochbau

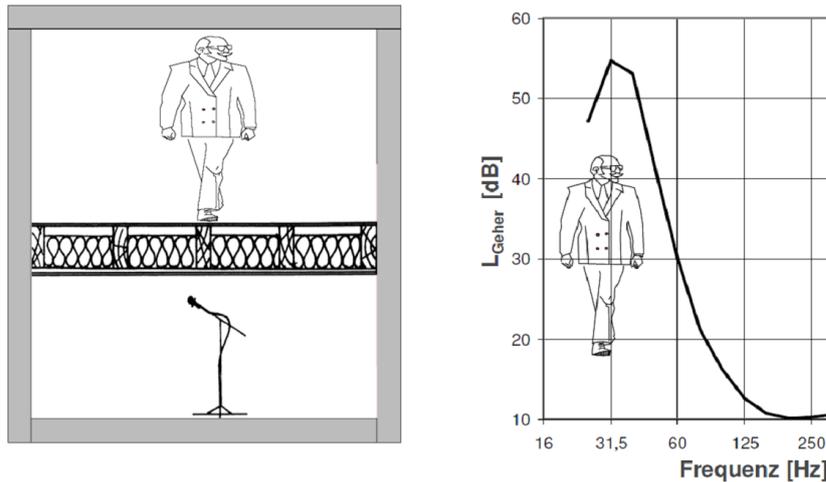
Im Zuge der Harmonisierung der europäischen Normung erfolgte die Einführung der Normungsreihe EN ISO 140 [1] (bzw. seit Ende 2010 EN ISO 10140 [2]) für bauakustische Labormessungen. Im Gegensatz zur vorhergehenden Prüfnorm DIN 52210-1:1984-08 [3] werden nun die Bauteile Wand und Decke im Prüfstand ohne Nebenwege geprüft. Die Ermittlung der Übertragung durch flankierende Bauteile erfolgt separat durch Messungen nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08 [4] oder auf rechnerischem Wege nach DIN EN 12354-1:2000-12 [5]. Die Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung in der jeweiligen Bausituation aus den Werten für die direkte Übertragung und die Übertragung der flankierenden Bauteile erfolgt ebenso nach DIN EN 12354-1:2000-12. Durch diese Vorgehensweise ist eine deutlich bessere Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die unterschiedlichen Bausituationen gewährleistet, als bei der vorhergehenden Prüfweise der Trennbauteile inklusive Nebenwege im Prüfstand mit *bauiüblichen Nebenwegen* (Mauerwerkswand $m' = 300 \text{ kg/m}^2$) nach DIN 52210-1:1984-08.

Für die Umstellung der Prüf- und Nachweisführung war die Erarbeitung eines Prognosemodells erforderlich, welches differenziert genug ist, um die vielfältigen Übertragungswege in der Bausituation berücksichtigen zu können und dennoch für den Baupraktiker anwendbar bleibt. Das hierfür erarbeitete Prognosemodell nach DIN EN 12354-1:2000-12 basiert auf einem stark vereinfachten Ansatz der Statistischen Energie-Analyse (SEA) (siehe Abschnitt 2.3). Es wird davon ausgegangen, dass die Schallübertragung nur zwischen den direkt miteinander verbundenen Bauteile stattfindet und das Schallfeld auf den Bauteilen und in den Räumen diffus ist. In dem Entwurf [6] wurden erste Überarbeitungen dieses Prognosemodells vorgeschlagen. Erste Anwendungen der Prognose nach EN 12354 in der Baubegleitung und Nachweisführung zeigten recht vielversprechende Ergebnisse [7, 8]. Eine detaillierte Anwendung der SEA Methode unter Berücksichtigung von Besonderheiten des Holzmassivbaus wird gegenüber dem stark vereinfachten Ansatz nach DIN EN 12354 eine weitere Genauigkeitssteigerung erbringen [9].

Die Anwendung der SEA-Methode setzt u. a. eine genügend hohe Eigenmodendichte im Bauteil und im Raum voraus. Diese Voraussetzung ist bei üblichen Bauteilabmessungen und Raumgrößen für tiefe Frequenzen nicht gegeben. Der typische

1 Einleitung

Anwendungsbereich der SEA liegt deshalb deutlich über 100 Hz. Untersuchungen zum subjektiven Empfinden der Trittschallübertragung bei Holzdecken zeigten jedoch, dass die tiefen Frequenzen bei der Trittschallübertragung eine maßgebende Rolle spielen [10–19]. Zur Illustration dieses Zusammenhangs wird in Abbildung 16 die Trittschallübertragung einer Holzdecke beim Begehen über der Frequenz aufgetragen. Für die computergestützte Simulation der Schallübertragung von



(a) Prinzipskizze der Messanordnung

(b) Frequenzabhängige Darstellung der Trittschallübertragung

Abbildung 1 Messung der Trittschallübertragung einer Decke bei Anregung durch Begehen der Decke. [18]

Deckenkonstruktionen ist es deshalb sinnvoll ergänzende Berechnungsmodelle zu verwenden, die genügend genaue Ergebnisse bei geringer Eigenmodendichte ermöglichen. Hier bietet sich die Verwendung von modalen Methoden an, die eine Berechnung der Schwingschnelle oder des Schalldrucks aus den Eigenmoden des Bauteils und des Raums ermöglichen. Bei einfachen Bauteilen und Raumgeometrien können analytische Ansätze für die Eigenmoden verwendet werden (z.B. [20, 21]).

Kann ein Bauteil aufgrund seines Aufbaus oder seiner Randbedingungen mit analytischen Ansätzen nicht befriedigend beschrieben werden, wird häufig die Finite Elemente Methode FEM zur Berechnung der Eigenmoden angewendet [22–24]. Bauakustische Anwendungen der FEM zur Berechnung der Luftschalldämmung von Wänden erfolgten z.B. in [25, 26]; zur Berechnung der Trittschalldämmung und Optimierung von Deckenkonstruktionen in [27–31].

1.2 Motivation zum Forschungsprojekt

Holzhäuser zeigen Pioniercharakter in Bezug auf Energieeinsparung und Nachhaltigkeit und bestechen durch ihre Kombination von nachhaltiger Bauweise mit anspruchsvoller Ästhetik und moderner Architektur. Auf Grund dieser Vorteile nimmt die Anzahl der Holzbauten auch in der Geschossbauweise des urbanen Bereichs kontinuierlich zu. Gerade im Geschosswohnungsbau bieten sich moderne vorgefertigte Massivholzelemente wie Brettsperrholz-, Hohlkasten- oder Holz-Beton-Verbundelemente für eine baukonstruktiv kosteneffiziente Erstellung der Gebäude an.

Verglichen mit Gebäuden in Mauerwerks- und Betonbauweise ist jedoch die Planung eines Bauobjektes in Holzbauweise für den Architekten und die Fachplaner eine deutlich größere Herausforderung. Die Gründe hierfür liegen unter anderem im Mangel von bewährten Konstruktionen und Konstruktionswerkzeugen für den Schallschutz und die Gebrauchstauglichkeit (Schwingungsnachweis). Es besteht erheblicher Handlungsbedarf, zumal Holzbauten wesentliche Chancen hinsichtlich einer Verbesserung der (Lebenszeit)-CO₂-Bilanz bieten.

Die Folge des Mangels an geeigneter Konstruktionsunterstützung wird im Planungsprozess offensichtlich. Um die Anforderungen an den Schallschutz und an die Gebrauchstauglichkeit sicher erfüllen zu können, werden die Bauteile häufig durch Ersatzmodelle und vereinfachte konservative Ansätze überdimensioniert und dadurch unwirtschaftlich. Geeignete computergestützte Planungswerkzeuge, die eine Simulation der genannten bauphysikalischen und konstruktiven Eigenschaften bereits im frühen Planungsentwurf für das gesamte Bauwerk und nicht nur für einzelne Komponenten ermöglichen, können den Planungsaufwand drastisch reduzieren. Zusätzlich würde die Planung zuverlässiger und damit die Qualität entscheidend erhöht und letztendlich die Wettbewerbsfähigkeit von Holzbauten gefördert werden. Notwendig hierzu ist eine geometrische, physikalische und mathematische Modellbildung sowie deren Validierung sowohl bzgl. einzelner Komponenten, der Kopplung von Bauteilen als auch des gesamten Bauwerks. Die Computersimulation ist schließlich in einen modellorientierten Planungsprozess einzubetten, der eine praxisgerechte Verwendung in den Anwendungsfeldern Schall- und Schwingungsschutz im Holzbau erlaubt.

Zur Illustration dieses Ansatzes wird in Abbildung 2 der vibroakustische Planungsprozesses im Kontext des gesamten Planungsablaufs vom Entwurf bis zur Werksplanung gezeigt. Ausgangspunkt des Prozesses ist der architektonische Entwurf, der in ein Bauwerksinformationsmodell (BIM) überführt wird. Im BIM werden neben der bauteilorientierten räumlichen Geometrie des Gebäudes insbe-

1 Einleitung

sondere dessen mechanische und bauphysikalische Attribute gespeichert. Dieses Informationsmodell kann nicht nur für die hier betrachtete schalltechnische Planung, sondern auch für vielfältige andere Planungsaufgaben verwendet werden, wie Abbildung 2 illustriert.

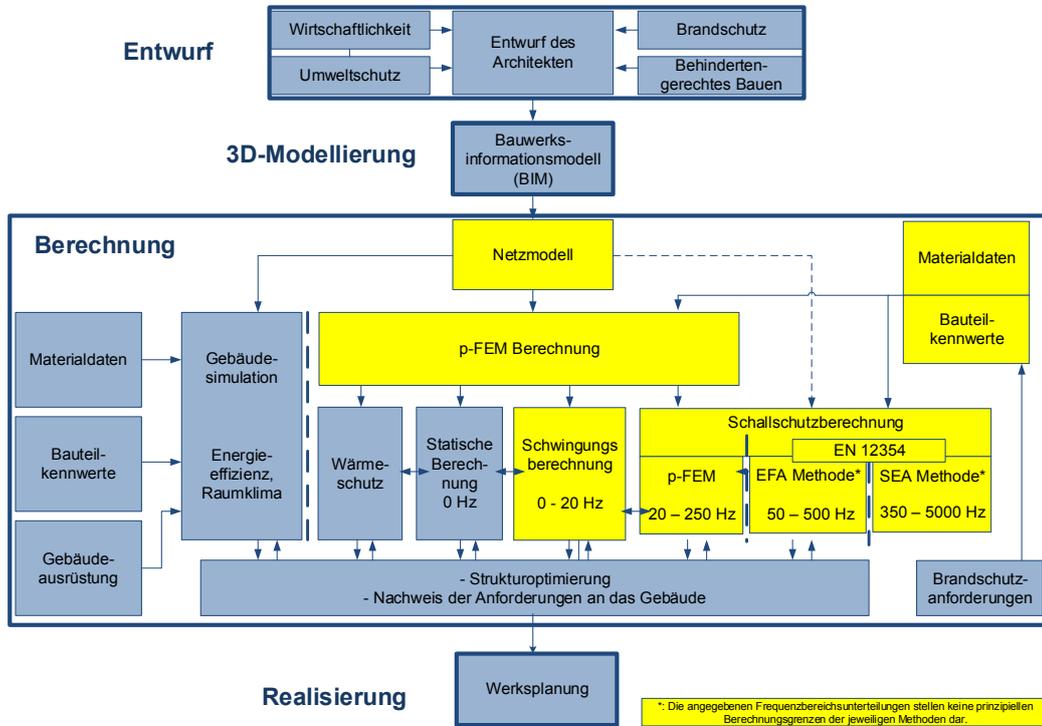


Abbildung 2 Gesamtplanungsablauf für ein Bauwerk in Geschossbauweise. Für den vibroakustischen Planungsprozess relevante Bereiche sind gelb hinterlegt.

Die Bearbeitung des Gesamtprojekts erfolgte in fünf eng verzahnten Teilprojekten. Einen Überblick der Projektaufteilung zwischen den Forschungspartnern gibt Abbildung 3.

1.3 Zielsetzung und Umsetzung der Arbeitspakete

Als Zielsetzung des Gesamtprojekts ergab sich aus der Motivation ein Planungsprozess, der die numerische Simulation und den Nachweis vibroakustischer Gebäudeeigenschaften eng an ein umfassendes Bauwerksinformationsmodell (BIM) koppelt. Dies ermöglicht dem Fachplaner einen optimierten Entwurf einzelner Bauteile, die Untersuchung deren (schwingungstechnischer) Kopplung sowie der vibroakustischen Eigenschaften des Gesamtgebäudes bereits in einem frühen Planungsstadium. In Kombination mit der Methode der Statistischen Energie-Analyse (SEA) wurde

1.3 Zielsetzung und Umsetzung der Arbeitspakete

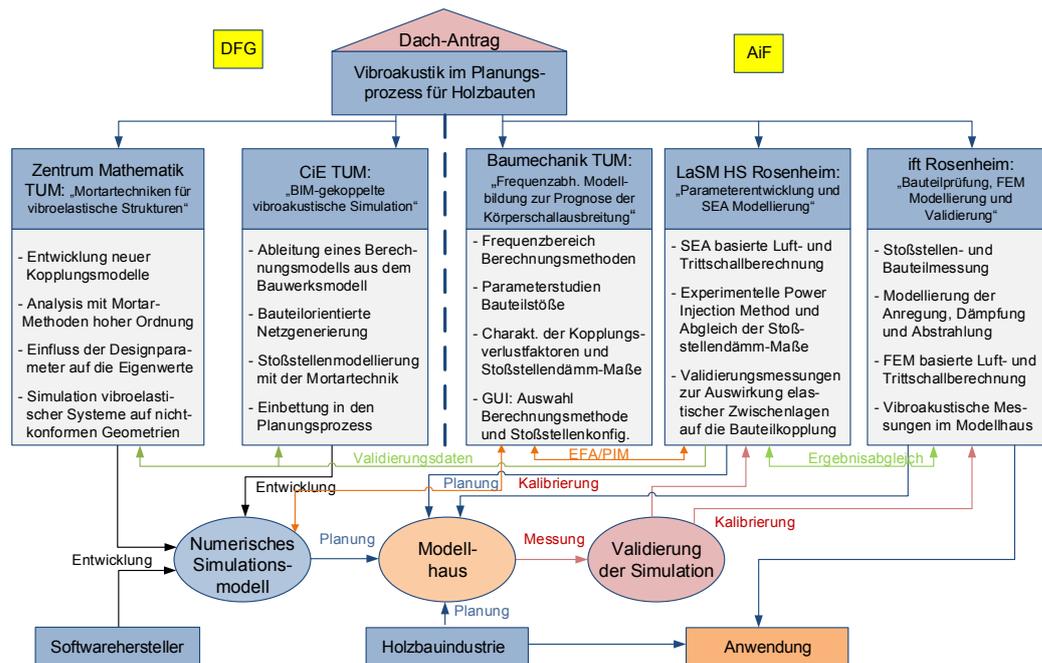


Abbildung 3 Aufgabenverteilung der Projektpartner im Gesamtprojekt

hierzu die Erweiterung vorhandener Finite-Elemente-Verfahren hinsichtlich einer geometrisch-mechanischen und vibroakustisch konsistenten Kopplung von Bauteilen sowie die Ableitung des volumenorientierten Gesamtmodells aus dem Bauwerksinformationsmodell angestrebt. Die für das Gesamtprojekt definierte Zielsetzung ergab für das hier zu bearbeitende Teilprojekt sechs Teil-Ziele:

1. in der Generierung einer Übersicht der gängigsten Bauteilkomponenten, der Stoßstellenausbildung und Verbindungsmittel
2. in der Zusammenstellung von elastomechanischen und vibroakustischen Kenndaten genannter Bauteile und Stoßstellen
3. in der vibroakustischen Beschreibung der Stoßstellen für alle relevanten Frequenzbereiche der Schallübertragung
4. in der Entwicklung einer Parameterdatenbank zur Hinterlegung der Kennwerte zur SEA basierten Luft- und Trittschallberechnung
5. in der Anpassung der Messmethodik für die experimentelle Power Injection Method an die Besonderheiten des Holzmassivbaus
6. in der messtechnischen Erfassung der relativen Stoßstellenbewegung zur Auswirkung von elastischen Zwischenlagen auf die Bauteilkopplung

1 Einleitung

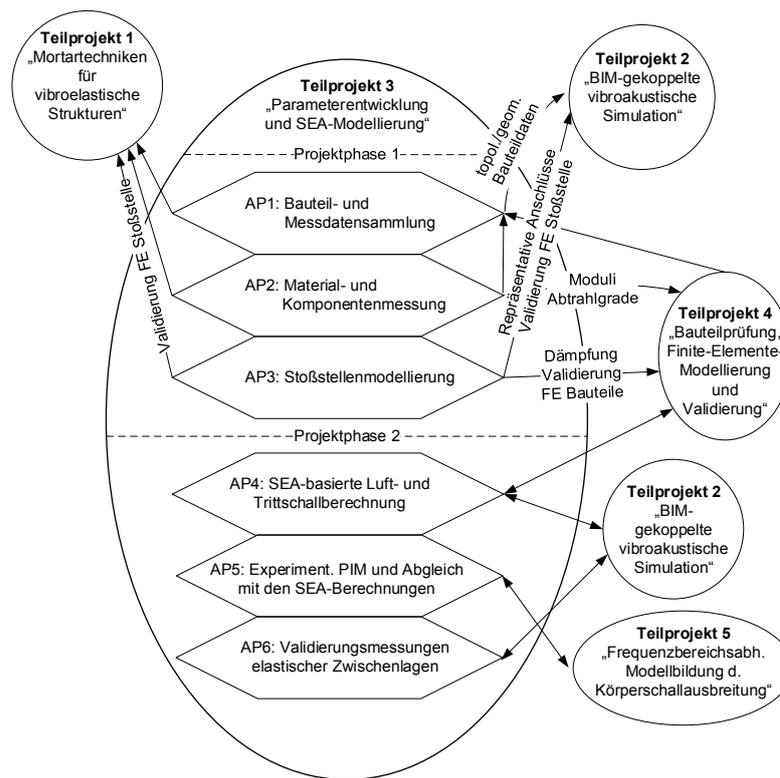


Abbildung 4 Arbeitspakete dieses Teilprojektes im Zusammenhang zu den anderen Teilprojekten

Eine Übersicht des Zusammenhanges dieser Teilziele mit den Teilprojekten der Forschungspartner wird in Abbildung 4 aus Sicht der Hochschule Rosenheim gegeben. Eine Übersicht der Arbeitspakete dieses Teilprojektes gibt Tabelle 1. Die Arbeitspakete 3.4 bis 3.6 bauen auf dem vorangegangenen Forschungsprojekt mit der IGF-Vorhaben Nr. 17328N/1 auf. In den folgenden Abschnitten werden die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse der Hochschule Rosenheim (HS Ro) kurz beschrieben.

Tabelle 1 Arbeitspakete AP 3.1 bis 3.3 aus Phase I und AP 3.4 bis 3.7 aus Phase II mit den eingesetzte Personenmonaten PM für wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) der HS Ro. ✓: abgeschlossen

AP	Beschreibung	PM	Status
3.1	Bauteil- und Messdatensammlung	7	✓

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 1 – Fortsetzung

AP	Beschreibung	PM	Status
3.2	Material- und Komponentenmessung	15	✓
3.3	Stoßstellenmodellierung⁺	5,2	✓
3.4	SEA basierte Luft- und Trittschallberechnung	16	✓
3.4.1	Parameterdatenbank Stoßstellendämm-Maße		
3.4.2	Anbindung an den Gesamt-Planungsprozess		
3.4.3	Validierung des Prognosemodells am Modellprojekt ^{*+}		
3.5	Experimentelle Power Injection Method und Abgleich der Stoßstellendämm-Maße	12	✓
3.5.1	Messtechnische Untersuchungen zur PIM		
3.5.2	Abgleich der Stoßstellendämm-Maße aus der EFA und der SEA ⁺		
3.6	Validierungsmessungen zur Auswirkung elastischer Zwischenschichten auf die Bauteilkopplung	3,5	✓
3.7	Abfassung des Abschlussberichtes	3	✓

* Die Validierung erfolgte auf Basis von empirisch ermittelten Stoßstellendämm-Maßen.

⁺ Detaillierte Veröffentlichungen der Ergebnisse der Modellbildungen für die SEA und EFA erfolgen im Rahmen von Dissertationen, die erst nach dem Ende der Projektlaufzeit abgeschlossen werden.

1.3.1 Bauteil- und Messdatensammlung

Die Zielsetzung der Bauteil- und Messdatensammlung bestand darin, eine aktuelle Konstruktions- und Messdatensammlung für den modernen Holzmassivbau den beteiligten Forschungsstellen als Arbeitsgrundlage zur Verfügung zu stellen. Für die Forschungsstelle 1 dem Zentrum für Mathematik der Technischen Universität München, der Forschungsstelle 2 dem Lehrstuhl für Computation in Engineering der Technischen Universität München (CiE) und der Forschungsstelle 4 dem ift Rosenheim (ift Ro) war es unerlässlich, die gängigsten Standardkonstruktionen der Bauteile selbst als auch deren Einbindung in andere Bauteile und die dabei verwendeten Verbindungsmittel zu kennen. Gesammelt werden mussten insbe-

1 Einleitung

sondere die zu deren vibroakustischen Beschreibung notwendigen Kenndaten. Die Bauteilsammlung sollte sich auf gängige Standardkonstruktionen beschränken; bauobjektspezifische Realisierungen sollten nicht betrachtet werden. Im Einzelnen waren folgende Daten über Bauteile in die Sammlung aufzunehmen:

- **Elastomechanische Kenngrößen** wie Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Flächenträgheitsmomente.
- **Innere Verlustfaktoren**, da erwartet wurde, dass hierzu noch keine Messdaten vorliegen.
- **Frequenzabhängige Luft- und Trittschalldämm-Maße**, da erwartet wurde, dass i. d. R. nur bewertete Kenngrößen als Einzahlwerte vorliegen.

Die Datensammlung war zu katalogisieren und bekannte vibroakustische Daten mussten geordnet und auf Plausibilität, insbesondere unter dem Aspekt unterschiedlicher messtechnischer Erfassung, geprüft werden. Fehlende Daten mussten auf Notwendigkeit der messtechnischen Generierung mit der Forschungsstelle 1, 2 und 4 abgestimmt werden. Tatsächlich sollten die Bauteilkonstruktionen und deren Einbindung in angrenzende Bauteile hinsichtlich mechanisch-statischer Ähnlichkeiten untersucht und nach ähnlichen konstruktiven Stoßstellenausbildungen kategorisiert werden. Damit sollte eine systemübergreifende Typisierung erzielt werden.

In der Umsetzung wurde zunächst eine Material- und Bauteilsammlung ausgearbeitet [32] und den anderen Forschungsstellen zur Verfügung gestellt. Daneben wurde im Rahmen einer Masterarbeit [33] insbesondere Konstruktionsdetails zu Stoßstellen im Holzmassivbau und bereits gemessene Stoßstellendämm-Maße von anderen internationalen Instituten zusammengetragen und für Vergleiche untereinander und Unsicherheitsbetrachtungen aufbereitet [34, 35]. Da ein optimierter Planungsprozess das zentrale Ziel des Gesamtprojektes ist, wurde eine webbasierte Datenbank VABDAT entwickelt, um die kategorisierten Kennwerte für die Schallschutzprognose zu erfassen und für die im Verlauf des Projektes zu entwickelnden Prognoseprogramme zur Verfügung zu stellen. Weitere Ausführungen und Ergebnisse zu diesem Arbeitspaket finden sich im Kapitel 2.

1.3.2 Material- und Komponentenmessung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Festlegung von messtechnisch zugänglichen Größen zur eigentlichen Charakterisierung von Bauteilen und Stoßstellen als auch

1.3 Zielsetzung und Umsetzung der Arbeitspakete

zur baukonstruktiven und elastomechanischen Charakterisierung der Bauteilverbindungen. Soweit nach Auswertung der Daten aus dem Arbeitspaket in Abschnitt 1.3.1 weitere Messungen vonnöten waren, mussten entsprechende Messtechniken und -aufbauten realisiert werden. Anfragen bei Bauelementeherstellern vor dem Start des Forschungsprojektes ergaben, dass oftmals keine hinreichend genauen Aussagen über elastomechanischen Kenngrößen vorliegen. Um einen guten Abgleich mit den im Rahmen dieses Teilprojektes geplanten Untersuchungen im Arbeitspaket des Abschnittes 1.3.3 zu bekommen, war es anzustreben, diese Größen an Labormustern zu ermitteln. Als relevante vibroakustische Kenngrößen einzelner Bauteile gelten der interne Verlustfaktor und der Abstrahlgrad. Die Messung des internen Verlustfaktors erfolgt dabei indirekt über die Messung des Abstrahlgrades und der Körperschall-Nachhallzeit unter Vermeidung einer Kopplung an andere Bauteile. Zur Kontrolle sollte auch die Ausbreitungsdämpfung in den Messproben bestimmt werden. Zur Validierung der vom ift Ro berechneten Eigenfrequenzen und Eigenmoden für einzelne Bauteile in Teilprojekt 4 sollten Betriebsschwinganalysen von einzelnen Holzbauteilen durchgeführt werden.

Bei der Durchführung dieses Arbeitspaketes wurden elastomechanische Kennwerte zu Brettsperrholzelementen mithilfe von 4-Punkt Biegeversuchen, der Messung von Impulslaufzeiten [36] und durch die Auswertung der ersten Biegeschwingformen und -eigenfrequenzen [37, 38] ermittelt. Ein Auszug der Ergebnisse befindet sich im Abschnitt 3.5.1. Zur Ermittlung der vibroakustischen Kenngrößen einzelner Bauteile wurden Körperschall-Nachhallzeiten an Brettsperrholzwänden mit unterschiedlichen Randlagern (starr, Elastomerlager, Sandbett) und unterschiedlicher Belastung innerhalb der Scheibenebene der Wand gemessen [37]. Dazu wurde zunächst eine Einrichtung (siehe Abschnitt 3.1.1) für die Experimente entwickelt, die es ermöglicht eine unterschiedliche Pressung auf eine Wandscheibe oder auf eine Stoßstelle aufzubringen und die zusätzliche aufgebrachte Kraft zu messen. Zusätzlich wurde die richtungsabhängige Ausbreitungsdämpfung an Brettsperrholzelementen ermittelt [39–41]. Der Abstrahlgrad und interne Verlustfaktor von orthotroper Platten wurde am Beispiel einer Dreischichtplatte aus Fichtenholz mit unterschiedlichen Messmethoden bestimmt und ein praktikables Ersatzmodell zur Prognose des Abstrahlgrades orthotroper Platten abgeleitet [38, 42]. Ergebnisse zu den vibroakustischen Kenngrößen einzelner Bauteile finden sich im Abschnitt 3.5.2.

1 Einleitung

1.3.3 Stoßstellenmodellierung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Bereitstellung von messtechnischen Validierungsdatensätzen für die Beschreibung gekoppelter Bauelemente im tieffrequenten Bereich durch FE-Modelle und im mittleren und höher frequenten Bereich durch SEA-Modelle. Hierzu sollten verschiedene Stoßstellen mit unterschiedlichen Bauteilen aufgebaut und die Bauteile mit Standardmethoden (Inertialshaker, Impulshammer) angeregt werden. Gleichzeitig sollte die Erregung auch mit Luftschall durchgeführt werden, um die Auswirkung einer flächigen Erregung auf die Ausbildung des Schwingungsverhaltens an den Stoßstellen messtechnisch zu erfassen. Im Rahmen des Teilprojektes sollten lediglich wenige Stoßstellen als T-Stoß unter Variation derselben (unterschiedliche Pressung der Bauteile, elastische Zwischenlagen, mechanische Verbindungen, etc.) und damit unter Variation einzelner Kopplungsverlustfaktoren untersucht werden. Variiert werden sollten dabei

- die Kopplungsbedingungen von Bauteilen (stumpf, eingebunden, durchlaufend)
- die Pressung an den Stoßstellen
- die Einbringung von elastischen Zwischenlagen zur Körperschallisolierung
- die statisch notwendigen Verbindungselemente

Für die SEA basierte Schallschutzprognose sollten Stoßstellendämm-Maße aus der Messung der Körperschall-Nachhallzeiten nach DIN EN ISO 10848 bestimmt werden. Die Festlegung der zu prüfenden Bauteile und Stoßstellen erfolgt anhand der Datensätze vorausgegangener Arbeiten [43–47]. Zur Durchführung der Stoßstellenmessungen in Leichtbaukonstruktionen waren die Grundlagen vorausgegangener Projekte zu berücksichtigen [44, 48–51]. Zur Absicherung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse von HS Ro und ift Ro sollten Vergleichsmessungen für die Stoßstellendämm-Maße beispielhaft am selben Aufbau mit der Messtechnik und der Vorgehensweise des jeweiligen Projektpartners ermittelt werden. Die Ermittlung der Kopplungsverlustfaktoren sollte jedoch auch auf dem Weg einer experimentellen Statistischen Energie-Analyse mit einem kommerziellen Werkzeug durchgeführt werden [52]. Dieses Verfahren beruht auf der Messung der Transferübertragungsfunktionen zwischen allen beteiligten Komponenten und erlaubt damit eine detaillierte Aufschlüsselung aller Übertragungspfade, bedingt durch die Anzahl und die Geometrie der Aufbauten als auch der unterschiedlichen physikalischen Übertragungsmechanismen. Die daraus berechenbaren Kopplungsverlustfaktoren können zum Abgleich mit den gemessenen Stoßstellendämm-Maßen verwendet werden.

Parallel sollte eine SEA-Pfadanalyse durchgeführt werden, da für die Schallübertragung bei den zu realisierenden Laboraufbauten nur wenige Übertragungswege eine Rolle spielen. Bei diesem Vorgehen sollten Kopplungsverlustfaktoren mit hoher Genauigkeit erzielt werden können.

Bei der Durchführung der Betriebsschwinganalysen wurden L- und T-förmige Bauteilkombinationen aus Brettsperrholz unter der Variation der o. g. Bedingungen durchgeführt [37, 40]. Dabei wurde die Messdurchführung so gewählt, dass sich der resultierende Datensatz auch für eine experimentelle Power Injection Methode bzw. einer experimentellen Statistischen Energie-Analyse im höher frequentem Bereich und zur Bestimmung von Stoßstellendämm-Maßen eignet. Ein Teil der Ergebnisse ist im Abschnitt 3.5.3 dargestellt. Die Messungen wurden nur bei Körperschallanregung durchgeführt. Da ein Vergleich von Körper- und Luftschallanregung am ift Ro in Teilprojekt 4 durchgeführt wurde, ist in diesem Teilprojekt auf Messungen mit Luftschallanregung verzichtet worden. Begleitend wurden mit einem kommerziellen SEA-Berechnungsprogramm erste Modellierungen zum L-förmigen Bauteilstoß aus Brettsperrholz zur Bestimmung von Stoßstellendämm-Maßen durchgeführt [53–55]. Weitere Ausführungen dazu sind in Abschnitt 2.2.

1.3.4 SEA basierte Luft- und Trittschallberechnung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es eine Berechnungsmethodik für die Schallübertragung im mittleren und höheren Frequenzbereiches zu entwickeln mit Hilfe der über die Stoßstellen gewonnenen Erkenntnisse. Das sollte auf Basis einer Modifikation und/oder Erweiterung des Verfahrens gemäß der DIN EN 12354 erfolgen und im Bauwerksinformationsmodell (Teilprojekt 2) integriert werden. Die schalltechnischen Berechnungen sollten nicht mit klassischen Einzahlwerten durchgeführt werden, da es gerade der Forschungsansatz ist, die Schallübertragung frequenzabhängig durch die frequenzspezifischen Berechnungsverfahren zu berechnen. Weiterhin sollte dieses Berechnungsverfahren am tatsächlich zu vermessenden Modellprojekt validiert werden.

Bei der Durchführung wurde zusammen mit dem ift Ro die Schnittstelle zwischen der Datenbank VABDAT mit den schalltechnischen Kennwerten und dem SEA basierten Luft- und Trittschall-Berechnungsprogramm VBACOUSTIC bearbeitet und die beiden Elemente aufeinander abgestimmt. Dabei wurde in der Datenbank VABDAT eine Exportfunktion für Material-, Bauteil- und Stoßstellenkennwerten geschaffen. Das Exportformat ist XML¹ und eignet sich für die Integration in ein Bauwerksinformationsmodell (BIM). Diese Dateien können zum

¹Extensible Markup Language

1 Einleitung

Einen direkt über die Homepage (www.VaBDat.de) bei dem jeweiligen Datensatz über eine Exportfunktion, und zum Anderen über eine gezielte Anfrage von einem externen Programm (REST-Interface) erzeugt werden [56]. Im zweiten Fall werden dafür Identifikatoren genutzt, welche in Kurzform die wesentlichen Informationen der Bausituation abbilden. Die Zusammensetzung dieser Identifikatoren fand in Abstimmung mit den anderen Forschungspartnern (Teilprojekte 1, 2, 4 und 5) statt. Daneben wurde in dem Prognoseprogramm VBACOUSTIC die Möglichkeit geschaffen ein praktikables Ersatzmodell für den Abstrahlgrad einer orthotropen Platte [38, 42] zu berücksichtigen und einen holzbauspezifischen Übertragungsweg Dff zu integrieren [57]. Der Übertragungsweg bei der Trittschallübertragung verläuft über den direkt angeregten Estrich über die flankierenden Wände. Die Validierung des Berechnungsverfahrens erfolgte am Beispiel eines viergeschossigen Holzgebäudes in Holzmassivbauweise [9, 58]. Weitere Information zum Berechnungsprogramm VBACOUSTIC finden sich im Bericht des ift Ro [59].

1.3.5 Experimentelle Power Injection Methode und Abgleich der Stoßstellendämm-Maße

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Bereitstellung von Messdaten zur Validierung der numerischen Modelle im Teilprojekt 5, welches vom Lehrstuhl für Baumechanik der Technischen Universität München (LfB) durchgeführt wurde. Dafür sollte die für eine Energieflussanalyse (EFA) notwendigen messtechnischen Untersuchungen unter Zuhilfenahme der experimentellen Power Injection Methode durchgeführt werden. Zusätzlich sollten die Stoßstellendämm-Maße aus den beiden numerischen Modellen (EFA und SEA) miteinander verglichen werden, um Erkenntnisse über die Frequenzuntergrenze bei der Anwendung der SEA zu erhalten.

Bei der Durchführung wurde das Messverfahren, welches bereits für das Arbeitspaket in Abschnitt 1.3.3 verwendet worden ist für die Power Injection Methode optimiert. Insbesondere wurde die Anbindung zwischen Modal-Schwingerreger und dem Brettsperrholz modifiziert. Damit konnte die Unsicherheit der eingebrachten Leistung reduziert und zufällige Phasenunterschiede zwischen Kraft und Schnelle am Einleitungsort hin zu höheren Frequenzen weiter minimiert werden [40]. Eine weitere wichtige Größe für die o. g. Methoden ist die räumlich und zeitlich gemittelte Energie in einem Bauteil. Dazu wurde die räumliche Schnellepegelverteilung bei direkt und indirekt angeregtem Bauteil untersucht. Der Fokus lag dabei auf folgenden Aspekten:

- die Auswirkung der Randeinbindungen
- die Größe des Nahfeldes um eine punktuelle Kraftanregung

1.3 Zielsetzung und Umsetzung der Arbeitspakete

- der Einfluss von Elementstößen innerhalb eines Bauteils
- der Einfluss des Ortes der punktuellen Krafteinleitung auf die mittlere Schmelze

Die Ergebnisse werden mit den Vorgaben aus der Messvorschrift der DIN EN ISO 10848 zur Bestimmung von Stoßstellendämm-Maßen kritisch gegenübergestellt. Daneben wurden die Messergebnisse in einer Bachelorarbeit [60] statistisch soweit ausgewertet, dass Aussagen über die Unsicherheiten bei der Energiebestimmung eines exemplarischen Brettsper Holz-Bauteils in Abhängigkeit von der Messpunktzahl gemacht werden können [61, 62]. Vergleiche zwischen den Ergebnissen der experimentellen PIM und der experimentellen SEA zeigten eine hohe Übereinstimmung unterhalb von 1,6 kHz. Zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen wurde auch ein Ergebnisvergleich der numerischen Modelle aus EFA und SEA auf Basis von normierten Energien der beteiligten Systeme am Beispiel eines L-förmigen Bauteilstoßes durchgeführt. Diese zeigten im mittleren Frequenzbereich eine hohe Übereinstimmung. Allerdings zeigte sich sowohl tieffrequent als auch hochfrequent systematische Unterschiede [63]. Ein Teil der Ergebnisse befindet sich in Abschnitt 2.2.2.

1.3.6 Validierungsmessungen zur Auswirkung elastischer Zwischenschichten

Ziel des Arbeitspaketes war die Untersuchung zu den Elastomeren, insbesondere zu den Bewegungen der Bauteile, die unmittelbar an der Stoßstelle durchgeführt werden. Das dient der Validierung der FEM-Modelle (Teilprojekt 1 und 2) über die modale Kopplung der Bauteile.

Die Durchführung der messtechnischen Analyse der Schwingungsverhaltens direkt am Stoß wurde an einem T-Stoß bestehend aus zwei Brettsper Holzwänden und einer dazwischen angeordneten Brettsper Holzdecke gemacht [40]. In der Stoßfuge wurden dabei elastische Zwischenlager verwendet. Ein Einblick in die Ergebnisse gibt Abschnitt 3.5.3.

2 Schallschutzprognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

Die Luft- und Trittschallberechnung in DIN EN 12354 [5] basiert auf einem stark vereinfachten Modell der SEA. Deswegen wird hier zunächst auf die zu Grunde liegende Methodik der SEA eingegangen, bevor die vereinfachte Berechnungsmethodik der Norm beschrieben wird.

2.1 Methodik der Statistischen Energie-Analyse

Zum Verständnis der Schallübertragung bei höheren Frequenzen kann prinzipiell die SEA verwendet werden. In diesem Frequenzbereich überlagern sich üblicherweise die Eigenschwingungen verbundener Bauelemente. Der Rechenaufwand der FEM steigt mit zunehmender Frequenz deutlich und gleichzeitig nimmt die Qualität der Ergebnisse aufgrund einer höheren Sensitivität gegenüber den Eingangsgrößen ab.

Im Gegensatz zur FEM werden bei der SEA stark abstrahierte Modelle wie in Abbildung 5 verwendet. Eine schwingungsfähige Struktur wird in Gebiete mit annähernd gleichem dynamischem Verhalten unterteilt. Diese Teilsysteme werden Subsysteme genannt. Dabei werden die Ergebnisse der SEA auf Grund der Mittelung über

- Frequenzbereiche,
- Beobachtungsorte und
- Anregungsorte

mit zunehmender Modendichte bei höheren Frequenzen robuster. Das gilt, wenn die Voraussetzungen

- einer schwachen und konservativen Kopplung der Subsysteme,
- einer hohen Modenanzahl im untersuchten Frequenzband,
- einer hohen Überlappung der Eigenmoden im Frequenzbereich und
- eine Homogenität und Diffusität des Schallfeldes innerhalb des Subsystems

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

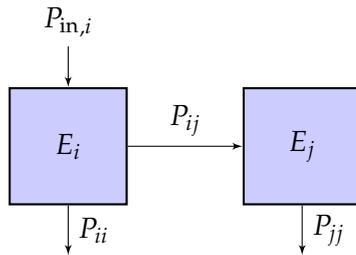


Abbildung 5 SEA-Modell mit zwei gekoppelten Systemen bei Leistungseintrag in System i . Dabei ist E_i die gespeicherte Energie in System i und P_{ij} der Leistungsübertrag von System i nach j .

gegeben sind.

Diese Bedingungen sind im Holzbau insbesondere bei stark periodisch aufgebauten¹ oder stark gedämpften Strukturen nicht immer gegeben [64]. Eine schwache Kopplung zwischen zwei Bauteilen liegt vor, wenn die modalen Bauteileigenschaften im gekoppelten und nicht gekoppelten Zustand nur geringe Unterschiede zeigen [65]. Detaillierte Informationen zu den Voraussetzungen der SEA finden sich u. a. bei [66–68]. Aufgrund der Unsicherheiten bei der SEA Methode bei tieferen Frequenzen wird mit der Energieflussanalyse (EFA) eine ergänzende Methode im Forschungsprojekt zur Analyse der Holzmassivbaustrukturen herangezogen.

Die wesentlichen Berechnungsgrößen bei der SEA sind Energien. Die Gesamtenergie einer homogenen Platte wird häufig aus der kinetischen Energie mithilfe der mittleren effektiven Schnelle $\langle v_{\text{eff}} \rangle$ und der Gesamtmasse der Platte berechnet (2.1). Eine Voraussetzung dafür ist u. a. dass die kinetische Energie gleich der potentiellen Energie ist. Das ist bei einer Resonanzfrequenz und in Frequenzbereichen mit hoher modalen Überlappung der Fall.

$$E = 2 E_{\text{kin}} = S m' \langle v_{\text{eff}} \rangle^2 \quad (2.1)$$

Die Gesamtenergie im Raum wird aus dem mittleren effektiven Schalldruck $\langle p_{\text{eff}} \rangle$, dem Raumvolumen V und der Impedanz der Luft Z_{air} berechnet (2.2).

$$E = V \frac{1}{c_{\text{air}}} \frac{\langle p_{\text{eff}} \rangle^2}{Z_{\text{air}}} \quad (2.2)$$

Aus Energieverhältnissen zwischen den Subsystemen und deren internen Verlustfaktoren η_{int} können Kopplungsverlustfaktoren η_{ij} berechnet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Energiefluss und damit der Kopplungsverlustfaktor zwischen den beiden Systemen vom dem Verhältnis der modalen Dichten n der beiden

¹z. B. gleiche Dimensionen von Hohlräumen oder Versteifungen durch Ständer/Rippen

Subsysteme nach der Konsistenzbeziehung in (2.3)

$$\frac{\eta_{12}}{n_2} = \frac{\eta_{21}}{n_1} \quad (2.3)$$

abhängt [vgl. 69].

Für den Spezialfall von nur zwei beteiligten Subsystemen mit Anregung von Subsystem i kann die Energiegleichung näherungsweise mit (2.4) [70] beschrieben werden.

$$\eta_{ij} = \frac{E_j}{E_i} (\eta_{ji} + \eta_{\text{int},j}) = \frac{E_j}{E_i} \eta_{\text{tot},j} \quad (2.4)$$

Im allgemeinen Fall hängen die eingebrachten Leistungen über die Verlustfaktoren und den Energien in den n Subsystemen nach Gleichung (2.5) zusammen [69, S. 120, 125].

$$[P_{\text{in}}] = \omega [L_0] [E] = \omega \begin{bmatrix} \eta_{\text{int},1} + \sum_{i \neq 1} \eta_{1i} & -\eta_{21} & \dots & -\eta_{n1} \\ -\eta_{12} & \eta_{\text{int},2} + \sum_{i \neq 2} \eta_{2i} & \dots & -\eta_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\eta_{1n} & -\eta_{2n} & \dots & \eta_{\text{int},n} + \sum_{i \neq n} \eta_{ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Auf der Hauptdiagonalen der Verlustfaktormatrix $[L_0]$ stehen die Gesamtverlustfaktoren der einzelnen Subsysteme. Dabei beschreibt der interne Verlustfaktor η_{int} den Verlustanteil durch das Material selbst und der Kopplungsverlustfaktor η_{ji} den Verlustanteil zwischen zwei Subsystemen (Bauteil zu Bauteil bzw. Bauteil zu angrenzenden Raum/Luftvolumen). Der Gesamtverlustfaktor $\eta_{\text{tot},i}$ eines Subsystems i besteht nach Gleichung (2.6) aus der Summe der Kopplungsverlustfaktoren zu allen anderen Subsystemen und dem internen Verlustfaktor.

$$\eta_{\text{tot},i} = \eta_{\text{int},i} + \sum_{j \neq i}^n \eta_{ij} \quad (2.6)$$

Im Fall eines Platten-Raum Modells kann der Gesamtverlustfaktor einer Platte auch als Summe aus internen Verlustfaktor, Verlust aus Abstrahlung an den Raum und den Kopplungsverlustfaktoren an andere Platten berechnet werden (2.8). Die Abstrahlverluste werden dabei aus Abstrahlgrad σ (2.17), der flächenbezogenen Masse der Platte m' und der Impedanz der Luft Z_{air} (2.7) berechnet. Die Eigenschaft der Luft wird dabei nach (2.7) über die Impedanz Z_{air} mit der

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall und der Dichte beschrieben.

$$Z_{\text{air}} = c_{\text{air}} \rho_{\text{air}} \quad (2.7)$$

Die Kopplungsverlustfaktoren zwischen zwei Platten [vgl. 65, 71] hängen von der Gruppengeschwindigkeit c_g [vgl. 72] und der Transmissionsgrad τ_{ij} von der Art der Kopplung sowie der Stoßgeometrie ab [vgl. 67]. So ist der Transmissionsgrad von einem Bauteil zu einem senkrecht dazu angeordneten Bauteil ein Anderer als bei zwei Bauteilen, die in der gleichen Ebene liegen.

$$\eta_{\text{tot},i} = \eta_{\text{int},i} + 2\sigma \frac{Z_{\text{air}}}{\omega m'_i} + \frac{1}{\omega} \frac{1}{\pi S_i} c_{g,i} \sum_{j \neq i}^n l_{ij} \tau_{ij} \quad (2.8)$$

Heckl beschrieb in [73, S. 805] ein Verfahren zur Prognose des Gesamtverlustfaktors einer Platte, ähnlich wie in Gleichung (2.8). Darin weist er darauf hin, dass der Summenterm für die Kopplungsverluste zu anderen Platten nur für $l_{ij} > \frac{\lambda_B}{2}$ gilt.

Zur Erstellung eines SEA-Modells werden als Eingangsgrößen

- die Geometrie der idealisierten Strukturelemente (Balken, Platten, Verbundplatten, Kanäle, Fluide),
- die Rohdichte,
- die Steifigkeitskennwerte (dyn. E-Moduln, G-Moduln, Poissonzahlen),
- die Dämpfung (interner Verlustfaktor η_{int})
- die Kopplungsbedingungen (Flächen-, Linien-, Punktstoßstellen),
- die Anregungsart (Punktkraft, diffuses Schallfeld, Schnelle) und das Lastspektrum

verwendet. Dabei können die Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten

1. Kopplungsverlustfaktoren η_{ji} und
 - a) Dämpfung durch Körperschallübertragung an Stoßstellen
 - b) Dämpfung durch Wechselwirkung zwischen Körperschall und Fluid (z. B. Abstrahlverlustfaktoren η_{rad})
2. internen Verlustfaktoren η_{int}
 - a) Materialdämpfung
 - b) Fluiddämpfung

verglichen werden.

Bei der Bewertung der Untergrenze des Anwendungsbereiches der SEA kann die Analyse des messtechnisch ermittelten Schwingverhaltens der Subsysteme zueinander beitragen. Dazu werden zur Überprüfung der Voraussetzung der schwachen Kopplung die Kopplungsverlustfaktoren und internen Verlustfaktoren miteinander verglichen.

2.1.1 Einteilung von Subsystemen

Für eine geeignete örtliche Abstraktion in dieser statistischen Methode können zwei Kriterien herangezogen werden:

1. Ausbreitungsdämpfung
2. Modale Überlappungsfaktor

Ist die Ausbreitungsdämpfung sehr hoch kann es sinnvoll sein mehrere Subsysteme zu bilden, da sonst die Schnelle zu stark über das Gebiet des Subsystems variiert. In [68] wird ein Kriterium (2.9) für die maximale Dimension für ein Subsystem angegeben, welches von der Gruppengeschwindigkeit und dem internen Verlustfaktor² abhängt.

$$\max(x, y) < \frac{c_g}{\omega \eta_{\text{int}}} \quad (2.9)$$

Dieses Kriterium begrenzt bei einer bestimmten Subsystemgröße die Anwendbarkeit zu hohen Frequenzen und entspricht einem maximalen Pegelabfall aufgrund der Materialdämpfung über die Distanz der maximalen Dimension von 4,34 dB. Zur experimentellen Charakterisierung des Schallfeldes der gewählten Subsysteme kann die Ausbreitungsdämpfung δ in zwei Richtungen gemessen werden. Zu tiefen Frequenzen kann die Diffusität des Körperschallfeldes über den modalen Überlappungsfaktor M bewertet werden. Dieser beschreibt die Überlappung der Moden im Frequenzbereich aufgrund der modalen Dichte n und des Gesamtverlustfaktors nach (2.10).

$$M = f \eta_{\text{tot}} n \quad (2.10)$$

Dieser kann experimentell aus Gleichungen (2.13) und (2.14) bestimmt werden [vgl. 64, 66, 74] und sollte für die Anwendung der SEA oberhalb von eins liegen.

Die modale Dichte von BiegeWellen n_B ist definiert als der Quotient aus Anzahl der Biegemoden N_B und der Frequenzbandbreite Δf und kann für eine gelenkig gelagerte, akustisch dünne Platte aus isotropen Material nach (2.11) [66] und für

²Der in [68] bezeichnete *damping loss factor* wird hier als interner Verlustfaktor η_{int} bezeichnet.

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

orthotropes Material nach [69, S. 141] prognostiziert werden.

$$n_B = \frac{N_B}{\Delta f} = \sqrt{3} \frac{S}{z} \frac{1}{c_L} \quad (2.11)$$

Sie ist für akustisch dünne Platten über die Frequenz konstant und hängt von der Geometrie (Bauteilfläche S , Plattendicke z) und der quasi-longitudinalen Ausbreitungsgeschwindigkeit c_L ab. Für isotrope Platten wird c_L nach Gleichung (2.12) berechnet.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad (2.12)$$

Allerdings gilt (2.11) nicht für den tieffrequenten Bereich, indem die o. g. Voraussetzungen der SEA nicht erfüllt sind und das modale Schwingverhalten dominiert. Die Frequenzbandbreite Δf ist dabei die Differenz der oberen zur unteren Eckfrequenz. Die Modenanzahl je Band steigt aufgrund der zunehmenden Bandbreite Δf der Frequenzbänder zu höheren Frequenzen. Die Anforderung an die minimale Modenanzahl im Frequenzband variiert in der Literatur und liegt im Bereich von 2 [66] bis 10.

Die modale Dichte kann auch näherungsweise experimentell über den Realteil der Eingangsadmittanz \underline{Y}_{in} nach (2.13) ermitteln werden [75].

$$n = 4 S m' \operatorname{Re}\{\underline{Y}_{in}\} \quad (2.13)$$

2.1.2 Eingangsadmittanz einer Platte

Die mechanische Eingangsadmittanz \underline{Y}_{in} ist definiert als Quotient aus Schnelle zu Kraft am Krafteinleitungsort nach (2.14). Mit der Eingangsadmittanz wird die Anregbarkeit einer Struktur an diesem Ort beschrieben.

$$\underline{Y}_{in} = \frac{v_{in}}{F_{in}} \quad (2.14)$$

Für eine punktförmig angeregte, akustisch dünne, unendlich ausgedehnte Platte ist die Eingangsadmittanz reell und kann aus der Plattenbiegesteifigkeit B und der flächenbezogenen Masse m' nach (2.15) berechnet werden. Die Eigenschaft *akustisch dünn* ist näherungsweise gegeben, solange die Plattendicke weniger als ein Sechstel der Biegewellenlänge ist [76].

$$Y_{in,\infty} = \frac{1}{8 \sqrt{m' B}} \quad (2.15)$$

Für den Fall einer akustisch dünnen, aber orthotropen Platte unterscheidet sich die Biegesteifigkeit in die beiden Hauptrichtungen der Platte. Nach Heckl [77] kann in (2.15) die Plattenbiegesteifigkeit als Näherung mit einer effektiven Plattenbiegesteifigkeit B_{eff} aus (2.16) ersetzt werden.

$$B_{\text{eff}} = \sqrt{B_1 B_2} \quad (2.16)$$

2.1.3 Schallabstrahlung von Platten

Eine Größe zur Beschreibung der Effizienz der Schallabstrahlung einer schwingenden Oberfläche in die umgebende Luft ist der Abstrahlgrad σ . Dieser beschreibt nach (2.17) das Verhältnis von der abgestrahlten Schallleistung P_{rad} einer beliebigen Oberfläche zu der einer starren, konphas schwingenden Platte gleicher Größe³ S und gleicher, mittleren effektiven Schnelle. Dabei ist v_{eff} die effektive Schnelle, welche an jedem Ort dieses Kolbenstrahlers gleich ist [78]. Die abgestrahlte Leistung im Verhältnis zur abstrahlenden Fläche wird als Intensität I bezeichnet.

$$\sigma = \frac{P_{\text{rad}}}{S \langle v_{\text{eff}} \rangle^2 Z_{\text{air}}} = \frac{I}{\langle v_{\text{eff}} \rangle^2 Z_{\text{air}}} \quad (2.17)$$

Der Kopplungsverlustfaktor für zweiseitige Abstrahlung einer Platte kann nach (2.18) berechnet werden. Dabei beschreibt P_{rad} die abgestrahlte Schallleistung auf einer Plattenseite.

$$\eta_{\text{rad}} = 2\sigma \frac{Z_{\text{air}}}{\omega m'} = \frac{2 P_{\text{rad}}}{\omega m_{\text{tot}} \langle v_{\text{eff}} \rangle^2} \quad (2.18)$$

Unendliche Platte

Der Abstrahlgrad von einer punktförmig angeregten, unendlich großen Platte, die zu freien⁴ BiegeWellen angeregt wird, lässt sich prinzipiell in drei charakteristische Bereiche einteilen. Das gilt, wenn die Platte isotrop⁵ und schwach gedämpft ist. Die Einteilung hängt dabei vom Verhältnis der BiegeWellenlänge in der Platte λ_B zur Wellenlänge in der umgebenden Luft λ_{air} ab.

- I $\frac{\lambda_B}{\lambda_{\text{air}}} < 1$ akustischer Kurzschluss; Luftschall-Nahfeld ohne abgestrahlte Schallleistung ($\sigma = 0$)

³Teilfläche aus einer unendlich großen Platte

⁴Der Abstrahlgrad resultierend aus *erzwungenen* Wellen infolge von Luftschallanregung wird hier nicht behandelt.

⁵Die Materialeigenschaften von Brettsperrholz können mit einem *orthotropen* Materialmodell beschrieben werden. Dabei resultieren aus den unterschiedlichen Steifigkeiten in den beiden Hauptrichtungen der Platte zwei Koinzidenz-Grenzfrequenzen.

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

II $\frac{\lambda_B}{\lambda_{\text{air}}} = 1$ Koinzidenz; streifende Abstrahlung ($\sigma \gg 1$)

III $\frac{\lambda_B}{\lambda_{\text{air}}} \gg 1$ volle Abstrahlung ($\sigma = 1$)

Endliche Platte

Der wesentliche Unterschied zwischen dem Modell der endlichen und unendlichen Platte besteht darin, dass bei der endlichen Platte das Luftschall-Nahfeld durch den Rand gestört ist. Daraus resultiert dort eine Schallabstrahlung im Bereich I ($\sigma > 0$), die im Wesentlichen von der Art der Randbedingung abhängt. Der Abstrahlgrad kann rechnerisch oder messtechnisch (siehe Abb. 36 und [38, 42]) bestimmt werden.

Isotrope Rechteckplatte: Im Folgenden werden drei Näherungslösungen für den Abstrahlgrad dargestellt: Ein Kombinationsmodell von

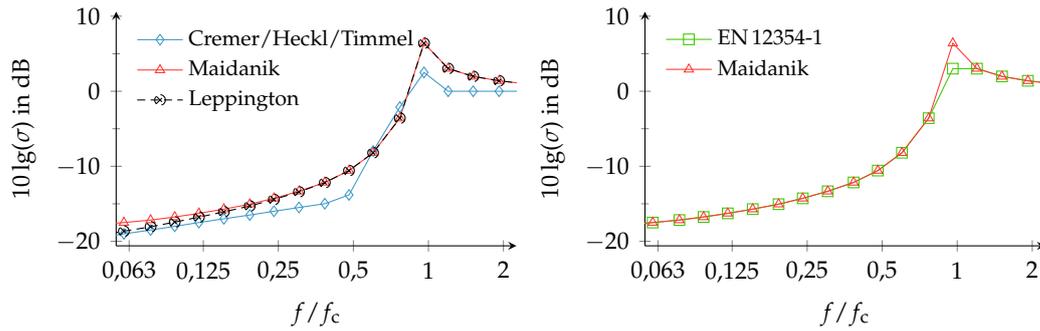
- Cremer, Heckl und Timmel [76, 79],
- das Berechnungsmodell nach Maidanik [80] und
- das Berechnungsmodell nach Leppington [81].

Abbildung 6b zeigt, dass die Berechnung in der EN 12354-1 [82] auf dem Berechnungsmodell von Maidanik basiert und sich durch die Begrenzung in der Norm auf $\max(\sigma) = 2$ unterscheidet. Alle Modelle gelten für eine Platte mit endlichen Abmessungen, welche

- isotrope Materialeigenschaften,
- punktförmig angeregt,
- gelenkig gelagert,
- rechteckig und
- schwach gedämpft

ist. Durch die *schwache Dämpfung* wird vorausgesetzt, dass bei der Abstrahlung der Randeinfluss gegenüber dem Biegewellennahfeld überwiegt. Heckl [83] gab dazu das Kriterium in (2.19) dafür an. Dieses ist abhängig von dem Verlustfaktor η , der Biegewellenzahl k_B und der Fläche der Platte S .

$$S k_B^2 \eta < 32 \quad \text{mit} \quad k_B = \frac{2\pi}{\lambda_B} \quad (2.19)$$



(a) Modellvergleich

(b) Vereinfachung in EN 12354-1

Abbildung 6 Näherungslösungen für das Abstrahlmaß einer endlichen, gelenkig gelagerten, isotropen Rechteckplatte bei punktförmiger Anregung nach [76, 79–82] am Beispiel einer Glasplatte ($1500 \times 1250 \times 6 \text{ mm}^3$; $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $c_L = 5200 \text{ m/s}$; $\nu = 0,24$) aus [65].

In Abbildung 6 werden die unterschiedlichen Lösungen am Beispiel einer Glasplatte als Abstrahlmaß aufgetragen. Das Kombinationsmodell von Cremer, Heckl und Timmel unterscheidet sich nur bei der Koinzidenz-Grenzfrequenz von dem ursprünglichen Modell von Cremer und Heckl [76]. Dabei hat Timmel [79] eine Korrektur vorgeschlagen bei Abweichungen von einer quadratischen Platte, die hier berücksichtigt wurde. Timmel setzt voraus, dass das Verhältnis der Plattendimensionen $a:b < 3:1$ ist.

Die Näherungslösungen von Maidanik [80] und Leppington [81] unterscheiden sich im Bereich $f < f_c/2$ voneinander. Dabei liegt der Abstrahlgrad von Leppington unterhalb dem von Maidanik. Im Gegensatz zum Berechnungsmodell von Cremer, Heckl und Timmel ist der Abstrahlgrad sowohl bei Leppington als auch bei Maidanik nahe der Koinzidenz-Grenzfrequenz deutlich höher.

Orthotrope Rechteckplatte: Im Gegensatz zu isotropen Platten weisen orthotrope Platten unterschiedliche Steifigkeiten in den verschiedenen Plattenrichtungen auf. Diese Eigenschaften weisen einige Werkstoffplatten im Holzbau auf, wie z. B. Brettsperrholz, Brettstapelelemente oder Spanplatten mit orientierten Spänen. Daraus resultieren in den beiden Hauptrichtungen der Platten unterschiedliche Koinzidenz-Grenzfrequenzen f_{c1} und f_{c2} . Das wiederum hat Einfluss auf die abgestrahlte Schallleistung in (2.17). Für den Fall unendlicher Platten gibt es Näherungslösungen für P_{rad} [77] und im Fall von endlichen gibt es numerisch aufwändigere Lösungsvorschläge, wie z. B. in [84].

(I) Effektive Koinzidenz-Grenzfrequenz: Um dennoch die Näherungslösungen für den Abstrahlgrad der isotropen Platte auf eine orthotrope Platte übertragen zu können wurde eine effektive Koinzidenz-Grenzfrequenz nach (2.20) und eine effektive Biegesteifigkeit zu Grunde gelegt [65, S. 198]. Diese Vereinfachung kann insbesondere im Bereich zwischen f_{c1} und f_{c2} zu einer großen Unsicherheit führen. Je größer der Abstand zwischen den beiden Koinzidenz-Grenzfrequenzen ist, umso weniger geeignet ist diese Vereinfachung, um einen Abstrahlgrad zu prognostizieren.

$$f_{c,\text{eff}} = \sqrt{f_{c1} f_{c2}} \quad (2.20)$$

(II) Effektiver Abstrahlgrad: Alternativ zu Ansatz I wird der Abstrahlgrad mit dem geometrischen Mittel der Abstrahlgrade von zwei getrennten Rechnungen durchgeführt. Dazu wurde die Platte einmal als isotrope Platte mit dem E-Modul E_1 berechnet und in einer zweiten Rechnung mit dem E-Modul E_2 . Je Terzband wurde das geometrische Mittel der beiden Abstrahlgrade berechnet.

$$\sigma_{II} = \sqrt{\sigma_{E_1} \sigma_{E_2}} \quad (2.21)$$

In [59] wird ein ähnliches Vorgehen wie Methode II vorgeschlagen. Dabei wird jedoch ein gewichtetes Mittel statt dem geometrischen Mittel verwendet. Anderson [84] berechnete Unterschiede im Abstrahlgrad zwischen einer allseitig gelenkig gelagerten und geklemmten Platte nur unterhalb der ersten Koinzidenz-Grenzfrequenz. Zusammenfassend ist zu erwarten, dass die Prognoseunsicherheit für den Abstrahlgrad unterhalb der ersten Koinzidenz-Grenzfrequenz und nahe der beiden Grenzfrequenzen höher ist.

In Abbildung 7 sind die prognostizierten Abstrahlmaße nach den beiden o.g. Methoden I und II⁶ dargestellt bei unterschiedlichen Verhältnissen der E-Moduln zueinander. Zusätzlich ist das Verfahren nach Heckl aufgetragen, welches für eine unendlich große, orthotrope Platte gilt. Dabei sind die Frequenzachsen normiert auf die zweite Koinzidenz-Grenzfrequenz f_{c2} . Ein Vergleich der beiden Lösungen mit experimentell ermittelten Abstrahlmaßen aus [38, 42] findet sich in Abbildung 36.

Die Auswirkung der unterschiedlichen Methoden nach (2.20) und (2.21) zeigen sich deutlicher, wenn der Abstrahlverlustfaktor nach (2.18) daraus bestimmt wird. Abbildung 8 zeigt am Beispiel von der im Projekt verwendeten Wand und Decke aus Brettspertholz diese Auswirkungen. Im Fall der Decke unterscheiden sich die E-Moduln der beiden Hauptrichtungen nur um den Faktor drei. Da zeigt das

⁶Als Ausgangspunkt für die Methode I und II wurde die Berechnungsmethode der EN 12354 für eine isotrope Platte genutzt. Die Methode I und II sind nicht Teil der Norm.

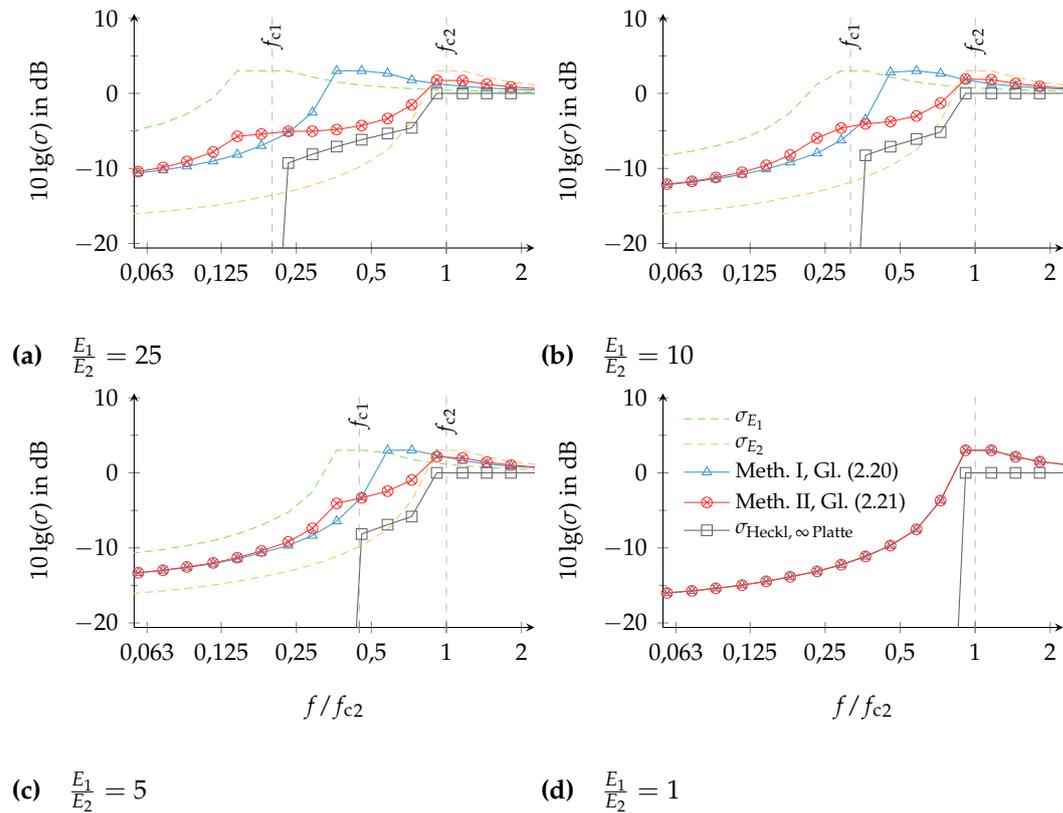
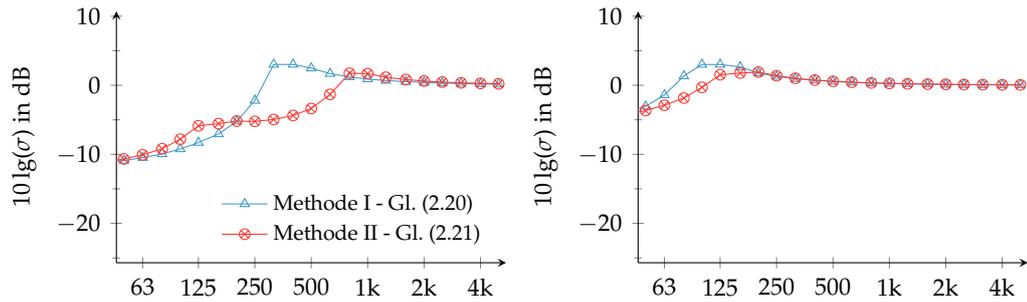


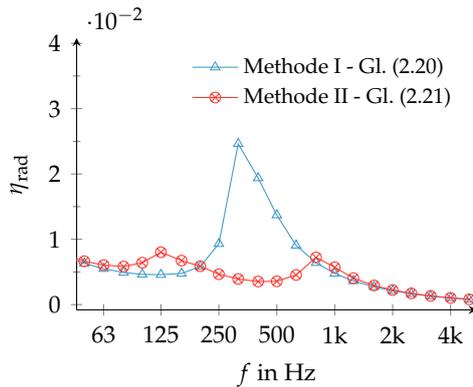
Abbildung 7 Abstrahlmaß in Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse an einer orthotropen Platte mit $(4000 \times 2500 \times 100 \text{ mm}^3; \rho = 450 \text{ kg/m}^3; E_2 = 400 \text{ MPa}; \nu = 0,035)$. Als Basis für die Berechnung nach Methode I und II wurde das Modell für eine isotrope Platte nach der EN 12354-1 [82] verwendet.

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

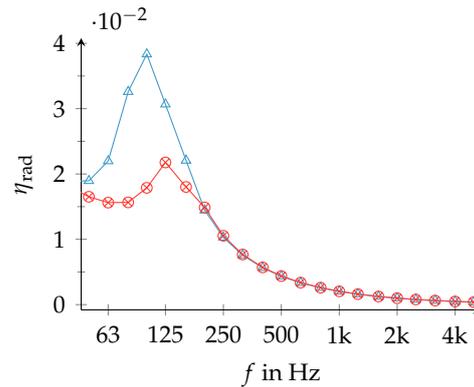


(a) Wand 3S, $\frac{E_{||}}{E_{\perp}} = 25$

(b) Decke 6S, $\frac{E_{||}}{E_{\perp}} = 3$



(c) Wand 3S



(d) Decke 6S

Abbildung 8 Einfache Näherungsmodelle für Abstrahlmaße und Abstrahlverlustfaktoren orthotroper Platten im Vergleich am Beispiel von BAUTEILE NR. 56 UND 42 aus Brettsperholz (Materialdatensatz (M1) aus Tab. 8). Als Basis für die Berechnung nach Methode I und II wurde das Modell für eine isotrope Platte nach der EN 12354-1 [82] verwendet.

Abstrahlmaß nach den beiden Methoden zwar nur geringe Unterschiede, diese sind jedoch im Abstrahlverlustfaktor deutlich zu erkennen. Im Fall der Wand ist das Verhältnis der E-Moduln deutlich größer. Dadurch resultiert ein Unterschied bis zu 8 dB im Abstrahlmaß zwischen den beiden Koinzidenz-Grenzfrequenzen.

2.2 Anwendung in einer kommerziellen Software

Zur Anwendung der Statistischen Energie-Analyse wurde eine kommerzielle Software VAONE[®] [85] der ESI GROUP genutzt. Dieses Programm unterstützt die Modellbildung bei der Definition von Subsystemen und ermöglicht die Berechnung der charakteristischen Eigenschaften von Subsystemen, wie z. B. modale Dichten,

modale Überlappungsfaktoren, anhand unterschiedlicher Materialmodelle. Ist das Modell und die Anregung vollständig definiert, können Energieflüsse zwischen den Subsystemen analysiert und Kopplungsverlustfaktoren berechnet werden. Seit der Version von 2014 / 2015 ist in dem Programm eine erweiterte Plattentheorie, die auf R. D. Mindlin zurück geht, integriert. Damit ist es nun auch möglich Platten zu berechnen, deren Schubeinflüsse bei der Energieübertragung bedeutend sind. Für die Anwendung in der Bauakustik ist es eine wichtige Erweiterung. Insbesondere Elemente aus dem Holzmassivbau weisen im höheren bauakustischen Frequenzbereich diese Eigenschaften auf.

2.2.1 Modellbeschreibung für einen L-förmigen Bauteilstoß

Zunächst wurde an der HS Ro ein L-förmiger Bauteilstoß, wie in Abbildung 27 (a) dargestellt, bestehend aus Brettsperrholz-Elementen ohne Elastomer in der Stoßfuge, messtechnisch untersucht und als SEA Modell mit der Software VAONE[®] erstellt, siehe Abbildung 10 (a). Das Gesamtsystem aus den Experimenten am STOSS NR. 3 wurde in zwei Subsysteme

1. Decke und
2. Wand

unterteilt. Die Abmessungen der Subsysteme für das SEA-Modell können den BAUTEILEN NR. 56 und 42 aus Tabelle 4 entnommen werden. Sie werden mit den orthotropen Materialeigenschaften aus Tabelle 8 beschrieben. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden zuvor Messungen (siehe Ergebnisse in Abschnitt 3.5.1) und eine FE-basierte Nachauswertung einer Betriebsschwinganalyse mittels Bayescher Optimierung durchgeführt [86]. Die elasto-mechanischen Kennwerte sind über die einzelnen Schichtlagen des Brettsperrholzes verschmiert und gelten damit für den jeweiligem Schichtaufbau. Der Dämpfungsverlustfaktor für beide Subsysteme wurde frequenzunabhängig angenommen mit $\eta_1 = 0,03$ und $\eta_2 = 0,026$, da zunächst auf eine Modellierung eigener Subsysteme für angeschlossenen Räume verzichtet wurde. Damit steht der Dämpfungsverlustfaktor im Modell stellvertretend für den in der Realität frequenzunabhängigen internen Verlustfaktor und den frequenzabhängigen Abstrahlverlustfaktor. Oberhalb der Koinzidenz-Grenzfrequenz in Richtung der geringeren Steifigkeit weist der Abstrahlverlustfaktor jedoch nur eine geringe Frequenzabhängigkeit auf (vgl. Abb. 8). Zur Strukturanregung wurde eine Leistung einmal in das Biegewellen Subsystem 1 und das andere Mal in das Biegewellen Subsystem 2 angesetzt.

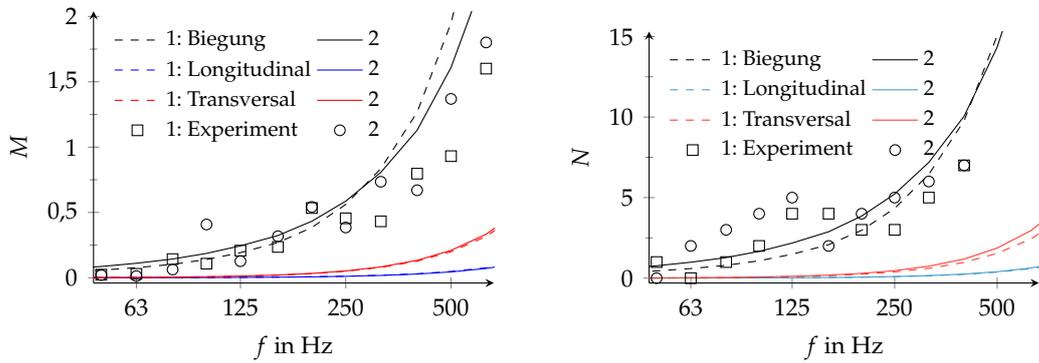
2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

In Abschnitt 2.1.1 wurde als wichtige Kriterien für die Frequenzuntergrenze eines SEA-Modells die Anzahl der Moden pro Frequenzband (2.11) und der modale Überlappungsfaktor eines Subsystems vorgestellt. Abbildung 9 zeigt die VAONE[®]-Ergebnisse für die verschiedenen Wellenarten dieser Subsysteme im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen. Bei den Messungen wurden zwei verschiedene Anregungspositionen je Bauteil verwendet und die Anzahl der Moden über die Anzahl der Maxima im Betrag der Akzeleranzen (3.5) aus einer Betriebsschwinganalyse näherungsweise bestimmt. Für den experimentellen modalen Überlappungsfaktor wurde die gemessene Eingangsadmittanz und der Gesamtverlustfaktor aus der Nachhallzeit-Methode verwendet, siehe (2.10) und (2.13). Beim Vergleich der Ergebnisse der BiegeWellen aus dem Modell mit den experimentellen Ergebnissen zeigen sowohl der modale Überlappungsfaktor als auch die Modenanzahl im Frequenzband einen ähnlichen Frequenzverlauf. Damit werden die modalen Eigenschaften der Teilsysteme im Modell geeignet beschrieben. Außerdem zeigt Abbildung 9 (b), dass die modale Dichte der BiegeWellen in diesem Frequenzbereich deutlich größer ist als die der anderen Wellenarten.

Als Frequenzuntergrenze für die Anwendung der SEA im vorliegenden Fall liegt danach im Bereich zwischen 250 Hz bis 500 Hz, wenn die Ergebnisse mit den aus der Literatur bekannte Mindestkriterien für den modalen Überlappungsfaktor $M > 1$ und den Mindestanzahl an Moden im Frequenzband $N > 3$ bis 10 verglichen werden. Zu beachten ist, dass diese Grenzen u. a. von der Größe der Subsysteme bzw. Bauteile abhängen, siehe (2.11) und damit für diese Bauweise nicht allgemeingültig sein können. Die Bauteilgrößen des hier dargestellten Beispiels sind aufgrund der Abmessungen des experimentellen Aufbaus im Prüflabor gewählt und eher am unteren Ende üblicher Bauteilgrößen einzuordnen.

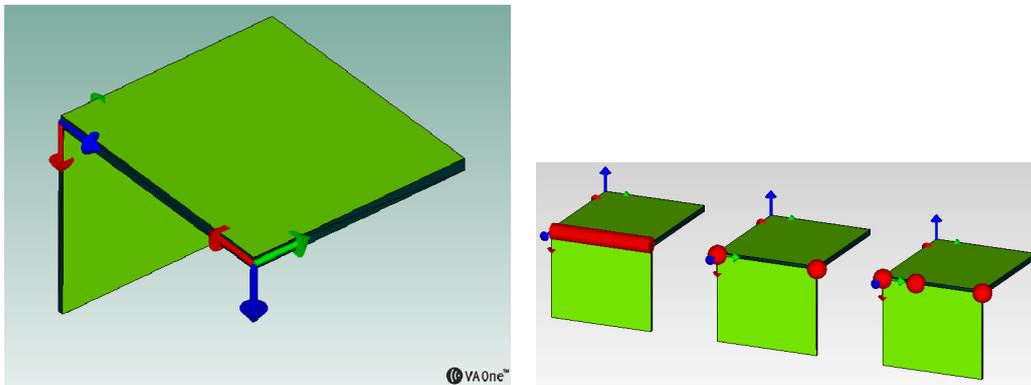
Zur Kopplung der Subsysteme bietet VAONE[®] verschiedene Standardkopplungen, sog. Linien- und Punktkopplungen an. Das sind voreingestellt starre Kopplungen, welche je nach Subsystemanordnung einem frequenzabhängigen Kopplungsverlustfaktor entsprechen. In [54, 55] wurden die Kopplungsverlustfaktoren der verschiedenen Varianten der starren Kopplungen, die in Abbildung 10 (b) dargestellt sind, mit experimentell ermittelten Kopplungsverlustfaktoren nach (2.4) verglichen. Dabei zeigten diese z. T. deutliche Unterschiede zu den Messungen auf. Im Folgenden wird zunächst auf die experimentellen Kopplungsverlustfaktoren und anschließend auf den Vergleich am Beispiel der starren Linienkopplung dargestellt.

Bei nur zwei Subsystemen mit Anregung von Subsystem i kann die Energiegleichung aus den Experimenten näherungsweise mit (2.4) [70] beschrieben werden. In diesem Fall kann η_{ij} aus dem Verhältnis der Energien E der beiden Subsysteme



(a) Modale Überlappungsfaktoren je Wellenart und aus Experimenten
 (b) Anzahl der Moden je Wellenart und aus einer Betriebschwinganalyse im Terzband

Abbildung 9 Modale Eigenschaften der Subsysteme des L-Stoßes berechnet mit VAONE® im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen vom STOSS NR. S3 mit zwei Anregungspositionen je Bauteil. Der Verlustfaktor zur Berechnung des modalen Überlappungsfaktors wurde frequenzunabhängig angenommen ($\eta_1 = 0,03$; $\eta_2 = 0,026$; Materialdatensatz (M2) aus Tab. 8).



(a) SEA Modell aus zwei Subsystemen (b) Linien- und Punktkopplungen

Abbildung 10 SEA Modell des L-STOSSES NR. S3 aus Wand- ② und Deckenelement ①.

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

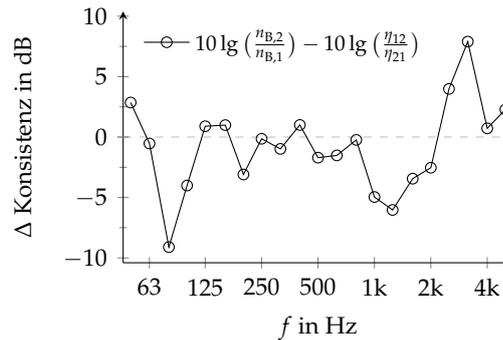


Abbildung 11 Abweichung der Konsistenz zwischen mit VAONE[®] berechneten modalen Dichten der Biegewellen und experimentellen Kopplungsverlustfaktoren des L-Stoßes STOSS NR. S3 aus der Mittlung von zwei Anregungspositionen je Bauteil. (Materialdatensatz (M2) aus Tab. 8).

me und dem gemessenen $\eta_{tot,j}$ des indirekt angeregten Systems. Zur Bildung der mittleren Schnelle wurden für die Decke 81 verschiedene Sensorpositionen und für die Wand 56 mit jeweils zwei unterschiedlichen Anregungspositionen verwendet. Ist das Verhältnis der Kopplungsverlustfaktoren gleich dem Verhältnis der modalen Dichten der Subsysteme sind diese konsistent zueinander. Abbildung 11 zeigt die Konsistenzabweichung, vergleiche (2.3), zwischen den experimentellen Kopplungsverlustfaktoren und den berechneten modalen Dichten der Biegewellen. Größere Abweichungen in der Konsistenz können darauf hinweisen, dass

- eine starke Kopplung zwischen den Subsystemen vorliegt,
- die statistische Beschreibung des modalen Verhaltens eines Subsystems im Frequenzband nicht zutreffend ist oder dass
- die Messpunktauswahl bei der Energiebestimmung nicht repräsentativ ist.

Im Bereich von 125 Hz bis 800 Hz liegt eine hohe Konsistenz vor. Die Frequenzbänder 80 Hz und 3150 Hz weisen eine große Inkonsistenz auf und sind für weitere Vergleiche nicht belastbar. Auf Ursachen größerer Unsicherheiten bei der experimentellen Energiebestimmung insbesondere im tiefen und hohen Frequenzbereich wird in [61, 62] am Beispiel von Brettsperrholz-Bauteilen eingegangen.

Abbildung 12 zeigt den Vergleich zwischen dem SEA-Modell der Biegewellen bei der starren Linienkopplung mit experimentellen Ergebnissen vom STOSS NR. S3 anhand von Kopplungsverlustfaktoren und Energieverhältnissen. Beim Vergleich der Kopplungsverlustfaktoren in Abb. 12 (a) zeigen die Kopplungsverlustfaktoren aus dem Modell mit der starren Linienkopplung eine zunehmende Überschätzung

gegenüber denen aus den Experimenten zu tiefen Frequenzen hin. Es zeigt sich jedoch auch, dass oberhalb der Frequenzgrenze von etwa 250 Hz bis 500 Hz in denen die Subsysteme die o. g. modalen Voraussetzungen für die SEA erfüllen, die Übereinstimmung der Kopplungsverlustfaktoren zunimmt. Dennoch ist in Abb. 12 (c) eine systematische Überschätzung der Kopplungsverlustfaktoren bei Verwendung der starren Linienkopplung zu erkennen. Es ist plausibel, dass die geschraubte Verbindung im Experiment schwächer als eine starre Verbindung die Bauteile koppelt.

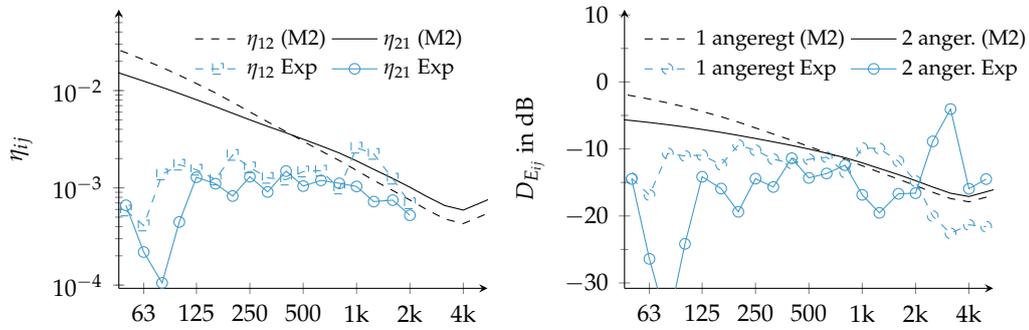
In dieser Abbildung sind zusätzlich noch die Abweichungen der Gesamtverlustfaktoren aus dem Modell zu den Messungen aufgetragen. Im Modell bestehen diese nach (2.6) aus dem frequenzunabhängig angesetzten internen und Abstrahlverlustfaktor ($\eta_1 = 0,03$ und $\eta_2 = 0,026$) und dem Kopplungsverlustfaktor. Bei den Messungen wurde aus der Nachhallzeit-Methode an den Bauteilen des L-Stoßes der Gesamtverlustfaktor bestimmt. Der Abweichungen zeigen, dass sich im Modell tieffrequent und hochfrequent höhere Gesamtverlustfaktoren ergeben. Die tieffrequenten Abweichungen liegen z. T. in den Unterschieden der Kopplungsverlustfaktoren zwischen Modell und Experiment begründet. Eine weitere Ursache für die Abweichung liegt darin begründet, dass der Abstrahlverlustfaktor im Modell ebenfalls frequenzunabhängig angesetzt worden ist. Durch den Zusammenhang zwischen den Verlustfaktoren und den Energieverhältnissen in (2.4) weisen die Energiepegeldifferenzen nach (2.22)

$$D_{E_{ij}} = 10 \lg \left(\frac{E_j}{E_i} \right) \quad i: \text{angeregt} \quad (2.22)$$

in Abbildung 12 (b) und die Abweichung in Abb. 12 (d) eine ähnliche Systematik auf. Bei diesen Vergleichen wurden nur die Energien und Kopplungsverlustfaktoren der Biegewellen vom Modell herangezogen, da in der Messung nur der Schnellanteil senkrecht zur Platte erfasst wurde. Aus den Vergleichen lässt sich folgern, dass die Hauptunterschiede zwischen Modell und Experiment auf die Annahme einer starren Linienkopplung und deren überschätzten Kopplungsverlustfaktor zurückzuführen ist.

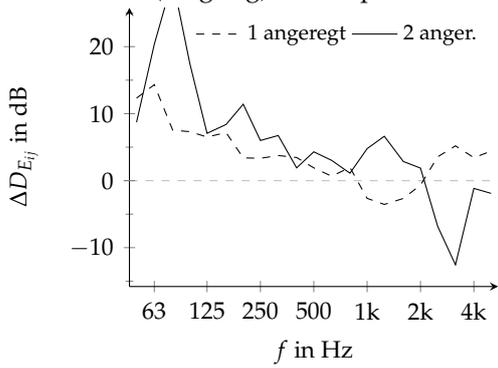
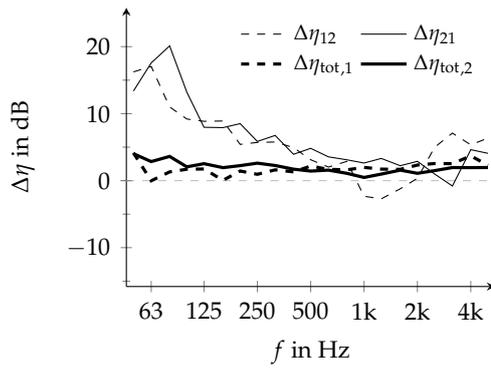
Weitere Modellierungen von typischen Bauteilstößen im Holzbau bei [87] zeigten, dass die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen bei Verwendung von punktförmigen Kopplungen der Subsysteme größer ist als bei einer linienförmigen Kopplung. Die nachgiebigen Verbindungen an Stoßstellen im Holzbau bestehen aus einzelnen Verbindungsmitteln (wie Schrauben oder vernagelten Befestigungswinkeln) und weisen eine unebene Beschaffenheit der gestoßenen Flächen in der Stoßstelle auf. Aus diesem Grund liegt dieses physi-

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse



(a) Kopplungsverlustfaktoren aus Modell und Experiment nach (2.4)

(b) Energiepegeldifferenzen zwischen indirekt zu direkt angeregtem Subsystem aus Modell (Biegung) und Experiment



(c) Abweichung zum Experiment

(d) Abweichung zum Experiment

Abbildung 12 Kopplungsverlustfaktoren und Energiepegeldifferenzen zwischen Subsysteme 1 (Biegung) und 2 (Biegung) des L-Stoßes berechnet mit VAONE[®] als starre Linienkopplung im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen vom STOSS S3 mit zwei Anregungspositionen je Bauteil. (Materialdatensatz (M2) aus Tab. 8).

kalische Modell nahe. Als Entscheidungshilfe kann nach [65] der Abstand der tatsächlichen Verbindungsmittel zur Biegewellenlänge herangezogen werden. Ist der Abstand groß gegenüber der Wellenlänge, ist eine punktförmige Verbindung empfehlenswert.

Eine weitere Beobachtung aus den Modellbildungen mit der SEA ist, dass eine höhere Übereinstimmung zwischen theoretischen Modell und Messdaten erzielt wird, wenn eine höhere Pressung der Stoßstelle bei den Messungen vorliegt. Die Pressung sorgt für eine gleichmäßigere mechanische Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen bzw. Subsystemen. Die Erhebung von Messdaten mit einer erhöhten Pressung in der Stoßstelle stellt zum Einen die tatsächliche Bausituation besser dar und führt zum Anderen zu einer zuverlässigeren Modellbildung mit der SEA.

Weitere Schritte der Modellierung zur Überprüfung dieser Erkenntnisse und zur Abbildung von Elastomeren sind notwendig und werden im Rahmen eines an der Hochschule Rosenheim laufenden Dissertationsvorhabens durchgeführt. Die Ergebnisse werden voraussichtlich 2018 veröffentlicht. Dazu stehen die Messdaten unter Variation von

- (a) den Kopplungsbedingungen der Bauteile (Decke eingebunden, Wand durchlaufend),
- (b) der Einbringung von elastischen Zwischenlagen zur Körperschallisolierung und
- (c) den statisch notwendigen Verbindungselementen

zur Verfügung.

Aus den richtungsabhängigen Kopplungsverlustfaktoren, die über das SEA-Modell ermittelten werden, können nach (3.2) richtungsabhängige Stoßstellendämm-Maße berechnet werden. Stoßstellendämm-Maße werden bei der Schallschutzprognose nach dem Verfahren der EN 12354 zur Quantifizierung der Stoßstellenübertragung verwendet. Die Grundzüge des Prognoseverfahrens wird im Abschnitt 2.3 dargestellt und experimentell ermittelte Stoßstellendämm-Maße finden sich im Abschnitt 3.5.5 und im Anhang. In Kapitel 3.5.4 werden ergänzend die Ergebnisse aus der experimentellen *Power Injection Method* (PIM) dargestellt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen des SEA-Modells findet sich bei [88].

2.2.2 Vergleich der Methode mit der Energieflussanalyse

Die Anwendung der Statistischen Energie-Analyse ist bei dem gewählten Beispiel des Bauteilstoßes aus Brettsperrholz im tieffrequenten Bereich nicht geeignet, da

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

die Voraussetzungen aus Abschnitt 2.1 nicht erfüllt sind. Im tiefen Frequenzbereich eignet sich die Finiten Elemente Methode (FEM) für Prognosen. Für zunehmende Frequenzen nimmt die modale Dichte zu, wodurch die klassische FEM aufgrund der Sensitivität der Ergebnisse auf die Streuung der Eingangsgrößen an Grenzen stößt und die Anwendung statistischer Methoden erforderlich wird. Die Statistische Energie-Analyse (SEA) liefert für hohe Frequenzen robuste Ergebnisse, erlaubt i. d. R. aber nur eine sehr eingeschränkte Ortsauflösung.

Energieflussanalyse

Aus diesem Grund wird in Teilprojekt 5 bei der Prognose für die o. g. Strukturen im mittleren Frequenzbereich im Rahmen einer Energieflussanalyse (EFA) Mittelungsmethoden der SEA [89] in der Nachauswertung der FEM eingesetzt. Vorteilhaft dabei sind robuste Ergebnisse verbunden mit einer größeren Flexibilität bei der Definition der Subsysteme [90, 91]. Details zur Methode finden sich im Bericht von Teilprojekt 5 [92], welcher am Lehrstuhl für Baumechanik von der Technischen Universität München durchgeführt worden ist.

Mit der EFA können die Energieflüsse zwischen den einzelnen Bauteilen, auch für den mittleren Frequenzbereich, in Form von Energieeinflusskoeffizienten bestimmt werden. Sofern die Voraussetzungen der SEA gegeben sind, kann die EFA auf die numerische *Power Injection Method* (PIM) erweitert werden, um auch die internen Verlustfaktoren η_{int} und Kopplungsverlustfaktoren η_{ji} zwischen Bauteilen zu berechnen.

Anhand der kinetischen Energie kann im mittleren und höheren Frequenzbereich für schwach gekoppelte Subsysteme die Gesamtenergie in den Subsystemen ermittelt werden. Aus Letzterer sowie der in die einzelnen Subsysteme eingebrachten Leistung kann die Matrix A der Energieeinflusskoeffizienten (2.23) ermittelt werden. Hierbei stellt der Matrixeintrag A_{ij} die auf die eingebrachte Leistung normierte Energie im Subsystem i bei Belastung des Subsystems j dar. Zu beachten ist, dass diese Indize-Reihenfolge abweicht von anderen Größen, die in diesem Bericht

verwendet worden sind.

$$[A] = [E] [P_{in}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{P_{in,1}} & \frac{E_{12}}{P_{in,2}} & \dots & \frac{E_{1n}}{P_{in,n}} \\ \frac{E_{21}}{P_{in,1}} & \frac{E_{22}}{P_{in,2}} & \dots & \frac{E_{2n}}{P_{in,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{E_{n1}}{P_{in,1}} & \frac{E_{n2}}{P_{in,2}} & \dots & \frac{E_{nn}}{P_{in,n}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sind hierbei die Voraussetzungen für eine Anwendung der SEA gegeben, können die internen und Kopplungsverlustfaktoren durch eine Invertierung der Matrix der Energieeinflusskoeffizienten gewonnen werden. Die resultierende Gleichung entspricht dabei der umgestellten SEA-Matrix in (2.5).

Vergleich der Modellergebnisse am Beispiel des L-Stoßes

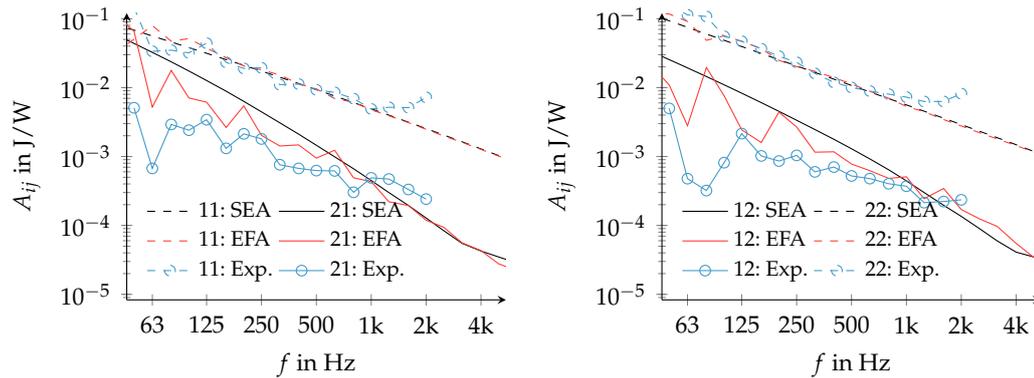
Für den Vergleich der Methoden wird das SEA-Modell aus Abschnitt 2.2.1 verwendet. Die gesamte eingebrachte Leistung wurde zunächst aus den 50 Einzellasten des FE-Modells, welche der EFA zu Grunde liegt, gebildet. Dieselbe Leistung wurde im SEA-Modell im Subsystem der Biegewellen angesetzt. Bei diesem Vergleich wurden im FE-Modell Schalenelemente verwendet. Ein Vergleich zu Ergebnissen mit Volumenelementen findet sich bei [63, 92]. Für die Dämpfung im Modell für die EFA wurde der gleiche frequenzunabhängige Verlustfaktor verwendet wie im SEA-Modell. Die Kopplung der Teilsysteme war ebenfalls für den Vergleich der Methoden in beiden Fällen starr verbunden.

Als Vergleichsgröße der Modellergebnisse der SEA mit denen aus der EFA werden Energieeinflusskoeffizienten genutzt. Zur Bildung eines Energieeinflusskoeffizienten bei der SEA wurden die Energien aus den verschiedenen Wellenarten nach (2.24) zusammengefasst und auf die eingebrachte Leistung bezogen.

$$A_{ij,SEA} = \frac{E_{Biegung,i} + E_{Transversal,i} + E_{Longitudinal,i}}{P_{in,j}} \quad (2.24)$$

Für einen orientierenden Vergleich der Simulationsergebnisse zu den Experimenten wurde ein Energieeinflusskoeffizient nach (2.25) gebildet. Beim Vergleich zu beachten ist, dass dabei die Energie nach (2.1) aus den Schnellen senkrecht zur Platte bei Verwendung von zwei verschiedenen Anregungspositionen an den Bauteilen ermittelt worden ist. Die Anzahl und Positionen der Beschleunigungsaufnehmer

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse



(a) Leistungseintrag in Bauteil 1

(b) Leistungseintrag in Bauteil 2

Abbildung 13 Energieeinflusskoeffizienten A_{ij} aus der SEA, EFA und Messung von im Bauteil (1,2). Bei der EFA sind 50 Einzellasten mit Rain-on-the-Roof verwendet worden und bei der SEA wurde die Leistung im Subsystem der Biegewellen angesetzt. Die Messung wurde jeweils mit zwei Anregepositionen durchgeführt.

sind den Zeichnungen auf Seite 149 und 150 zu entnehmen. Für die eingebrachte Leistung aus den Messungen wurde die mittlere Leistung der beiden Anregepositionen verwendet. Zur Leistungsbestimmung wurde ein Impedanzmesskopf verwendet. Bei der verwendeten Messkonfiguration konnte die Leistung bis 2 kHz bestimmt werden. Weitere Informationen zur messtechnischen Leistungsbestimmung finden sich im Abschnitt 3.4.4 und bei [32].

$$A_{ij,Exp} = \frac{E_i}{P_{in,j}} \quad (2.25)$$

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Energieeinflusskoeffizienten der Modelle der beiden Methoden und des Experimentes am STOSS NR. 3⁷. Der Vergleich der normierten Energien der direkt angeregten Subsysteme (11 und 22) zeigt ab 125 Hz eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den Methoden und auch dem Experiment. Die Abweichung der Messung zu den beiden Methoden bei hohen Frequenzen ist in der zunehmenden Ungenauigkeit bei der experimentellen Leistungsbestimmung begründet und zum Teil auf den Effekt von Dickenmoden zurückzuführen, siehe [93].

Bei den indirekt angeregten Subsystemen (12 und 21) zeigten die Ergebnisse der

⁷Schmalbandige Energieeinflusskoeffizienten für den tieffrequenten Bereich finden sich auch in Abbildung 43 (a).

EFA geringere Abweichungen zu den Ergebnissen der Messung. Außerdem weist der Kurvenverlauf insgesamt eine höhere Ähnlichkeit auf. Das zeigt die Vorteile der EFA Methode tieffrequent gegenüber der SEA Methode. Die zuletzt genannte Methode beschreibt das modale Verhalten bei wenigen Moden im tieffrequenten Bereich nur unzureichend. Der Vergleich der Simulationsergebnisse zu den Messergebnissen weist darauf hin, dass die starre Kopplung in den Modellen dazu führt, dass mehr Energie auf das indirekt angeregte System übertragen wird als im Experiment.

Die Abweichung der Energieeinflusskoeffizienten nach (2.26) zwischen den beiden Modellen der Methoden ist in Abbildung 14 dargestellt.

$$\Delta A_{ij} = 10 \lg \left(\frac{A_{ij,SEA}}{A_{ij,EFA}} \right) \quad (2.26)$$

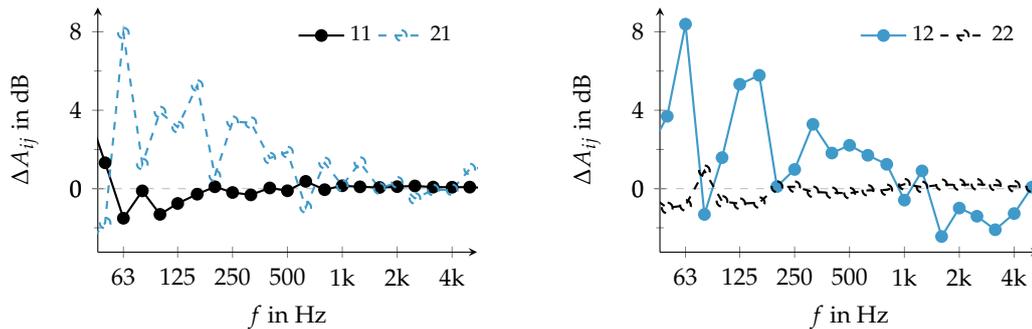
Dabei zeigt sich ein zunehmender Unterschied der beiden Methoden beim indirekt angeregten Subsystem zu tiefen Frequenzen hin. Oberhalb der Frequenzuntergrenze bei etwa 250 Hz bis 500 Hz, ab der die verwendeten Subsysteme die SEA-Kriterien erfüllen, sind die Abweichungen maximal 4 dB. Bei der EFA wird die Energie aus der Summe aus kinetischer und potentieller Energie bestimmt; bei der SEA Methode wird vorausgesetzt, dass diese beiden Anteile gleich groß sind. Aus diesem Grund ist ein Teil der Unterschiede der Energieeinflusskoeffizienten in Frequenzbändern mit wenigen oder keinen Moden zurückzuführen, da nur im Bereich mit vielen Moden die o. g. Voraussetzung der Energiebestimmung bei der SEA erfüllt ist.

2.2.3 Validierung der Anregbarkeit einer Brettsperrholzplatte

Eine Validierung der Materialdaten und der Berechnung der Anregbarkeit mithilfe der Software VAONE[®] erfolgte über der Realteil der mittleren Eingangsadmittanz (2.14) aus den Messungen an der unteren Wand vom T-STOSS NR. S21. Die Messung erfolgte an sechs verschiedenen Anregungspositionen mit jeweils vier Wiederholungsmessungen [41]. Im Vergleich dazu wurde die berechnete modale Dichte der BiegeWellen aus VAONE[®] in eine Admittanz umgerechnet. Verwendet wurden zwei verschiedene Materialdatensätze M1 und M2 aus Tabelle 8.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse zwischen den berechneten Admittanzen und der mittleren Admittanz aus der Messung mit Standardabweichung. Zusätzlich eingezeichnet sind die Admittanzen berechnet nach (2.15) u. (2.16) für eine *akustisch, dünne* Platte. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt eine gute Übereinstimmung im mittleren und hochfrequenten Bereich zwischen der Berechnung aus VAONE[®] mit

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse



(a) Leistungseintrag in Bauteil 1

(b) Leistungseintrag in Bauteil 2

Abbildung 14 Abweichung der Energieeinflusskoeffizienten zwischen SEA- und EFA-Berechnung bei Referenz EFA. Bei der EFA sind 50 Einzellasten mit Rain-on-the-Roof verwendet worden und bei der SEA wurde diese Leistung im Subsystem der Biegewellen eingebracht.

dem Datensatz M1 und der Messung. Im tieffrequenten Bereich sind Abweichungen zu erwarten, da die statistische Berechnung der Anregbarkeit für das ausgeprägte modale Körperschallfeld nicht geeignet ist (siehe Abs. 2.1). Die Berechnung mit dem Materialdatensatz M2 zeigt eine Überschätzung der Anregbarkeit im hohen Frequenzbereich. Dieser Datensatz M2 stammt aus einem Optimierungsprozess [86] zwischen einem FE-Modell und den Ergebnissen aus der Betriebsschwinganalyse im Frequenzbereich $f < 200$ Hz.

Die Admittanzen berechnet für eine *akustisch, dünnen* Platte zeigen eine zunehmende Diskrepanz zu den Messungen oberhalb des mittleren Frequenzbereichs ab etwa 400 Hz. Damit wird deutlich, dass eine Plattentheorie mit Berücksichtigung des Schubeinflusses wie die Theorie nach Mindlin erforderlich ist, um im bauakustischen Frequenzbereich die Anregbarkeit dieser Brettsperrholzplatte zu beschreiben. In VAONE[®] ist diese Theorie als *thick plate theory* implementiert.

2.3 Anwendung bei der Luft- und Trittschallberechnung nach EN 12354

Die SEA-basierte Luft- und Trittschallberechnung⁸ erfolgt in DIN EN 12354-1:2000-12 und DIN EN 12354-2:2000-09 nach einem stark vereinfachten SEA-Modell. Das Verfahren wird hier sehr verkürzt zur Übersicht und Einordnung der durchgeführten Arbeiten dargestellt. Für die Entwicklung des Modells und die Einbindung in das Nachweisverfahren der neuen DIN 4109:2016-07 [95] wurden umfangreiche

⁸Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung sind bereits Entwürfe der Teile 1 [82] und 2 [94] der DIN EN ISO 12354 erschienen.

2.3 Anwendung bei der Luft- und Trittschallberechnung nach EN 12354

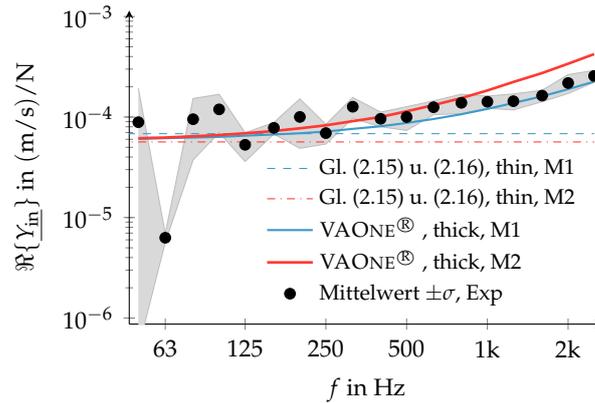


Abbildung 15 Realteile der gemessenen mittleren Eingangsadmittanz (Exp) der unteren Wand im Vergleich zu Berechneten für eine *akustisch dünne* (thin) und eine *akustisch dicke* (thick) Platte in Terzbändern. Für die Berechnung verwendeten Material Datensätze (M1 und M2) sind in der Tabelle 8 aufgeführt. Im Experiment wurden sechs Anregungspositionen mit je vier Wiederholungsmessungen verwendet [41].

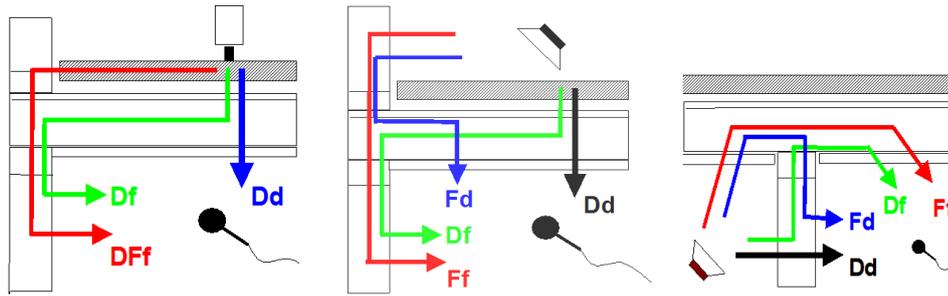
Untersuchungen durchgeführt [96–101] und Planungswerte für die Bauteilkataloge zusammengetragen [43].

Die Anwendung des Modells auf die Holzbauweise erforderte zusätzliche Untersuchungen zur Durchführbarkeit der Messungen nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08 an Holzständerwänden und Holzbalkendecken [48, 49, 102] und eine differenziertere Betrachtung der Übertragungswege an den Bauteilstößen.

So wurde bei der Trittschallübertragung die Anregung der flankierenden Wand durch den Estrichaufbau und den Randdämmstreifen, der Weg DFf in Abbildung 16 (a), zusätzlich berücksichtigt [44, 57, 103, 104]. Bei der Trittschallanregung sind somit neben der direkten Übertragung auf dem Weg Dd die Beiträge der Flankenübertragung auf den Übertragungswegen $ij = Df$ und DFf zu berücksichtigen. Der Übertragungsweg DFf wird im bisherigen Modell nach [5], das nachfolgend beschrieben wird, noch nicht berücksichtigt. Weiterführende Informationen zum Weg DFf finden sich in [59]. Bei der Luftschallanregung bestehen die Beiträge der Flankenübertragung aus den Übertragungswegen $ij = Ff, Fd$ und Df. Dabei ist n die Anzahl der zu berücksichtigenden Pfade der Flankenübertragung.

Die frequenzabhängige Berechnung der Luftschalldämmung R' und des Norm-Trittschallpegels L'_n für die Bausituation erfolgt aus den in Abbildung 16 dargestellten Übertragungswegen nach Gleichung (2.27) und (2.28).

$$R' = -10 \lg \left(10^{-0,1 \cdot R_{Da}} + \sum_{j=1}^n 10^{-0,1 \cdot R_{ij}} \right) \quad (2.27)$$



(a) Trittschallübertragung (b) Vertikale und horizontale Luftschallübertragung

Abbildung 16 Beiträge zur Schallübertragung im Holzbau. [104]

$$L'_n = 10 \lg \left(10^{0,1 \cdot L_{n,Dd}} + \sum_{j=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{n,ij}} \right) \quad (2.28)$$

2.3.1 Adaption der Dämpfung der Eingangswerte auf die Bausituation

Die Eingangswerte für diese Berechnung kommen aus Prüfstandsmessungen oder aus theoretischen Berechnungen. In beiden Fällen muss die zugrunde liegende Bauteildämpfung auf die Bausituation angepasst werden. Damit werden Unterschiede in den Randanbindungen zwischen Labor/Simulation und Bau korrigiert. Dazu muss der Gesamtverlustfaktor aus der Messung bzw. der Berechnung $\eta_{tot,lab}$ und der prognostizierte Gesamtverlustfaktor für die Bausituation $\eta_{tot,situ}$ bekannt sein. Die Ermittlung der Gesamtverlustfaktoren erfolgt aus theoretischen Berechnungen oder auf empirischer Basis. Die Berechnungen können laut Anhang C aus [5] ausführlich nach Gleichung (2.29)

$$\begin{aligned} \eta_{tot} &= \eta_{int} + \eta_{rad} + \eta_{coupl} \\ &= \eta_{int} + 2 \frac{Z_{air}}{\omega m'} \sigma + \frac{c_{air}}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k \end{aligned} \quad (2.29)$$

oder vereinfacht für die Laborsituation nach Gleichung (2.30a) und vereinfacht für die Bausituation nach Gleichung (2.31) erfolgen. Dabei ist die Konstante c von der typischen Bausituation der Bauweise abhängig.

$$\eta_{tot,lab} = \eta_{int} + \frac{m'}{485} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (2.30a)$$

2.3 Anwendung bei der Luft- und Trittschallberechnung nach EN 12354

$$\eta_{\text{tot,lab}} = \eta_{\text{int}} + \frac{m'}{300} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad \text{für } (m' < 150 \text{ kg/m}^2) \quad (2.30b)$$

$$\eta_{\text{tot,situ}} = \eta_{\text{int}} + c \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (2.31)$$

Die experimentelle Ermittlung erfolgt über die Messung der Körperschall-Nachhallzeit T_s (Abklingmethode) nach der DIN EN ISO 10848-1:2006-08 [4]. So kann aus der Körperschall-Nachhallzeit der Gesamtverlustfaktor η_{tot} nach Gleichung (2.32) bestimmt werden [76].

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{\ln(10^6)}{2\pi} \frac{1}{f T_s} \approx \frac{2,2}{f T_s} \quad (2.32)$$

2.3.2 Prognose der Schallübertragung des direkten Übertragungsweges Dd

Der direkte Übertragungsweg für Luft- und Trittschall wird nach Gleichung (2.33) bzw. (2.34) berechnet aus dem Prognoseanteil des Trennelementes und der zu erwartenden Verbesserung durch Vorsatzschalen $\Delta R_{i,\text{situ}}$ bzw. eines Bodenaufbaus ΔL_{situ} oder Unterdecke $L_{d,\text{situ}}$.

$$R_{Dd} = R_{s,\text{situ}} + \Delta R_{D,\text{situ}} + \Delta R_{d,\text{situ}} \quad (2.33)$$

$$L_{n,Dd} = L_{n,\text{situ}} - \Delta L_{\text{situ}} - L_{d,\text{situ}} \quad (2.34)$$

Die Adaption der Dämpfung der Eingangswerte R und L_n , welche aus Prüfstandmessungen oder Simulationen stammen, auf die zu erwartende Dämpfung der Bausituation erfolgt dabei mit Gleichung (2.35) und (2.36).

$$R_{\text{situ}} = R - 10 \lg \left(\frac{\eta_{\text{tot,lab}}}{\eta_{\text{tot,situ}}} \right) \quad (2.35)$$

$$L_{n,\text{situ}} = L_n + 10 \lg \left(\frac{\eta_{\text{tot,lab}}}{\eta_{\text{tot,situ}}} \right) \quad (2.36)$$

2.3.3 Prognose der Schallübertragung der indirekten Übertragungswege ij

Eine Darstellung des Berechnungsvorgangs für einen exemplarischen flankierenden Übertragungsweg erfolgt in Abbildung 17. Abhängig vom typischen Dämpfungsverhalten der Bauteile wird das Prognoseverfahren in zwei Fälle unterschieden:

- (a) Bauteile für die der Gesamtverlustfaktor durch die verbundenen Bauteile dominiert wird

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

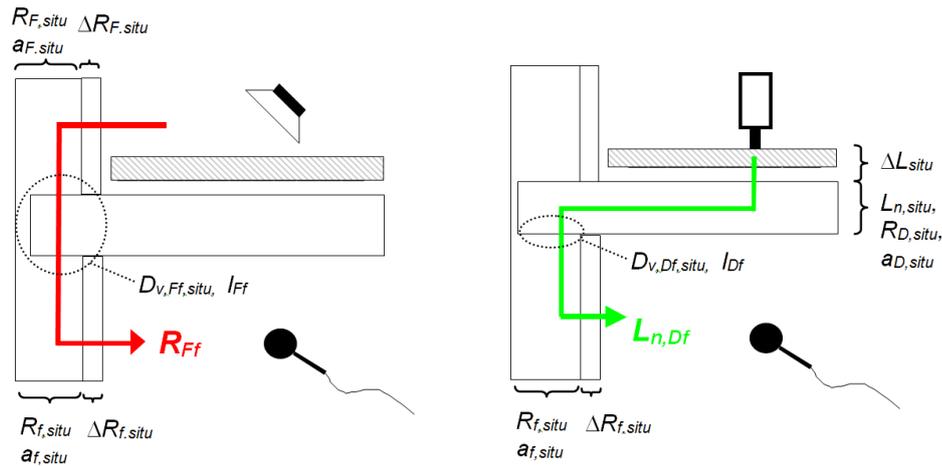


Abbildung 17 Eingangsgroößen zur Berechnung des Flankendämm-Maßes R_{Ff} bei Luftschallanregung (links) und zur Flankenübertragung $L_{n,Df}$ bei Trittschallanregung (rechts).

(b) Weitere Bauteile, bei der die Bauteildämpfung groß ist gegenüber der Bedämpfung am Bauteilrand. Folgende Bauteile weisen häufig diese Eigenschaften auf:

- zweischalige Leichtbauteile, z.B. Holz- oder Metallständerwände
- Bauteile mit einem inneren Verlustfaktor $\eta_{\text{int}} \geq 0,03$
- Bauteile, die mindestens um den Faktor drei leichter sind als die umgebenden Bauteile
- Bauteile, die nicht fest mit den umgebenden Bauteilen verbunden sind

(a) **Bauteile, für die der Gesamtverlustfaktor durch die verbundenen Bauteile dominiert wird.** Die Anteile auf den jeweiligen Schallübertragungswegen über die flankierenden Wände und den gemischten Übertragungswegen werden nach (2.37) und (2.38) ermittelt. Für die Luftschallübertragung werden die prognostizierten Flankendämm-Maße $R_{ij} = R_{Ff}, R_{Fd}, R_{Df}$ aus den auf die Bausituation angepassten Schalldämm-Maßen $R_{i,situ}$ des i -ten Grund-Bauteils (F oder D) und $R_{j,situ}$ des j -ten Grund-Bauteils (f oder d), der Verbesserungen $\Delta R_{i,situ}$ und $\Delta R_{j,situ}$ durch ggf. auf dem Übertragungsweg vorhandener Vorsatzschalen (Installationsebenen, schwimmende Estriche, Unterdecken), der für die Bausituation zu erwartenden Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij,situ}}$ und der Flächenkorrekturen für das Trennbauteil

S_S und der flankierenden Bauteile S_i, S_j bestimmt.

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_S}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \quad (2.37)$$

Für die Flankenübertragung bei Trittschallanregung $L_{n,ij}$ wird zusätzlich der Norm-Trittschallpegel der Decken-Grundkonstruktion (Rohdecke ohne Unterdecke) $L_{n,situ}$ um die Verbesserung ΔL_{situ} durch den ggf. vorhandenen schwimmenden Estrich reduziert.

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \lg \left(\sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \quad (2.38)$$

Auch die in den Gleichungen (2.37) und (2.38) verwendeten Schalldämm-Maße $R_{i,situ}, R_{j,situ}$ und der Norm-Trittschallpegel $L_{n,situ}$ sind nach Gleichung 2.35 und 2.36 bereits hinsichtlich ihrer Dämpfung auf die Bausituation angepasst.

Der charakteristische Kennwert für die Stoßstelle ist das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} . Dieses ist ein Eingangswert für die Prognoseberechnung zur Flankenübertragung, welches ebenfalls aus Prüfstandsmessungen (3.1) oder aus theoretischen Berechnungen stammen kann. Für die Adaption dieses Kennwertes auf eine konkrete Bausituation muss sowohl die Geometrie als auch Dämpfung umgerechnet werden. Der auf die Bausituation angepasste Wert ist die prognostizierte Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij,situ}}$. Die Umrechnung vom Stoßstellendämm-Maß K_{ij} für dem Flankenübertragungsweg ij erfolgt mit Gleichung (2.39) und den äquivalenten Absorptionslängen⁹ $a_{i,situ}$ und $a_{j,situ}$ nach (2.40). Dabei werden die gemeinsame Kopplungslänge l_{ij} , die Bauteilflächen S_i und S_j und die zu erwarteten Gesamtverlustfaktoren der beteiligten Bauteile für die zu planende Bauteilsituation verwendet.

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \lg \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} \cdot a_{j,situ}}} \right) \quad (2.39)$$

$$a_{i,situ} = \frac{2,2 \pi^2 S_i}{c_{air} T_{S,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} = \sqrt{f_{ref} f} \frac{\pi^2}{c_{air}} S_i \eta_{tot,i,situ} \quad (2.40)$$

(b) Weitere Bauteile bei denen davon auszugehen ist, dass die Bauteildämpfung groß ist im Vergleich zur Bedämpfung am Bauteilrand, so kann die Randbedämpfung vernachlässigt werden. Die äquivalente Absorptionslänge a_{situ} ist proportional

⁹Die äquivalente Absorptionslänge a_j ist die Länge einer fiktiven, vollständig absorbierenden Stoßstelle des Bauteils j , wenn deren Grenzfrequenz mit $f_{ref} = 1000$ Hz angenommen wird, wobei sie den gleichen Verlust ergibt wie die Gesamtverluste des Bauteils j in einer gegebenen Situation. [4]

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

und sogar zahlenmäßig gleich der Fläche des Bauteils anzunehmen, so dass $a_{i,\text{situ}} = \frac{S_i}{l_0}$ und $a_{j,\text{situ}} = \frac{S_j}{l_0}$ gilt; dabei ist die Bezugslänge $l_0 = 1$ m. Gleichung (2.37) und (2.38) vereinfachen sich nach [6, 94] dadurch zu:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,\text{situ}}}{2} + \Delta R_{i,\text{situ}} + \frac{R_{j,\text{situ}}}{2} + \Delta R_{j,\text{situ}} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \lg\left(\frac{S_S}{l_0 l_{ij}}\right) \quad (2.41)$$

$$L_{n,ij} = L_{n,ii} - \Delta L_i + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,n}} - 10 \lg\left(\frac{S_i}{l_0 l_{ij}}\right) \quad (2.42)$$

Dabei wird statt dem Stoßstellendämm-Maß wie in Abschnitt (a) die normierte und richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij,n}}$ genutzt. Die Ermittlung der normierten, richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz kann entweder nach (2.43) erfolgen

$$\overline{D_{v,ij,n}} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \lg\left(\frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_{i,\text{situ}} \cdot S_{j,\text{situ}}}}\right) \quad (2.43)$$

oder für Bauteile mit einer hohen Ausbreitungsdämpfung und einer entsprechend geringen Körperschall-Diffusität nach Gleichung (2.44) erfolgen.

$$\overline{D_{v,ij,n}} = K_{ij,\text{junction}} + 10 \lg\left(\sqrt{\frac{\delta_i \cdot \delta_j}{C}}\right) \quad \text{mit } C = 1 \text{ dB/m} \quad (2.44)$$

Die Ausbreitungsdämpfung δ kann messtechnisch bestimmt oder berechnet werden, siehe dazu auch [105, 106]. Sie beschreibt die Abnahme der Schnellepegel zwischen zwei Positionen aufgrund der räumlichen Ausbreitung der Schwingungen. Somit kann sie als

$$\delta = \frac{\Delta L_v}{\Delta r} = \frac{L_{v,m} - L_{v,n}}{r_m - r_n} \quad (2.45)$$

definiert werden. Dabei ist Δr der Entfernungsunterschied von zwei Messpunkten m und n bezogen auf den Kraffteinleitungspunkt.

Die experimentellen Ergebnisse in Abschnitt 3.5 weisen darauf hin, dass die Brettsperrholzbauweise zur ersten Gruppe gehört. Aus diesem Grund werden ausführliche Messungen zu Stoßstellendämm-Maßen mit Detaileinflüssen (Elastomer, Verbindungsmittel, Pressung der Stoßfuge) am Stoß in diesem Bericht dokumentiert und in dem Bericht vom ift Rosenheim eine große Anzahl von Konstruktionen in der Massivholz-Bauweise [59].

2.4 Anbindung der Planung an den Gesamtplanungsprozess

Die Optimierung des Planungsprozesses war ein zentrales Ziel dieses Forschungsprojektes. Zur Erreichung dieses Ziel war es erforderlich, dass dem Planer bereits in einem frühen Planungsstadium die Holzmassivbau-spezifischen Kennwerte und ein Berechnungsprogramm für die Schallschutzprognose nach dem Verfahren der EN 12354 und zur Schwingungsprognose von Decken sowie dem Gesamtgebäude zur Verfügung stehen.

Am ift Rosenheim wurde dazu ein Schallschutzrechner VBACOUSTIC und an der Hochschule eine Datenbank VABDAT zur Kennwertverwaltung entwickelt, welche Besonderheiten des Holzmassivbaus berücksichtigen. Am Lehrstuhl für Computation in Engineering und dem Lehrstuhl für Numerische Mathematik der Technischen Universität München Teilprojekt 2 und 1 wurden die Methoden zur automatischen Vernetzung von Gebäuden als Grundlage für eine FE-Berechnung weiterentwickelt, um aus einem Bauwerksinformationsmodell (BIM) heraus eine Schwingungsprognose durchführen zu können. Die Entwicklungen zeigen beispielhaft, welche Informationen und Berechnungen notwendig sind, um die Schallschutzprognose und Schwingungsprognose von Gebäuden im Holzmassivbau im Sinne einer integralen Planung mit einem BIM durchzuführen.

Der Zusammenhang zwischen dem Architektenentwurf, der Datenbank, den Berechnungsverfahren und den Nachweisen ist in Abbildung 18 dargestellt. Ausgangspunkt ist der Architektenentwurf, der in 3D gezeichnet und in ein BIM überführt wird. Sobald erste Konstruktionsvorgaben im Modell vorliegen, kann der Schallschutzfachplaner durch Zuweisung von konkreten Bauteilaufbauten und Anschlüssen aus der Datenbank VABDAT die Schallschutzprognose nach der EN 12354 mithilfe des Programmes VBACOUSTIC für verschiedene Zweiraumsituationen berechnen. Im tieffrequenten Bereich wird mit ADHOC die Finite-Elemente Methode ergänzend genutzt, um auch dort eine geringe Prognoseunsicherheit zu erreichen. Werden die Anforderungen durch die vorgeschlagenen Konstruktionen eingehalten, können diese Ergebnisse und der Datenbank-konforme Bauteilschlüssel im Modell hinterlegt werden, so dass abhängige Fachplaner informiert sind.

Neben den Schallschutzaussagen können mithilfe der geometrischen Informationen und den Materialkennwerten im Modell auch Berechnungen für den Schwingungsnachweis mithilfe der Finiten-Elemente Methode durchgeführt werden. Dazu wird mit TUM GEOFRAME zunächst eine Bauwerksvernetzung automatisch vorgenommen und anschließend mithilfe der Materialdaten, die aus der Datenbank VABDAT abgerufen werden, die Eigenfrequenzen des Gesamtgebäudes berechnet. Falls die Anforderungen im Schallschutz oder im Schwingungsschutz nicht erfüllt

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

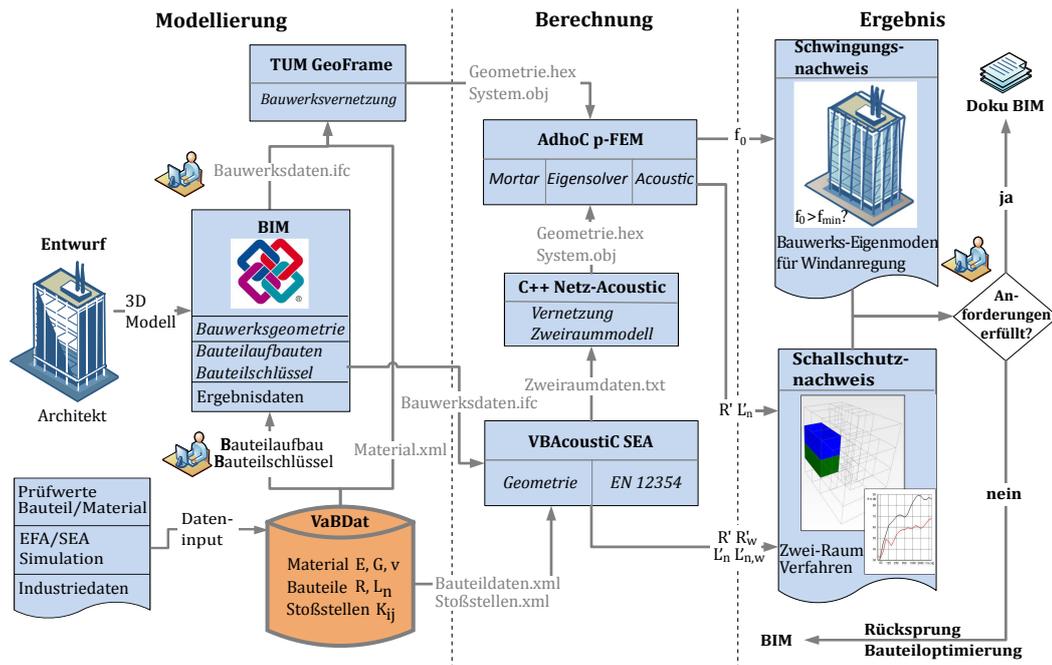


Abbildung 18 Angestrebter Berechnungsablauf im Planungsprozess für ein Bauwerk in Geschossbauweise.

werden oder durch den Einfluss anderer Disziplinen Änderungen notwendig sind kann eine Neuberechnung erfolgen.

2.4.1 Kategorisierung der Bausituation für die Schallschutzprognose

Der Fachplaner hat die Aufgabe für eine Bausituation Vorschläge für Konstruktionen und Anschlussdetails in Hinblick auf die Schallschutzziele zu machen. Dabei ist es notwendig die Bausituation hinsichtlich schalltechnisch relevanter Aspekte, wie Massen- und Steifigkeitsverhältnisse, zu kategorisieren. Der gesamte Holzbau lässt sich nach [107] in die drei übergeordneten Konstruktionsprinzipien ordnen. Das sind die ingenieurmäßige Skelettbauweise, die Holzrahmenbauweise und die Massivholz-Bauweise. In diesem Forschungsprojekt wurde hauptsächlich die Massivholz-Bauweise behandelt.

In [32, 33, 108] sind typische Konstruktionen aus dem Massivholzbau gesammelt und kategorisiert. Eine Zusammenstellung von Materialkennwerten zu typischen Baustoffen und Bauprodukten aus [32] findet sich im Anhang C. Aus dem architektonischen Entwurf, der Wahl der Bauweise und den statistischen Anforderungen ergeben sich unterschiedliche Bauteilanschlüsse. Dabei kann zunächst die rein geometrische Anordnung der Bauteile zueinander, wie z. B.

2.4 Anbindung der Planung an den Gesamtplanungsprozess

- L-Stoß / Eckstoß,
- T-Stoß und
- X-Stoß

unterschieden werden.

Im Gegensatz zum Mauerwerks- und Betonbau sind die Varianten in der Ausführung der Bauteilverbindungen untereinander vielfältiger. Die Schallübertragung einer durchlaufenden Decke ist deutlich höher als bei einer Ausführungsvariante bei dem die Decke mit einer Trennfuge konstruktiv getrennt ist. Außerdem kann die Schallübertragung durch den gezielten Einsatz von Elastomerlagern und elastisch gelagerten Verbindungsmitteln weiter reduziert werden. Damit sind neben der geometrischen Anordnung der Bauteile zueinander auch die

- Art der Bauteileinbindung,
- Art der Verbindungsmittel zur Bauteilkopplung und
- die Verwendung von Elastomerlagern

bei der schalltechnischen Kategorisierung für die Bausituation zu berücksichtigen.

Bei den Bauteilen kann die tragende Bauteilschicht einem Konstruktionsprinzip zugeordnet werden. Abbildung 19 zeigt schematisch Grundelementtypen von Decken aus dem Massivholzbau und der Holzrahmenbauweise. Daneben ist bei der Anordnung von Vorsatzschalen und Estrichkonstruktionen vor diesen Grundelementen die flächenbezogene Masse und die Steifigkeit einer Zwischenschicht (z. B. Trittschalldämmung) von Bedeutung. Ein Beispiel zur Kurzbeschreibung einer Deckenkonstruktion für die Schallschutzplanung ist in Tabelle 2 gegeben. Für jede Materialschicht ist die wesentliche physikalische Eigenschaft für den Schallschutz aufgeführt. In dem Beispiel dient die Schüttung zur Beschwerung der Rohdecke und der Körperschalleintrag vom Zementestrich zur Rohdecke wird über eine

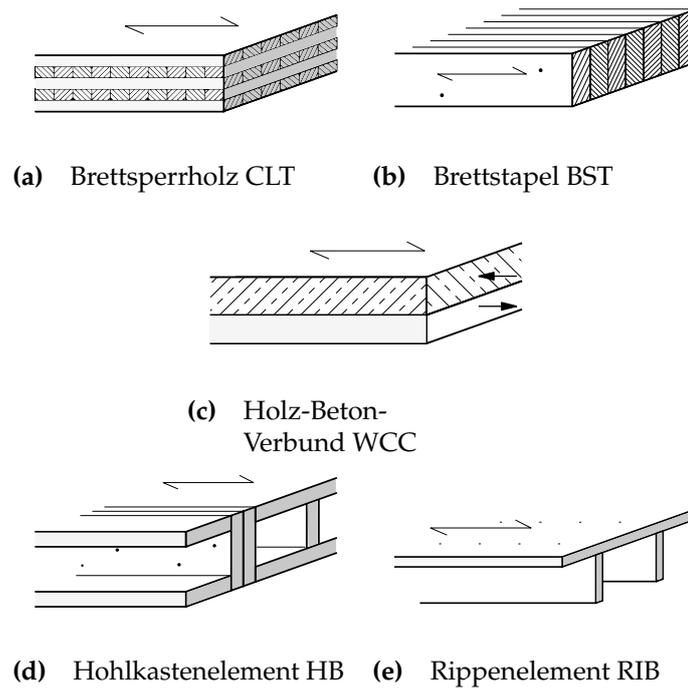
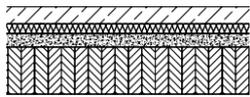


Abbildung 19 Grundelemente von Decken in Massivholz-Bauweise (oben) und in der Holzrahmenbauweise (unten). Die Abkürzungen basieren auf den englischen Begriffen und werden in der Datenbank VABDAT verwendet.

2.4 Anbindung der Planung an den Gesamtplanungsprozess

Trittschalldämmung mit geringer dynamischen Steifigkeit s' reduziert.

Tabelle 2 Bauteilbeschreibung einer Trenndecke^a mit Zementestrich [37] mit $m'_{\text{tot}} = 235 \text{ kg/m}^2$ und $z_{\text{tot}} = 232 \text{ mm}$. Der Bauteilschlüssel konform zur Datenbank VABDAT lautet B_sCE50_ipMF5_wL69_bBST120 und setzt sich aus Informationen zu den Einzelschichten zusammen.

Zeichnung	Dicke	Material	R_w	$L_{n,w}$
			($C_{50-5000}$; $C_{tr,50-5000}$)	($C_{1,50-2500}$)
	in mm		in dB	in dB
	50	Zementestrich $m' = 105 \text{ kg/m}^2$	68 (-7; -20)	46 (5)
	35/30	Trittschalldämmung MW-T $s' = 5 \text{ MN/m}^3$		
	27	Schüttung $m' \approx 69 \text{ kg/m}^2$		
		Rieselschutz		
	120	Brettstapeldecke, genagelt $m' \approx 59 \text{ kg/m}^2$		

^a ift Rosenheim / Scholl 2005

2.4.2 Kennwertverwaltung in der Datenbank VaBdat

Für eine Schallschutzprognose von Gebäuden steht dem Planer das Verfahren aus der EN 12354 (Abs. 2.3) zur Verfügung. Mithilfe der Bauteileigenschaften und Flankensituationen kann eine Berechnung für die Luft- und Trittschalldämmung durchgeführt werden. Insbesondere bei der praktischen Anwendung in der Massivholz-Bauweise fehlen dem Planer dafür häufig notwendige Eingangsgrößen, um die Eigenschaften üblicher Bauprodukte, Bauteile und Stoßstellen zu beschreiben. Die webbasierte Datenbank www.VaBdat.de bietet dem Fachplaner die Möglichkeit, diese Eingangsgrößen über die kategorisierte Bausituation in Abschnitt 2.4.1 abzufragen und in den Programmen zur Schallschutz- und Schwingungsprognose weiter zu verwenden, siehe Abbildung 18.

Struktur und Inhalt

Die logische Struktur der relationalen Datenbank unterscheidet die Bausituation im Wesentlichen in

1. Bauprodukte bzw. Baustoffe,
2. Bauteile und
3. Stoßstellen.

In der ersten Ebene sind Kenngrößen enthalten zu Bauprodukten/-stoffen, wie z. B. richtungsabhängige E-Moduln, Koinzidenz-Grenzfrequenzen, interne Verlustfaktoren von Plattenmaterialien oder dynamische Steifigkeiten von Trittschalldämmungen. Beim Anlegen von Bauprodukten können Materialmodelle (z. B. isotrop, orthotrop) unterschieden werden. Zulassungen und technische Datenblätter der Hersteller können als Dateianlage ergänzt werden.

In der zweiten Ebene werden aus Bauprodukt-Kombinationen Bauteile zusammengesetzt. Den Bauteilen können konstruktive Details, wie z. B. die Art der Verbindung zwischen den Schichten, und schalltechnische Kennzahlen, wie z. B. Einzahlwerte und frequenzabhängige Schalldämm-Maße R und Norm-Trittschallpegel L_n , zugeordnet werden. Die Informationen zu den Bauteilen kommen aus Prüfzeugnissen oder sind Teil des durchgeführten Messprogrammes dieses Forschungsprojektes.

Zuletzt werden in einer dritten Ebene Stoßstellen aus Bauteil-Kombinationen gebildet und mit Kennzahlen, wie frequenzabhängige Schnellepegeldifferenzen $\overline{D}_{v,ij}$ und Stoßstellendämm-Maßen K_{ij} , versehen. Ergänzende Informationen zur Ausbildung der Stoßstelle, wie z.B.

- verwendete Elastomere,
- Pressung der Elastomere,
- die Kopplungslänge,
- Verbindungsmittel

können ebenfalls hinterlegt werden.

Der aktuelle Datenbestand zu Stoßstellen stammt überwiegend aus Messungen (Massivholz-Bauweise) des Forschungsprojektes und wird um gemessenen Stoßstellendämm-Maßen anderer Institute aus [33] erweitert. Stoßstellen aus dem Holzrahmenbau und der Skelettbauweise sind nicht enthalten. Die Datenbank bietet eine strukturierte und transparente Ablage von Planungsgrößen. Für eine

breite Abdeckung von Bausituationen ist die Erweiterung des Datenbestandes durch Ergebnisse weiterer Institute oder durch die Industrie und den Ergebnissen von Simulationen erforderlich. Sowohl aus der EFA- als auch der SEA-Methode in Abschnitt 2.2.2 können Kopplungsverlustfaktoren berechnet und in der Datenbank hinterlegt werden. Daraus können die bauüblichen Stoßstellendämm-Maße K_{ij} nach (3.2) berechnet werden.

Verwendung

Bei dem Zugriff auf die Datenbank über die Homepage werden ein öffentlicher und ein interner Bereich unterschieden. Für den öffentlichen Bereich wird keine Benutzerauthentifizierung benötigt. Dort können Daten eingesehen und exportiert werden, die nach einer Plausibilitätsüberprüfung durch die Hochschule Rosenheim freigegeben wurden. Die sachgerechte Anwendung der Informationen bleibt Aufgabe des Anwenders. Zur Nachvollziehbarkeit und Bewertung der Datenherkunft sind die Quellen angegeben und ggf. als Datei beigefügt.

Zur einheitlichen Beschreibung der Bauprodukte, Bauteile und Stöße für die Bausituation werden auf VABDAT Kürzel verwendet. Die Kürzel basieren aus einer Kombination von Abkürzungen von englischen Begriffen und Kennzahlen. Die Deckenkonstruktion in Tabelle 2 würde dem Bauteilschlüssel

B_sCE50_ipMF5_wL69_bBST120

in der Datenbank entsprechen. Die Systematik dieser Kürzel ist im Hilfebereich der Homepage beschrieben¹⁰. Um Daten aus der Datenbank weiter zu verwenden gibt es

1. die indirekte Abfrage über eine Anwendung und
2. die direkte Abfrage über die Homepage.

Für den Datenaustausch sind *Representational State Transfer* (REST)-Schnittstellen implementiert worden [56]. Als Dateiformat werden XML-Dateien verwendet. In Abbildung 18 sind die für den angestrebten Planungsprozess verwendeten Programme beispielhaft für die indirekte Abfrage aus einer Anwendung heraus. Dabei wird der Benutzer aufgefordert die Bausituation über eine Benutzeroberfläche einzuschränken. Im Hintergrund wird daraus eine URL¹¹ als Zugriffsschlüssel zusammengesetzt und bei erfolgreicher Rückmeldung werden die Daten über eine XML-Datei in die Anwendung geladen.

¹⁰https://www.vabdat.de/documents/Support/Abbreviation/Abbreviation_Def.pdf

¹¹Uniform Resource Locator

2 Prognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse

Die Umsetzung für den indirekten Zugriff über das Programm VBACOUSTIC ist im Teilbericht des ift Rosenheim beschrieben [59]. In [9, 58] wurde dieses Programm mit der Verwendung von Daten aus VABDAT für eine exemplarische Schallschutzprognose durchgeführt. Prinzipiell eignen sich auch eine Vielzahl von anderen Programmen für den indirekten Zugriff, da der öffentlichen Bereich der Daten keine Benutzerauthentifizierung erfordert und XML-Dateien von vielen Programmen verarbeitet werden können.

Mit dem direkten Zugriff über die Homepage (Abbildung 20) kann über eine Schaltfläche mit der Beschriftung XML eine Exportdatei für einen einzelnen Datensatz (Stoßstelle, Bauteil oder Material) auch direkt im Browser aufgerufen werden und abgespeichert werden. Damit ist es auch möglich, dass der Nutzer eigene Programme (z. B. Berechnungsschema in einer Tabellenkalkulation) für die Verwendung der Daten anpasst.

2.4 Anbindung der Planung an den Gesamtplanungsprozess

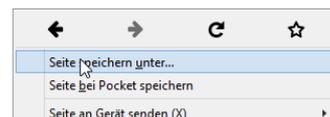
Id	Kürzel	Dicke in m	Einsatzort	Bauweise	Export
65	B_bBST80_bOSB15_bGF12	0.107	Innenwand	brettstapel (BST)	XML
92	B_bCB19	0.019	Sonstiges	timber frame construction (TFC)	XML
86	B_bCLT100	0.1	Innenwand	cross laminated timber (CLT)	XML

(a) Übersicht zu den Bauteilen

```

- <response>
- <Bauteil>
  - <Stammdaten>
    <id>73</id>
    <name>B_sCE50_ipMF7_bCLT160</name>
    <dicke>0.25</dicke>
    <flaechenMasse>197</flaechenMasse>
    <quelle>ift Rosenheim</quelle>
    <quellenart>Forschungsbericht Vibroakustik</quellenart>
    <quellenreferenznummer>1a_A_03_05</quellenreferenznummer>
    <kuerzel>B_sCE50_ipMF7_bCLT160</kuerzel>
    <einsatzort>Trenndecke</einsatzort>
    <bauweise>cross laminated timber (CLT)</bauweise>
    <hersteller>ift Rosenheim</hersteller>
  - <Stammdaten>
  - <BauteilKennzahl>
    <institution>HS Rosenheim</institution>
    <jahrDatenerhebung>2015</jahrDatenerhebung>
    <herkunftsart>keine Angabe</herkunftsart>
  - <BauteilKennzahl>
  - <BauteilBauprodukt>
    <bauprodukt_id>1</bauprodukt_id>
    <bauprodukt_name>Zementestrich</bauprodukt_name>
    <bauprodukt_kuerzel>M_sCE50</bauprodukt_kuerzel>
    <schicht>1</schicht>
  - <BauteilBauprodukt>

```



(b) XML-Exportdatei im Browser

Abbildung 20 Zugriff auf Bauteildaten der Datenbank über die Homepage.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Prüfstand

Die Messungen wurden im Gebäude G der Hochschule Rosenheim durchgeführt.

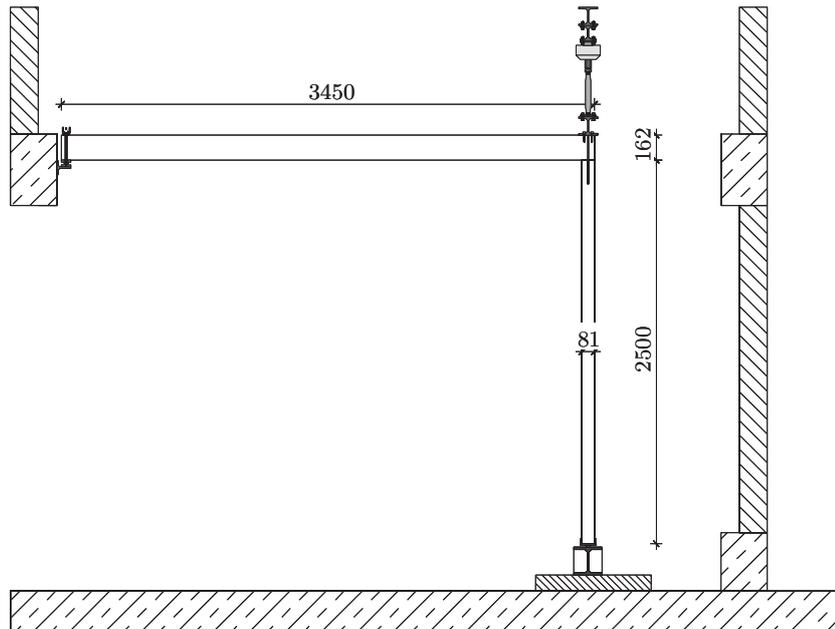
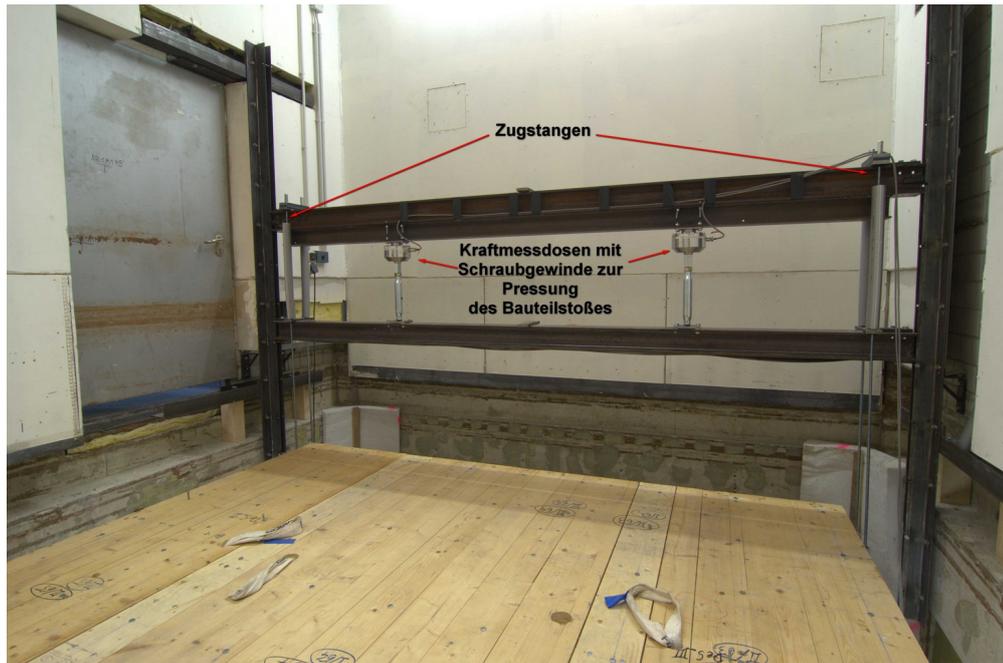


Abbildung 21 Der Messaufbau zeigt schematisch den L-Stoß aus Brettsperrholz-Elementen im Prüfstand der Hochschule Rosenheim.

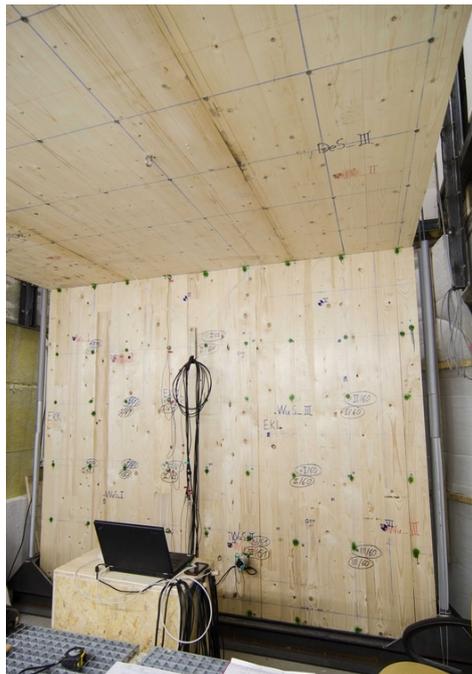
3.1.1 Einrichtung zur Pressung des Bauteilstoßes

Für Untersuchungen an den Bauteilstößen in Abhängigkeit von der Stoßstellenpressung ist eine Einrichtung zur Pressung (Abb. 22a) im Labor für Schallmesstechnik entwickelt worden. Diese Einrichtung ermöglicht linienförmige Pressungen der Stoßstelle bis 20 kN/m. Dazu werden zwei Druckstempel mit jeweils einer Kraftmessdose in einer Stahl-Rahmenkonstruktion verspannt. Über seitlich angeordnete Zugstäbe wird der Träger des unteren Wandauflegers mit dem oberen Träger verbunden und die Zugkräfte übertragen. Die Höhe der eingespannten Bauteilkombination ist dabei variabel einstellbar bis maximal 5,5 m.

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Ansicht von oben



(b) Ansicht von unten

Abbildung 22 Fotos vom L-förmigen Messaufbau im Prüfstand der Hochschule Rosenheim.

3.1.2 Ausbildung der gelenkigen Bauteilauflager

Zur Nachbildung der Prüfsituation in einem Finiten-Elemente-Modell ist es notwendig, die Randbedingungen im Prüfstand bei den idealisierten Randbedingungen in dem FE-Modell abbilden zu können. Mithilfe von Halbrundstählen und Flachovalen in Abbildung 23 (b) und 23 (a) soll eine *ideal, gelenkige* Lagerung weitestgehend erreicht werden.

Wandaufleger Das untere Ende der Wand ist in einem Stahl U-Profil eingefasst. An diesem U-Profil ist eine durchgehende, angeschraubte Stahl-Halbwelle zur gelenkigen Lagerung der Wand befestigt. Abbildung 23 (b) zeigt die direkte Lagerung, wie sie im Projekt verwendet wurde. Dabei wird die Last der Wand linienförmig in den Doppel-T-Träger eingeleitet. Durch die Anordnung der Flachovale wird eine Zentrierung der Wand mittig auf den Doppel-T-Träger gewährleistet.

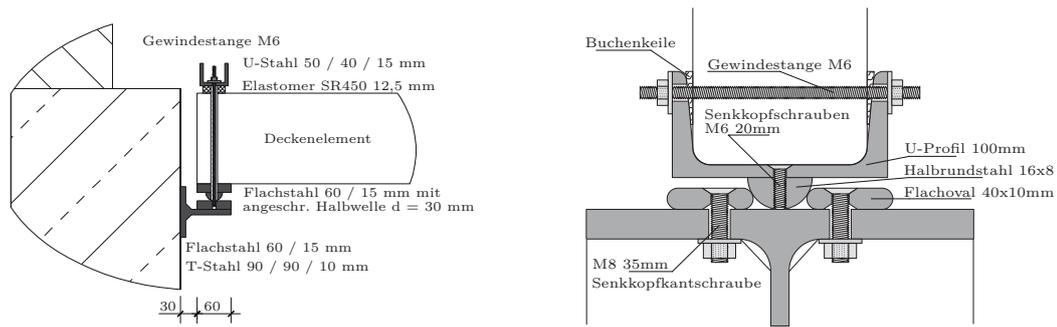
Der Träger in Abbildung 23 (c) ist für die optionale Wandpressung (Abs. 3.1.1) erforderlich. Dieser steht auf einer ca. 5 cm starken Estrichschicht, die direkt auf den Beton Rohboden des Prüfstandes zum Ausgleich von Unebenheiten aufgebracht wurde. Um einen Einfluss auf die Betriebsschwinganalyse zu minimieren wurde der Träger mit eingeschweißten Stahlelementen versteift und mit dem Rohboden verschraubt. Im Rahmen einer Modalanalyse ist die Versteifung des Trägers so ausgelegt worden, dass die erste Eigenfrequenz des unteren Trägerelementes oberhalb von 400 Hz liegt.

Deckenaufleger Die Auflager der Brettsperrholz Decke und dem Prüfstand ist ebenfalls gelenkig mit einer Stahl-Halbwelle ausgeführt. Die Auflagerkonstruktion ist in einem vorausgegangenem Forschungsprojekt [109] entwickelt und angewendet worden. Eine Abweichung stellt die Verwendung einer Stahl-Halbwelle anstelle eines Elastomer Streifens unterhalb der Decke in Abbildung 23 (a) dar. Über die Verschraubung des U-Stahles wirkt auf die Decke eine resultierende, linienförmige Einspannung von 20 kN/m.

3.2 Messtechnik

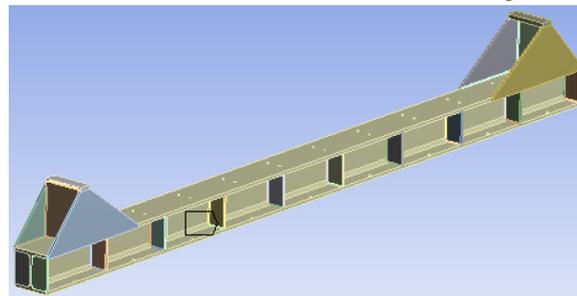
Zur Datenerfassung für die Messungen in Kapitel 3.4.1, 3.4.3 und 3.4.4 steht ein Mehrkanalmesssystem der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) zur Verfügung. Mit den acht Messkanälen besteht u. a. die Möglichkeit einfache Spannungssignale zu messen. Des Weiteren können über eine zugeschaltete Spannungsversorgung IEPE-Sensoren verwendet werden. Das Messgerät ist über eine Ethernet

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Gelenkiges Deckenaufleger

(b) Halbwelle direkt auf Doppel-T-Träger, seitlich gehalten



(c) Ansicht des unteren, ausgesteiften Trägers

Abbildung 23 Ausbildung des Deckenauflegers und des unteren gelenkigen Wandauflegers. Die Decke wird zwischen einer U-Schiene mit einem Elastomer Streifen und einer Stahl-Halbwelle auf einer T-Konsole verspannt.

Verbindung direkt mit einem Messrechner verbunden. Mit dem Messsystem und der dazugehörigen Messsoftware CATMAN EASY können Zeitrohdaten erfasst werden. Für die weitere Verarbeitung wird der Datenexport nach MATLAB[®] genutzt.

Bei der Messung der Körperschall-Nachhallzeiten in Kapitel 3.4.2 erfolgt die Datenerfassung über eine externe Soundkarte. Die Soundkarte wird über eine USB Verbindung mit dem Messrechner genutzt. Als Mess- und Auswertesoftware wird das Programm M | REVERB von MÜLLER BBM verwendet.

Für die Ermittlung der Messgrößen Kraft und Beschleunigung kommen IEPE-Sensoren zum Einsatz. Die Typbezeichnungen der Sensoren sind Tabelle 3 zu entnehmen. Für die Beschleunigungen an der Bauteiloberfläche wurden Aufnehmer mit einer Sensitivität von $S_v \approx 10 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ verwendet. Zur Ermittlung der Pressung in der Stoßfuge sind zwei Kraftmessdosen in die Einrichtung aus Kapitel 3.1.1 eingebaut. Für die *Power Injection Method* (PIM) ist die Ermittlung der eingebrachten Leis-



Abbildung 24 Anbindung des Impedanzmesskopfes an die Struktur.

tung¹ aus den Messgrößen Kraft und Beschleunigung am Krafteinleitungspunkt phasengenau zu bestimmen. Aus diesem Grund wird hier ein Impedanzmesskopf (Abb. 24) eingesetzt. Bei der Strukturanregung wurde je nach Messaufgabe entweder ein Interial-Schwingerreger, ein Modal-Schwingerreger oder ein Modalhammer genutzt. Die Messkette die am häufigsten in Projekt verwendet wurde ist in Abbildung 25 dargestellt. Die aufgelistete Messreihennummer MR dient dabei der Zuordnung zu den verschiedenen Messungen.

¹Detaillierte Untersuchungen zu Störeinflüssen bei der Leistungsbestimmung und zur Anbindung des Impedanzmesskopfes an die Struktur finden sich in [32].

3 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 3 Verwendete Messtechnik bei den Labormessungen

Gerät	Typ	Hersteller
Mehrkanaliges Messsystem	MX840A	HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK (HBM)
Mehrkanaliges Messsystem	PAK MKII	MÜLLER BBM VIBROAKUSTIK
Externe Soundkarte	UA1010 OCTACAPTURE	ROLAND CORPORATION
Kalibrator	4294	NORSONIC
Beschleunigungsaufnehmer	KS 77 C-100	METRA MESS- UND FREQUENZTECHNIK (MMF)
Beschleunigungsaufnehmer	KS 95 B-100	METRA MESS- UND FREQUENZTECHNIK (MMF)
Impedanzmesskopf	288D01	PCB PIEZOTRONICS
Kraftmessdosen	U10M	HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK (HBM)
Inertial-Schwingerreger	IV40	DATA PHYSICS
Verstärker	PA30E	DATA PHYSICS
Schwingerreger	4809	BRÜEL & KJÆR
Schwingerreger	51110	TIRA
Verstärker		FG ELEKTRONIK
Verstärker	BAA120	TIRA
Modalhammer	2304	ENDEVCO

Die Messung und Bewertung der Bauteil- und Stoßstellenkennwerte wurde nach den derzeit gültigen deutschen und internationalen Normen durchgeführt. Als wesentliche Norm zur Messung der Stoßstellendämm-Maße, der Schnellepegel-differenzen und der Körperschall-Nachhallzeit wurde die DIN EN ISO 10848 [4] verwendet.

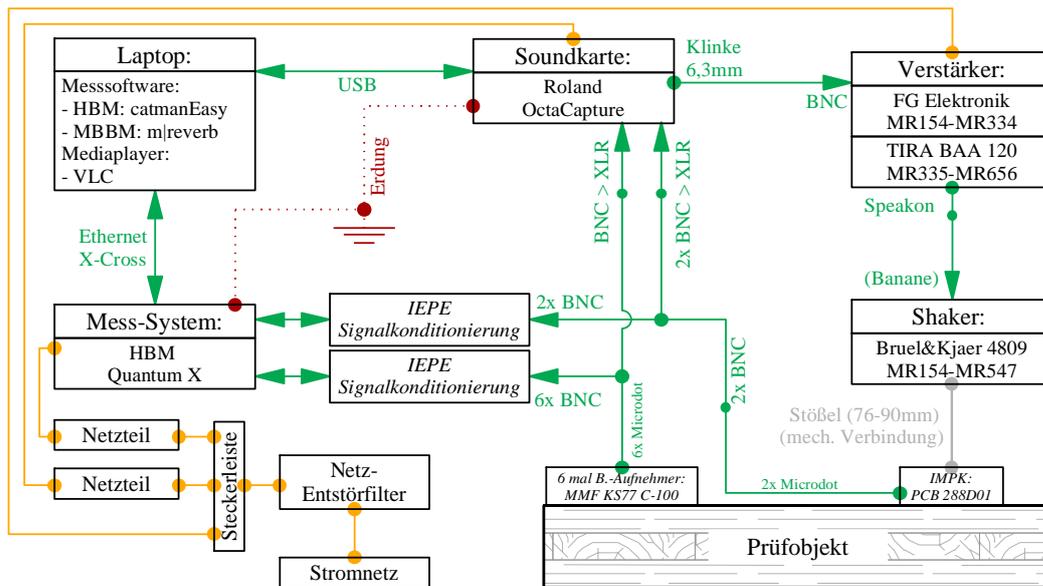


Abbildung 25 Die Messkette der Hardware für die Bestimmung der Stoßstellendämm-Maße. Diese Messkette wurde für die Messungen von MR154 bis MR547 genutzt (Messreihen in Tabelle 5). In grün sind Verbindungen von elektrischen Messsignalen mit Pfeilrichtung gekennzeichnet. Orange sind 230 V spannungsführende Netzversorgungen und in grau mechanische Verbindungen dargestellt.

3.3 Messobjekte

3.3.1 Brettsperrholz-Elemente

Brettsperrholz besteht aus einzelnen Brettschichten, die zueinander kreuzweise verleimt sind. Holz hat richtungsabhängige (anisotrope) Eigenschaften. Parallel zur Faserrichtung kann Holz die größten Zug- und Druckkräfte aufnehmen. Aus diesem Grund wird bei der Verwendung von Brettsperrholz-Elementen darauf geachtet, dass in der Deckschicht die Faserrichtung des Holzes parallel zur Haupttragrichtung liegt.

Wände 3S aus drei Einzelementen

Die Wandelemente 3S² sind aus drei Brettsperrholz-Elementen aus Fichte aufgebaut. Die Wände aus diesem Produkt sind bei allen Varianten 3,00 m breit und 81 mm stark (Tab. 4). An zwei Stellen gibt es eine Breitenverbindung mit einem verschraubten Deckbrett aus einem Furniersperrholz (Abb. 26c). Die Deckbretter sind mit Tellerbauschrauben 6 x 80 mm befestigt. Jedes der Einzelemente aus Brettsperrholz ist aus drei Brettschichten mit einer Schichtstärke von 27 mm aufgebaut (Abb. 26a). Zur Erstellung der BAUTEILE NR. 74 und 72 für den T-Stoß mit unterbrochener Wand wurde die Wand des durchlaufenden T-Stoßes (BAUTEIL NR. 70) aufgeteilt.

Wand 5S aus zwei Einzelementen

Das Wandelement 5S³ ist aus zwei Brettsperrholz-Elementen aus Fichte aufgebaut. Es ist insgesamt $x = 5,00$ m hoch, $y = 2,75$ m breit und $z = 105$ mm stark (Tab. 4). Mittig gibt es eine Breitenverbindung mit einem verschraubten Deckbrett aus einem Furniersperrholz (Abb. 26c). Die Deckbretter sind mit Tellerbauschrauben 6 x 80 mm befestigt. Beide Einzelemente aus Brettsperrholz sind aus fünf Brettschichten mit einer Deckschicht von 27 mm und drei inneren Schichten von jeweils 17 mm aufgebaut.

²dreischichtiges Brettsperrholz mit Handelsname LENO 81 von der MERK TIMBER GMBH;
Datenbank www.VaBDat.de: Bauprodukt/-stoff ID 36

³fünfschichtiges Brettsperrholz mit Handelsname LENO 105 - TYP 2 von der MERK TIMBER GMBH;
Datenbank www.VaBDat.de: Bauprodukt/-stoff ID 28

Decken 6S aus drei Einzelementen

Die Deckenelemente 6S⁴ sind aus drei Brettsperrholz-Elementen aus Fichte aufgebaut. Die Decken aus diesem Produkt sind bei allen Varianten 3,00 m breit und 162 mm stark. An zwei Stellen gibt es eine Elementverbindung mit einem verschraubten Deckbrett aus einem Furniersperrholz (Abb. 26c). Die Deckbretter sind mit Tellerbauschrauben 6 x 80 mm befestigt. Jedes der Einzelemente ist aus sechs Schichten aufgebaut. Die Schichtstärke ist jeweils 27 mm. Die Brettschichten haben eine zueinander senkrechte Faserrichtung, jedoch haben die beiden mittleren Schichten die gleiche Faserrichtung (Abb. 26b). Für die Decken mit der BAUTEIL NR. 71 und 73 wurde die Decke mit der BAUTEIL NR. 42 gekürzt. Diese Elemente

⁴sechsschichtiges Brettsperrholz mit Handelsname LENO 162 von der MERK TIMBER GMBH;
Datenbank www.VaBDat.de: Bauprodukt/-stoff ID 110

3 Experimentelle Untersuchungen

wurden schon in einem vorhergehenden Forschungsprojekt untersucht [109].

Tabelle 4 Abmessungen der zusammengesetzten Bauteile aus Brettsperrholz. [32, 39]

	Gesamtlänge x Deckschicht- Faserrichtung	Gesamtbreite y ⊥ Deckschicht- Faserrichtung	Gesamtdicke z	BAUTEIL NR.
	in mm	in mm	in mm	
Wand 5S (Voruntersuchung)	5000	2750 (1375 / 1375)	105 (27 / 3 × 17 / 27)	63
Wand 3S des L-Stoßes	2500	3000 (1100 / 800 / 1100)	81 (3 × 27)	56
Decke 6S des L-Stoßes	3450	3000 (813 / 1375 / 813)	162 (6 × 27)	42
Wand 3S des durchlaufenden T-Stoßes	5000	3000 (1100 / 800 / 1100)	81 (3 × 27)	70
Decke 6S des durchlaufenden T-Stoßes	3350	3000 (813 / 1375 / 813)	162 (6 × 27)	71
Wand unten 3S des unterbrochenen T-Stoßes	2495	3000 (1100 / 800 / 1100)	81 (3 × 27)	74
Wand oben 3S des unterbrochenen T-Stoßes	2318	3000 (1100 / 800 / 1100)	81 (3 × 27)	72
Decke 6S des unterbrochenen T-Stoßes	3350	3000 (813 / 1375 / 813)	162 (6 × 27)	73

3.3.2 L- und T-förmige Bauteilverbindungen

Der Einfluss von verschiedenen Verbindungsmitteln, den Einsatz von Elastomeren und der Bauteilstoßpressung auf die Schallübertragung ist an Varianten von T- und L-förmigen Bauteilverbindungen experimentell untersucht worden. Die Erkenntnisse aus den Messergebnissen werden zur Stoßstellenmodellierung im

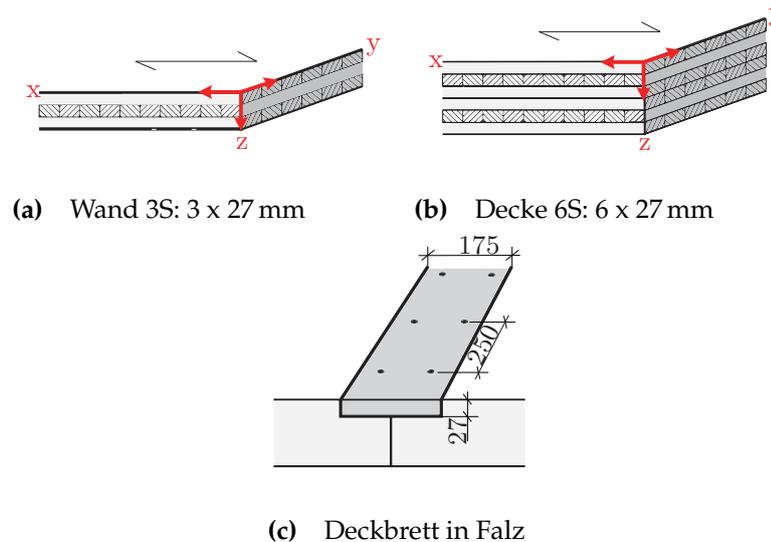


Abbildung 26 Schichtaufbau und Breitenverbindung der Brettsperreholzelemente

Arbeitspaket 3 benötigt. Die Berechnungsmethoden zur Schallschutzprognose erfordern zur Überprüfung verschiedene Messungen.

Für die FEM im tieffrequenten und die EFA im mittleren Frequenzbereich werden an den Bauteilen in einem Messraster Übertragungsfunktionen (3.5) gemessen. Zusätzlich werden für den gesamten bauakustischen Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz an den Bauteilen die Verlustfaktoren und Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$ nach [4] gemessen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Messungen, welche an den Stoßvarianten durchgeführt worden sind.

Tabelle 5 Übersicht zu den Messungen an den Stoßvarianten von L- und T-Stößen. Die Zeichnungen zu Mess- und Anregungspositionen befinden sich im Anhang.

Stoßart	Elastomer	Varianten	Messungen	STOSS NR. / Messreihe
L-Stoß	ohne	0 kN/m, verschraubt 15 N m	BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S3 MR154-178
		20 kN/m, verschraubt 15 N m	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S1 MR284-299

Fortsetzung nächste Seite ...

3 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 5 – Fortsetzung

Stoßart	Elastomer	Varianten	Messungen	STOSS NR. / Messreihe
		0 kN/m, verschraubt 15 N m	BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S2 MR180- 200
	GETZNER SYLODYN ND (grün)	20 kN/m, verschraubt 15 N m	BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S4 MR234- 249
		20 kN/m, opt. verschraubt 15 N m mit Elas- tomerscheibe	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S5 MR300- 315
		10 kN/m, verschraubt 15 N m	BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S6 MR251- 267
	GETZNER SYLODYN NC (gelb)	10 kN/m, opt. verschraubt 15 N m mit Elastomerscheibe	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S7 MR316- 331
	GETZNER SYLODYN NE (blau)	20 kN/m, verschraubt 15 N m	BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S8 MR268- 283
	BSW REGUFOAM 570PLUS (rosa)	20 kN/m, verschraubt 15 N m	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen WuSPII, WuSPIV, DeSPII, DeSPIII	S9 MR217- 233
T-Stoß, durchl. Wand	<i>ohne</i>	20 kN/m, verschraubt 15 N m	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPII, WuSPIV, WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	S11 MR335- 368
	GETZNER SYLODYN ND (grün)	20 kN/m, verschraubt 15 N m	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPII, WuSPIV, WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	S12 MR370- 399

Fortsetzung nächste Seite ...

Tabelle 5 – Fortsetzung

Stoßart	Elastomer	Varianten	Messungen	STOSS NR. / Messreihe
T-Stoß, unterbr. Wand	ohne	20 kN/m, verschraubt (unten) 15 N m und Winkel (oben)	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPII, WuSPIV, WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	S21 MR406-436
			BSA/PIM ² Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPII, WuSPIV, WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	S21a MR621-644
			Messungen der Schnellepegelverteilung der unteren Wand und der Decke mit 6 Anregungspositionen an der unteren Wand	S21a MR645-656
	GETZNER SYLODYN ND (grün)	20 kN/m, opt. verschraubt (unten) 15 N m und opt. Winkel (oben)	$D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPII, WuSPIV, WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	S22 MR438-464
			BSA/PIM ² $D_{v,ij}$ ¹ Verlustfaktoren ¹ mit Anregungspositionen: WuSPIV, WoSPII, DeSPIII WuSPII, WoSPIV, DeSPII	S23 MR465-500 MR535-547
			Differenz der Bauteilmess-Seiten, mit Anregepositionen: WoSPII, WoSPIV, DeSPII, DeSPIII	MR504-534

¹ Je Anregungsposition sind sechs Messpositionen gemessen. $\overline{D_{v,ij}}$ steht für die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz.

² Je Anregungsposition ist das Messraster auf den Bauteilen gemessen. BSA steht für Betriebs-schwinganalyse und PIM für die experimentelle *Power-Injection-Method*.

Abbildung 27 zeigt eine Übersicht der Stoßvarianten am L-Stoß. Bei den Varianten c-d ist der Bauteilstoß mit einer Zusatzlast F' (Abs. 3.1.1) belastet worden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass durch die Ankopplung der Einrichtung zur Lastaufbringung ein zusätzlicher Übertragungsweg im Gegensatz zur Variante a-b vorhanden ist.

3 Experimentelle Untersuchungen

Bei den T-förmigen Bauteilverbindungen in Abbildung 28 wurden Stöße mit durchgehender Wand und mit unterbrochener Wand untersucht. In beiden Fällen wurden Maßnahmen zur Reduzierung der Körperschallübertragung durch den Einsatz elastisch gelagerter Verbindungsmittel geprüft. In allen Varianten ist die obere Wand durch die Einrichtung zur Lastaufbringung gehalten und mit einer Zusatzlast $F' = 20 \text{ kN/m}$ belastet worden. Die Wandelemente für die Stoßvarianten mit durchlaufender Wand wurden nach Abschluss der Messserie geteilt und für die Stoßvarianten mit unterbrochener Wand verwendet.

3.4 Methoden

3.4.1 Stoßstellendämm-Maß

K_{ij} aus richtungsgemittelter Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$

Die Ermittlung des Stoßstellendämm-Maßes aus der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz erfolgte nach folgender Beziehung:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad (3.1)$$

Die äquivalenten Absorptionslängen a_i und a_j nach (2.40) ergeben sich aus den Bauteilflächen S_i und S_j , den Körperschall-Nachhallzeiten $T_{s,i}$ und $T_{s,j}$ (siehe Abs. 3.4.2).

K_{ij} aus Kopplungsverlustfaktor η_{ij}

Wird dagegen ein Stoßstellendämm-Maß aus einem bekannten Kopplungsverlustfaktor berechnet, so ist dieses im Gegensatz zu (3.1) von der Messrichtung abhängig. Die Berechnung von $K_{i \rightarrow j}$ aus η_{ij} für den Weg $i \rightarrow j$ erfolgt mit (3.2) nach [110]. Um ein richtungsunabhängiges K_{ij} zu berechnen wird der arithmetische Mittelwert der beiden Richtungen verwendet (3.3). Der Vergleich von (2.4) und (3.2) mit (3.1) zeigt, dass bei $K_{i \rightarrow j}$ zusätzlich die Massen m und Koinzidenzfrequenzen f_c der Subsysteme erforderlich sind.

$$K_{i \rightarrow j} = -10 \lg \left(\eta_{ij} \frac{\pi^2 S_i}{c_{\text{air}} l_{ij}} \sqrt{\frac{f_{c,i}}{f_{c,j}}} f_{\text{ref}} f \right) \quad (3.2)$$

$$K_{ij} = \frac{K_{i \rightarrow j} + K_{j \rightarrow i}}{2} \quad (3.3)$$

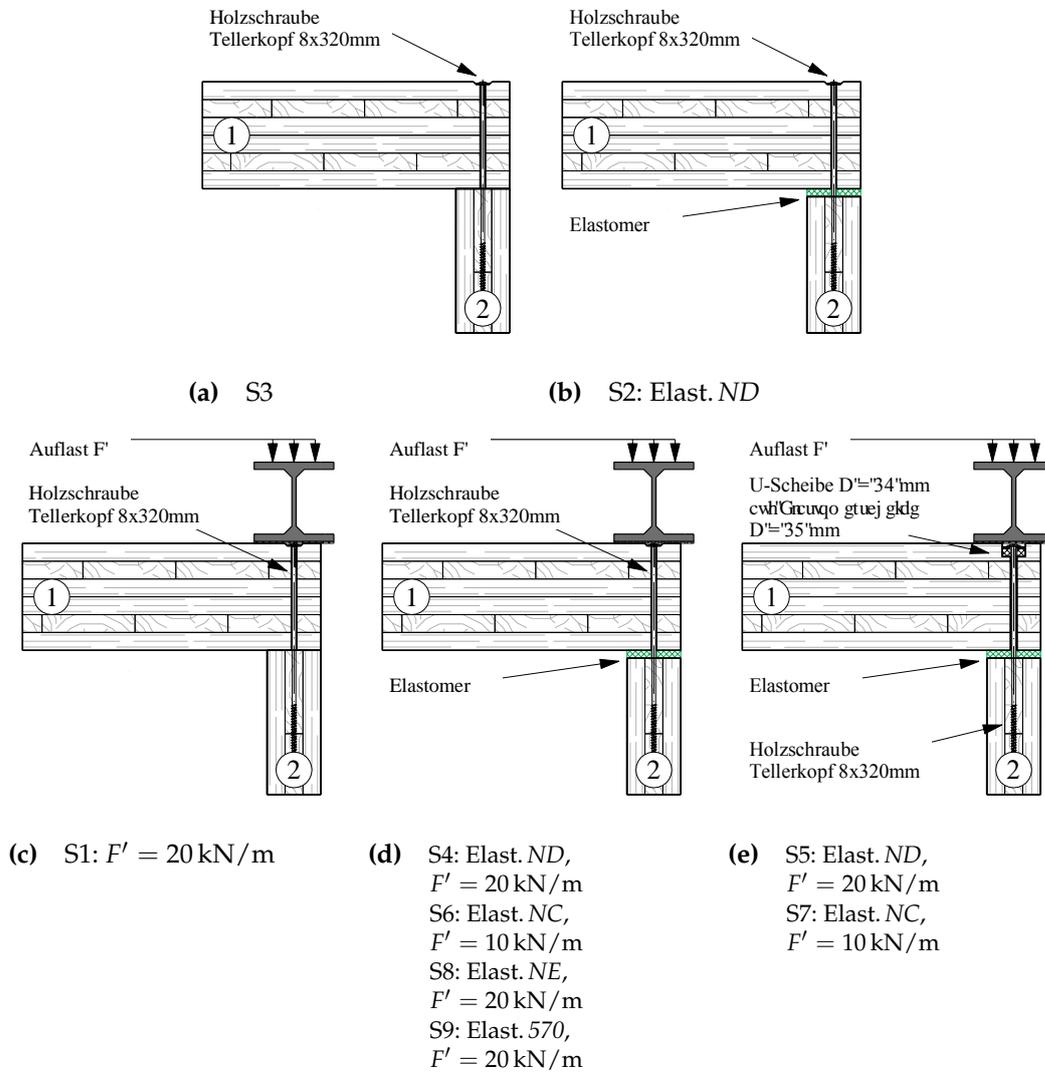


Abbildung 27 Varianten der gemessenen L-förmigen Bauteilstöße mit STOSS NUMMERN. Als Kurzhinweis sind die Elastomerart und die zusätzliche Linienlast F' angegeben.

3 Experimentelle Untersuchungen

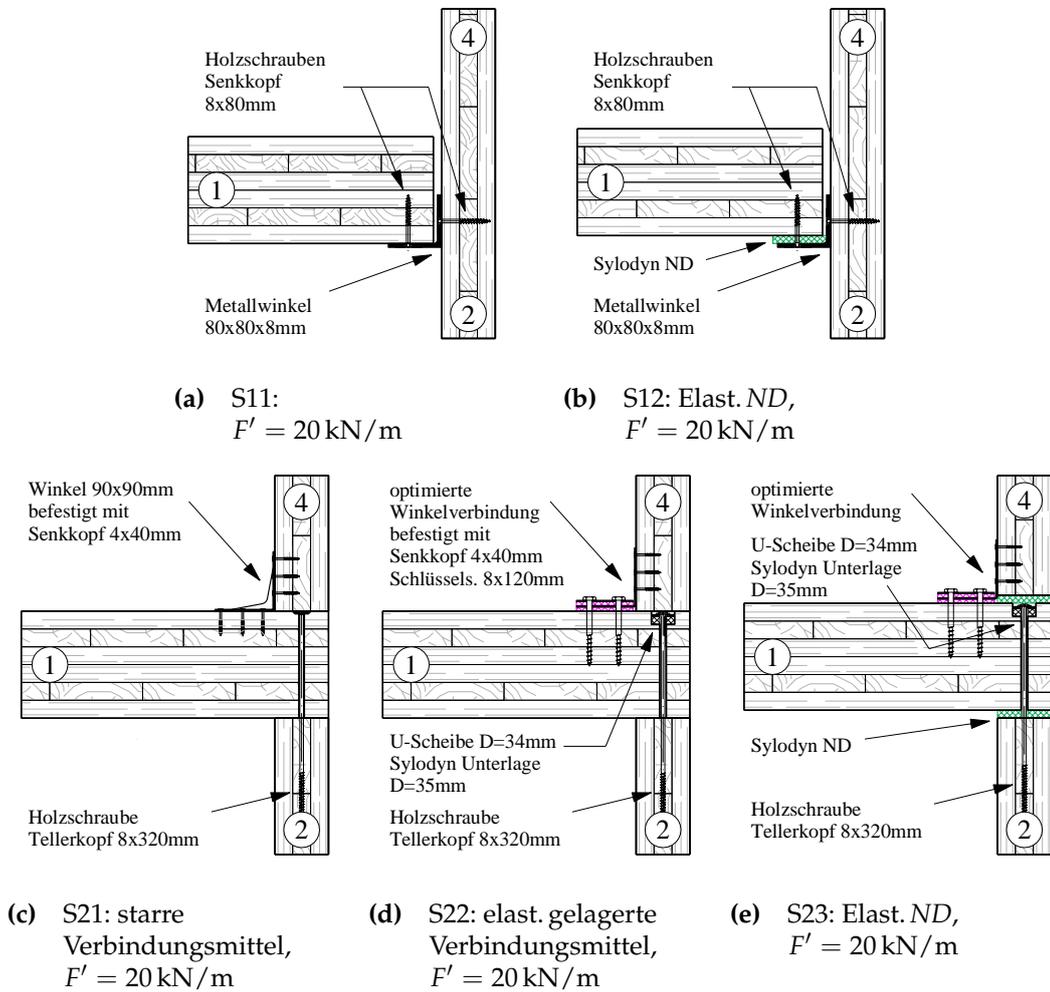


Abbildung 28 Varianten der gemessenen T-förmigen Bauteilstöße mit STOSS NUMMERN. Als Kurzhinweis sind die Elastomerart und die zusätzliche Linienlast F' angegeben. Bei Variante a und b ist die Decke auf eine Metallkonsole aufgelegt und die Wand durchgehend. Dagegen ist bei Variante c-e die Wand unterbrochen.

$K_{ij, \text{junction}}$ aus Ausbreitungsdämpfung δ

Zur weiteren Beurteilung wird im nächsten Schritt eine normierte richtungsge-
mittelte Schnellepegeldifferenz nach (2.43) ausgewertet, die nach prEN12354 [110]
für Bauteilstöße verwendet wird, bei denen die Bedämpfung durch das Bautei-
lauflager vernachlässigbar ist gegenüber der Bauteildämpfung. DIN EN ISO 10848
setzt für die Ermittlung der Schnellepegeldifferenz eine ausreichende Körperschall-
Diffusität voraus. Ist diese Voraussetzung nicht eingehalten, kann nach [110] die
Schnellepegeldifferenz aus einem direkt am Bauteilstoß ermittelten Stoßstellen-
dämm-Maß und der Ausbreitungsdämpfung auf den Bauteilen nach (2.44) ermittelt
werden.

Das Stoßstellendämm-Maß $K_{ij, \text{junction}}$ wird auf einer Breite von 0,5 m vor und
nach dem Stoß gemessen. Die Ausbreitungsdämpfung δ kann messtechnisch be-
stimmt oder berechnet werden (Abs. 3.5.2).

3.4.2 Verlustfaktoren

Bei der Abklingmethode wird der zeitliche Abfall des Beschleunigungspegels L_a im
diffusen Körperschallfeld ausgewertet. Die Zeit, die bis zum Beschleunigungspe-
gelabfall um 60 dB vergeht, wird als Körperschall-Nachhallzeit T_s definiert. Bei der
Auswertung ist die Rückwärtsintegration nach Schroeder [111] zu verwenden. Als
Maß für die Dämpfung können verschiedene Größen genutzt werden. So kann aus
der Nachhallzeit der Gesamtverlustfaktor η_{tot} nach (2.32) bestimmt werden [76].
Die Körperschall-Nachhallzeit wird zur Bestimmung der äquivalenten Kantenab-
sorptionslänge a_i nach (2.40) für die Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij}
(3.1) benötigt.

Bei der Messung der Körperschall-Nachhallzeit werden Gesamtverluste der
Struktur erfasst. Nach (3.4a) besteht der gemessene Gesamtverlustfaktor aus der
Summe von Anteilen aus der Materialdämpfung, der Dämpfung durch die Ab-
strahlung und den Randverlusten. Im Fall von zusammengesetzten Bauteilen sind
auch Reibungsverluste zwischen einzelnen Komponenten enthalten.

$$\eta_{\text{tot, situ}} = \eta_{\text{int}} + \eta_{\text{rad}} + \eta_{\text{fric}} + \eta_{\text{coupl}} \quad \text{Zusammenges. Bauteil, eingebaut} \quad (3.4a)$$

$$\eta_{\text{tot, kombi}} = \eta_{\text{int}} + \eta_{\text{rad}} + \eta_{\text{fric}} \quad \text{Zusammenges. Bauteil, frei hängend} \quad (3.4b)$$

$$\eta_{\text{tot, single}} = \eta_{\text{int}} + \eta_{\text{rad}} \quad \text{Einzelelement eines Bauteils, frei hängend} \quad (3.4c)$$

Um messtechnisch den internen Verlustfaktor η_{int} zu bestimmen, können einzelne,
nicht gekoppelte Bauteile gemessen werden. Dafür kann ein Einzelelement weich

3 Experimentelle Untersuchungen

auf gegangen und daran die Messung der Körperschall-Nachhallzeiten durchgeführt werden. Durch diese Messanordnung sind keine Reibungsverluste η_{fric} zwischen einzelnen Komponenten und vernachlässigbare Randverluste ($\eta_{\text{coupl}} \rightarrow 0$) in dem Messergebnis $\eta_{\text{tot, single}}$ enthalten. In diesem Fall vereinfacht sich (3.4a) zu (3.4c). Aus dem Gesamtverlustfaktors bei dieser Prüfanordnung und der Ermittlung des Verlustfaktors durch zweiseitige Abstrahlung η_{rad} (2.18) nach [76] kann der interne Verlustfaktor mit (3.4c) berechnet werden. Der Abstrahlgrad σ einer endlichen Platte kann entweder nach [76, 80, 81, 112] berechnet oder über die Messung der Schnelleverteilung auf der Platte und der abgestrahlten Schallintensität I ermittelt werden (2.17).

Zur Strukturanregung bei der Messung von T_s eignen sich sowohl stationäre Anregungssignale mit einem elektrischen Schwingererger als auch instationäre Signale, wie z.B. Hammerschläge. Bei den Messungen an der Hochschule sind beide Arten der Anregung verwendet worden. Die Unabhängigkeit vom Anregungssignal wurde in einer Vergleichsmessung geprüft. Abbildung 29 zeigt eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse η_{20} ⁵ oberhalb von 40 Hz.

Zur Mittelung der gemessenen Nachhallzeiten wurde abweichend zur ISO 10848 [4] nicht der arithmetische Mittelwert verwendet, sondern der Median [102].

Eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten zur messtechnischen Dämpfungsermittlung und zur Separation der einzelnen Verlustanteile ist in Abbildung 30 gegeben.

Neben der direkten Messung an einzelnen Bauteilen (Gl. a in Abb. 30) ist es möglich, über eine SEA-Matrix-Analyse (Gl. b in Abb. 30) den Gesamtverlustfaktor η_{tot} zu ermitteln und damit auf die Körperschall-Nachhallzeit zu schließen. Dabei entspricht der Dämpfungsverlustfaktor dem internen Verlustfaktor η_{int} .

3.4.3 Betriebsschwinganalyse

Für die Betriebsschwinganalyse werden Übertragungsfunktionen an Messpositionen über das gesamte Bauteil in Bezug auf einen Lastangriffspunkt ermittelt. Dazu wird am Ort der Krafteinleitung die Kraft und Beschleunigung gemessen und an verteilten Positionen über das Bauteil die Beschleunigung. Aus der komplexen Übertragungsfunktionen werden Schwingungsbilder erzeugt, welche die Schwingform in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz f darstellen. Hier werden Akzeleranzen H_{aF} (3.5) genutzt.

⁵Für die Vergleichsmessung wurde der Bereich für T_{20} (Pegelabfall zwischen -5 und -25 dB) ausgewertet, da das Messsystem NORSONIC RTA840 keine Möglichkeit bietet einen geringen Abfall auszuwerten.

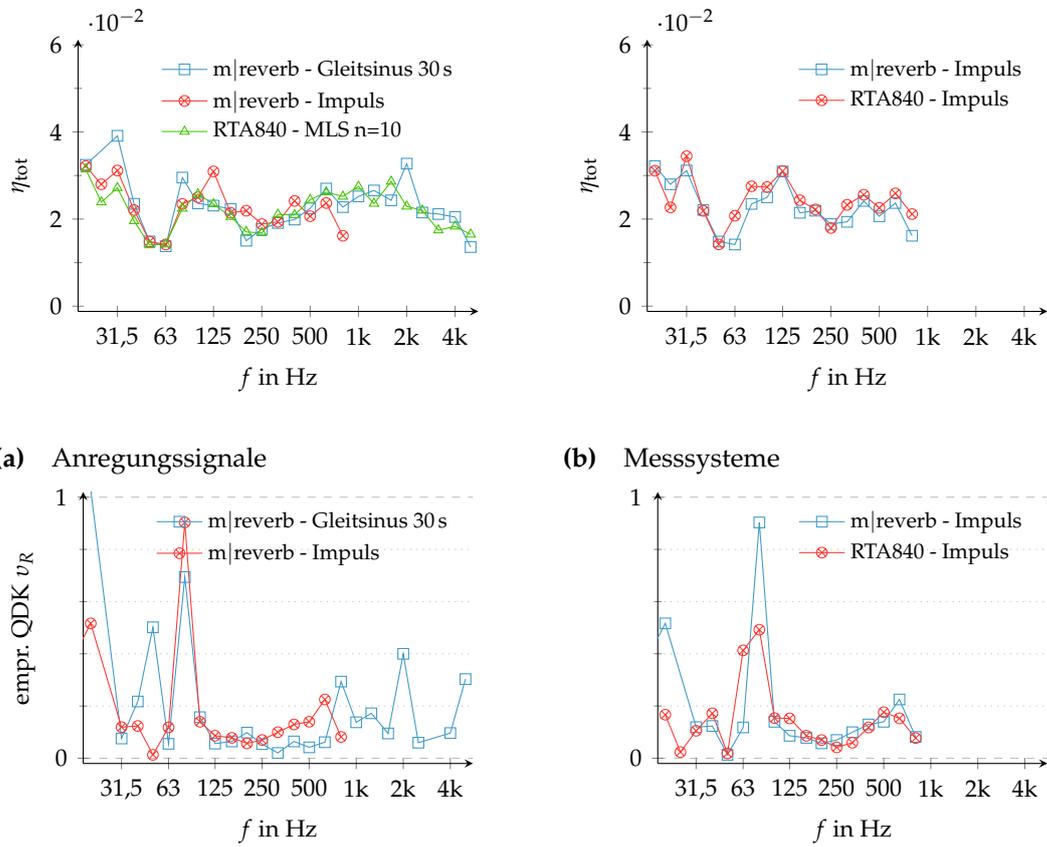


Abbildung 29 Median (oben) und empirischer Quartilsdispersionskoeffizient (v_R) (unten) aus η_{20} einer Vergleichsmessung mit zwei unterschiedlichen Messsystemen ($n=20$). Die Anregung erfolgte mit einem Modalhammer bzw. mit einem Schwingerreger an einer Anregungsposition. Gemessen wurde an jeweils zwei Messpositionen.

3 Experimentelle Untersuchungen

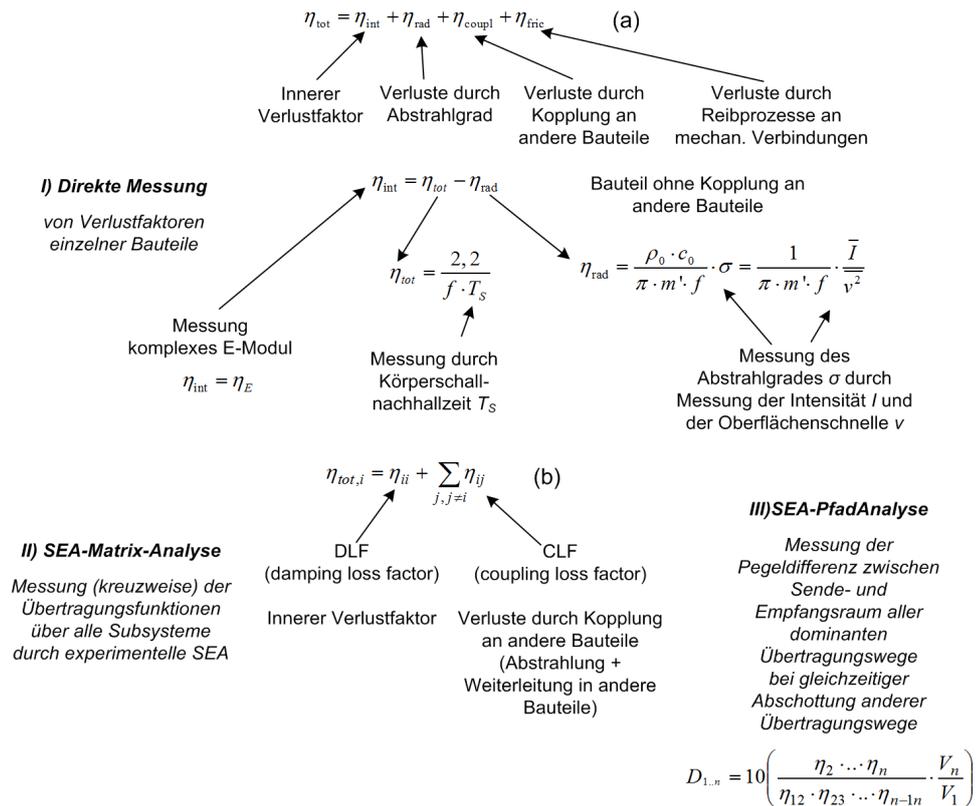


Abbildung 30 Übersichtsschema zur Messung von Verlustfaktoren

Für die Amplitude A_H der bildlichen Darstellung eines Messpunktes $MPos(x, y)$ wird der Imaginärteil von $\underline{H_{aF}}(x, y, f)$ nach (3.6) verwendet. Durch die Verbindung der gemessenen Punkte ergibt sich eine dreidimensionale Schwingform bei der betrachteten Frequenz. Der Fokus bei dieser Analyse der Übertragungsfunktionen liegt beim Auffinden lokaler Maxima, die als Näherung als Eigenfrequenzen und die dazugehörige Schwingform als Eigenmode der Struktur betrachtet werden können.

$$\underline{H_{aF}}(x, y, f) = \frac{\underline{a}(x, y, f)}{\underline{F}(f)} \quad (3.5)$$

$$A_H(x, y, f) = |\underline{H_{aF}}(x, y, f)| \cdot \sin(\phi(x, y, f)) = \Im \{ \underline{H_{aF}}(x, y, f) \} \quad (3.6)$$

3.4.4 Power Injection Methode

Mittels der experimentellen *Power Injection Method* (PIM) werden Messdaten für die Durchführung der Energieflussanalyse (EFA) generiert. Hierbei wird das System entsprechend der Bauteile in Subsysteme eingeteilt: im Fall des L-Stoßes (siehe Abs. 22) in die zwei Subsysteme - Brettsperrholzwand und -decke. Dabei muss für die Auswertung der EFA im Gegensatz zur SEA die Voraussetzung der schwachen Kopplung nicht gegeben sein. Zunächst wurden die einzelnen Subsysteme sukzessive mit einem Gleitsinus beaufschlagt. Mit dem Impedanzmesskopf (Abb. 24) werden Kraft F und Beschleunigung a am Lastangriffspunkt gemessen⁶. Daraus abgeleitet wird die zeitlich gemittelte eingebrachte Leistung, die Wirkleistung $\overline{P_{in}}$, berechnet.

$$\overline{P_{in}} = \sum \frac{1}{2} \Re \{ \underline{F} \cdot \underline{v}^* \}, \quad (3.7)$$

wobei * für den konjugiert komplexen Wert steht.

Das Zeitmittel der kinetischen Energie $\overline{E_{kin}}$ wird zunächst auf Basis der an der Bauteiloberfläche gemessenen Schnellen berechnet und lastfallbezogen über das jeweilige Subsystem aufsummiert. Hierbei stellt ρ die Dichte des Brettsperrholzes, V das Volumen, $\Re\{\underline{v}\}$ und $\Im\{\underline{v}\}$ den Real- und den Imaginärteil der Schnelle dar.

$$\overline{E_{kin}} = \sum \frac{1}{4} \rho V (\Re\{\underline{v}\}^2 + \Im\{\underline{v}\}^2) \quad (3.8)$$

Anhand der kinetischen Energie kann im mittleren und höheren Frequenzbereich für schwach gekoppelte Subsysteme die Gesamtenergie in den Subsystemen ermittelt werden. Aus Letzterer sowie der in die einzelnen Subsysteme eingebrachten Leistung kann die Matrix A der Energieeinflusskoeffizienten ermittelt

⁶Ausführliche Informationen zur messtechnischen Vorgehensweise bei der Ermittlung der eingebrachten Leistung am Lastangriffspunkt finden sich bei [32].

3 Experimentelle Untersuchungen

werden (2.23). Hierbei stellt der Matrixeintrag A_{ij} die auf die eingebrachte Leistung normierte Energie im Subsystem i bei Belastung des Subsystems j dar.

3.5 Resultate der Messungen

3.5.1 Elastomechanische Kenngrößen

Wand 3S aus drei Brettsper Holz-Elementen

Zur Ermittlung der E-Moduln in den beiden Hauptrichtungen E_x und E_y sind experimentelle Modalanalysen an dem frei aufgehängten Gesamtwandelement 3S (Geometrie, siehe Tab. 4) und an den beiden einzelnen Elemente 1 und 2 durchgeführt worden. Bei reinen Biege-Schwingungen kann die Struktur auch als Balken berechnet werden. Die Biege-Eigenfrequenzen errechnen sich aus (3.9).

$$f_{x,B,n} = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{\rho \cdot y \cdot z \cdot x^4}} = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{m \cdot x^3}} \quad (3.9)$$

Für den Spezialfall der ersten Biege-Eigenfrequenzen bei freien Rändern lässt sich die Balkenformel für die beiden Hauptrichtungen vereinfachen zu (3.10a) und (3.10b). Die Frequenz und die Schwingform der ersten Biege-Schwingung des frei hängenden Wandelementes in den beiden Hauptrichtungen zeigt Tabelle 9.

$$E_x = 0,096\pi^2 \cdot f_{x,B,1}^2 \cdot \rho \frac{x^4}{z^2} \quad (3.10a)$$

$$E_y = 0,096\pi^2 \cdot f_{y,B,1}^2 \cdot \rho \frac{y^4}{z^2} \quad (3.10b)$$

Tabelle 6 E-Moduln der dreischichtigen Brettsperrholz-Elemente mit der Länge $x = 2500$ mm und der Dicke $z = 81$ mm berechnet aus der Frequenz der ersten Biege-Schwingung einer experimentellen Modalanalyse.

Wand 3S	E_x	$f_{x,B,1}$	E_y	$f_{y,B,1}$	ρ	u
	in N/mm ²	in Hz	in N/mm ²	in Hz	in kg/m ³	in %
Element 1 y = 1 100 mm	10 460	64,4	(718)	87,7	442	11-12
Element 2 y = 800 mm	10 210	62,7	-	-	441	11-12
Element 3 y = 1 100 mm	-	-	-	-	447	11-12
Gesamtwand 3S y = 3 000 mm	10 530	64,4	408	8,8	450	11-12
Berechnung^a	10 580	-	539	-	450	-
Bemessung^b	10 590	-	410	-	≈ 515	10 ± 2

^a Verschmierte Materialparameter berechnet gemäß [113] mit Hilfe der kalibrierten Werte für die einzelne Holzlage aus Forschungsprojekt „VibWood“ [109, 114].

^b Rechenwerte für die Bemessung nach Eurocode 5 aus allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung [115] für das Produkt MERK-DICKHOLZ® der Firma FINNFOREST MERK GMBH. Die Rohdichte ρ und Holzfeuchte u sind entnommen aus [116].

Die E-Moduln für die zusammengesetzte Wand aus den drei Einzelementen stimmen mit den Angaben aus der Zulassung für die Bemessung nach Eurocode 5 in Tab. 6 überein. Allerdings sind die E-Moduln E_x der Einzelemente geringer als die der Gesamtwand, da die geschraubten Deckbretter die Steifigkeit der zusammengesetzten Wand gegenüber den gefälzten Einzelementen erhöhen. Die Abweichung für E_y von Element 1 ist dadurch zu erklären, dass über die kurze Elementbreite der Schubanteil erheblichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit hat. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Balkenformel in (3.9) nicht erfüllt.

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Impulslaufzeit

(b) 4-Punkt Biegeversuch

Abbildung 31 Messsituation zur Ermittlung der E-Moduln der sechsschichtigen Brettsperrholz-Elemente. [36]

Zwei Brettsperrholz-Elemente

Die sechsschichtigen Deckenelemente 6S wurden schon in einem früheren Forschungsprojekt verwendet und dafür Materialparameter bestimmt [109, 114]. Ergänzend wurden an zwei Einzelementen alternative Messmethoden für die E-Modul Bestimmung im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht [36]. Dabei wurde u. a. die Impulslaufzeit (ILZ) an den Elementen gemessen und in der Bauteilprüfmaschine der Hochschule Rosenheim ein 4-Punkt Biegeversuch (4P) mit statischer Belastung durchgeführt. Eine weitere Versuchsreihe bestand aus einer statischen Grundlast in Kombination mit einer dynamischer Last bis 5 Hz.

Die Berechnung des E-Moduls aus der ILZ erfolgte richtungsabhängig nach (2.12) [76, S.81] und (3.11) [117, S.111] mit der Annahme einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,3$. Ein Teil der Ergebnisse findet sich in Tabelle 7.

$$E_{x,Stab} = c_L^2 \cdot \rho \quad (3.11)$$

Tabelle 7 E-Moduln der sechsschichtigen Brettsperrholz-Elemente mit der Länge $x = 5500$ mm und der Dicke $z = 162$ mm

Decke 6S	E_x	c_L	E_y	n	ρ	u
	in N/mm ²	in m/s	in N/mm ²		in kg/m ³	in %
Element 1 - ILZ^a y = 1370 mm	9 300 ± 500	4 696 ± 140	-	18	464 ± 14	9,4
Element 1 - 4P-st^b y = 1370 mm	8 300 ± 900	-	-	21	464 ± 14	9,4
Element 2 - ILZ^a y = 555 mm	8 800 ± 400	4 435 ± 140	-	6	445 ± 13	9
Berechnung^c	8 170	-	2 948	-	455	-
Bemessung Eurocode 5^d	8 150	-	2 850	-	≈ 540	10 ± 2

^a Element 1 berechnet als Platte nach Gl. (??), Element 2 als Stab nach Gl. (3.11) aus [36]

^b lokales E-Modul aus statischem 4-Punkt Biegeversuch aus [36]

^c Über die Schichten verschmierte Materialparameter berechnet gemäß [113] mit Hilfe der kalibrierten Werte für die einzelne Holzlage aus Forschungsprojekt *VibWood* [109, 114].

^d Rechenwerte für die Bemessung nach Eurocode 5 aus allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung [115] für das Produkt MERK-DICKHOLZ® der Firma FINNFOREST MERK GMBH. Die Rohdichte ρ und Holzfeuchte u sind entnommen aus [118].

Von den Messergebnissen zeigt der E-Modul aus dem 4-Punkt Biegeversuch die größte Näherung zu den Rechenwerten für die Bemessung nach Eurocode 5, wobei die Unsicherheit der Messmethode größer ist. Die gemessene Schallgeschwindigkeit c_L liegt im Erwartungsbereich nach [119, S.50], siehe hierzu Anhang C.

Zusammenfassung der elastomechanischen Kenngrößen

In Tabelle 8 sind die *verschmierten* Materialparameter für die beiden Brettsperrholz-Bauteile des L-Stoßes zusammengeführt. Diese Datensätze dienen als Eingangsdaten für die Berechnungsmodelle mit der SEA und der FEM. Aus die-

3 Experimentelle Untersuchungen

sen Materialwerten werden die Biegewellenlängen in Abbildung 32 für die beide Hauptrichtungen $x \Leftrightarrow \parallel$ und $y \Leftrightarrow \perp$ zur Faserrichtung der Deckschicht berechnet. Aus den Schnittpunkten der Wellenlänge in der umgebenden Luft in der Abbildung 32 mit der Biegewellenlänge der Platte kann der Bereich für die Koinzidenz eingegrenzt werden. Die Koinzidenz-Grenzfrequenz f_c beschreibt die Frequenz, bei der die Wellenlängen der Platte und der umgebenden Luft gleich sind und die abgestrahlte Schalleistung der Platte am größten ist.

Tabelle 8 Materialparameter für die drei Hauptrichtungen des Brettsper Holz LENO

	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	c_L	ρ	u
	in N/mm ²	in N/mm ²	[-]	in m/s	in kg/m ³	in %
3S (M1)	10 530 ^a	459	0,035/0,018	-	450	10 ± 2
$z =$	408 ^a	168	0,045/0,010			
81 mm	137	103	0,037/0,020			
3S (M2)^b	10 710	675	0,877/0,063	-	450	-
$z =$	765	157	0,707/0,043			
81 mm	651	88,6	0,189/0,161			
6S (M1)	8170	459	0,035/0,018	4570	455	10 ± 2
$z =$	2950	168	0,045/0,010			
162 mm	137	103	0,037/0,020			
6S (M2)^b	8330	675	0,251/0,095	-	450	-
$z =$	3150	157	0,579/0,045			
162 mm	651	88,6	0,427/0,088			

^a aus Messergebnissen einer experimentellen Modalanalyse an einem zusammengesetzten Wandelement (BAUTEIL NR. 56), siehe Abschnitt 3.5.3.

^b Parameter aus Bayesscher Optimierung eines an Messungen kalibrierten FE-Modells [86]

In dem Frequenzbereich, in der die Wellenlänge

$$\lambda_B > 6 \cdot z \quad (3.12)$$

ist, können nach [76] näherungsweise reine Biegewellen angenommen werden. Dort gilt die Platte als *akustisch dünn*.

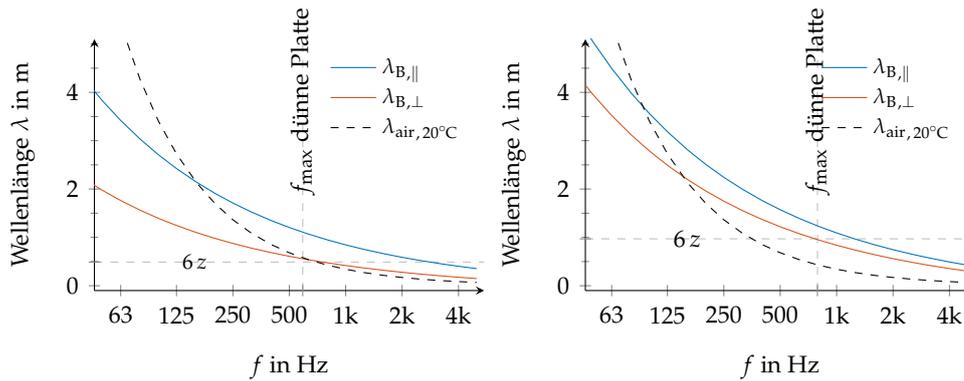
(a) LENO81, 3-lagig, $z = 81$ mm(b) LENO162, 6-lagig, $z = 162$ mm

Abbildung 32 Richtungsabhängige Wellenlängen im Brettsperrholz berechnet aus den Materialdaten (M2) in Tabelle 8. Die horizontale Linie kennzeichnet die Grenze der Wellenlänge, bei der die Platte abhängig von der Plattendicke z ($\lambda_B > 6 \cdot z$) als *akustisch dünn* gilt. Die Biegewellenlängen sind für eine *akustisch dünne* Platte berechnet.

3.5.2 Vibroakustische Kenngrößen einzelner Bauteile

Verlustfaktoren

Als erster Schritt für die Ermittlung des internen Verlustfaktors wurden frei hängende Einzelemente in einem Raum mit hoher Dämpfung (zur Vermeidung einer Wiedereinkopplung des bereits abgestrahlten Luftschalls) gemessen. Der gemessene Verlustfaktor $\eta_{\text{tot,single}}$ (3.4c) wird in Abbildung 33 (rechts, orange) dargestellt. Darin enthalten sind noch Verluste durch Abstrahlung in den Raum. Durch die mechanische Verbindung (Abb. 26c) der Einzelemente zu einem Gesamtbauenteil könnten zusätzliche Reibungsverluste an den Stoßstellen auftreten.

In einer weiteren Messreihe wurden deshalb die gekoppelten Einzelemente frei hängend gemessen, um mögliche zusätzliche Verluste η_{fric} durch die Verbindungen zu quantifizieren. Die Ergebnisse $\eta_{\text{tot,kombi}}$ (3.4b) sind den Verlustfaktoren $\eta_{\text{tot,single}}$ der Einzel Elemente in Abbildung 33 gegenüber gestellt. Im Fall des fünfschichtigen Brettsperrholzes in Abbildung 33d sind die Unterschiede $\Delta\eta_{\text{tot}} \approx \eta_{\text{fric}} \ll 0,005$ im Frequenzbereich bis 1 kHz. Der Verlustfaktor der frei hängenden Einzelemente der Wand 3S (Abb. 33b) zeigt dagegen eine Erhöhung des Verlustfaktors im Fall der gekoppelten Elementen von 1% zwischen 160 Hz und 250 Hz. Die Messungen wurden mit der Abklingmethode bestimmt. Der hohe Verlustfaktor unter 80 Hz ist aufgrund der geringen Modendichte in diesem Frequenzbereich sehr fragwürdig [120].

Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Randbedingung

Nach den Untersuchungen an den frei hängenden Elementen ist der Einfluss der Randverluste η_{coupl} genauer betrachtet worden. Dazu wurde das untere Randauflager des hohen Wandelement 5S variiert. Als unteres Auflager wurde

- (a) ein weiches Elastomer,
- (b) ein steifes Elastomer,
- (c) eine Stahl-Halbwellen an der Wandunterkante direkt auf Beton und
- (d) eine Lagerung in einem Sandbett verwendet.

Neben der Variation der Auflagersituation wurde auch die Pressung der Wandscheibe im Bereich zwischen 1 kN/m bis 20 kN/m verändert, da Massivholzbau- teile in Gebäuden auch statische Tragwirkungen haben. Insbesondere Wandbauteile werden durch darüber liegende Geschosse sehr unterschiedlich belastet.

Abbildung 35b zeigt eine Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Pressung im Frequenzbereich unter 250 Hz. Ab einer Mindestpressung von 10 kN/m bleibt der Verlustfaktor konstant. Ein Erklärungsansatz ist, dass ab dieser Pressung die Reibkräfte groß genug sind, um zusätzliche Reibungsverluste durch translatorische Bewegung im Auflager zu verhindern. Bei der Variation des unteren Auflagers (Abb. 34) zeigte sich ebenfalls eine Angleichung des Verlustfaktors mit zunehmender Pressung.

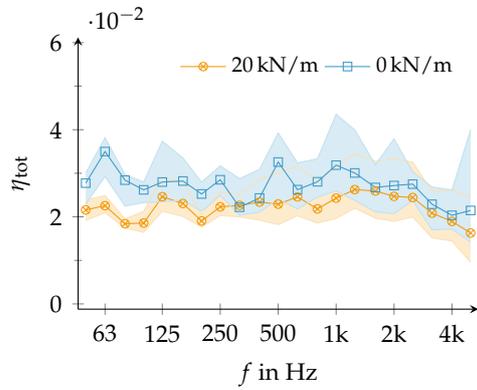
Für alle weiteren Messungen ist als Auflagervariante die Stahl-Halbwellen gewählt worden, da die Messungen nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Pressung aufweisen. Daneben ist die Halbwellen (Abb. 23b) geeignet, um eine ideale, gelenkige Randbedingung - im Sinne der FEM - näherungsweise im Experiment umzusetzen.

Abstrahlgrad und Abstrahlverlustfaktor

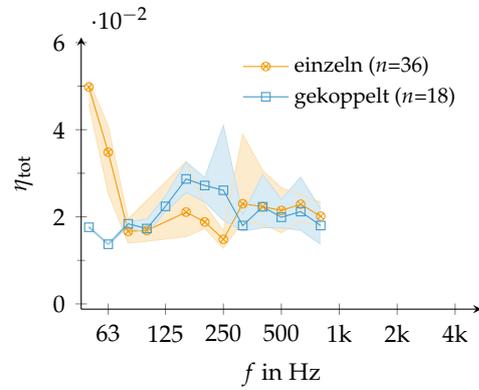
Zur Bestimmung des Abstrahlverlustfaktors (2.18) wird der Abstrahlgrad σ (2.17) benötigt. Die Näherungslösungen von [76, 79–81, 110] für den Abstrahlgrad aus Abschnitt 2.1.3 können nicht direkt auf den Anwendungsfall des Brettsperrholzes übertragen werden, da folgende Modellbedingungen bei den Experimenten nicht vorliegen:

- (a) Isotrope Platte
- (b) Allseitig gelenkige Lagerung

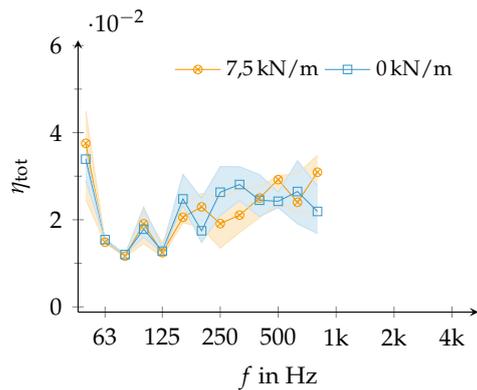
3.5 Resultate der Messungen



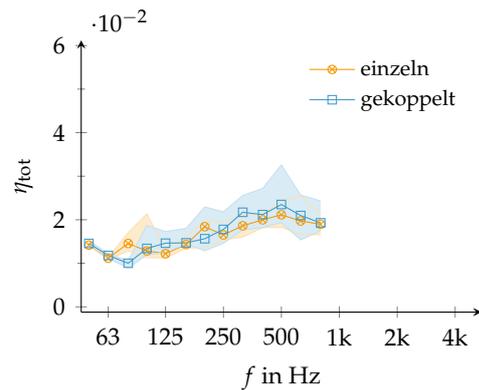
(a) Wand 3S, $z = 81$ mm, zweiseitig gelagert, zwei Elementstöße



(b) Wand 3S, $z = 81$ mm, frei hängend, zwei Elementstöße



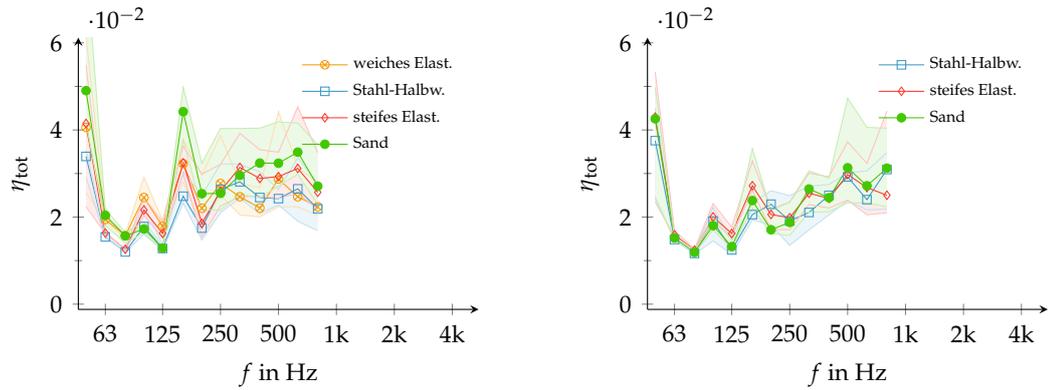
(c) Wand 5S, $z = 105$ mm, zweiseitig gelagert, ein Elementstoß



(d) Wand 5S, $z = 105$ mm, frei hängend, ein Elementstoß

Abbildung 33 Verlustfaktoren von Brettsperrholz-Elementen bei unterschiedlichen Randbedingungen und Impulsanregung. Darstellung des Medians, des 1. und 3. Quartils.

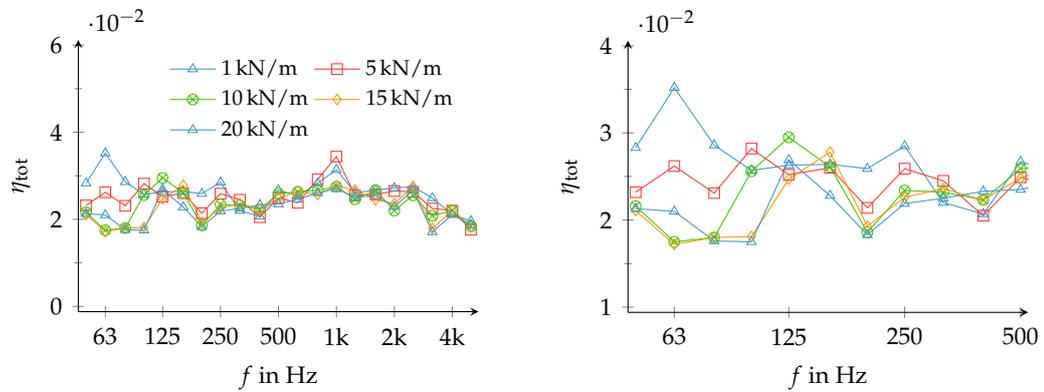
3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Ohne Linienlast

(b) Mit Linienlast ca. 8 kN/m

Abbildung 34 Verlustfaktoren des Wandelementes 5S ($z = 105$ mm) bei unterschiedlichen unteren Lagerbedingungen. Darstellung des Medians, des 1. und 3. Quartils.



(a) Gesamter Messbereich

(b) Bereich bis 500 Hz

Abbildung 35 Verlustfaktoren η_{15} der Wand 3S in Abhängigkeit der Vorspannung. Median aus 3×6 Messpositionen ($n = 18$) bei Anregung mit Gleitsinus über einen Inertial-Schwingerreger.

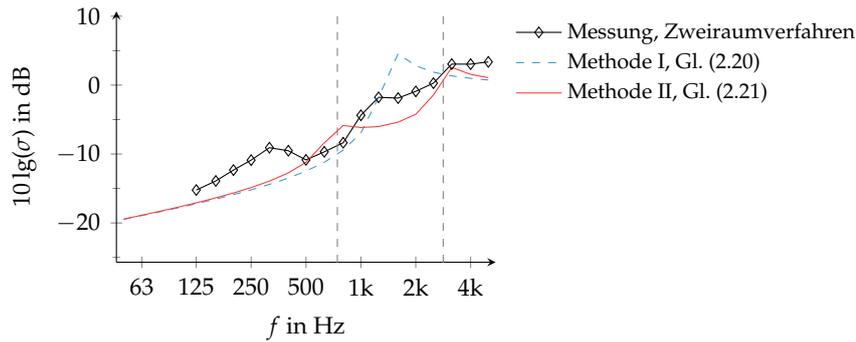


Abbildung 36 Experimentell ermittelte Abstrahlmaße im Vergleich zu Näherungslösungen für gelenkig gelagerte, orthotrope Platten am Beispiel einer Dreischichtplatte ($2490 \times 1240 \times 16 \text{ mm}^3$; $\rho = 490 \text{ kg/m}^3$; $E_{\parallel} = 13,6 \text{ MPa}$; $E_{\perp} = 0,939 \text{ MPa}$; $\nu = 0,3$) aus [42]. Als Basis für die Berechnung nach Methode I und II wurde das Modell für eine isotrope Platte nach Leppington [81] verwendet.

Lösungsvorschläge für den Abstrahlgrad von orthotropen Platten finden sich für den Fall der unendlich großen Platte bei Heckl [77] und für endliche Platten bei Anderson [84]. Das Modell von Anderson ist für baupraktische Lösungen recht aufwändig. Aus diesem Grund wurden praktikablere Näherungen für den Abstrahlgrad von orthotropen Platten aus Abschnitt 2.1.3 angewendet, die abgeleitet sind vom Abstrahlmodell für endliche, isotrope Platten. Beispiele für orthotrope Platten im Bauwesen sind neben Brettsperrholz auch Dreischichtplatten, die in ähnlicher Weise aufgebaut sind. Die Schichtdicken einer Dreischichtplatte sind im Gegensatz zu Brettsperrholz nur wenige Millimeter. In beiden Beispielen kann eine starke Richtungsabhängigkeit der Steifigkeit vorliegen.

In Abbildung 32 ist zu erkennen, dass es eine Biegewellenlänge in Deckschichtfaserrichtung und senkrecht dazu gibt, welche mit der Wellenlänge in der Luft übereinstimmt. Das führt dazu, dass für die beiden Hauptrichtungen der Platten zwei unterschiedlichen Koinzidenz-Grenzfrequenzen $f_{c\parallel}$ und $f_{c\perp}$ resultieren.

Zur Überprüfung der Näherungsmethoden I (2.20) und II (2.21) aus Abschnitt 2.1.3 wurden in [38, 42] die Materialparameter und der Abstrahlgrad einer Dreischichtplatte aus Fichte experimentell ermittelt. Die abgestrahlte Schallleistung wurde mithilfe der Intensität in einem Zweiraumverfahren bestimmt. Dabei wurde die Platte an den Rändern von einem elastischen Kittbett gehalten. Abbildung 36 stellt die beiden Näherungslösungen, welche mit dem Ansatz von Leppington kombiniert wurden, den experimentell ermittelten Abstrahlmaßen gegenüber. Zusätzlich sind die beiden Koinzidenz-Grenzfrequenzen $f_{c\parallel}$ und $f_{c\perp}$ als vertikale Linien eingezeichnet, welche sich aus den experimentellen Materialparametern ergeben.

3 Experimentelle Untersuchungen

Der Vergleich zeigt, dass unterhalb von $f_{c\parallel}$ die tatsächliche Randbedingung im Experiment mit der gelenkigen Lagerung im Modell nur unzureichend beschrieben ist. Da die Koinzidenz-Grenzfrequenzen der beiden Hauptrichtungen der Dreischichtplatte einige Terzbänder auseinander liegen ist die Methode I mit der Verwendung einer effektiven Koinzidenz-Grenzfrequenz aus dem geometrischen Mittel weniger geeignet als die Methode II. Allerdings legt der Vergleich des Kurvenverlaufs zwischen dem Abstrahlgrad nach Methode II und den Messungen die Vermutung nahe, dass der E-Modul E_{\parallel} eventuell zu hoch ermittelt worden ist. Der Wert $E_{\parallel} = 13,6 \text{ MPa}$ ist für Fichtenholz in Faserrichtung im Vergleich zu Literaturwerten, siehe Tabelle 17, groß. Mit einem niedrigeren Wert für $f_{c\parallel}$ würde eine bessere Übereinstimmung erreicht werden.⁷ Insgesamt zeigt sich jedoch eine zufriedenstellende Übereinstimmung zu den Messungen.

Neben der Bestimmung des Abstrahlgrades über das Zweiraumverfahren mithilfe der Intensität wurde diese Platte in [38, 42] mit einer weiteren Methode in einem Hallraum gemessen. Dabei wurde über einen experimentellen SEA-Ansatz [vgl. 121] der Abstrahlgrad der freihängenden Dreischichtplatte ermittelt. Mithilfe des daraus resultierenden Abstrahlverlustfaktors und den gemessenen Gesamtverlustfaktor konnte nach (3.4c) der interne Verlustfaktor bestimmt werden. Es zeigte sich, dass dieses Verfahren geeignet ist, um einen internen Verlustfaktor über einen weiten Frequenzbereich zu bestimmen ohne auf aufwändige Messtechnik angewiesen zu sein. Im Fall der Dreischichtplatte wurde im Bereich von $f = 160 \text{ Hz}$ bis 2500 Hz der interne Verlustfaktor mit $\eta_{\text{int}} = 0,010(1)$ bestimmt. Dieser Wert ist vergleichbar mit früheren Ergebnissen [122].

Ausbreitungsdämpfung

Die Abnahme des Schnellepegels $\Delta L_{v,mm}$ zwischen zwei Positionen m und n an der Bauteiloberfläche nach (3.13) hängt bei höheren Frequenzen von dem Entfernungswert zur Schallquelle ab. Die Distanz zwischen Schallquelle und Position m wird mit r_m bezeichnet. In (3.14a) werden zwei Ursachen für den Pegelabfall angegeben [vgl. dazu 105]. Im ersten Term steht die distanzbezogene geometrische Dämpfung einer Punktquelle und im zweiten Term die distanzbezogene Pegelabnahme aufgrund der Materialdämpfung. Die geometrische Dämpfung einer Punktquelle beträgt dabei 3 dB je Abstandsverdoppelung.

Im Fall einer *akustisch, dünnen Platte* kann (3.14a) in (3.14b) mithilfe von $c_{g,B} =$

⁷Ob eine systematische Abweichung bei der Ermittlung von E_{\parallel} vorliegt, konnte bis zur Anfertigung dieses Berichtes nicht abschließend geklärt werden.

$2 c_B$ umgerechnet werden.

$$L_{v,theo,m} = L_{v,n} - \Delta L_{v,mn} \quad (3.13)$$

$$\Delta L_{v,mn} = 10 \lg \left(\frac{r_m}{r_n} \right) + \frac{10}{\ln 10} \eta_{\text{int}} \frac{\omega (r_m - r_n)}{c_{g,B}} \quad (3.14a)$$

$$\Delta L_{v,mn} = 10 \lg \left(\frac{r_m}{r_n} \right) + \frac{10}{\ln 10} \eta_{\text{int}} \frac{\pi (r_m - r_n)}{\lambda_B} \quad (3.14b)$$

Einflüsse anderer Dämpfungsmechanismen, wie Randverluste und Abstrahlverluste werden hier nicht berücksichtigt. Die systematische Abweichung bei dieser Berechnung von $\Delta L_{v,mn}$ nach (3.14) wird klein, wenn eine hohe Materialdämpfung und geringe Randverluste vorliegen. Die Randverluste sind in den nachfolgenden Experimenten, aufgrund der Randbedingungen (Abb. 23a und 23), sehr gering. Wenn Randverluste berücksichtigt werden müssen, wird in (3.14) ein weiterer Term mit der Kantenabsorption benötigt [vgl. dazu 65, S. 174].

Bei der Ausbreitungsdämpfung sind direkt punktförmig angeregte Bauteile von indirekt angeregten Bauteilen zu unterscheiden, da im ersten Fall die geometrische Dämpfung der sich kreisförmig ausbreitenden Körperschallwellen die Ausbreitungsdämpfung beeinflussen.

Direkt angeregtes Bauteil: Zur Kontrolle wurde neben den Verlustfaktoren in Abschnitt 3.5.2 auch die Ausbreitungsdämpfung δ (2.45) an der freistehenden Wand des Versuchsaufbaus des durchlaufenden T-Stoßes in einem weiteren Experiment untersucht [39, 40]. Dazu wurde der distanzabhängige Schnellepegelabfall aus den Messungen bei Punktanregung mit den prognostizierten Schnellepegelabfall $\Delta L_{v,mn}$, der in (3.13) enthalten ist, verglichen. Im Experiment wurde die Decke inklusive zugehöriger Verbindungsmittel von der Wand getrennt. Die drei verschraubten Brettsperrholz-Elemente sind somit von der oberen Konstruktion zur Lastaufbringung gehalten und gleichzeitig mit einer Auflast von 20 kN/m belastet worden. Bei diesem BAUTEIL NR. 70, siehe Tabelle 4, aus dreischichtigem Brettsperrholz wurde die Ausbreitungsdämpfung in vertikaler Richtung in der Messspalte B messtechnisch bestimmt. Die Verteilung der Messpunkte ist im Anhang A zu entnehmen⁸. Die Messpunkte unterhalb der Anregungsposition fließen aufgrund des geringen Abstandes zum Bauteilrand und den daraus resultierenden möglichen Randreflektionen der BiegeWellen nicht in die Auswertung ein.

⁸Es wurden alle eingezeichneten Messachsen gemessen, jedoch zur Auswertung nur die Messspalte B herangezogen.

3 Experimentelle Untersuchungen

Diagramme für alle Terzbänder im bauakustischen Frequenzbereich finden sich in [39]. Abbildung 37 zeigt die Abstandsabhängigkeit der gemessenen Schnellepegel entlang der Messspalte B für vier exemplarische Terzbänder. Zu beobachten ist das modale Verhalten des Prüfbauteils bei tiefen Frequenzen in den Abbildungen 37 (a) und 37 (b). Dort liegen die gemessenen Schnellepegel (Exp) an Position m oberhalb der Pegel $L_{v,theo,m}$, welche durch die geometrische- und die Materialdämpfung nach (3.13) und (3.14b) prognostiziert (Theo) werden. Für $L_{v,n}$ ist in diesem Fall der Schnellepegel an der Lastangriffsposition (APos) verwendet worden, der an einem Impedanzmesskopf ermittelt wurde. Teilweise zeigt sich das Maximum der Schnellepegel nicht am Anregungsort, sondern an anderer Stelle des Bauteils. Die vertikalen Linien kennzeichnen den Hallradius r_H nach (3.15).

$$r_H = \frac{\sqrt{f \cdot f_c} S \eta_{int}}{2 c_{air} (1 - \alpha)} \quad (3.15)$$

Diese Berechnung gilt nur für *akustisch, dünne Platten* und führt in diesem Beispiel hochfrequent zur systematischen Abweichung. Eine punktförmig angeregte Platte bildet ein Nahfeld um den Kraftereinleitungsort aus. Innerhalb und außerhalb vom Hallradius ist nach der Definition die Energiedichte gleich groß. Im mittleren Frequenzbereich bei 1000 Hz zeigt Abbildung 37 (c) eine geringere Abweichung der gemessenen Werte zu den prognostizierten Schnellepegeln in Abhängigkeit des Abstands zur Körperschallquelle. Ebenso lässt sich der leicht höhere Pegel links vom Anregungspunkt möglicherweise durch die reflektierten BiegeWellen an der Bauteilkante erklären. Im hohen Frequenzbereich bei 4000 Hz ist am Kraftereinleitungsort in Abbildung 37 (d) ein sehr hoher Schnellepegel im Vergleich zu den restlichen Pegeln auf dem Bauteil bestimmt worden.

Die Abbildung 38 zeigt die Differenzen zwischen den gemessenen Schnellepegeln⁹ und den prognostizierten Schnellepegeln unter Berücksichtigung der geometrischen Dämpfung und der Materialdämpfung nach (3.13) und (3.14b).

Im tiefen Frequenzbereich unterhalb von 200 Hz war noch ein modales Verhalten der Bauteilstruktur in den Messresultaten zu erkennen, daher können dort gemessene Schnellepegel oberhalb von prognostizierten Werten liegen¹⁰. In diesem Bereich ist die Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung anhand des Vergleichs der Schnellepegel auf dem Bauteil nicht sinnvoll. Oberhalb dieser Frequenzbänder nähert sich der prognostizierte immer mehr dem gemessenen Schnellepegel an. Ab

⁹Für die Auswertung der Ausbreitungsdämpfung sind nur Messpositionen $P0201$ bis $P0217$ im Anhang A verwendet worden.

¹⁰Für die Entfernung vom Anregungspunkt bis zum ersten Messpunkt wurde $r_{n,\parallel} = 0,13$ m verwendet.

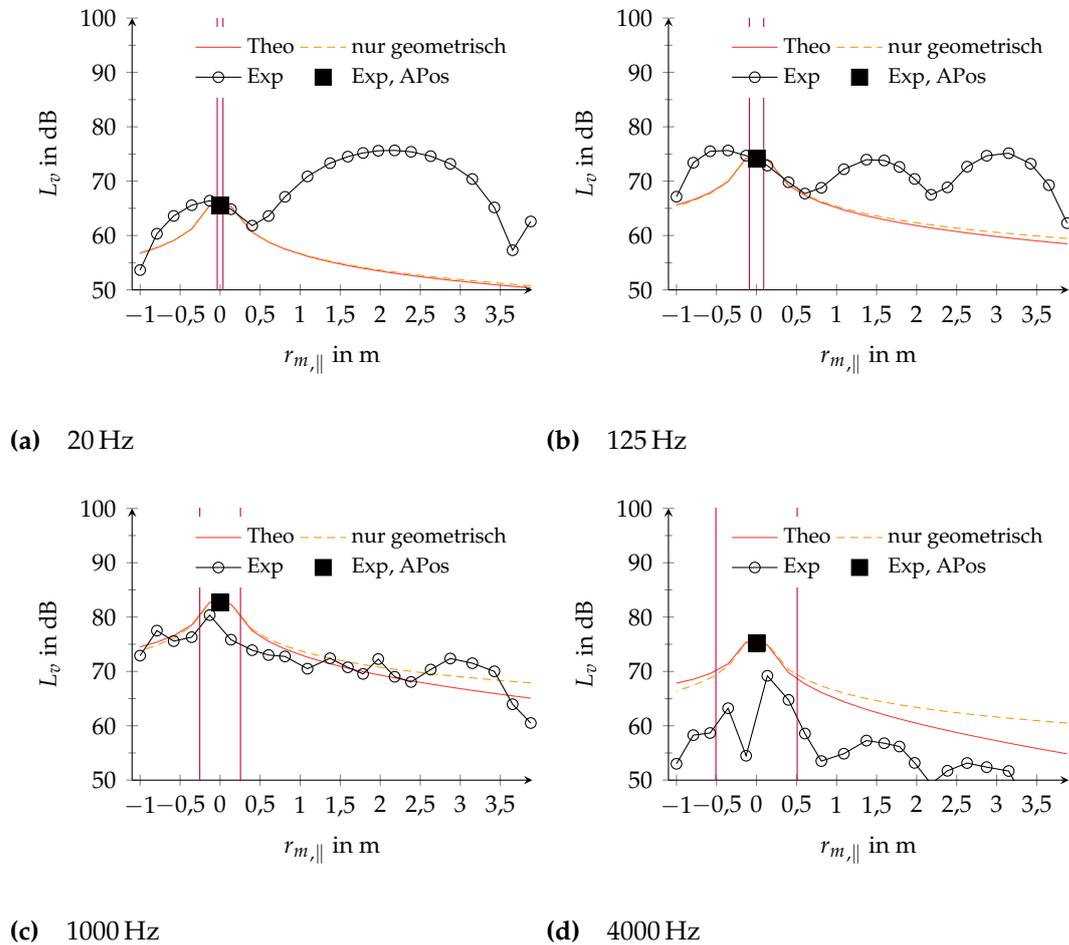


Abbildung 37 Der gemessene (Exp) und prognostizierte (Theo) Schnellepegel L_v in Abhängigkeit der Entfernung in Deckschichtfaserrichtung $r_{m,||}$ zur Krafterregung an *WuSPIV* ist dargestellt für vier Terzbänder. Die Kurve *nur geometrisch* zeigt Schnellepegel, welche ausschließlich aufgrund der geometrischen Ausbreitungsdämpfung prognostiziert sind. Die Kurve *Theo* zeigt Schnellepegel auf einer Platte mit zusätzlicher Berücksichtigung der Materialdämpfung nach (3.13) und (3.14b) ($\eta_{\text{int}} = 0,02$ als Annahme; Materialdatensatz (M1) aus Tab. 8). *APos* ist der Pegel gemessen am Kraftereinleitungsort. Die vertikalen Linien kennzeichnen den Hallradius nach (3.15). [vgl. 39]

3 Experimentelle Untersuchungen

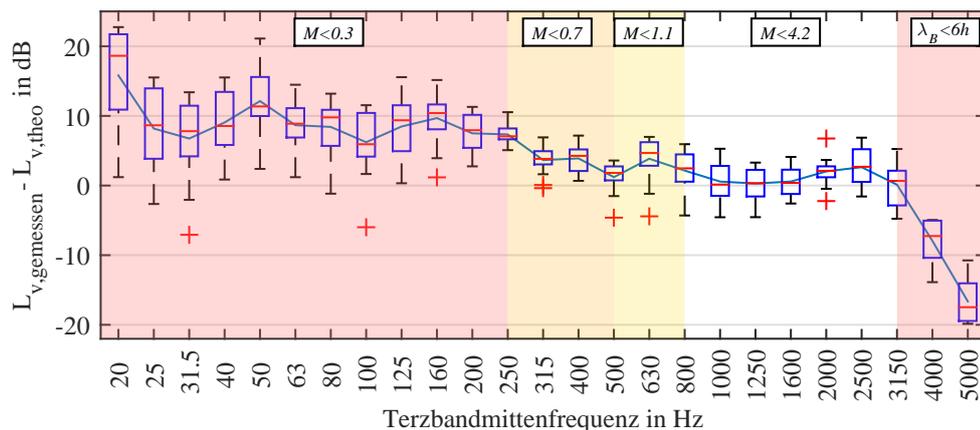


Abbildung 38 Abweichungen zwischen gemessenen und prognostizierten Schnellepegeln nach (3.13) und (3.14b) auf dem BAUTEIL NR. 70 für die Messpositionen oberhalb der Krafeinleitung. Die farbig markierten Bereiche grenzen dabei die Gültigkeit der Modellrechnung ab. Rot steht für keine gute Übereinstimmung, Orange für geringe Übereinstimmung, Gelb für vertretbare Übereinstimmung und der weiße Bereich ergibt eine hohe Übereinstimmung. [39]

dem Terzband 500 Hz bis 3150 Hz ist die Differenz mit höchstens 5 dB akzeptabel.

Oberhalb von 3150 Hz gilt die *Theorie der dünnen Platten* (3.12) nicht mehr. Damit ist die Voraussetzung für die Berechnung des theoretischen Schnellepegels mithilfe von (3.14b) nicht mehr gegeben. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung von (3.14a) mit der Gruppengeschwindigkeit der Biegewellen für *akustisch, dicke Platten* diese Abweichungen verringert [siehe dazu auch 65, S. 174]. Außerdem ist der Durchmesser der Platte zur Befestigung des Impedanzmesskopfes an der Struktur nicht mehr klein im Vergleich zur Biegewellenlänge in y -Richtung, siehe Abbildung 32 (a).

Die Eignung des hier verwendeten Prognosemodells für die Ausbreitungsdämpfung im Frequenzbereich kann mithilfe des modalen Überlappungsfaktors der Biegewellen M_B nach (2.10) bewertet werden. Unterhalb von 250 Hz ist für die gemessene Wand der modale Überlappungsfaktor $M_B \leq 0,3$ (Annahme: $\eta_{tot} = 0,02$). Das entspricht drei Moden im Terzband (Abb. 39). Mit zunehmender Bandbreite der Frequenzbänder steigt auch die Modenanzahl pro Terzband (2.11). Somit sind die Voraussetzungen für ein diffuses Körperschallfeld besser erfüllt. Ab einer Frequenz von 500 Hz werden die Abweichungen geringer. Ab 800 Hz beträgt die Differenz im Mittelwert 2 dB. Oberhalb dieses Frequenzbandes ist der modale Überlappungsfaktor $M_B > 1$. In diesem Bereich sind die Bedingungen eines diffusen Körperschallfeldes erfüllt.

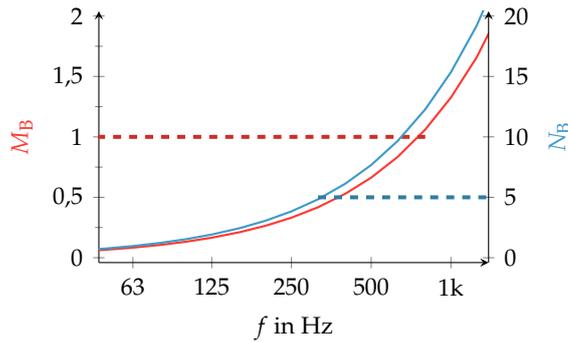


Abbildung 39 Anzahl der Biegemoden im Terzband N_B und der modale Überlappungsfaktor M_B des BAUTEILS NR. 70 ($\eta_{\text{tot}} = 0,02$ als Annahme; Materialdatensatz (M1) aus Tab. 8). Die horizontal gestrichelten Linien zeigen übliche Mindestwerte der SEA für N_B (5) und für M_B (1) an. [vgl. 39]

Indirekt angeregtes Bauteil: Weitere Untersuchungen zur Ausbreitungsdämpfung an indirekt angeregten Bauteilen aus Brettspertholz sind in [41] enthalten. Dort ist in Grundzügen das Verfahren nach [123, Anhang A] angewendet worden, um die Klassifizierung der Bauteile in Gruppe A oder B für die Flankenübertragung nach EN 12354 (Abs. 2.3.3) bzw. ISO 10848 durchzuführen. In dem verwendeten Brettspertholzstoß STOSS-NR. 21 (siehe Anhang S. 237) im freistehenden Prüfstand der Hochschule Rosenheim wurden die Brettspertholzbauteile der Gruppe A zugeordnet. Die Gruppe A beschreibt Bauteile bei denen die Gesamt-Bauteildämpfung durch die verbundenen Bauteile dominiert ist.

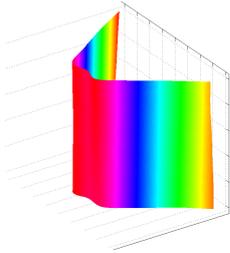
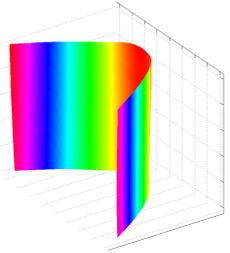
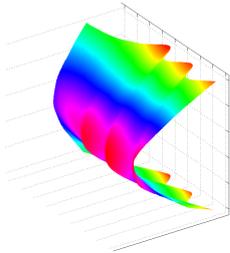
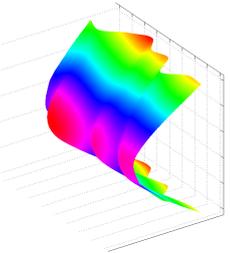
3.5.3 Betriebsschwinganalysen

Betriebsschwinganalyse einzelner Bauteilen

Die experimentellen Modalanalysen an dem frei hängenden Wandelement 3S sind zur Ermittlung der E-Moduln und zur Validierung der in Teilprojekt 4 berechneten Eigenfrequenzen und Eigenmoden durchgeführt worden. Aus der Resonanzfrequenz der ersten Biege-Schwingung in den beiden Hauptrichtungen lassen sich die E-Moduln nach (3.10a) und (3.10b) berechnen. Abbildung 9 zeigt für zwei verschiedene Anregungspositionen die Formen und Frequenzen der ersten Biege-Schwingung. Die resultierenden E-Moduln aus diesen Messungen sind in Tabelle 6 dargestellt. Eine Übersicht aller Schwingformen dieser experimentellen Modalanalyse bis 100 Hz befindet sich im Anhang 15.

3 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 9 Erste Biege-Schwingformen und Frequenzen des frei hängenden Wandelementes 3S (BAUTEIL NR. 56) aus der experimentellen Modalanalyse. Die Anregung an der Wand erfolgte mit einem Modalhammer an zwei Positionen (APos).

Nr.	Schwingform APos I	Frequenz in Hz	Schwingform APos IV	Frequenz in Hz
1		8,8		8,8
11		64,4		64,5

Betriebsschwinganalyse gekoppelter Bauelemente

Aus der Betriebsschwinganalyse (BSA) an den gekoppelten Bauteilen des L-Stoßes wurden die Schwingformen mithilfe der Akzeleranzen (Kap. 3.4.3) gebildet. Dazu wurde jeweils ein Bauteil mit einem Gleitsinus über einen elektrischen Schwingererregter erregt und an beiden Bauteilen an einem unregelmäßigen Messraster mit einem Abstand von ca. 40 cm gemessen. Die ersten Schwingformen von den gekoppelten Bauteilen des L-Stoßes ohne Elastomerlager sind für die reziproken Messungen in Tabelle 10 darstellt. Alle Schwingformen aus der BSA bis einschließlich 200 Hz befinden sich im Anhang 22. Ergänzend dazu sind auch die Ergebnisse für die Variante mit Elastomerlager (L-STOSS NR. S3) für zwei verschiedene Anregungspositionen je Bauteil im Anhang 29 zu finden.

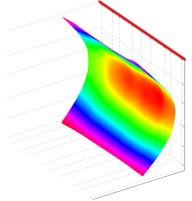
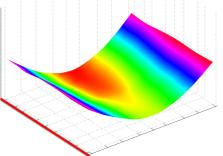
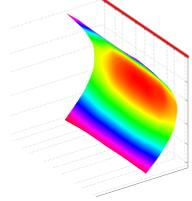
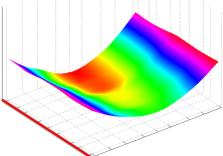
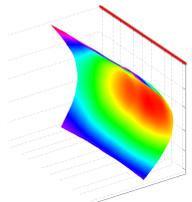
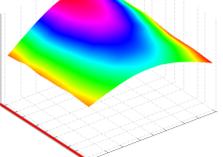
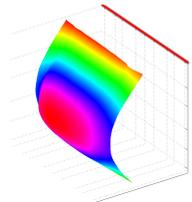
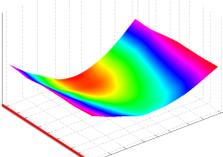
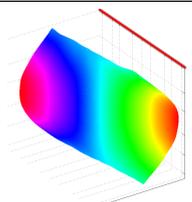
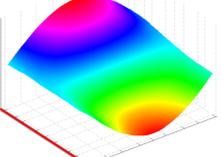
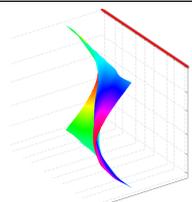
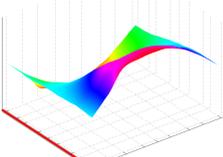
Bei der Analyse der Schwingformen in Tabelle 10 zeigt sich, dass die ersten Formen jeweils doppelt auftreten und z. T. eine starke Kopplung zwischen den

Bauteilen vorhanden ist. Die Schwingungsbilder sind in der Amplitude jeweils stark vergrößert dargestellt und sind nicht gleich skaliert. Als Orientierungshilfe ist ein Amplitudenfaktor A_F angegeben, der die maximale Amplitude des indirekt angeregten Bauteils bezogen auf die maximale Amplitude des direkt angeregten Bauteils darstellt. Beispiele für Schwingformen mit gleicher Amplitudenskala finden sich in Abbildung 43. Die erste Biege-Schwingform tritt bei 25,0 Hz und bei 26,5 Hz bei Wand und Decke auf. Dieses Verhalten ist auch bei den nächsten drei Paaren von Schwingformen (Nr. 4-8) zu beobachten. Die reziproke Messung in Tabelle 10 zeigt bei den ersten Schwingformen ein ähnliches Verhalten und bestätigt die dazugehörigen Resonanzfrequenzen. Ein interessante Beobachtung bei den Ergebnissen der Messreihe mit Anregung an der Decke ist, dass bei der Wand deutliche Schwingformen zu erkennen sind bei Frequenzen bei denen die Decke keine eindeutige Schwingformen erkennen lassen (siehe Nr. 5 und 7, Tab. 10). Das bedeutet, dass die Wand in diesem Fall nicht durch eine Biege-Eigenschwingung der Decke angeregt wird.

Auf eine zusätzliche Untersuchung mit Luftschallanregung statt Körperschallanregung wurde hier verzichtet, da am ift Rosenheim der Einfluss der unterschiedlichen Anregung bereits behandelt worden ist. Die Ergebnisse der BSA dienen insgesamt dem Verständnis des Schwingverhaltens gekoppelter Bauelemente bei unterschiedlichen Kopplungsbedingungen und zur Kalibrierung eines Berechnungsmodells mit der FEM in den Teilprojekten 2 und 4.

3 Experimentelle Untersuchungen

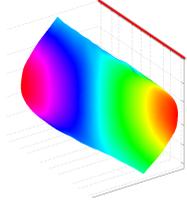
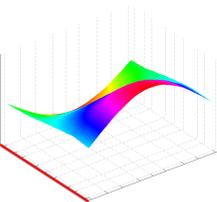
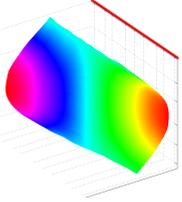
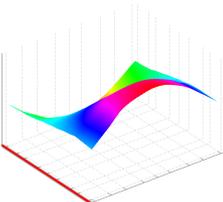
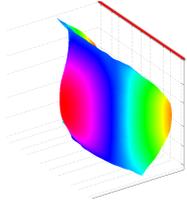
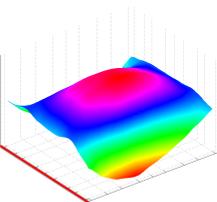
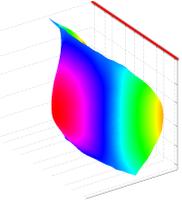
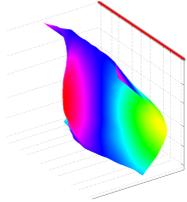
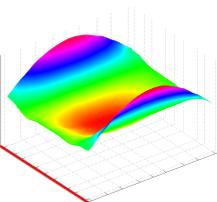
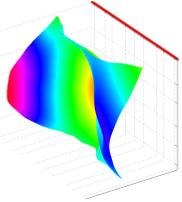
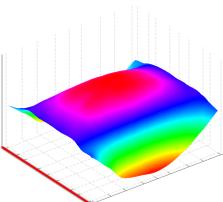
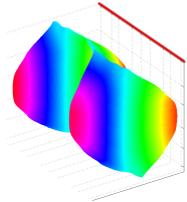
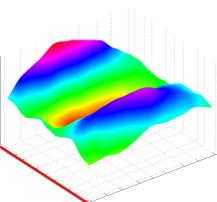
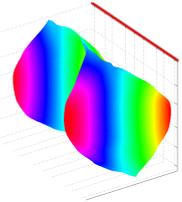
Tabelle 10 Schwingformen und Resonanzfrequenzen von Wand- und Deckenelement im L-STOSS NR. 3 ohne zusätzl. Pressung und ohne Elastomer in der Stoßfuge aus der BSA. Der Amplitudenfaktor A_F ist normiert auf die maximale Amplitude des direkt angeregten Bauteils. Die rote Linie kennzeichnet die Kopplungsstelle der beiden Bauteile.

Nr.	Wand angeregt: WuSPIV	Decke	Wand	Decke angeregt: DeSPIII
1				
f in Hz	25,0	25,0	25,1	25,1
A_F		0,62		1,16
2				
f in Hz	26,5	26,5	26,5	26,5
A_F		0,98		0,68
3				
f in Hz	28,9	28,9	29,1	29,1
A_F		0,43		1,91

Fortsetzung nächste Seite ...

3.5 Resultate der Messungen

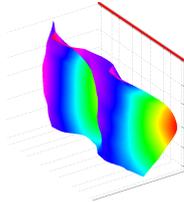
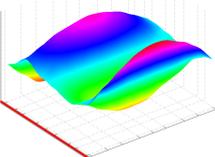
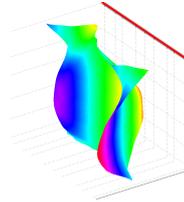
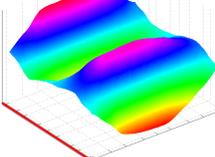
Tabelle 10 – Fortsetzung

Nr.	Wand angeregt: WuSPIV	Decke	Wand	Decke angeregt: DeSPIII
4				
f in Hz	31,1	31,0	31,2	31,2
A_F		0,74		1,43
5				-
f in Hz	36,1	36,3	36,5	-
A_F		0,05		-
6				
f in Hz	42,5	42,9	43,2	43,2
A_F		5,8		0,23
7				-
f in Hz	47,5	47,7	48,1	-
A_F		0,09		-

Fortsetzung nächste Seite ...

3 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 10 – Fortsetzung

Nr.	Wand angeregt: WuSPIV	Decke	Wand	Decke angeregt: DeSPIII
8				
f in Hz	53,0	53,4	53,4	53,2
A_F		1,7		0,16

Auswirkung elastischer Zwischenschichten auf die Bauteilkopplung

Die Messungen für die Modelle der FEM wurden in [41] für die relativen Bauteilbewegungen unmittelbar am Bauteilstoß des T-STOSSES NR. 23 (siehe Anhang, S. 249) durchgeführt. Der Stoß ist mit elastischen Zwischenschichten ausgeführt und die Bauteile sind mit schwingungstechnisch optimierten Verbindungsmitteln verbunden. Die Bewegungen der drei Bauteile unmittelbar an der Stoßstelle wurden an mehreren Punkten in vertikaler und horizontaler Richtung erfasst. Die Befestigung der Sensoren in Abbildung 40 erfolgte mittels Magnetkontakte an Langmuttern auf Stockschrauben, die im Brettsperrholz eingeschraubt waren. Die Positionen der Messspalten entsprechen den der Rastermessungen auf der Decke. Daraus ergibt sich ein Messraster von 4×9 Positionen unmittelbar an der Stoßstelle. Die Bezeichnungen für die Positionen der Messzeilen in Z-Richtung am Stoß in Abbildung 40 sind

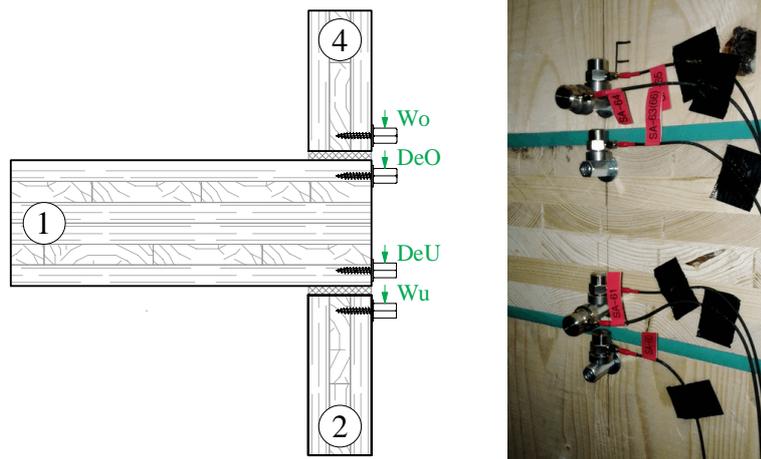
Wo Wand oben,

DeO Decke oben,

DeU Decke unten und

Wu Wand unten.

Bei den Auswertungen wurde nur der tieffrequente Bereich $f = 20$ Hz bis 200 Hz analysiert. Dabei wurden aus der Betriebsschwinganalyse Frequenzen ermittelt, welche globale oder lokale Schwingformen aufzeigen, um interessante Stoßstellenbewegungen auszuwählen.

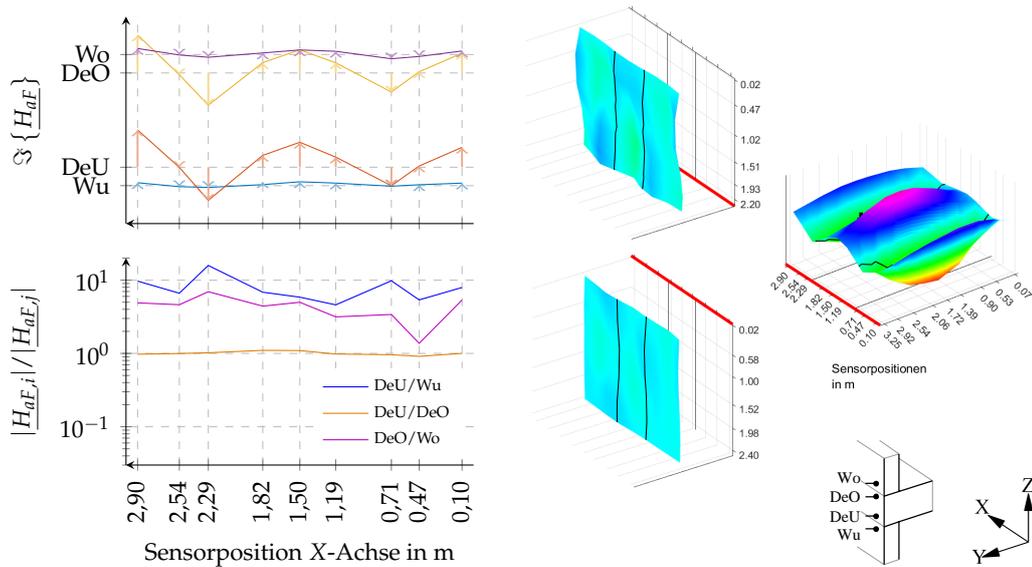


- (a) Die Messpositionen mit grüner Beschriftung kennzeichnen die vertikale Messachse in Z-Richtung.
- (b) Ansicht auf die Stoßstelle mit Sensoren.

Abbildung 40 Die Messpositionen und Befestigungen der Sensoren für die Bestimmung der relativen Stoßstellenbewegung. Gemessen wurden die vertikalen Bewegungen am T-STOSS S23 mit dem Elastomer SYLODYN ND in der Stoßfuge und mit schwingungstechnisch optimierten Verbindungsmitteln.[41]

In der Abbildung 41 (b) ist die Schwingform des T-Stoßes bei 137,875 Hz abgebildet. Die Amplituden der drei Bauteile sind einheitlich skaliert. Die Körperschallanregung an der Deckenposition $DeSP11$ ist in der Abbildung 41 (b) mit dem schwarzen Pfeil gekennzeichnet. Die roten Linien zeigen die gemeinsame Koppellinie an. Die Decke zeigt bei dieser Frequenz eine ausgeprägte Schwingform auf. Die obere Wand zeigt größere Auslenkungen als die untere Wand. Aufgrund der Schwingform der Decke und dem Elastomer in der Stoßfuge ist nun die Frage, in wie weit die ortsabhängigen Bewegungen der Decke auf die Wände in deren longitudinaler Richtung übertragen werden. Dazu sind im oberen Bereich der Abbildung 41 (a) die Amplituden in Z-Richtung der drei Bauteile direkt an der Stoßstelle aufgetragen. An den Positionen der Achsenbeschriftungen Wo , DeO , DeU und Wu befindet sich die Ruhelage der entsprechenden Messzeilen. Bei den abgebildeten Schwingungsamplituden sind die Auslenkungen aus ihrer Ruhelage mit Richtungspfeilen gekennzeichnet. In der gleichen Abbildung im unteren Bereich sind die Amplitudenverhältnisse durch die Beträge der Transferakzeleranzen H_{qF} (3.5) der Bauteile zueinander aufgetragen. Das Amplitudenverhältnis der Decke zur unteren Wand (DeU/Wu) in der Abbildung 41 (a) beträgt maximal 16. Dies

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Auslenkung der Stoßstelle und das Amplitudenverhältnis in Z-Richtung (b) Schwingformen der Bauteile aus der Betriebsschwinganalyse

Abbildung 41 Stoßstellenbewegung und Schwingformen am T-STOSS S23 für $f = 137,875$ Hz bei Anregung an der Decke an der Position *DeSPIII*. [41]

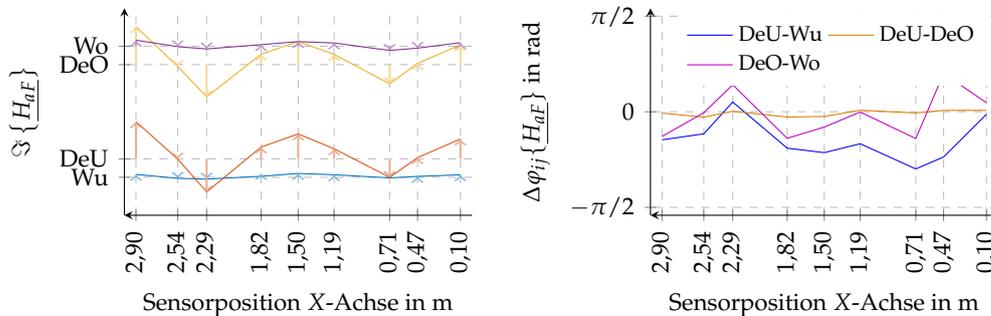
würde auf eine 16-fache Amplitude der Decke zu der unteren Wand hinweisen. Das Amplitudenverhältnis der Decke zur oberen Wand (DeO/Wo) ist kleiner als das der Decke zur unteren Wand. Dies zeigt eine größere Übertragung der Schwingung auf die obere Wand. Da beide Verhältnisse deutlich über eins sind, könnte eine Stauchung der elastischen Zwischenschicht vorliegen. Das verwendete Elastomer führt somit bei einer Frequenz von 137,875 Hz zu einer geringeren Schwingungsübertragung auf die angrenzenden Bauteile. Zur Verifizierung der Messung dient das Amplitudenverhältnis der Messpositionen an der Decke unten (DeU) zu Decke oben (DeO). Das Verhältnis von eins ist plausibel, da die beiden Aufnehmer jeweils am selben Bauteil befestigt sind und dieses in dem Frequenzbereich unter 200 Hz keine Dickenmoden haben kann.

Die Phasendifferenzen der Transferakzelerenzen nach (3.16)

$$\Delta\varphi_{ij}\{H_{aF}\} = \varphi_i\{H_{aF,i}\} - \varphi_j\{H_{aF,j}\} \quad (3.16)$$

zwischen den Aufnehmerpaaren aus den Messzeilen $i - j$ (DeO-Wo, DeU-Wu und DeU-DeO) in Z-Richtung sind über die Achsenpositionen in X-Richtung in der Abbildung 42 (b) aufgetragen. Zu der Ermittlung der Phasen sei angemerkt, dass

durchaus mit einer größeren Unsicherheit zu rechnen ist. Die Messwerte können als Orientierung herangezogen werden. Die Phasendifferenzen der zwei Messzeilen an der Decke (DeU-DeO) sollten auch hier, wie die Amplitudenverhältnisse, keinen Unterschied zeigen. Die Phasendifferenz zwischen der Decke und der oberen Wand



(a) Ansicht der vertikalen Schwingform der Stoßstelle aus ihrer Ruhelage (b) Phasendifferenzen zwischen den Transferakzeleranzen der Stoßstelle

Abbildung 42 Stoßstellenbewegung und Phasendifferenzen zwischen Transferakzeleranzen am T-STOSS S23 für $f = 137,875$ Hz bei Anregung an der Decke an der Position DeSPIII. [41]

(DeO-Wo) ist nahezu Null. In der Abbildung 42 (a) zeigen die Richtungspfeile der Schwingungsamplituden $\mathfrak{S}\{H_{aF}\}$ der Aufnehmerpositionen in die gleiche Richtung. In diesem Fall ist auch nur mit geringem Phasenversatz zu rechnen. Wäre die Phasendifferenz $+\pi$ oder $-\pi$ könnte eine gegenphasige Schwingung vorliegen.

Im Anhang von [41] sind für weitere Eigenfrequenzen des Stoßes, Amplituden- und Phasenverhältnisse aufgeführt. Diese Messergebnisse ergaben Hinweise für die Finite Elemente Modellierung in Teilprojekt 2 und 5 bei der Umsetzung der Bauteilkopplung an den Stoßstellen.

3.5.4 Power Injection Method

Die *Power Injection Method* (PIM) ist mit großem zeitlichen Aufwand sowie hoher messtechnischer Präzision verbunden. Bei der Untersuchung verschiedener Stoßstellenkonfigurationen ist die numerische *Power Injection Method* bzw. Energieflussanalyse von Vorteil. Hierbei bleibt der zusätzliche Modellierungsaufwand für weitere Konfigurationen begrenzt, indem einzelne Parameter variiert werden. Dazu benötigt wird ein parametrisiertes Modell, das anhand von Messungen kalibriert ist. Die Erstellung parametrisierter Modelle auf Grundlage der Energieflussanalyse (EFA) wurde in Teilprojekt 5 [92] durchgeführt. Anhand von Energie-

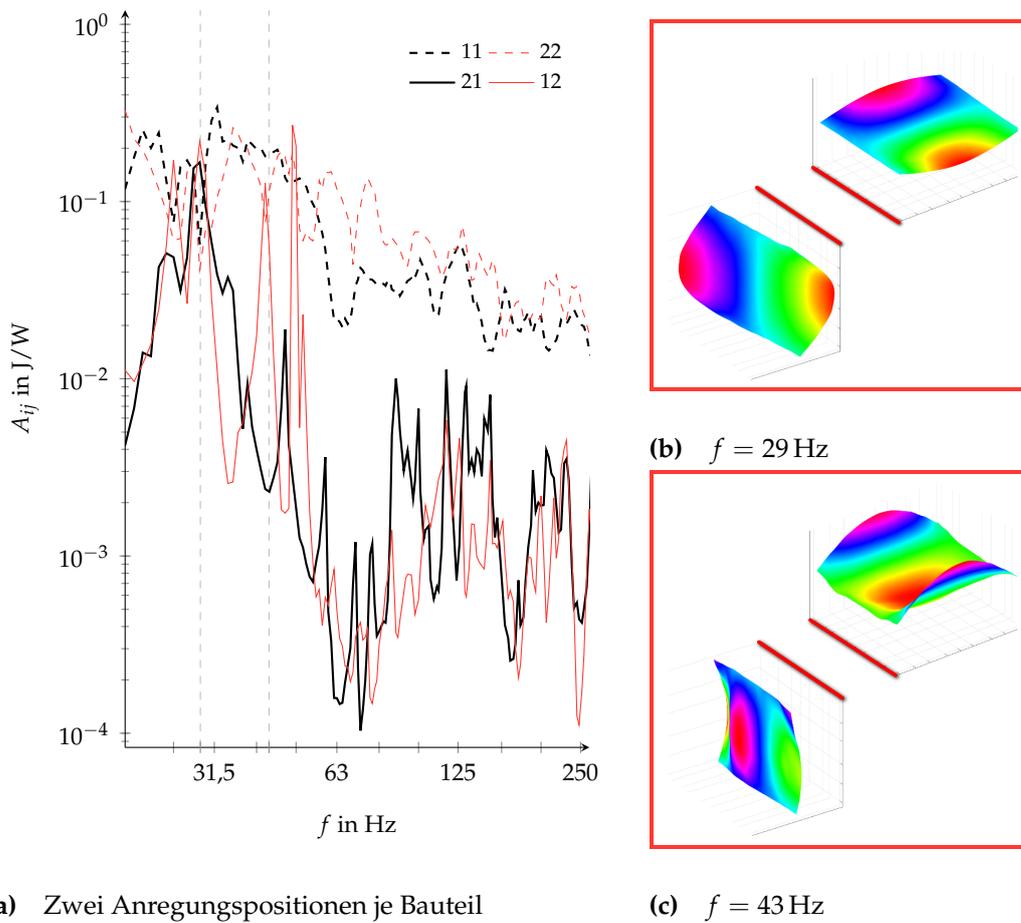
3 Experimentelle Untersuchungen

einflusskoeffizienten können Simulationen mit den Messergebnissen [88] verglichen werden (Abs. 2.2.2).

Im Folgenden werden die Messergebnisse aus der experimentellen PIM für verschiedene Stoßstellenkonfigurationen dargestellt. Ein Vergleich von Kopplungsverlustfaktoren aus experimenteller PIM und experimenteller SEA ist beispielhaft für zwei Varianten des L-Stoßes im Anhang in den Diagrammen 59b und 65b dargestellt.

L-Stoß ohne Elastomerzwischenlage

Abbildung 43 (a) zeigt die tieffrequenten und schmalbandigen Energieeinflusskoeffizienten (2.25) des L-STOSSES NR. S3. Für den Frequenzbereich von $f = 50$ Hz bis 2000 Hz sind diese in Terzbändern in Abbildung 13 dargestellt. Dabei können A_{11} bzw. A_{22} als Anregbarkeit der Subsysteme 1 (Decke) bzw. 2 (Wand) interpretiert werden. A_{12} stellt die normierte Energie in der Decke bei Anregung der Wand dar.



(a) Zwei Anregungspositionen je Bauteil

(c) $f = 43$ Hz

Abbildung 43 Energieeinflusskoeffizienten A_{ij} auf Basis gemessener Schnellen und Schwingformen aus einer Betriebsschwinganalyse bei Anregung von System 2 (Wand) an L-STOSS NR. S3.

Bei 43 Hz ist A_{12} trotz der geringen Anregbarkeit der Wand größer als A_{21} . Die Schwingform bei dieser Frequenz aus der Betriebsschwinganalyse zeigt in Abbildung 43 (c) entsprechend höhere Amplituden der Decke im Vergleich zur Wand. Bei 29 Hz haben alle vier Energieeinflusskoeffizienten A_{ij} in etwa den gleichen Wert. Dies zeigt sich in den Amplituden in Abbildung 43 (b). Somit kann anhand der A_{ij} neben den Energieflüssen auch das modale Verhalten der Struktur identifiziert werden.

Durch Invertieren und Umsortieren der Matrix A der Energieeinflusskoeffizienten (2.23) erhält man gemäß Abschnitt 2.2.2 Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren (siehe Abb. 45). Diese sind jedoch nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich interpretierbar. Zur Abgrenzung des physikalisch sinnvollen Fre-

3 Experimentelle Untersuchungen

quenzbereichs wurde das in der SEA verwendete Kriterium der Modenanzahl im Frequenzband (2.11) herangezogen. Die Modenanzahl im Frequenzband kann für die einzelnen Subsysteme durch eine aufwändige Nachauswertung der Modalanalyse am FE-Modell bestimmt werden. Für die reale Struktur kann die Modenanzahl anhand der Ergebnisse der Betriebsschwinganalyse näherungsweise ermittelt werden. Die Anzahl der Moden aus Messung und Simulation sowie die für die Anwendbarkeit der SEA kritische Zahl variiert je nach Literaturquelle. Für den hier untersuchten L-Stoß wird die PIM ab dem Bereich von ca. 250 Hz bis 500 Hz als physikalisch sinnvoll erachtet, siehe Abbildung 9 (b).

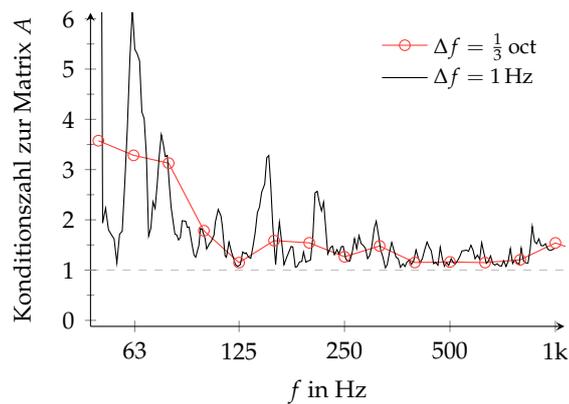


Abbildung 44 Konditionszahl der Matrix der Energieeinflusskoeffizienten aus dem Experiment von L-STOSS NR. S3. Es wurden zwei Anregungspositionen je Bauteil verwendet.

Ein weiteres Kriterium stellt die Konditionszahl der Matrix A (2.23) dar, welche die Güte der Invertierbarkeit beschreibt. Nimmt die Konditionszahl einen Wert nahe Eins an, steht dies für eine gute Invertierbarkeit der Matrix. Betrachtet man Abbildung 44, erkennt man dass die Kondition der schmalbandig ausgewerteten Messdaten durch die Mittelung über Terzbänder verbessert wird.

Unter Berücksichtigung der genannten SEA-Kriterien dürfen die Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren¹¹ in Abbildung 45 im tieffrequenten Bereich nicht ausgewertet werden. Diese Auswertung ist spezifisch für den untersuchten Bauteilstoß.

In Abbildung 45 (a) sind die Mittelwerte der Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren aus den Messergebnissen von zwei verschiedenen Anregungspositionen dargestellt. Zusätzlich sind Minimum und Maximum der Verlustfaktoren aus den

¹¹Die Dämpfungsverlustfaktoren in diesem Abschnitt sind nicht mit dem internen Verlustfaktors der Platten gleichzusetzen, da die abgestrahlte Leistung in den Raum messtechnisch nicht separat erfasst worden ist.

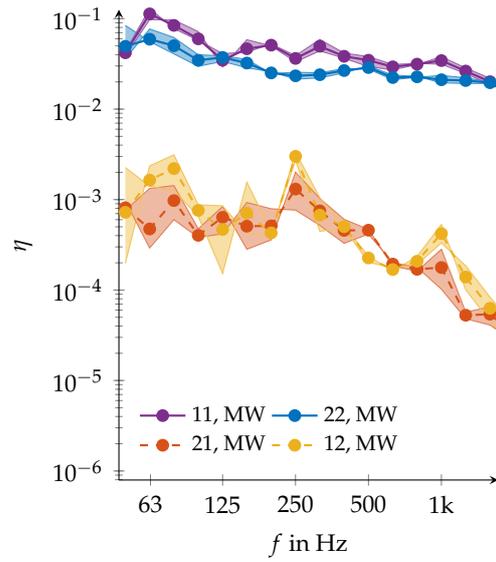
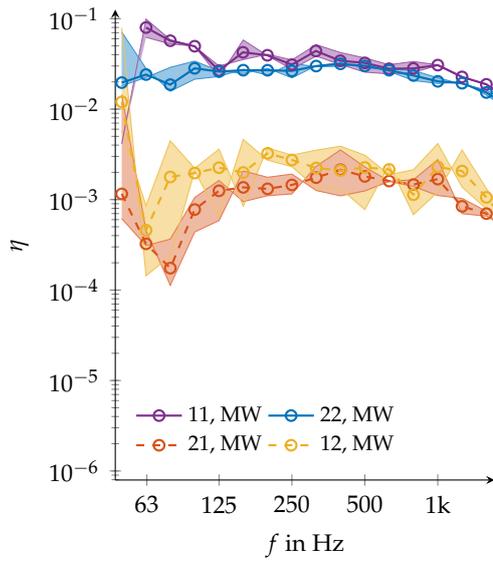
einzelnen Anregungspositionen als Bereich eingezeichnet. Die Kopplungsverlustfaktoren zeigen eine geringere Robustheit hinsichtlich der Anregungsposition als die Dämpfungsverlustfaktoren. Das Verhältnis der Dämpfungs- zu den Kopplungsverlustfaktoren ist nahezu konstant über den dargestellten Frequenzbereich.

L-Stoß mit Elastomerzwischenlage

Das Einbringen einer Elastomerlage zwischen Wand und Decke (vgl. Abb. 27b) führt mit zunehmender Frequenz zu kleiner werdenden Kopplungsverlustfaktoren und zeigt die Entkopplung der beiden Bauteile in Abbildung 45 (c) auf. In Abbildung 45 (b) wird der Einfluss zweier unterschiedlicher Anregungspositionen pro Subsystem auf die Verlustfaktoren dargestellt. Während sich die Dämpfungsverlustfaktoren robust verhalten, führt dies bei den Kopplungsverlustfaktoren zu Abweichungen.

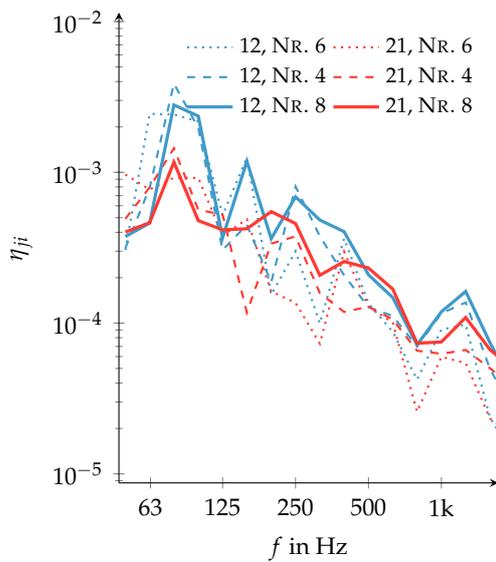
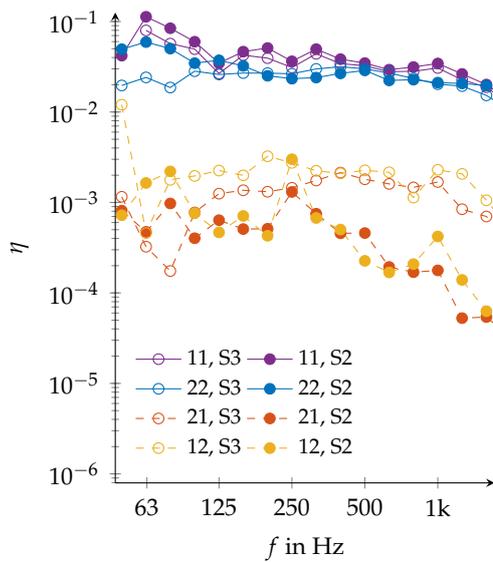
In einer weiteren Untersuchung wird eine zusätzliche Pressung aufgebracht (vgl. Abb. 27d), wobei unterschiedliche Elastomere verwendet werden. SYLODYN NC ist die weichste Variante, SYLODYN ND etwas steifer und SYLODYN NE stellt den steifsten Elastomertyp dar. In Abbildung 45 (d) sind die im Rahmen der experimentellen *Power Injection Method* ermittelten Kopplungsverlustfaktoren dargestellt. Je weicher das eingebaute Elastomer ist, desto geringer sind die Kopplungsverlustfaktoren mit Ausnahme einzelner Abweichungen, die der Messungenauigkeit zugeordnet werden können. Für weichere Elastomere deuten die geringeren Kopplungsverlustfaktoren somit eine stärkere Entkopplung der beiden Bauteile an. Ein kleinerer Kopplungsverlustfaktor hat ein höheres Stoßstellendämm-Maß zur Folge, siehe Abschnitt 3.5.5.

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) S3 - Min/Max aus Anregungsposition und Mittelwert (MW) aus Beiden.

(b) S2 - Min/Max aus Anregungsposition und Mittelwert (MW) aus Beiden.



(c) Mit (S2) und ohne (S3)
Elastomerzwischenlage bei
Verwendung von zwei
Anregungspositionen je Bauteil.

(d) Elastomerzwischenlage SYLODYN NC
(S6), ND (S4) und NE (S8) bei zwei
Anregungspositionen je Bauteil.

Abbildung 45 Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren aus *Power Injection Method* am L-Stoß. Unterhalb von 500 Hz sind die Ergebnisse nur eingeschränkt interpretierbar.

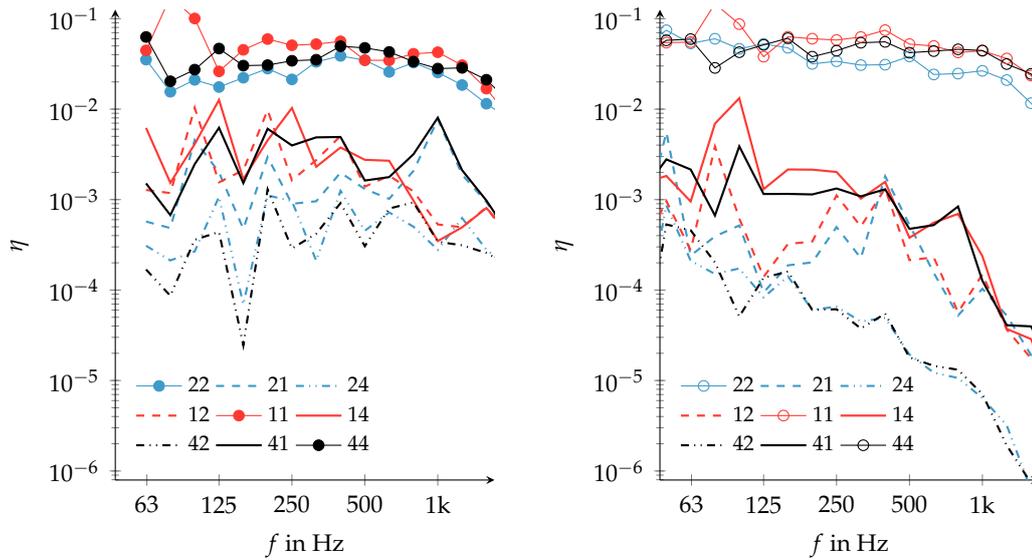
Unterbrochener T-Stoß ohne Elastomerzwischenlagen

Bei der Durchführung der experimentellen *Power Injection Method* am unterbrochenen T-Stoß wurde zunächst eine Variante gemessen, bei der weder zwischen unterer Wand (Subsystem 2) und Decke (Subsystem 1) noch zwischen oberer Wand (Subsystem 4) und Decke ein Elastomer angebracht worden ist (vgl. Abb. 28 (c)). Für die Montage der Decke auf die untere Wand wurden diese stumpf verschraubt. Die obere Wand wurde über Winkel auf die Decke montiert. Die resultierenden Kopplungs- und Verlustfaktoren aus den Messeergebnissen der experimentellen *Power Injection Method* gemittelt über zwei verschiedene Anregungspositionen ist in Abbildung 46 (a) dargestellt. Die Kopplungsverlustfaktoren zwischen unterer und oberer Wand (42 und 24) zeigen die geringsten Werte auf, da diese nur indirekt über die dazwischen angeordnete Decke verbunden sind. Die geschraubte Winkelverbindung zwischen oberer Wand und Decke (14 und 41) führt im mittleren Frequenzbereich zu etwas höheren Kopplungsverlustfaktoren als die geschraubte Verbindung zwischen unterer Wand und Decke.

Unterbrochener T-Stoß mit Elastomerzwischenlagen

In einer weiteren Variante mit Entkopplungsmaßnahmen an der Stoßstelle wurde die experimentelle *Power Injection Method* am unterbrochenen T-Stoß durchgeführt. Sowohl zwischen unterer Wand (Subsystem 2) und Decke (Subsystem 1) als auch zwischen oberer Wand (Subsystem 4) und Decke wurde eine Zwischenlage aus Elastomer eingebracht (vgl. Abb. 28 (e)). Zusätzlich wurden zur Körperschallkopplung geeignete Verbindungsmittel gewählt. Hierbei ergeben sich für die oberen beiden Bauteile, die obere Wand sowie die Decke, im Vergleich zur unteren Wand leicht erhöhte Dämpfungsverlustfaktoren η_{11} und η_{44} (Abb. 46 (b)). Die Kopplungsverlustfaktoren verhalten sich nicht durchwegs symmetrisch, da weder Geometrie noch Lagerung der beiden Wände symmetrisch sind. Außerdem sind die Zwischenlagen bestehend aus Elastomer unterschiedlich stark gepresst. Dies wirkt sich auf die unterschiedlich starke Entkopplung der angrenzenden Bauteile aus, wie aus dem Verlauf der Kopplungsverlustfaktoren hervorgeht.

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) S21 ohne Elastomerzwischenlagen und ohne elastische Lagerung der Verschraubung

(b) S23 mit Elastomerzwischenlagen und elastisch gelagerter Verbindungsmittel

Abbildung 46 Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren aus der *Power Injection Method* am T-STOSS NR. S21 UND S23 in Terzbändern. Unterhalb von 500 Hz sind die Ergebnisse nur eingeschränkt interpretierbar. Die Verlustfaktoren sind als Mittelwert aus den Messergebnissen von zwei Anregungspositionen je Bauteil berechnet worden.

Der Vergleich der Kopplungsverlustfaktoren der elastisch gelagerten Variante in Abbildung 46 (b) und der verschraubten Variante ohne Entkopplungsmaßnahmen in Abbildung 46 (a) verdeutlicht, dass diese Maßnahmen bereits ab etwa 250 Hz die Schallübertragung der beiden Wände zueinander deutlich reduziert. Bei den Verbindungen zwischen Wand und Decke zeigt sich im mittleren Frequenzbereich zwar schon eine Verbesserung, allerdings wird diese erst bei höheren Frequenzen ab etwa 1 kHz signifikant. Eine weitere Beobachtung in den Ergebnissen ist, dass die Kopplungsverlustfaktoren zwischen Wand und Decke ab 400 Hz in der entkoppelten Variante eine sehr hohe Übereinstimmung zeigen. Eine Ausnahme bildet das 800 Hz Terzband. Dort zeigt die Kopplungsverbindung mit den elastisch gelagerten Winkel zwischen oberer Wand und Decke (41 und 14) deutlich höhere Kopplungsverlustfaktoren als die elastisch gelagerten Tellerkopfschrauben zwischen Decke und unterer Wand (21 und 12).

3.5.5 Stoßstellendämm-Maße in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

Einige Planungswerte für Einzahlwerte von Stoßstellendämm-Maße konnten in Zusammenarbeit von ift Rosenheim, Hochschule Rosenheim und der Holzforschung Austria ermittelt und zusammengestellt werden [44–46, 50, 124]. Diese standen bereits vor Projektbeginn zur Verfügung. Innerhalb dieses Forschungsprojektes konnten diese durch weitere Messungen ergänzt werden. In einer Zusammenführung durch A. Timpte [33, 34] wurden empirische Daten für die Massivholzbauweise von anderen internationalen Instituten einbezogen. Dabei wurden auch frequenzabhängige Vergleiche und eine detailliertere Differenzierung der Stoßarten durchgeführt.¹² In dem Normenentwurf zur EN 12354-1 [6] werden im Anhang F.3 erstmals Vorschläge für frequenzabhängige Stoßstellendämm-Maße speziell für die Brettspertholzbauweise für einen T-Stoß und einen X-Stoß gemacht, die auf empirische Daten basieren [126].

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Messungen an der Hochschule während des Forschungsprojektes dargestellt. Zum Einen wurden konstruktive Einflüsse wie der Einsatz von Elastomerzwischenlagen und elastisch gelagerte Verbindungsmittel an den Stoßstellen untersucht, zum Anderen ergaben sich auch Erkenntnisse über Einflüsse aus der Messvorschrift der ISO 10848 und der Art des Prüfstandes.

Einzahlwerte der Stoßstellendämm-Maße

Die Einzahlwerte der Stoßstellendämm-Maße (3.1) der verschiedenen Stoßvarianten, die an der Hochschule Rosenheim gemessen worden sind, werden in diesen Abschnitt zusammenfassend dargestellt und soweit vorhanden mit anderen Quellen verglichen. Nach [4, Anhang A] wurden die Einzahlwerte als Mittelwert aus den Terzbändern von 200 Hz bis 1250 Hz bestimmt. Eine kompakte Zusammenstellung von Planungswerten für Stoßstellendämm-Maße von Massivholzelementen erfolgt im Teilbericht des ift Rosenheims [59].

Die ausführliche, frequenzabhängige Ergebnisdokumentation zu den L-förmigen Stößen sind im Anhang D und für die T-förmigen Stöße im Anhang E und F zu entnehmen. Tabelle 11 zeigt, dass bei einer L-förmigen Stoßstelle mit einer stirnseitigen Verschraubung der Einsatz einer Elastomerschicht eine Verbesserung des Einzahlwertes zwischen 6 dB bis 10 dB erzielt werden kann. Die elastische

¹²Die Dokumentation ist auch online verfügbar [125].

3 Experimentelle Untersuchungen

Lagerung der Verschraubung zeigt in diesem Fall eine Wirkung von etwa 3 dB.

Tabelle 11 Einzahlangaben der Stoßstellendämm-Maße für L-Stöße aus Messungen an der Hochschule. Aufgrund der angeschlossenen Einrichtung zur Bauteilpressung ist ein zusätzlicher Übertragungsweg vorhanden. Ein direkter Vergleich zum L-Stoß ohne die angeschlossene Einrichtung ist damit nicht möglich.

				
			ohne Lasteintr.	mit Lasteintr.
Bauteilanschluss		$\frac{m_1'}{m_2'}$	\bar{K}_{12}	\bar{K}_{12}
			in dB	in dB
HS Rosenheim (S3, S1)	stirnseitig geschraubt	2	10,4	12,3
HS Rosenheim (S2, S4, S6, S8, S9)	stirnseitig geschraubt + Elastomer	2	17,2	18,6 bis 21,7
HS Rosenheim (S5, S7)	stirnseitig geschraubt elast. + Elastomer	2	-	22,1 bis 24,0

Bei der T-förmigen Stoßvariante mit durchlaufender Flanke, die ebenso an der Hochschule Rosenheim gemessen wurde, ist das 162 mm starke Deckenelement aus Brettsperrholz auf eine Stahlkonsole verschraubt. Dabei ist die Stahlkonsole mit dem Wandelement ebenfalls verschraubt.

Der Einsatz eines Elastomerlagers zwischen Deckenelement und Stahlkonsole erhöht das Stoßstellendämm-Maß um ca. 2 dB (s. Tabelle 12). Die Kopplungsart mit der durchlaufenden Stahlkonsole führt zu einer höheren Körperschallübertragung als eine direkte stirnseitige Verschraubung, wie sie am ift Ro gemessen wurde. Der Vergleich zu den Prognosewerten aus dem Anhang E der DIN EN 12354-1 zeigt deutliche Abweichungen für die weichere Verbindung im Holzbau im Vergleich zu

einer starren Verbindung im Mauerwerks- und Betonbau.

Tabelle 12 T-Stöße mit durchlaufender Flanke - Einzahlangaben von Stoßstellendämm-Maßen im Vergleich aus mehreren Messungen und Quellen. [vgl. 39]

	Bauteilanschluss	$\frac{m_1}{m_2}$		
			$\bar{K}_{12} / \bar{K}_{14}$	\bar{K}_{24}
			in dB	in dB
HS Ro [50, S.53]	ohne Verbindungsmittel	0,6	15	-
HS Ro (S11)	Stahlkonsole, starr geschr.	2	9,2 / 8,4	5,0
ift Ro (1a-A-01) [127, S.2f in C1]	stirnseitig geschr.	0,5	13,9	3,8
EN 12354-1 [5]	starr	2	6,2	10,5
HS Ro (S12)	Stahlkonsole + Elast., geschr.	2	11,7 / 11,2	3,9

Bei der T-förmigen Stoßvariante mit unterbrochener Flanke in Tabelle 13, die an der Hochschule gemessen wurde, ist das Deckenelement aus Brettsper Holz zwischen den Wänden eingefügt. Der Einsatz elastisch gelagerter Verbindungsmittel zeigte nur eine geringe Erhöhung des Stoßstellendämm-Maßes von etwa 1 dB auf dem Weg 12/14 und 24. Wird zusätzlich ein Elastomerlager in den beiden Stoßfugen verwendet, beträgt die Verbesserung des Einzahlwertes etwa 6 dB bis 7 dB auf dem Weg 12/14 und 18 dB auf dem Weg 24.

Ein Vorschlag der CSTB für spezielle Prognosewerte im Massivholzbau im Entwurf E DIN EN ISO 12354-1 [82, Anhang F] für Stoßstellen mit nicht starrer Koppelung führt zu höheren Stoßstellendämm-Maßen als die von der Hochschule und dem ift Rosenheim ermittelten Werte bei starrer Verschraubung. Dabei sind die Differenzen zur Hochschule Rosenheim (HS Ro) größer als die zum ift Ro. \bar{K}_{24} ist an der HS Ro um etwa 3 dB niedriger als am ift Ro und 5 dB niedriger als in dem

3 Experimentelle Untersuchungen

Vorschlag der CSTB.

Tabelle 13 T-Stöße mit unterbrochener Flanke - Einzahlangaben von Stoßstellendämm-Maßen im Vergleich aus mehreren Messungen und Quellen. [vgl. 39]

	Bauteilanschluss	$\frac{m_1'}{m_2}$		
			$\bar{K}_{12} / \bar{K}_{14}$	\bar{K}_{24}
	oben / unten		in dB	in dB
HS Ro [50] Im X-Stoß	ohne Verbindungsmittel / ohne Verbindungsmittel	1,6	17,0	22,0
HS Ro (S21)	Bauwinkel, starr geschraubt / stirnseitig geschraubt	2	12,9 / 11,2	17,1
prEN 12354-1 proposal Annex E (CSTB)	nicht starr	2	15,3	22,0
ift Ro (2a-A-01) [127, S.52f in C2]	Bauwinkel, starr geschraubt / stirnseitig geschraubt	1,9	12,7	20,6
ift Ro (2a-A-04) [127, S.52f in C2]	Bauwinkel, starr geschraubt / stirnseitig geschraubt	1,1	11,3	19,7
NRC [51] Im X-Stoß	Bauwinkel, starr geschraubt / Bauwinkel, starr geschraubt	2,2	10,5	20,3
HS Ro (S22)	Bauwinkel elast., geschraubt / stirnseitig geschraubt elast.	2	12,5 / 12,1	17,8
HS Ro (S23)	Bauwinkel elast. + Elastomer, geschraubt / Elastomer + stirnseitig geschraubt elast.	2	19,6 / 16,6	30,1
HS Ro [50, S.80] im X-Stoß	Bauwinkel elast. + Elastomer, geschraubt / ohne Verbindungsmittel	1,6	25,0	33,0



(a) elastisch gelagerte
Verschraubung



(b) starre Verschraubung

Abbildung 47 Varianten der Bauteilverbindungen

Einfluss von elastisch gelagerten Verbindungsmitteln

Im Folgenden wird der frequenzabhängige Einfluss von elastisch gelagerten Verbindungsmitteln auf das Stoßstellendämm-Maß gezeigt. Dazu wurden zwei Stoßvarianten mit elastisch gelagerten Schraubverbindungen, siehe Abbildung 47 (a), und zwei Varianten mit starrer Verschraubung, siehe Abbildung 47 (b), gegenübergestellt.

S4,S6 mit starrer Verschraubung und Elastomer-Zwischenschicht (Abb. 66,72)

S5,S7 mit elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer-Zwischenschicht

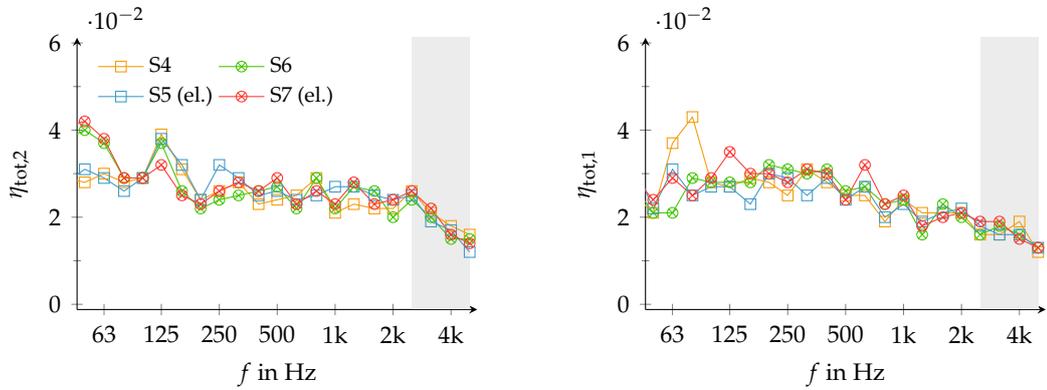
Die Ergebnisse der wesentlichen Kenngrößen zu den Stoßstellen dieser Varianten sind in Abbildung 48 frequenzabhängig dargestellt. Ein signifikanter Einfluss auf die Verlustfaktoren kann bei dieser Gegenüberstellung nicht erkannt werden. Die Schnellepegeldifferenzen sind im Fall der elastisch gelagerten Verschraubung etwas höher. Das führt dazu, dass die Einzahlwerte der Stoßstellendämm-Maße an dem L-förmigen Bauteilstoß etwa 0,5 dB bis 1 dB größer sind.

Einfluss des Gesamtverlustfaktors

Das Stoßstellendämm-Maß (3.1) ist abhängig vom Gesamtverlustfaktor der Bauteile in der jeweiligen Einbausituation. Dazu wird die Kantenabsorptionslänge (2.40) je Bauteil berechnet. In Abschnitt 2.1.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass der modale Überlappungsfaktor (2.10) direkt vom Gesamtverlustfaktor abhängt.

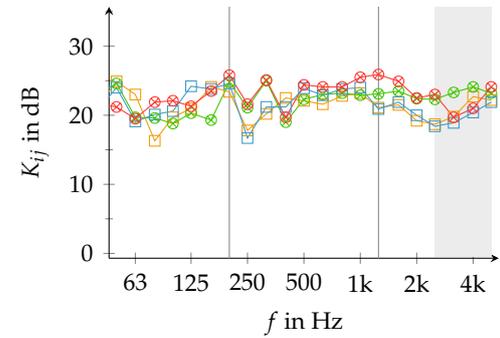
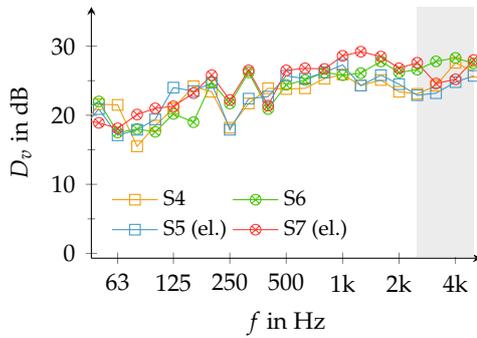
Für zuverlässige Prognosewerte mithilfe der Statistischen Energie-Analyse darf der modale Überlappungsfaktor nicht zu gering sein. Als Konsequenz ist der Ge-

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Verlustfaktoren Wand: Quartile

(b) Verlustfaktoren Decke: Quartile



(c) Schnellepegeldifferenzen

(d) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\overline{K}_{12,S4U6} = 21,7 \text{ dB bis } 22,7 \text{ dB}$
 $\overline{K}_{12,S5U7} = 22,1 \text{ dB bis } 24,0 \text{ dB}$

Abbildung 48 Vergleich der Gesamtverlustfaktoren der Bauteile und Stoßstellendämm-Maße bei Variation der Schraubverbindung an L-STOSS NR. S5 & S7 mit *Elastomer* (elastische Lagerung des Schraubenkopfes) und L-STOSS NR. S4 & S6 (Verschraubung ohne elastische Lagerung). Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Bauteile $m'_1 / m'_2 = 2$. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor.

samtverlustfaktor neben der modalen Dichte entscheidend für die Unsicherheit zu tiefen Frequenzen. Das gilt damit auch für die Stoßstellendämm-Maße [vgl. 128]. Aus diesem Grund sind zur Beurteilung der Unsicherheiten der Stoßstellendämm-Maße im Anhang die modalen Überlappungsfaktoren mit angegeben. Diese wurden aus den gemessenen Gesamtverlustfaktoren und der mittleren Eingangsadmittanz mithilfe von (2.13), (2.14) und (2.10) berechnet.

Für die Prognose nach der EN 12354 wird der Gesamtverlustfaktor für die Umrechnung zwischen Labor- und Bausituation benötigt, siehe Abschnitt 2.3. Sind diese nicht aus Messungen bekannt, können diese mit (2.30a) für die Laborsituation und (2.31) für die Bausituation prognostiziert werden.

Die im Projekt ermittelten Gesamtverlustfaktoren an Massivholzbauteilen im freistehenden Prüfstandes der Hochschule Rosenheim (Abschnitt 3.1) und dem Prüfstand mit unterdrückten Flankenwegen des ift Rosenheims [59] werden den prognostizierten Werten in Abbildung 49 gegenübergestellt. Bei dem Vergleich ist zu beachten, dass der prognostizierte Gesamtverlustfaktor für die Laborsituation nach (2.30a) nur für Messungen in Prüfständen nach der Normenreihe EN ISO 10140 gilt. In der Norm sind die schweren Flanken der Prüföffnung geregelt.

Bei der Ermittlung von Stoßstellendämm-Maße können sich die Gesamtverlustfaktoren aufgrund der Anbindung zwischen Prüfstand und Prüfkörper erheblich unterscheiden. Das liegt vor allem am Anteil der Randverluste [vgl. 74]. Vergleicht man die Gesamtverlustfaktoren in Abbildung 49 (a) und 49 (c) aus dem Prüfstand des ift Rosenheims mit denen aus dem freistehenden Prüfstand der Hochschule in Abbildung 49 (b) und 49 (d) wird der erhebliche Einfluss des Prüfstandes bei tiefen und mittleren Frequenzen deutlich. Die Gesamtverlustfaktoren am Prüfstand der Hochschule zeigen eine geringe Frequenzabhängigkeit auf, da auch die Ränder, die mit dem Prüfstand verbunden sind, kaum Randverluste aufweisen (vgl. Abs. 3.1.2). Der höhere Gesamtverlustfaktor in Prüfständen mit unterdrückten Flankenwegen wirkt sich aus den o. g. Gründen positiv auf die Zuverlässigkeit der Stoßstellendämm-Maße bei tieferen Frequenzen aus [vgl. 74].

Wird für die Prognose der Gesamtverlustfaktoren in den einzelnen Diagrammen in Abbildung 49 mit der flächenbezogene Masse der Bauteile verwendet (2.30a), bestätigt sich, dass diese nur für Prüfstände der Normenreihe EN ISO 10140 und nicht für diese Flankenprüfstände gilt. Die Gesamtverlustfaktoren werden dabei systematisch unterschätzt. Eine bessere Übereinstimmung zwischen Prognose und Messwerten am Prüfstand mit unterdrückten Flanken werden mit (2.30a) erreicht. Dabei wurde für die Konstante c das minimale und maximale flächenbezogene Massenverhältnis zwischen den senkrecht zueinander stehenden Bauteilen aus den

3 Experimentelle Untersuchungen

Messungen herangezogen. In Abbildung 49 (f) zeigen die nach diesem Verfahren prognostizierten Verlustfaktoren mit den in der Bausituation gemessenen eine gute Übereinstimmung.

Die Gesamtverlustfaktoren in Abbildung 49 (e) zeigen Massivholzelemente, wobei die einzelnen Brettschichten nicht geleimt sondern mit Holzdübeln verbunden sind. Dabei zeigt sich im Frequenzverlauf gegenüber den Brettsperrholzelementen eine deutliche Erhöhung des Gesamtverlustfaktors bei etwa 250 Hz bis 500 Hz.

Einfluss der Bezugsfläche zur Ermittlung der mittleren Schnellepegel eines Bauteils

In der DIN EN ISO 10848-1:2006-08 werden geometrische Vorgaben zur Verteilung der Messpositionen für die Ermittlung der mittleren Schnellepegel auf den Bauteilen gemacht. Zum Rand sind mindestens 25 cm und zur Kraffteinleitungsposition 100 cm einzuhalten [4]. Diese Vorgaben sollen sicherstellen, dass im diffusen Körperschallfeld gemessen wird.

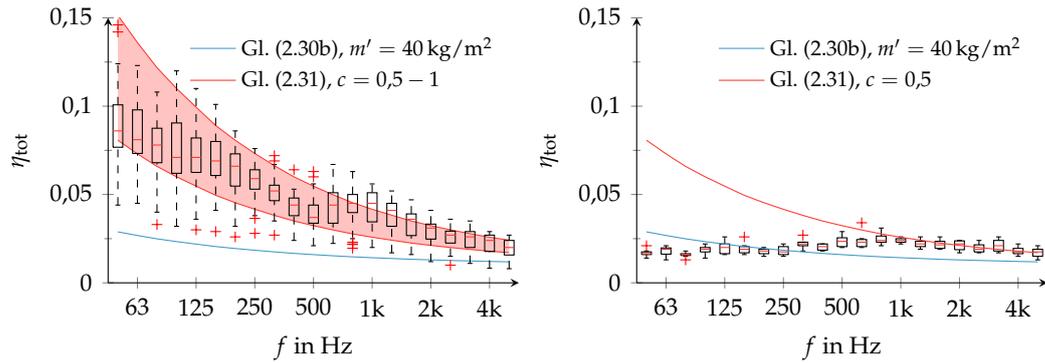
In Randbereichen kann es zu Erhöhungen der Schnellepegel durch Randreflexionen kommen und in der Nähe der Kraffteinleitungsposition dominiert das Nahfeld den gemessenen Schnellepegel. Da die Vorgaben der Norm für verschiedene Baustoffe gelten, sind diese Werte als stark pauschaliert zu betrachten und für den vorliegenden experimentellen Aufbau nicht immer zutreffend. Das führt bpsw. dazu, dass ein Großteil der Bauteilfläche als Bezugsfläche für die Ermittlung eines mittleren Schnellepegels nicht zur Verfügung steht.

Aus diesem Grund wurde der Hallradius r_H (3.15) für das Brettsperrholz für das Terzband 3150 Hz berechnet und als Grundlage einer angepassten Bezugsfläche genutzt, um mehr Messpositionen, die aus dem Messraster (z.B. Anhang: D.1) der Betriebsschwinganalyse zur Verfügung stehen, verwenden zu können. Danach ergibt sich ein Abstand¹³ von 30 cm der Messpositionen gegenüber der Kraffteinleitungsposition als hinreichend, um bis zu diesem Frequenzband keinen Einfluss durch das Nahfeld zu erhalten. Daneben wurde der Einfluss der Randpositionen bei Missachtung des Randabstandes der Norm auf das resultierende Stoßstellendämm-Maß gezeigt.

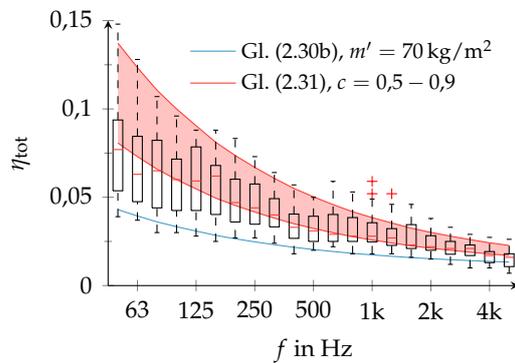
Abbildung 50 zeigt die Stoßstellendämm-Maße für Varianten der zulässigen Bezugsfläche für die Schnellmessung. Die Ergebnisse wurde für zwei Varianten der L-förmigen Bauteilverbindung (mit und ohne Elastomerzwischenlage in der Stoßfuge) durchgeführt. Bei dem Graphen (alle MPos) wurden alle Messpositionen aus der Betriebsschwinganalyse zur Bildung des mittleren Schnellepegels des Bauteils

¹³Hallradius berechnet mit Annahme: $\eta_{\text{int}} = 0,019$ und $\alpha = 0,3$

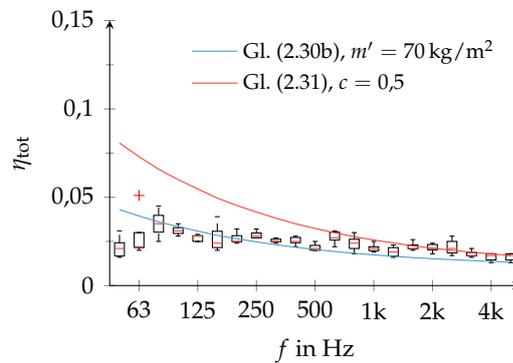
3.5 Resultate der Messungen



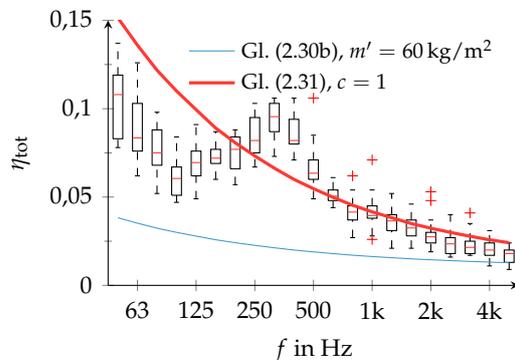
(a) Prüfstand (unterdr.Flanken) am ift Ro $m' = 37 \text{ kg/m}^2$, ($n = 45$)



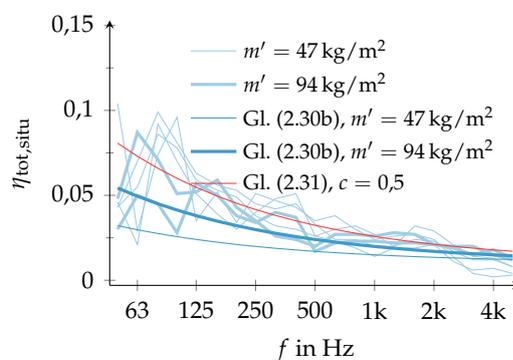
(b) Freistehender Prüfstand an HS Ro $m' = 39 \text{ kg/m}^2$ bis 40 kg/m^2 , ($n = 8$)



(c) Prüfstand (unterdr. Flanken) am ift Ro $m' = 69 \text{ kg/m}^2$ bis 74 kg/m^2 , ($n = 25$)



(d) Freistehender Prüfstand an HS Ro $m' = 74 \text{ kg/m}^2$, ($n = 5$)

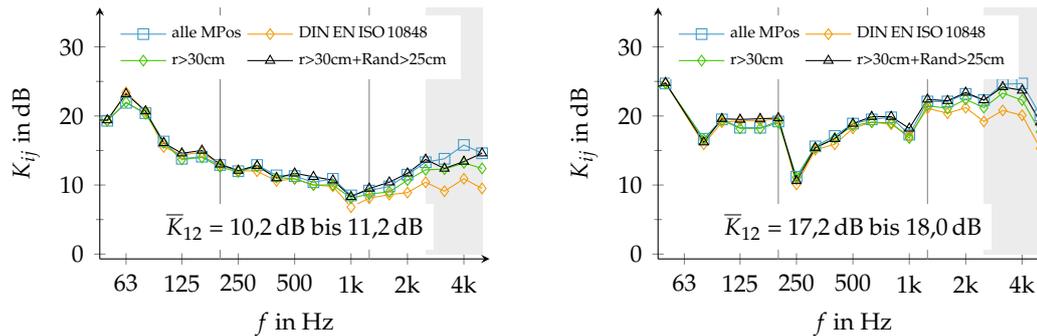


(e) Prüfstand (unterdr. Flanken) am ift Ro, Elemente gedübelt, $m' = 60 \text{ kg/m}^2$, ($n = 18$)

(f) Baumessung Stufen, X-Stoß, $m' = 47 \text{ kg/m}^2$ bis 94 kg/m^2 , ($n = 6$)

Abbildung 49 Gesamtverlustfaktoren von Massivholzbauteilen (ohne Vorsatzschalen, Elastomere) in Stoßsituationen aufgeteilt nach Einbausituation, flächenbezogener Masse m' des Bauteils und Bauweise des Massivholzelementes. Zusätzlich ist ein Referenzwert für typische Bauteile mit $m' < 150 \text{ kg/m}^2$ angegeben [vgl. 82, Gl. C.3] (hier: $\eta_{\text{int}} = 0.01$ statt 0.005) und nach [vgl. 82, Gl. C.6] mit $c = \min / \max(m'_i / m'_{\perp,i})$.

3 Experimentelle Untersuchungen



(a) Stoßstellendämm-Maße, S3, ohne Elastomer

(b) Stoßstellendämm-Maße, S2, Elastomer SYLODYN ND

Abbildung 50 Stoßstellendämm-Maße bei unterschiedlicher Bezugsfläche zur Bildung der mittleren Schnellepegel je Bauteil an L-STOSS NR. S2 UND S3 mit $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Dabei steht r für den Mindestradius einer Messposition zur Krafteinleitungsposition und $Rand$ für den Mindestabstand zum Bauteilrand. Der Achsabstand der durchgehenden Schrauben zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis $m'_1 / m'_2 = 2$, bei maximal 54 Messpositionen (MPos) an der Wand und 81 MPos an der Decke.

genutzt. Der Vergleich der Varianten verdeutlicht, dass im Bewertungsbereich zur Bildung des Einzahlwertes (200 Hz bis 1250 Hz) die unterschiedliche Bezugsfläche nahezu vernachlässigbar ist ($\max \Delta \bar{K}_{12} \approx 1 \text{ dB}$). Oberhalb von 1250 Hz führt der größere Mindestabstand von 1 m zur Krafteinleitungsposition zu einem geringeren Stoßstellendämm-Maß. Um zu Stoßstellendämm-Maßen anderer Quellen vergleichbar zu bleiben, wurden die Vorgaben der Norm hinsichtlich der Bezugsfläche in allen Ergebnissen im Anhang berücksichtigt.

Weitere Untersuchungen zu Körperschallfeldern in Brettsperrholzbauteilen im Kontext der geometrischen Vorgaben der Messvorschrift in der Norm [4] finden sich in [129].

In dieser Norm wird auch eine Mindestmesspunktanzahl gefordert, um robuste Ergebnisse für die mittlere Schnelle zu erhalten. In einer Fallstudie am T-förmigen Bauteilstoß aus Brettsperrholzbauteilen wurde die Unsicherheit der Energiebestimmung in Abhängigkeit der Messpunktanzahl statistisch untersucht. Dabei wurden ausschließlich Messdaten aus diesem Forschungsprojekt zu Grunde gelegt. Bei einigen Frequenzbändern zeigten sich eine starke Abhängigkeit von der Messpunktanzahl, da das Körperschallfeld der Brettsperrholzbauteile nur bedingt diffus ist. Damit ist auch das Stoßstellendämm-Maß in diesen Frequenzbändern davon abhängig. Aus diesem Grund ist bei der Ergebnisdokumentation im Anhang auch

die Messpunktanzahl aufgeführt. Die statistische Vorgehen für die o. g. Fallstudie ist ausführlich in [60] beschrieben und zusammenfassend in [61, 62].

Einfluss der Messeite der Bauteile

Nach der [4, Kapitel 7.2.4] gilt:

Die Aufnehmer müssen auf der nicht angeregten Seite der Sendeplatte (außen) [outside] und der abstrahlenden Seite der Empfängerplatte (innen) [inside] befestigt werden. Für grundlegend homogene Aufbauten ist die Seite des Aufbaus irrelevant, aber nicht für zweischalige Aufbauten.

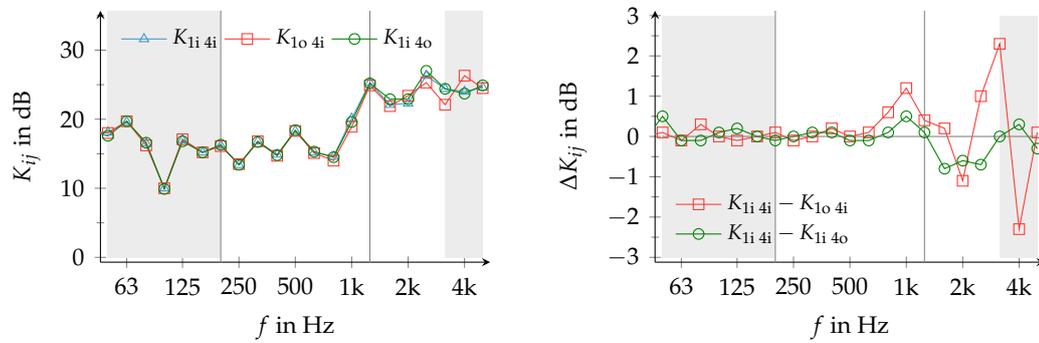
Da Brettsper Holz nicht gänzlich homogen ist, sondern einen Schichtenaufbau aufweist, wurde in [41] geprüft, ob die gewählte Bauteilseite für die Schnellmessung einen Einfluss bei der Bestimmung des Stoßstellendämm-Maßes hat.

Aus messpraktischer Sicht wurde für bei den Stoßstellenmessungen an der Hochschule von den normativen Empfehlungen abgewichen. Zur Überprüfung des möglichen Einflusses wurden die Stoßstellendämm-Maße von drei verschiedenen Messwegen, die in Abbildung 51c dargestellt sind, für den Übertragungsweg ① ↔ ④ bestimmt. Die Anregung der Bauteile ① (Decke) und ④ (Wand) erfolgte an je zwei Positionen. Die Messung der Schnellen erfolgte an je sechs Aufnehmerpositionen pro Bauteil und Anregungsposition. Die Messpositionen an den Außenseiten sind genau an den gleichen Koordinaten wie die an den Innenseiten, jedoch auf die gegenüberliegende Seite des Bauteils projiziert. Somit sollte keine Schnelldifferenz der Messpunkte aufgrund der auf der Platte räumlich verteilten Schnellen auftreten. Im Anschluss wurden die Stoßstellendämm-Maße mit den ermittelten Schnellen und Verlustfaktoren auf den getrennten Bauteilseiten für die drei Messwege berechnet.

Wie in der Abbildung 51 (a) zu erkennen ist, stimmen die spektralen Verläufe der Stoßstellendämm-Maße K_{ij} über den Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz sehr gut überein. Die Einzahlwerte weisen eine sehr geringe maximale Differenz von 0,3 dB auf. In der Abbildung 51 (b) sind die Differenzen des K_{ij} zu dem üblichen Messweg 1i 4i aufgetragen. Über den gesamten Frequenzbereich sind die Abweichungen bis maximal 2,5 dB sehr zufriedenstellend. Im Einzahlwertbereich betragen sie maximal 1,1 dB im 1000 Hz Terzband des Übertragungsweges 1o 4i. Auf dem Weg 1i 4o sind die Differenzen im gesamten Frequenzbereich unter 1 dB.

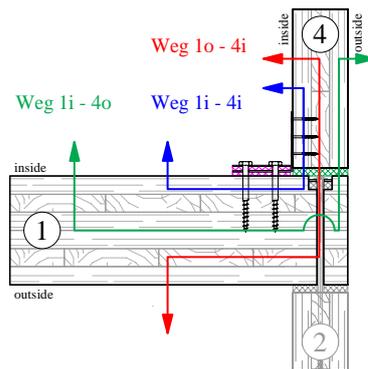
Die Abweichung der ermittelten Stoßstellendämm-Maße sind damit bei der Messung auf der Außenseite des dickeren Bauteils (Weg 1o 4i.) am größten. Aufgrund des dickeren Bauteils könnte der Einfluss auf die ermittelten Werte für den

3 Experimentelle Untersuchungen



- (a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $K_{1i-4i} = 17,2 \text{ dB}$; $K_{1o-4i} = 16,9 \text{ dB}$;
 $K_{1i-4o} = 17,1 \text{ dB}$

- (b) Differenzen der verschiedenen Übertragungswege zum Messweg 1i-4i



- (c) Angeregt an je zwei Positionen an der Innenseite.

Abbildung 51 Stoßstellendämm-Maße der drei verschiedenen Messwege für den Übertragungsweg von 1 nach 4 im T-STOSS NR. 23 im Vergleich. [41]

Verlustfaktor und der Schnelle höher sein. Die Differenzen der beiden Übertragungswege $K_{1i\ 4i} - K_{1o\ 4i}$ weisen keine systematische, einseitige Abweichung auf sondern streuen um Null. Zu hohen Frequenzen nehmen die Differenzen im Betrag zu.

Insgesamt zeigte der Vergleich, dass bei der Ermittlung von Stoßstellendämm-Maßen an Brettsperrholzbauteilen die Messseite nur in hochfrequenten Bereich einen geringen Einfluss hat. Dieser ist jedoch bauakustisch nicht relevant. Weitere Details zu diesem Vergleich, wie die Unterscheidung in die einzelnen Messgrößen, sind in [41] enthalten.

Einfluss der Einrichtung zur Bauteilstoßpressung auf K_{ij}

Durch die Nutzung der Einrichtung zur Pressung des Bauteilstoßes (Abs. 3.1.1) entsteht ein neuer Schallübertragungsweg, der möglichst klein sein soll gegenüber der Schallübertragung zwischen den Bauteilen des Versuchsaufbaus. Für eine erste Quantifizierung werden die Verlustfaktoren (Abb. 52a und 52b), Schnellepegeldifferenzen (Abb. 52c) und schließlich die resultierenden Stoßstellendämm-Maße (Abb. 52d) von zwei Varianten der L-förmigen Bauteilverbindung verglichen.

S1 mit angeschlossener Einrichtung bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$

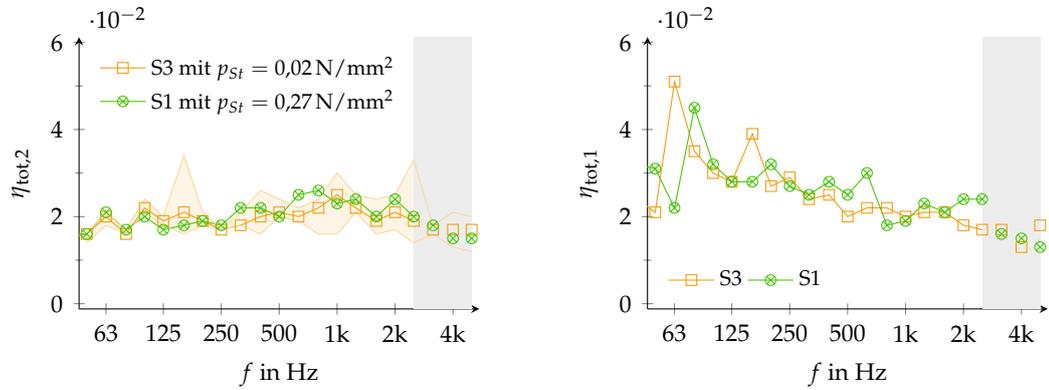
S3 ohne angeschlossene Einrichtung bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$

Der Vergleich der Verlustfaktoren zeigt bei der Variante mit angeschlossener Einrichtung zur Pressung der Stoßfuge leicht erhöhte Verlustfaktoren im mittleren Frequenzbereich. Die Schnellepegeldifferenzen sind ebenfalls etwas größer im Fall der angeschlossenen Einrichtung. Es ist möglich, dass ein Teil der Energie über den angeschlossenen Träger abgeleitet wird und zu diesen Unterschieden führt. Allerdings zeigen die resultierenden Stoßstellendämm-Maße in Abbildung 52d, dass die Unterschiede mit ca. 2 dB in einem vertretbaren Maß sind.

Vergleichsmessung der Institute

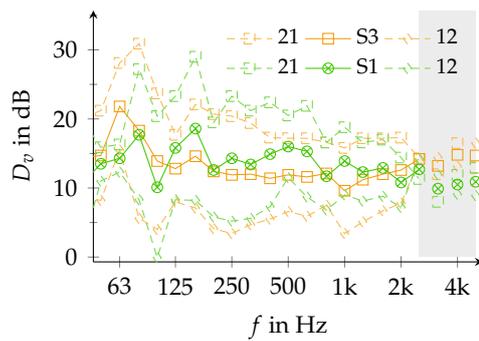
Am L-förmigen Bauteilstoß aus Brettsperrholz (Abb. 22) wurde zur Verifizierung der Messergebnisse eine Vergleichsmessung zwischen der HS Ro (Teilprojekt 3) und dem ift Ro (Teilprojekt 4) unter Verwendung der jeweiligen Messausrüstung und -auswertung und dem jeweiligen Messpersonal durchgeführt. Dabei wurden als Messdaten die Beschleunigungspegel und die Körperschall-Nachhallzeiten erfasst und nach Abschnitt 3.4.1 das Stoßstellendämm-Maß bestimmt.

3 Experimentelle Untersuchungen

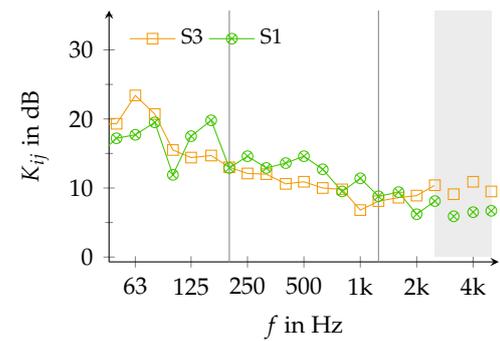


(a) Verlustfaktoren Wand: Quartile, $N = 8$ (S3), $N = 12$ (S1)

(b) Verlustfaktoren Decke: Quartile, $N = 8$ (S3), $N = 12$ (S1)



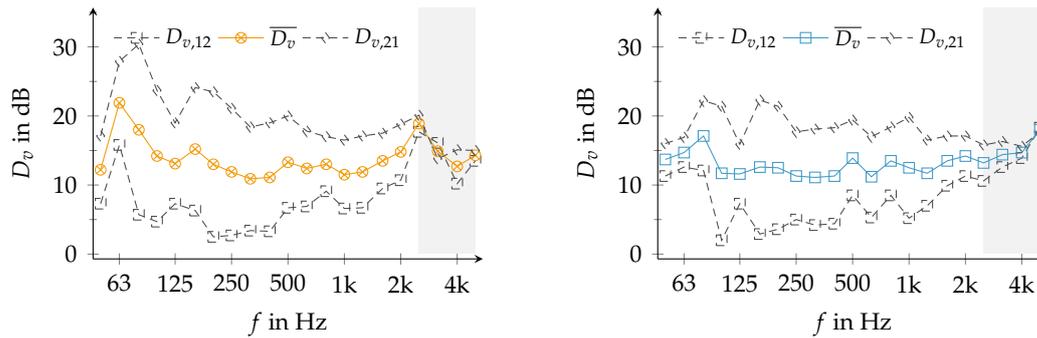
(c) Schnellepegeldifferenzen, $N \geq 12$ je Messrichtung



(d) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\overline{K}_{12,S3} = 10,4$ dB ; $\overline{K}_{12,S1} = 12,3$ dB

Abbildung 52 Vergleich der Gesamtverlustfaktoren der Bauteile und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS NR. S1 UND S3 ohne Elastomer. Der Achsabstand der durchgehenden Schrauben zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Bauteile $m'_1 / m'_2 = 2$. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor.

3.5 Resultate der Messungen



(a) HS Rosenheim, $N = 8$ je
Messrichtung

(b) ift Rosenheim, $N = 8$ je
Messrichtung

Abbildung 53 Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen aus der Vergleichsmessung zwischen HS Ro und ift Ro am L-STOSS NR. S3 bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$ und einem Massenverhältnis $m'_1/m'_2 = 2$.

Schnellepegeldifferenzen wurden über die gemessenen Beschleunigungspegel ermittelt. Dabei gab es bei der Anregung der Struktur folgende Unterschiede:

HS Ro Modal-Schwingerreger über Stößel mit Struktur verbunden,
Signal: log. Gleitsinus 16 Hz bis 5700 Hz, 256 s

ift Ro Modal-Schwingerreger über Haftmagnet mit Struktur verbunden,
Signal: rosa Rauschen, 30 s

Die Ergebnisse in Abbildung 53 zeigen insgesamt eine hohe Übereinstimmung der Schnellepegeldifferenzen und die gleiche charakteristische Richtungsabhängigkeit auf. In den Frequenzbereichen unter 80 Hz und oberhalb von 2500 Hz sind jedoch Abweichungen erkennbar, die möglicherweise auf die o. g. Unterschiede der Messdatenerhebung zurückzuführen sind. Die Richtungsabhängigkeit, die u. a. auf das Massenverhältnis der beteiligten Bauteile zurückzuführen ist, zeigte sich schon bei den Messungen am ift Rosenheim (vgl. Teilprojekt 4, [59]) und kann hier bestätigt werden.

Körperschall-Nachhallzeiten wurden mit den folgenden messtechnischen Unterschieden ermittelt:

HS Ro Modal-Schwingerreger über Federstahl mit Struktur verbunden,
Signal: log. Gleitsinus 16 Hz bis 5000 Hz; 30 s ,
Auswertung der Nachhallkurven über M | REVERB von MÜLLER BBM

3 Experimentelle Untersuchungen

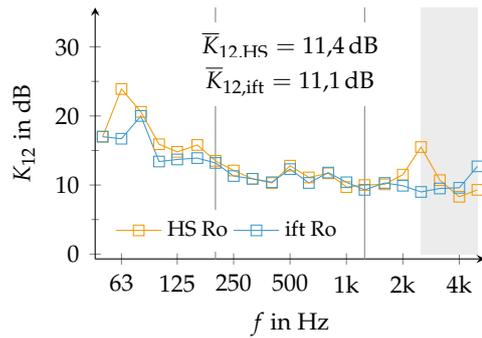
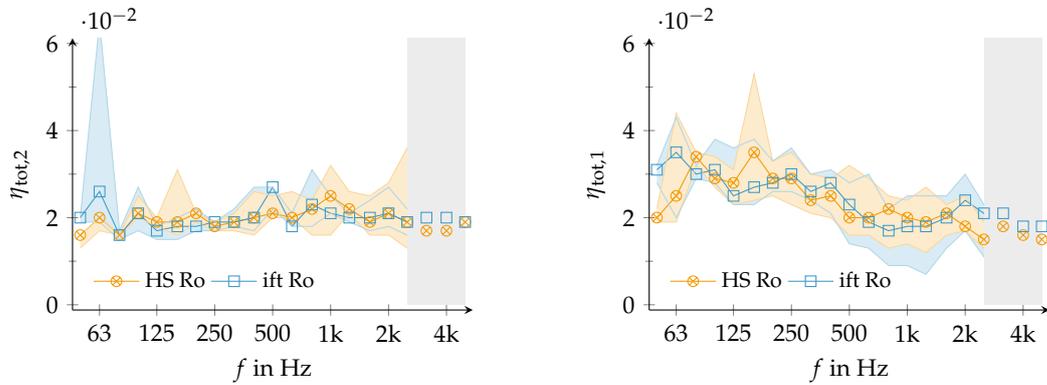


Abbildung 54 Stoßstellendämm-Maße K_{12} bei Körperschallanregung aus der Vergleichsmessung zwischen HS Ro und ift Ro am L-STOSS NR. S3 (geschraubt, ohne zusätzl. Pressung). Massenverhältnis $m'_1/m'_2 = 2$.

ift Ro Modal-Schwingerreger über Haftmagnet mit Struktur verbunden,
 Signal: log. Gleitsinus 50 Hz bis 5000 Hz; 10,6 s ,
 Auswertung der Nachhallkurven über das SOUNDBOOK

Beim Vergleich der Körperschall-Nachhallzeiten und den daraus berechneten Verlustfaktoren in Abbildung 55 sind zwischen der HS Ro und dem ift Ro hohe Übereinstimmungen zu erkennen. Die Unterschiede tieffrequent liegen in Terzbändern mit geringer Modenanzahl (vgl. Anhang 22), wodurch die Messunsicherheit größer ist. Im Gegensatz zur Wand zeigt sich bei der Decke eine stärkere Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors. Bis 400 Hz ist der Gesamtverlustfaktor der Decke um ca. 1 % höher als der über die Frequenz nahezu konstante Verlustfaktor der Wand. Die frequenzabhängigen Stoßstellendämm-Maße in Abbildung 54 und die berechneten Einzahlwerte sind unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit gleich.



(a) Wand: Quartile, $N = 8$

(b) Decke: Quartile, $N = 8$

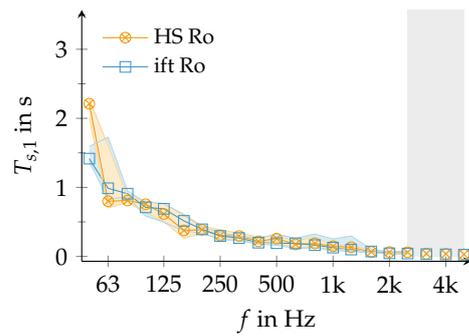
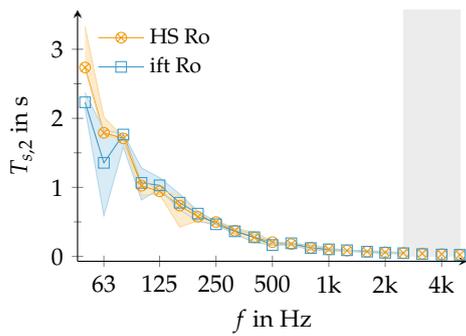


Abbildung 55 Verlustfaktoren und Körperschall-Nachhallzeiten des Vergleichs zwischen der Messtechnik und -methodik der HS Ro und dem ift Ro an den Bauteilen des L-STOSSES NR. S3 *ohne Elastomer* bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Bauteile $m'_1 / m'_2 = 2$.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projektes war die Anwendbarkeit praxisnaher Prognosemodelle zu untersuchen, die sich anhand des Bauwerksinformationsmodells in den Planungsablauf einbinden lassen. In diesem Teilprojekt wurden Übersichten zu Konstruktionen in der Massivholzbauweise zusammengestellt. Für die Flankenübertragung in der Schallschutzplanung wurden Stoßstellendämm-Maße aus eigenen Messungen und von anderen Instituten zusammengetragen und kategorisiert [33, 125]. Es zeigte sich, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen die Art des Prüfstandes aufgrund der unterschiedlichen Randverluste einen Einfluss auf die Unsicherheit bei der Ermittlung von Stoßstellendämm-Maßen hat.

In den Labormessungen wurden Messdaten zur Ermittlung von Materialparametern, zur Analyse der Körperschallübertragung zwischen praxisnahen Bauteilanschlüssen und zur Validierung der Prognosemodelle durchgeführt. Die mittels der Finite-Elemente Methode prognostizierten Eigenmoden und Eigenfrequenzen von Holzmassivbauteilen in Teilprojekt 2 und 5 [92] wurden mit den experimentellen Ergebnissen in diesem Teilprojekt validiert. Dazu wurden Betriebsschwinganalysen an einzelnen und gekoppelten Bauteilen aus Brettsperrholz durchgeführt. Es wurden T- und L-förmige Bauteilanschlüsse mit und ohne Elastomerzwischenlagen gemessen. Dabei wurden auch die Relativbewegungen der Bauteile nahe der Stoßstelle unter $f = 200$ Hz bei Verwendung einer Elastomerzwischenlage gemessen. Neben der tieffrequenten Schwingungsanalyse wurde für den mittel- und hochfrequenten Frequenzbereich die *Power Injection Method* (PIM) zur Ermittlung der Energieflüsse angewendet. Aus den Ergebnissen konnten Energieeinflusskoeffizienten und Verlustfaktoren für die Verifizierung der prognostizierten Ergebnisse aus der Energieflussanalyse in Teilprojekt 5 und der Statistischen Energie-Analyse in diesem Teilprojekt berechnet werden. Im Projektverlauf konnte die Unsicherheit der experimentellen Leistungsbestimmung durch eine Optimierung der mechanischen Verbindung zwischen Schwingerreger und Prüfkörper reduziert werden. Bei der Statistischen Energie-Analyse werden diffuse Schallfelder vorausgesetzt. Die Diffusität des Körperschallfeldes konnte durch eine hohe örtliche Abtastung der Oberflächenschnelle der Bauteile beschrieben werden. Zu höheren Frequenzen wurde eine Ausbreitungsdämpfung über den zur Schallquelle distanzabhängigen Pegelabfall bestimmt. Die Unsicherheit bei der experimentellen Energiebestimmung in Abhängigkeit der Messpunktanzahl wurde mithilfe der Monte-Carlo Methode

anhand einer Fallstudie in der Nachauswertung der empirischen Daten bestimmt. Die Reduktion der Körperschallübertragung durch den Einsatz von Elastomerlagern und elastisch gelagerten Verbindungsmittel konnte nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass die Wahl der Bauteilkopplung, wie z. B. Stahlkonsole oder direkte Verschraubung, starken Einfluss auf das resultierende Stoßstellendämm-Maß hat.

Für die Schallschutzprognose auf Basis der Statistischen Energie-Analyse wurde eine kommerzielle Software VAONE[®] eingesetzt. Aus den Kopplungsverlustfaktoren aus dem Modell können Stoßstellendämm-Maße für die Schallschutzprognose der EN 12354 bestimmt werden. Bei der Beschreibung der in diesem Teilprojekt verwendeten Brettsperrholzbauteile als SEA-Subsystem zeigte sich, dass bereits im mittleren Frequenzbereich der Schubeinfluss einen signifikanten Einfluss auf die modalen Eigenschaften hat und die Beschreibung als *akustisch dünne* Platte nicht mehr ausreichend ist. Mit der Software können auch Platten mit der Theorie von Mindlin berechnet werden, welche den Schubeinfluss berücksichtigt. Die Anregbarkeit der Platte im Modell konnte mit einer mittleren Eingangsadmittanz aus der Messung validiert werden. In einem Methodenvergleich mit der Energieflussanalyse aus Teilprojekt 5 am Beispiel eines L-förmigen Bauteilstoßes konnten die Modellergebnisse verifiziert werden. Der Vergleich von Energieeinflusskoeffizienten zeigte auch die zu erwartende Diskrepanz der Methoden zu tiefen Frequenzen. Im tieffrequenten Bereich sind die Voraussetzungen der Statistischen Energie-Analyse nicht erfüllt. Mithilfe der Software können auch Abstrahlgrade orthotroper Platten, wie z.B. Brettsperrholz, berechnet werden. In der EN 12354-1 wird nur ein Verfahren für isotrope Platten beschrieben. An Berechnungs- und experimentellen Beispielen konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung dieser orthotropen Eigenschaften die Prognoseunsicherheit reduziert. Für weiterführende Arbeiten zum Einsatz der Statistischen Energie-Analyse im Holzbau stehen Daten aus den Labormessungen zur Verfügung. Diese können zur Berücksichtigung von elastischen Zwischenschichten bei der Anwendung der Statistischen Energie-Analyse genutzt werden.

Für die Optimierung des Schallschutzplanung in der Massivholzbauweise auf Basis der Statistischen Energie-Analyse wurde eine Bauteil- und Messdatendatenbank mit optionaler Schnittstelle zu Bauwerksinformationsmodellen entwickelt. Die Datenbank VABDAT ist unter www.VaBDat.de erreichbar und stellt dem Schallschutzplaner holzbauspezifische Kennwerte für die Schallschutzplanung nach der EN 12354 zur Verfügung. Die Forschungsergebnisse des ift Rosenheims und an der Hochschule Rosenheim aus diesem Projekt sind dort verfügbar. Neben Messergebnissen können auch Ergebnisse aus der Statistischen Energie-Analyse und Energieflussanalyse in Form von Kopplungsverlustfaktoren hinterlegt werden. Am

ift Rosenheim wurde im Teilprojekt 4 das Prognosetool VBACOUSTIC für die Schallschutzplanung entwickelt, welches auf die Daten der Datenbank zugreifen kann. Die automatisierte Schwingungsprognose für den Schwingungsnachweis eines mehrgeschossigen Gesamtgebäudes wurde an der TU München weiterentwickelt. Für diese Berechnungen kann auf die Datenbank zugegriffen werden.

Die Datenbank stellt exemplarisch die Datenbasis für eine Schallschutzprognose in der Massivholzbauweise in Zusammenhang mit Bauwerksinformationsmodellen dar. Für den Zugriff auf die Daten werden Kürzel verwendet, welche aus der Beschreibung der Bausituation abgeleitet werden können. In weiterführenden Arbeiten kann die Schnittstelle zwischen der bauakustischen Planung und Bauwerksinformationsmodellen weiter ausgebaut werden. Die Sammlung weiterer Planungsdaten für die Datenbank sowie die Untersuchung und Berücksichtigung von Vorsatzschalen vor Massivholzelementen in Form von Installationsebenen oder abgehängten Decken ist erforderlich.

5 Projektbewertung und Transferkonzept

5.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Hinsichtlich Normung reihen sich die Ergebnisse in eine Sammlung weniger, ausgesuchter internationaler Forschungsanstrengungen ein, die im Rahmen der Erarbeitung der Erweiterung der DIN EN 12354 hinsichtlich Holz- und Leichtbau zusammengetragen werden. Die erzielten Ergebnisse bestätigen und untermauern die Daten anderer, internationaler Forschungsgruppen.

Es lässt sich konstatieren, dass mithilfe der im diesem Bericht und der Datenbank www.VaBDat.de ausführlich dokumentierten Messergebnisse dem planenden Ingenieur in Ingenieurbüros zur Tragwerksplanung und zur Bauphysik als auch in firmeninternen Planungsabteilungen von größeren Holzbauunternehmen Stoßstellendämm-Maße für unterschiedliche Stoßausbildungen (Verbindungsmittel, Elastomere) im Holzmassivbau zur Verfügung stehen. Die Messergebnisse dokumentieren die positive Auswirkung auf eine Reduktion der Körperschallausbreitung und beweisen die Tauglichkeit der auf aktuellen Messen im Bauwesen von Firmen präsentierten ersten Lösungen zur Schallentkopplung, welche b. d. auf einer positiven Vermutung als denn auf einem tatsächlichen messtechnischen Nachweis beruhte. Der Einfluss von elastisch gelagerten Verbindungsmitteln auf die Körperschallübertragung am Bauteilstoß ist ebenfalls im Bericht dargestellt. Damit wird eine Schallschutzprognose nach dem Verfahren der DIN EN 12354 zu Teilen ermöglicht und die derzeitige, die Ingenieurpraxis konfrontierende Planungsunsicherheit reduziert. Die auf den Holzbau spezialisierten Tagungen erfahrende hohe Nachfrage nach den Messergebnissen dokumentiert die Bedeutung für Betriebe im Bereich des mehrgeschossigen Holzmassivbaus. Ein innovativer Beitrag ist in dem Ansatz zu sehen, anhand der in diesem Teilprojekt erstellten Bauteilschlüssel die Bauteildatenbank in das Bauwerksinformationsmodell einzubinden und dadurch eine automatische Zuweisung der Bauteildaten für die Berechnung zu ermöglichen. Die industriellen Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse wurden in der Planung von vier Mehrgeschossern in Massivholzbauweise in Teilprojekt 4 aufgezeigt, die mit VBACOUSTIC berechnet werden konnten. Unabhängig von den Seminaren können die bisher veröffentlichten Planungsdaten für die Bauteilstöße von Ingenieurbüros für die bauakustische Planung bereits angewendet werden.

5 Projektbewertung und Transferkonzept

Durch die genaueren Planungsmöglichkeiten können nun für ein Bauvorhaben hinsichtlich Schallschutz Kosten-Nutzen-optimierte Bauteile eingesetzt werden. Nicht zuletzt führt die genauere Planungsmöglichkeit zur Vermeidung von Planungs- und Baufehlern und damit zur Vermeidung von Nachtragskosten.

Durch den breiten methodischen Ansatz bei der messtechnischen Bestimmung (Betriebsschwinganalyse, *Power-Injection-Method*, Schnellepegeldifferenzen, Nachhallzeitmethode, Resonanzbreitenmethode) konnte das Schallübertragungsverhalten an Bauteilstößen in verschiedene Frequenzbereiche eingeordnet werden. Damit konnten Eingangsdaten für die unterschiedlichen Berechnungsansätze, wie die Finite Elemente Methode, die Energieflussanalyse und die Statistische Energie-Analyse gewonnen werden.

Für die Erzielung belastbarer Ergebnisse wurden wichtige Besonderheiten bei der messtechnischen Bestimmung von Holzbauteilen identifiziert. Damit ist die Grundlage für die messtechnische Erfassung der Schallübertragung an vielen unterschiedlichen Bauteilkombinationen und insbesondere für die Validierung der Berechnungsansätze gelegt. Für die im Gesamtprojekt angestrebte Optimierung des Gesamt-Planungsprozess ist die Fortführung und Ausweitung der Parameterstudien erforderlich. Letztendlich können damit die für die o. g. Zielgruppen der Wirtschaft bereitzustellenden Kenndaten für einen vollständigen Planungsprozess komplettiert werden.

5.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden dem Planenden und Ausführenden als Planungsgrundlage zur Verfügung gestellt. Fachspezifische Seminare und Fachtagungen wurden und werden genutzt, um die Ergebnisse zu präsentieren. Parallel dazu erfolgt die Vermittlung der Ergebnisse in der Lehre an der Hochschule Rosenheim und an der TU München. Ergänzend werden die Ergebnisse sowohl elektronisch als auch in der Fachpresse veröffentlicht.

Aus Tabelle 14 lässt sich für den Ergebnistransfer in die Wissenschaft erkennen, dass etliche Anstrengungen in Form von Konferenzbeiträgen, studentischen Abschlussarbeiten und weiteren Veröffentlichungen unternommen wurden und werden.

Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft bestand b. d. aus der Bekanntmachung der Ergebnisse auf mehreren Tagungen, die von planenden Ingenieuren v. a. aus dem Bereich der Bauphysik und firmeninternen Planungsabteilungen besucht werden sowie bei den in der projektbegleitenden Arbeitsgruppe beteiligten Unternehmen.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Prognose mit VBACOUSTIC und der Bauteil-

5.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzeptes

datenbank VABDAT sollen auch durch Seminare an der HS Rosenheim aufgezeigt und einem breiteren Interessierten-Kreis zugänglich gemacht werden. Damit wird der Nutzen der Planungstools und Erkenntnisse aus diesem Projekt unmittelbar an Planende und Ausführende vermittelt.

Trotz der wissenschaftlich noch als jung zu bezeichnenden Ergebnisse sind diese bereits für Lehrzwecke aufbereitet worden und werden sowohl an der Hochschule Rosenheim und der TU München bereits eingesetzt. Damit ist es möglich, angehende Ingenieure mit hochgradig aktuellen Planungsdaten zur Schallschutzprognose von mehrgeschossigen Gebäuden in Massivholzbauweise auszubilden.

Tabelle 14 Durchgeführte und noch geplante* Maßnahmen zum Ergebnistransfer in Projektphase I und II. Die Projektphase II startete am 01.04.2015.

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeit, Ort
Informationen an Unternehmen	Diskussion der Forschungsergebnisse und Transfer in die Industrie und Verband	Projektbegleitende Ausschüsse	14.01.2013, München
			22.12.2013, Rosenheim
			28.11.2014, München
			28.11.2015, München
			07.10.2016, Rosenheim
			17.02.2017, München
	Weiterbildung von Mitarbeitern aus KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	Forum Holz Bau Urban, Europäischer Kongress	16.10.2014, Köln
		6. HolzBauSpezial Akustik & Brandschutz	25.03.2015, Bad Wörishofen
	Transfer in Industrie, Verband und KMU	Forschungsbericht 2016 der HS Ro [58]	27.02.2017, Rosenheim

Fortsetzung nächste Seite ...

5 Projektbewertung und Transferkonzept

Tabelle 14 – Fortsetzung

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeit, Ort
	Weiterbildung von Mitarbeitern aus KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	8. HolzBauSpezial I Bauphysik [130]	22.-23.03.2017, Bad Wörishofen
	Transfer in Industrie, Verband und KMU	Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18724 N und 17328 N [131]	07.2017
	Transfer in Industrie, Verband und KMU	Kurzfassung des Schlussberichtes* zum IGF-Vorhaben 17328 N [132]	voraussichtlich 10.2017
Vorträge / Fachbeiträge	Transfer an Industrie und Fachberater	DAGA, Fachtagung [133]	21.03.2013, Meran
	Transfer unter Spezialisten und Fachberatern	5 th Colloquium on Computational Mechanics [134]	30.09.2013, Hamburg
	Transfer an Industrie und Fachberater	DAGA, Fachtagung [88, 120]	11.03.2014, Oldenburg
	Transfer unter Spezialisten und Fachberatern	EURODYN, Internationale Konferenz [88]	01.07.2014, Porto
	Transfer an Industrie und Fachberater	DAGA, Fachtagung [54]	18.03.2015, Nürnberg
	Transfer unter Spezialisten und Fachberatern	EURONOISE [55], Europäischer Kongress	01.06.2015, Maastricht
	Transfer an Industrie und Fachberater	DAGA [9, 86, 129], Fachtagung	14.-17.03.2016, Aachen
	Transfer unter Spezialisten und Fachberatern	DAGA [34, 42, 61], Fachtagung	06.-09.03.2017, Kiel
	Transfer unter Spezialisten und Fachberatern	ICSV* [35, 62], Internationaler Kongress	23.-27.07.2017, London
Studentische Abschlussarbeiten	Einbeziehung von Multiplikatoren	Bachelor- und Masterarbeiten [33, 36, 38, 39, 41, 56, 60, 87, 135, 136]	2013-2017, HS Ro

Fortsetzung nächste Seite ...

5.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Tabelle 14 – Fortsetzung

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeit, Ort
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Einbeziehung von Multiplikatoren	z.B. Vorlesung <i>Schallschutz im Holzbau</i>	Laufend, Rosenheim
Seminare	Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten der bauakustischen Planung im Massivholzbau.	Schulung an VBACOUSTIC und VABDAT	voraussichtlich 03.2018, Rosenheim
Dissertation	Transfer unter Spezialisten	Wissenschaftliche Publikation* zur Anwendung der SEA Methode	voraussichtlich 2018

5.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Zielsetzung, den Planungsprozess im Holzbau eng an ein umfassendes Bauwerksinformationsmodell zu verknüpfen, war es erforderlich, die in Projektphase I erstellte Datenbank weiter zu entwickeln (Arbeitspaket 3.4). Für den Datenaustausch zwischen den Prognoseberechnungen aus Teilprojekt 2 bis 5 und der Datenbank wurde eine Schnittstelle geschaffen, die auf XML-Dateien basiert. Dieser Dateistandard ermöglicht die Integration in ein Bauwerksinformationsmodell und trägt damit zur Reduktion des Planungsaufwandes bei. Die Entwicklung von Identifikatoren für den gezielten Datenzugriff ist notwendig, um eine gegebene Bausituation in der Planung in der Datenstruktur wieder zu finden. Neben der Entwicklung dieser datentechnischen Infrastruktur wurde durch Aufbau des Datenbestandes aus Ergebnissen des Forschungsprojektes und Ergebnissen weiterer Forschungseinrichtungen vorangetrieben.

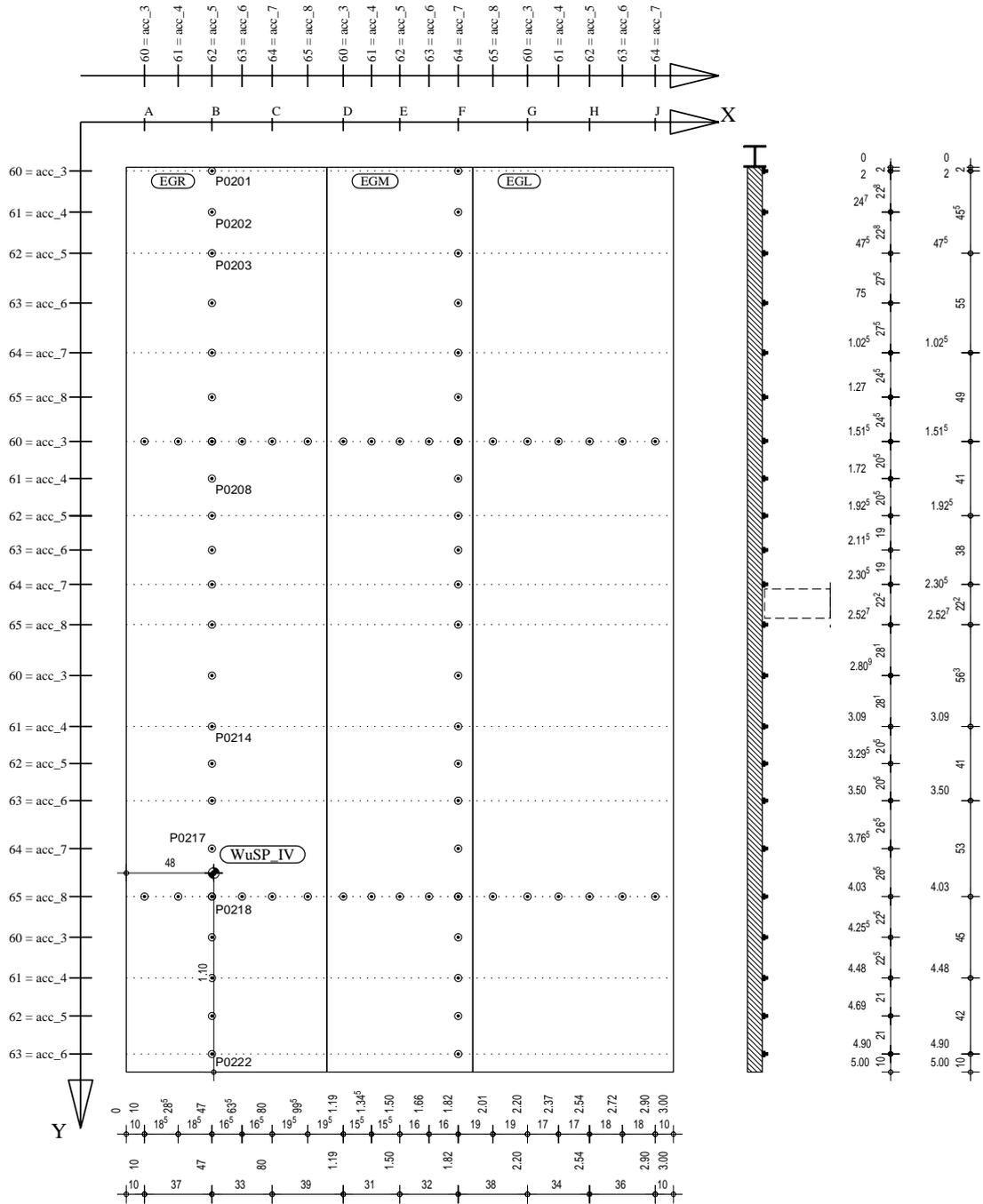
Die Optimierungen der Messprozedur zur Bestimmung der eingebrachten Leistung in Arbeitspaket 3.5 und die Validierungsmessungen zur Auswirkung elastischer Zwischenschichten in Arbeitspaket 3.6 sind notwendig gewesen, um geeignete Kalibrierdaten und Modellierungshinweise für das numerische Modelle in Teilprojekt 2, 3 und 5 zu erhalten. Die Unsicherheitsbestimmungen der mittleren Energie eines Bauteils sind Voraussetzungen für aussagekräftige Vergleiche zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen. Die Erkenntnisse aus der Kartierung der Schnellepegelverteilung eines Bauteils bei punktueller Kraftanregung und der statistischen Auswertung der gemessenen Schnellen geben Hinweise

5 Projektbewertung und Transferkonzept

auf die Anwendbarkeit der Messvorschrift in der DIN EN ISO 10848-1:2006-08 auf den Holzmassivbau.

Weitere *Erläuterungen zum Personaleinsatz* finden sich in Abschnitt 1.3. Die *Ausgaben für Leistungen Dritter* laut zahlenmäßigem Nachweis wurden im Rahmen der Arbeitspakete 3.4 und 3.5 für eine kommerzielle SEA Software eingesetzt. Damit wurden die Simulationen auf Basis der Statistischen Energie-Analyse durchgeführt. In Abschnitt 2.2 finden sich weitere Informationen zur Verwendung der Software und den Ergebnissen.

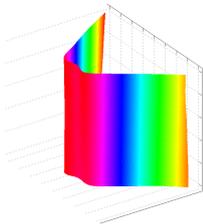
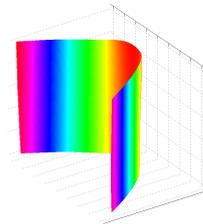
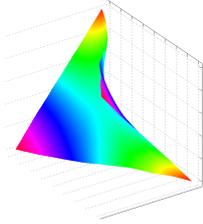
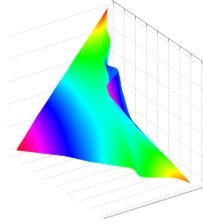
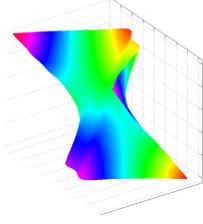
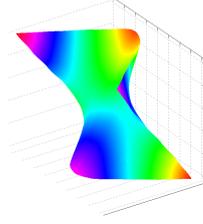
A Zeichnung zur Ausbreitungsdämpfung



Forschungsprojekt		Planinhalt		Maßstab	
Vibroakustik		Wand Leno 81 (Bauteil Nr. 70)		1:33	
Ansicht von Deckenseite				Datum	
Positionen bei Ermittlung der Ausbreitungsdämpfung in X- und Y-Richtung				25.11.2014	
				gezeichnet	
				Kruise	

B Schwingformen des frei hängenden Wandelementes

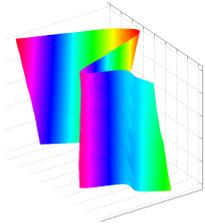
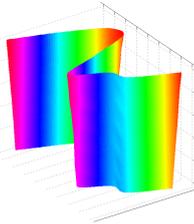
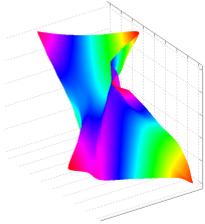
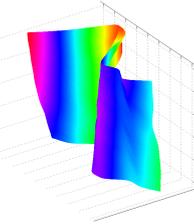
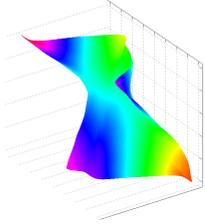
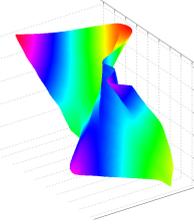
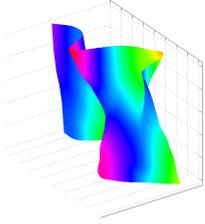
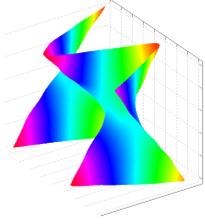
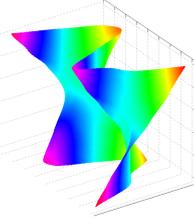
Tabelle 15 Schwingformen und Resonanzfrequenzen des frei hängenden Wandelementes aus der experimentellen Modalanalyse. Die Anregung an der Wand (BAUTEIL NR. 56) erfolgte mit einem Modalhammer an zwei verschiedenen Positionen (APos).

Nr.	Schwingform APos I	Frequenz in Hz	Schwingform APos IV	Frequenz in Hz
1		8,8		8,8
2		10,7		10,8
3		23,1		23,1

Fortsetzung nächste Seite ...

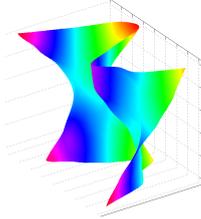
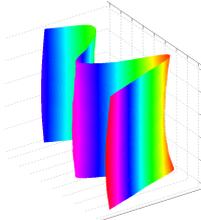
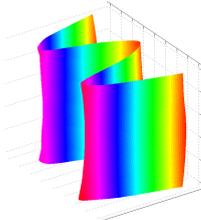
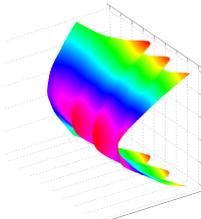
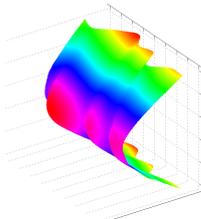
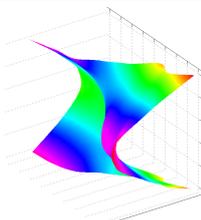
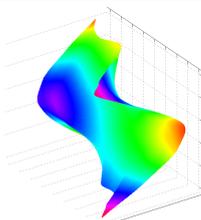
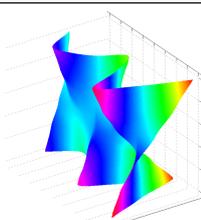
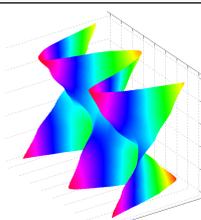
B Schwingformen des frei hängenden Wandelementes

Tabelle 15 – Fortsetzung

Nr.	Schwingform APos I	Frequenz in Hz	Schwingform APos IV	Frequenz in Hz
4		24,3		24,3
5		27,3		27,3
6		30,6		30,8
7		34,0	-	-
8		40,8		40,9

Fortsetzung nächste Seite ...

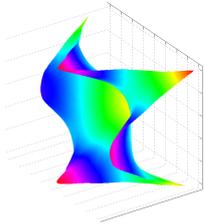
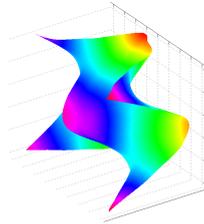
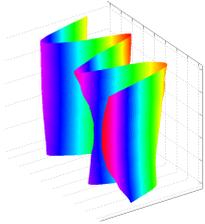
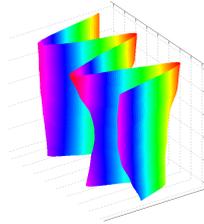
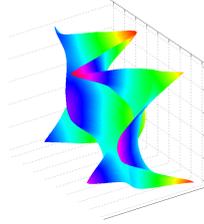
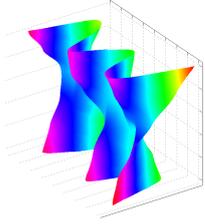
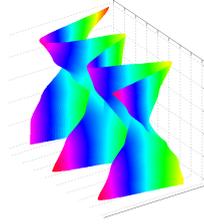
Tabelle 15 – Fortsetzung

Nr.	Schwingform APos I	Frequenz in Hz	Schwingform APos IV	Frequenz in Hz
9	-	-		44,6
10		60,2		60,3
11		64,4		64,5
12		67,6		67,6
13		72,7		72,9

Fortsetzung nächste Seite ...

B Schwingformen des frei hängenden Wandelementes

Tabelle 15 – Fortsetzung

Nr.	Schwingform APos I	Frequenz in Hz	Schwingform APos IV	Frequenz in Hz
14		77,0		77,1
15		84,6		84,3
16	-	-		91,6
17		98,2		98,0

C Materialkennwerte von Baumaterialien Ergebnis der Literaturrecherche

Tabelle 16 Elastomechanische Kennwerte von Baumaterialien [37]

Material	E-Modul	G-Modul	Poissonzahl	Rohdichte	Verlustfaktor
	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	ρ	η_{int}
	in N/mm ²	in N/mm ²	-	in kg/m ³	in %
Gipsfaserplatte	3 300 ^a	1 300 ^a	0,3 ^a	1 150 ^{a,e}	1,0 ^a
	3 300	1 300			
	3 300	1 300			
Gipsplatte Typ A	2 400 ^a	900 ^a	0,3 ^a	680 ^f	1,2 ^b
	2 400	900			
	2 400	900			
Kalksplitt-Schüttung	10 ^a	0,06 ^a	0,2 ^a	1 500 ^e	8,0 ^a
	10	0,06			
	10	0,06			
Stahlbeton	20 000 ^a	12 300 ^a	0,2 ^a	2 500 ^a	0,6 ^a
	20 000	12 300			
	20 000	12 300			
Trittschalldämmung MW S-6 ^d	0,15 ^a	0,06 ^a	0,2 ^a	70 ^c	8,0 ^a
	0,15	0,06			
	0,15	0,06			
Trittschalldämmung MW S-40 ^d	0,80 ^a	0,33 ^a	0,2 ^a	190 ^c	10,0 ^a
	0,80	0,33			
	0,80	0,33			
Zementestrich	20 000 ^a	8 300 ^a	0,2 ^a	2 400 ^a	0,6 ^a
	20 000	8 300			
	15 000	8 300			

^a [30, S.140]

^b [137, S.146]: $\rho_{\text{Gipsplatte}} = 710 \text{ kg/m}^3$; [65]: $\rho_{\text{Gipsplatte}} = 680 \text{ kg/m}^3$

^c Messungen am ift Rosenheim

^d Saint-Gobain Isover G+H AG, AKUSTIC EP1 bzw. AKUSTIC EP3

^e FERMACELL GMBH, FERMACELL GIPFASER-PLATTE [138]; FERMACELL WABEN-DÄMMSYSTEM

^f SAINT-GOBAIN RIGIPS GMBH, BAUPLATTE RB [139]

Tabelle 17 Elastomechanische Kennwerte von Holz- und Holzwerkstoffen [37]

Material	E-Modul	G-Modul	Poissonzahl	Rohdichte	Verlustfaktor
	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	ρ	η_{int}
	in N/mm ²	in N/mm ²	-	in kg/m ³	in %
Fichte					
[140] ^a	12 048	744	0,034	450	0,6 ^d
	818	42	0,733		
	420	623	0,046		
[141] ^a	13 760	730	0,030	-	0,6 ^d
	910	30	0,600		
	490	510	0,536		
[114, S.36, 58] ^b	10 981	459	0,052	468	≥ 1,2
	137	74			
	137	459			
Brettsperrholz					
[113, S.58, 74] ^e	10 918	715	0,013/0,008	476-483	-
	2 804	167	0,195/0,188		
	-	225	0,125/0,113		
Furnierschichtholz					
[142, KertoS]	13 800	500	0,25 ^c	480	1,0 ^c
	300	500			
	300	500			
[142, KertoQ]	10 500	500	0,25 ^c	480	1,0 ^c
	2 500	500			
	2 500	500			
Spanplatte roh					
[137, S.145f]	3 600 ^c	1 000 ^c	0,3 ^c	573	1,9 ± 0,1
	3 600	140			
	3 600	140			
Holzfaserplatte WF					
[137, S.145f]	-	-	0,2 ^c	305	2,6

^a $E_{x,y,z}$ entspricht $E_{longitudinal,radial,tangential}$, Holzfeuchte $u = 12\%$, fehlerfreie Proben

^b MERK TIMBER GMBH, LENO 105 TYP 2, 5-schichtige Platte aus Fichte, 27-17-17-17-27 mm, für eine einzelne Schicht aus Ergebnissen einer experimentellen Modalanalyse

^c [30, S.140]

^d [143], berechnet aus $\Lambda = 0,0195$

^e 5-schichtige Platte aus Fichte, 15-15-20-15-15 mm, Ergebnisse aus einer exp. Modalanalyse von drei frei aufgehängten Platten, Holzfeuchte $u = 12\%$, Dämpfungsrate $-0,4$ bis $-0,8\%$

Tabelle 18 Quasi-longitudinale Schallgeschwindigkeiten von Baumaterialien [37]

Material	Schall- geschwindigkeit	Rohdichte	Materialfeuchte
	c_L	ρ	u
	in m/s	in kg/m ³	in %
Fichte			
[144, S.89] ^a	5 933 ± 364	420 ± 20	12,8
[145]	5 800	470	12,0
[146, S.26,32] ^c	5 580 ± 407	441 ± 11	12,0
[65, S.609] ^g	5 000	440	-
[147] ^d	5 364 ± 303	497 ± 56	11,5 ± 1,5
Massivholzplatten			
[119, S.50]	4 000 - 5 000	-	-
Spanplatten			
[119]	2 000 - 2 500	-	-
[147] ^e	2 066 ± 107	615 ± 10	-
[65, S.608]	2 200	760	-
Holzfasерplatte MDF			
[119]	2 500	-	-
[65, S.609]	2 560	760	-
Sperrholz			
[119]	4 000	-	-
Orientierte Grobspanplatte OSB			
[65, S.609]	2 200 - 3 500 ^f	590	-
Beton			
[148, S.75] ^b	4 770	2 300	-

^a Mittelwert und Standardabweichung ($n = 36$)

^b Mittelwert aus zwei Messmethoden (piezoelektrische Anregung, Laseranregung)

^c Mittelwert und Standardabweichung ($n = 393$), Nadelholz aus Österreich

^d Mittelwert mit 95 % Konfidenzintervall ($n = 5$) aus Laufzeitmessungen mithilfe von stirnseitig angebrachten Beschleunigungssensoren und Hammeranregung an Holzbalken

^e Mittelwert mit 95 % Konfidenzintervall ($n = 6$) aus Laufzeitmessungen in Plattenebene mithilfe von seitlich angebrachten Beschleunigungssensoren und Hammeranregung

^f Orthotropes Material: Werte abhängig von der Orientierung.

^g Nadelholz für Konstruktionen am Bau.

D L-Stoß

D.1 Zeichnungen

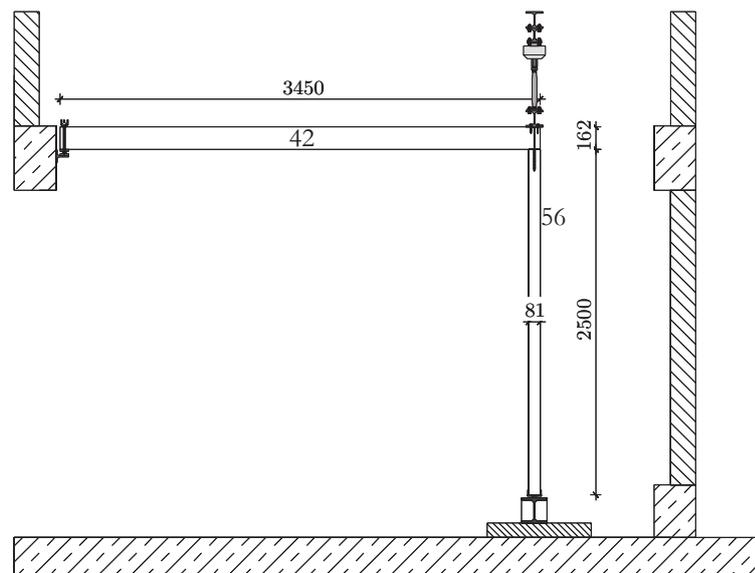
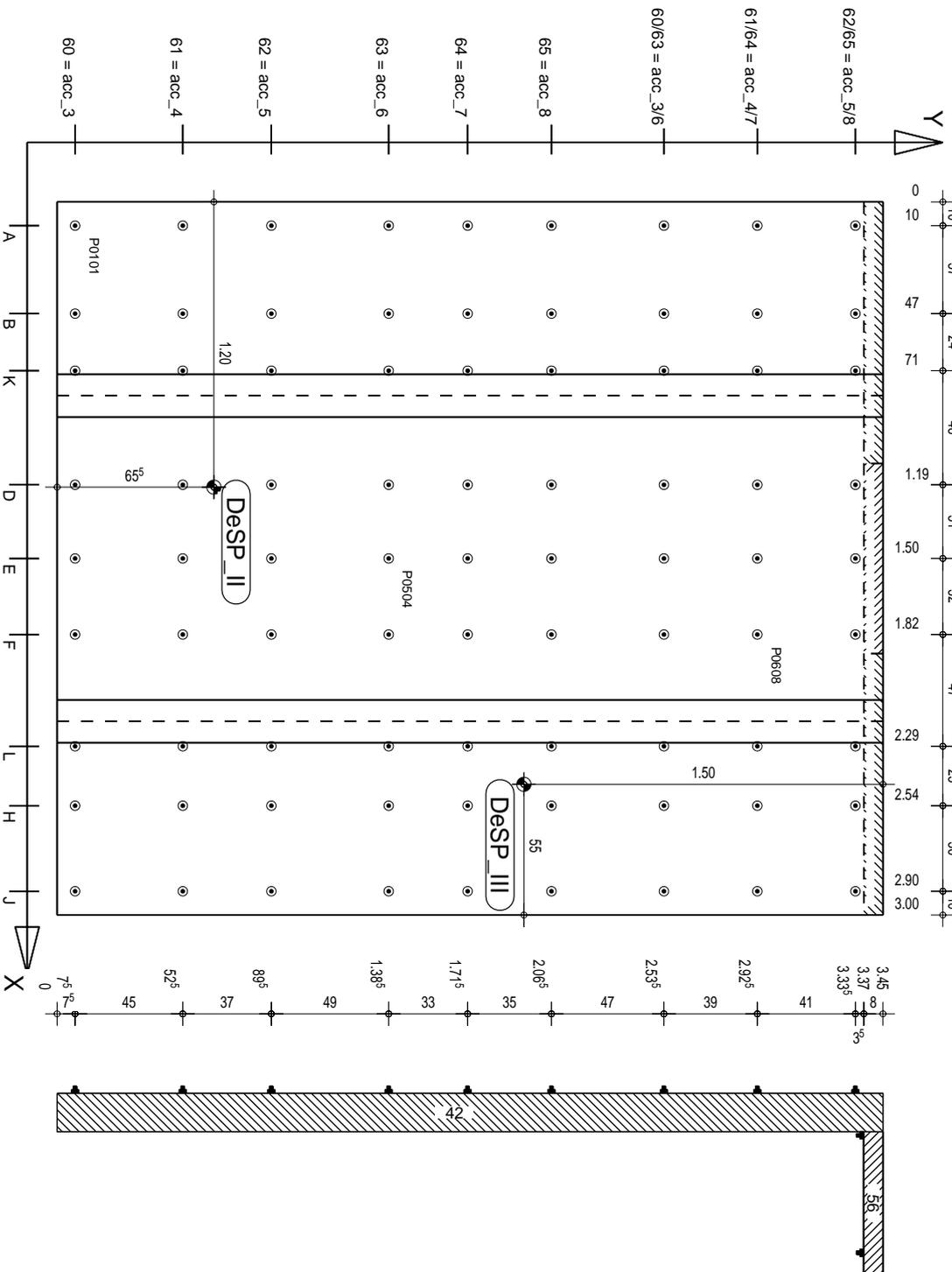


Abbildung 56 Abmessungen des L-förmigen Bauteilstoßes im Prüfstand der HS Rosenheim. Die Kopplungslänge l_{12} beträgt 3 m.



Forschungsprojekt
Vibroakustik

Planinhalt
Deckel Leno 162 (Bauteil Nr. 42)
Im L-Stoß

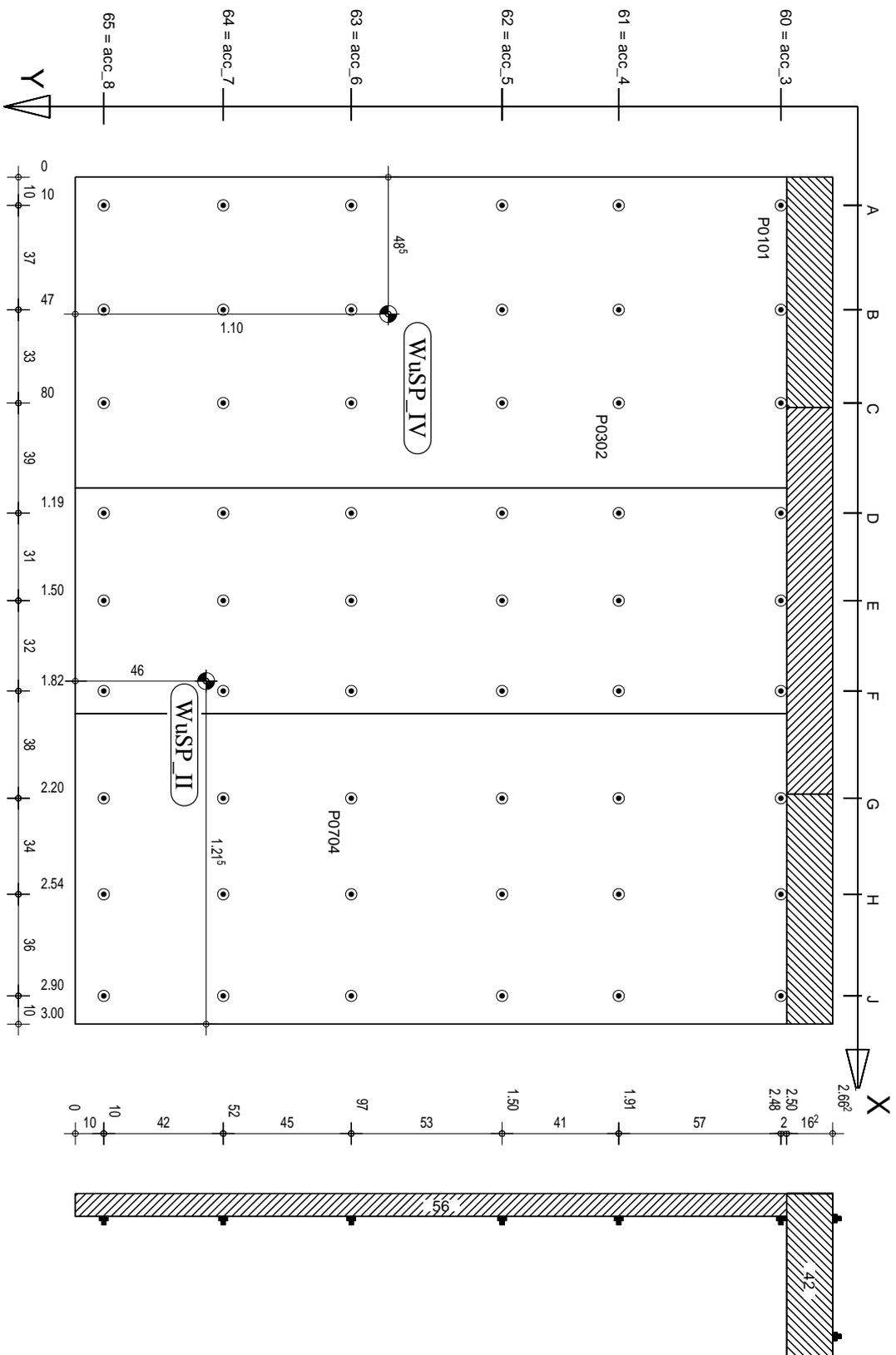
Masstab
1 : 25

Ansicht von oben
Positionen bei Durchführung der Power Injection Methode
und Betriebschwingenanalyse (gültig bis MR 149)

Anregungspunkt
(Modellshaker)
Messpunkt

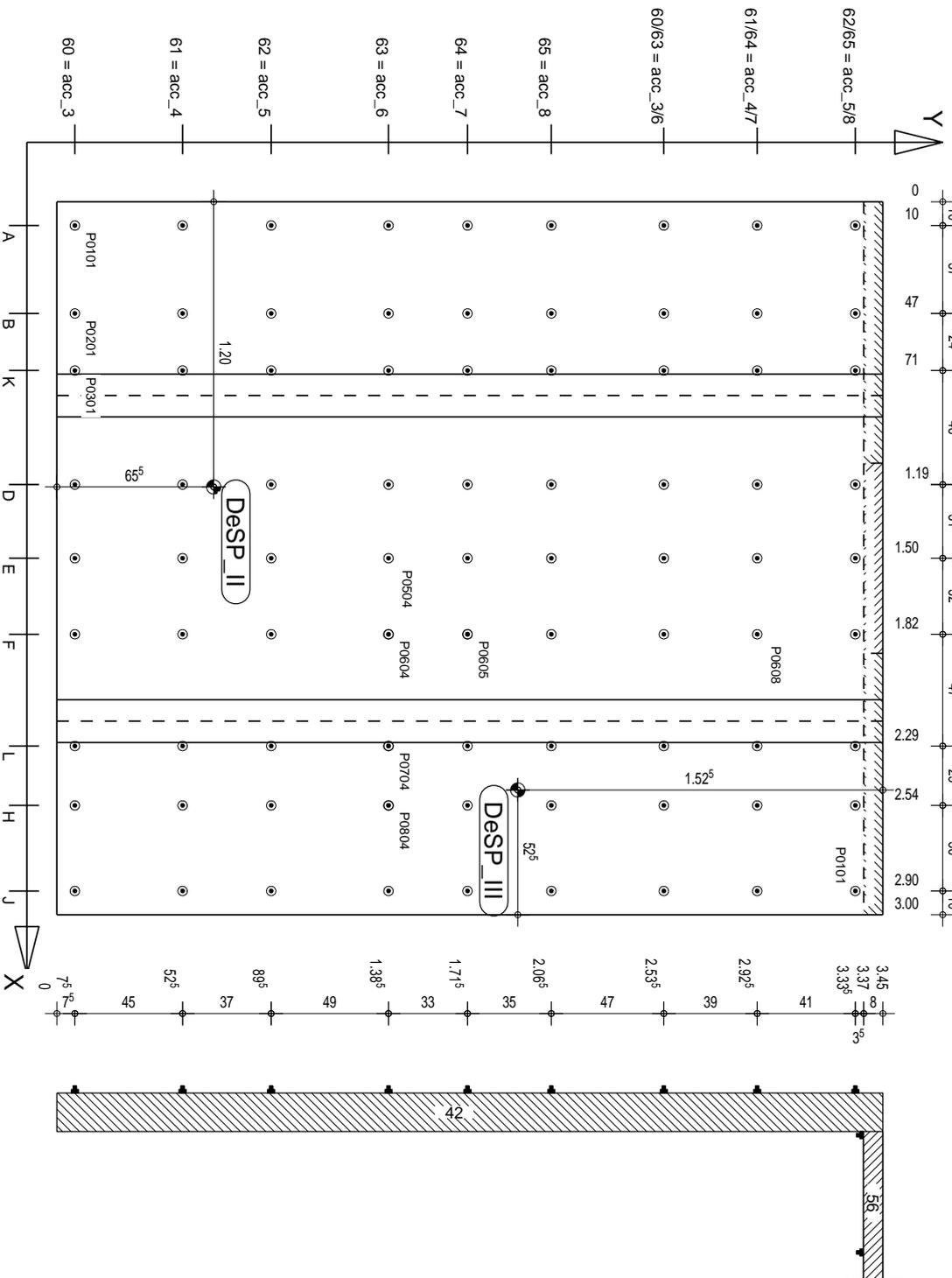
Datum
25.11.2014
gezeichnet
Kriese

ACHTUNG: GÜLTIG BIS MR 149



ACHTUNG: GÜLTIG BIS MR 149

Forschungsprojekt	Planinhalt	Maststab
Vibroakustik	Wand Leno 81 (Bauteil Nr. 56) Im L-Stoß	1 : 25
Ansicht von Deckenseite Positionen bei Durchführung der Power Injection Methode und Betriebschwingenanalyse (gültig bis MR 149)		Datum
Anregungspunkt (Modalschaker)		25.11.2014
Messpunkt		gezeichnet
		Kruse



Forschungsprojekt
Vibroakustik

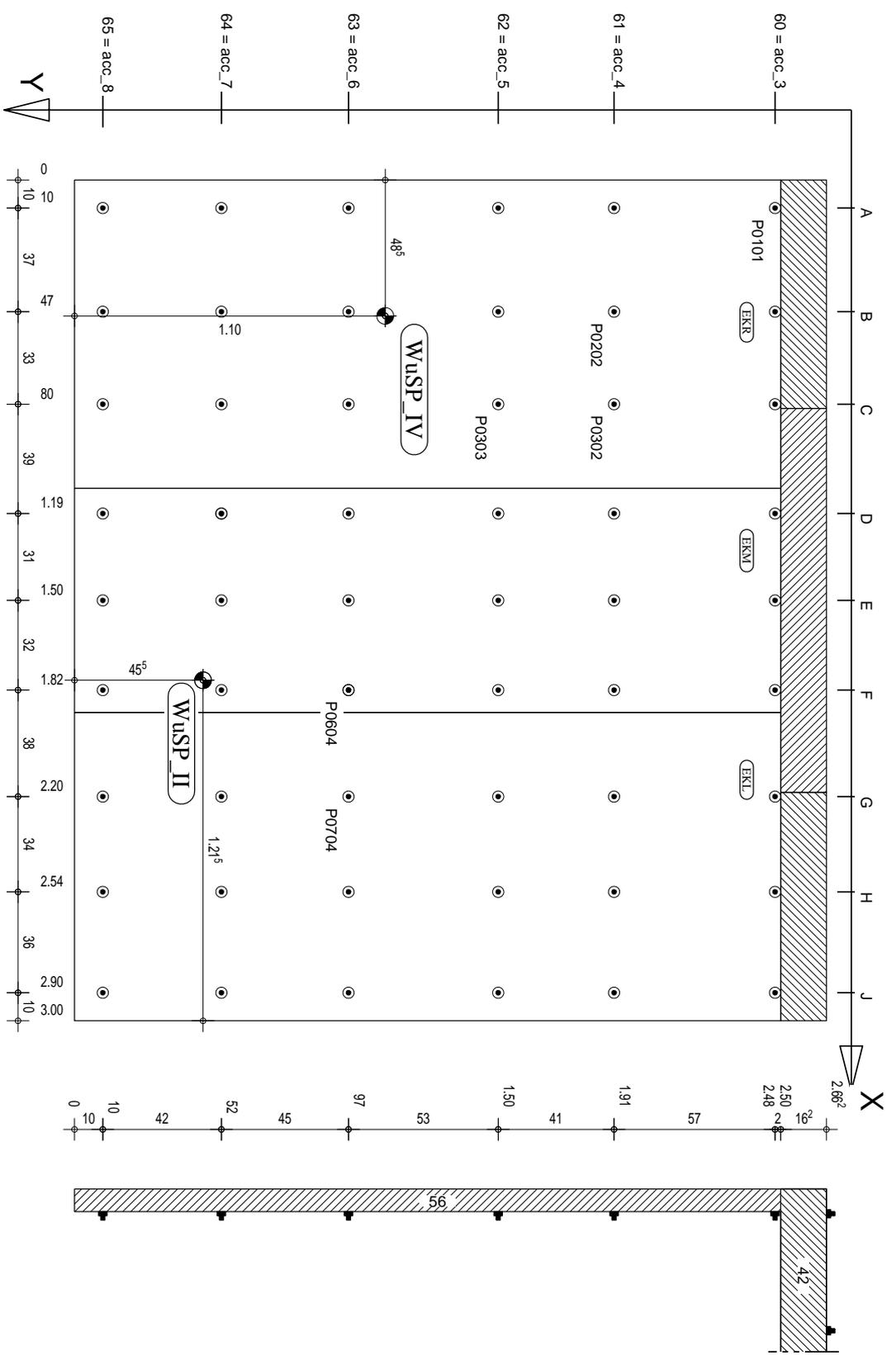
Planinhalt
Decke Leno 162 (Bauteil Nr. 42)
Im L-Stoß

Maßstab
1 : 25

Ansicht von oben
Positionen bei Durchführung der Power Injection Methode
und Betriebschwingenanalyse (gültig ab MIR 149 / 16.05.2014)

Arregungspunkt
(Modellstaker)
Messpunkt

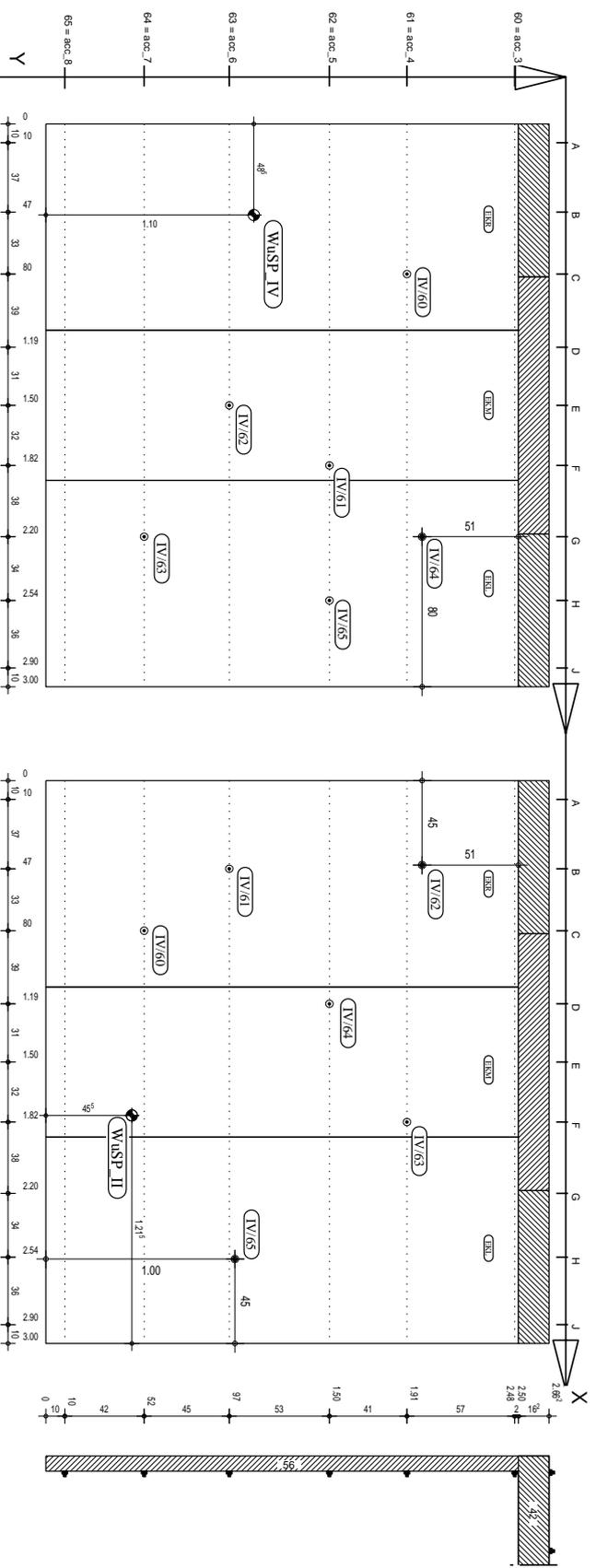
Datum
22.01.2015
gezeichnet
Kriese



Forschungsprojekt		Planinhalt	
Vibroakustik		Wand Leno 81 (Bauteil Nr. 56) Im L-Stoß	
Anregungspunkt (Modalshaker)		Messpunkt	
<p>Ansicht von Deckenseite Positionen bei Durchführung der Power Injection Methode und Betriebschwingenanalyse (gültig ab MR 149 / 16.05.2014)</p>		<p>Maßstab 1 : 25</p>	
Datum 22.01.2015		gezeichnet Kriese	

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WuSP IV (Verlustfaktormessungen)
 - DesP II, WuSP IV (Schallepegeldifferenzen)

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WuSP II (Verlustfaktormessungen)
 - DesP II, WuSP II (Schallepegeldifferenzen)

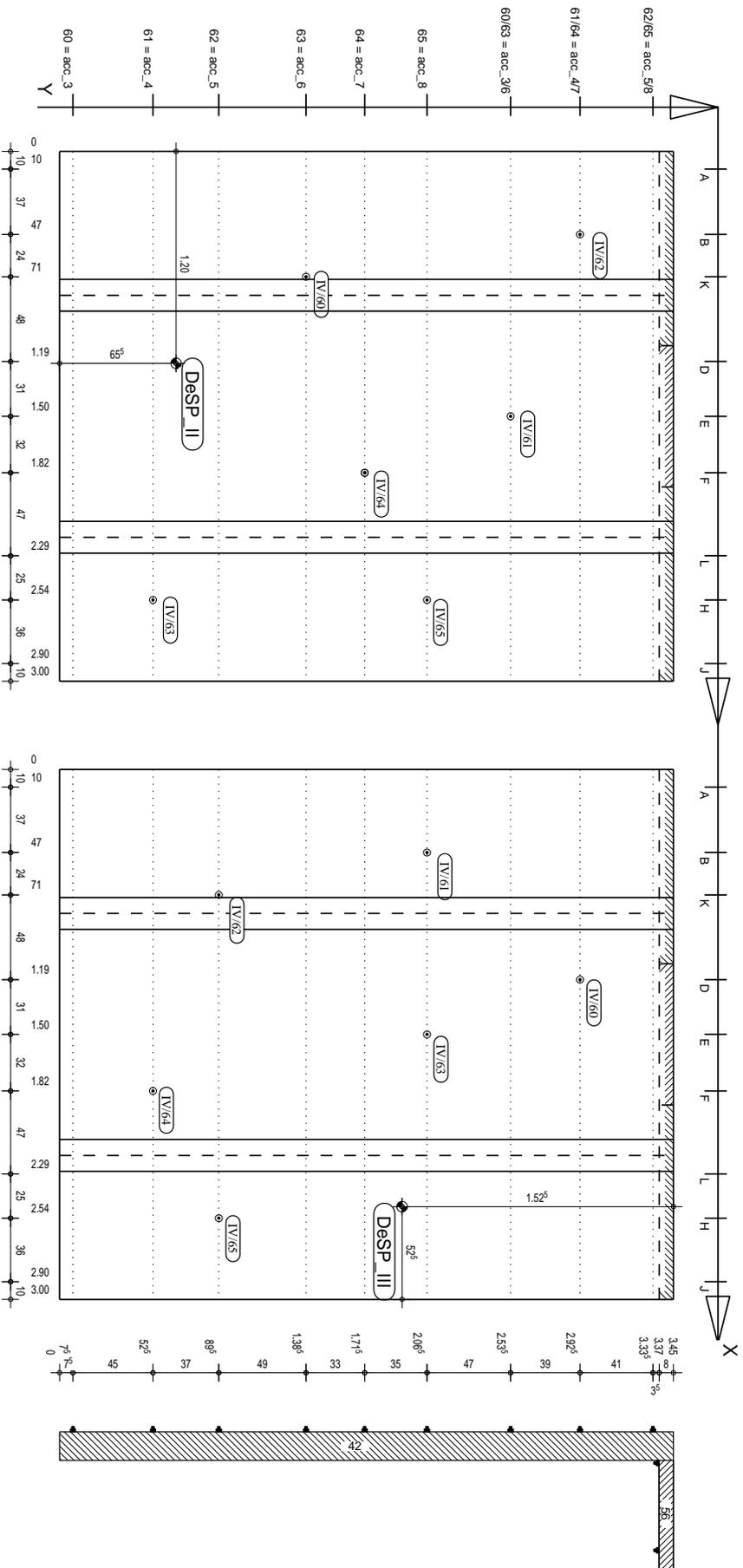


Forschungsprojekt **Vibroakustik** Planinhalt **Wand Leno 81 (Bauteil Nr. 56) Im L-Stoß** Maßstab **1 : 33**

Ansicht von Deckenseite **Arregungspunkt (Modalsäker) Messpunkt** Datum **22.01.2015**
 Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der **Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)** **geschneit**
Kriuse

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DeSPII (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPII, WuSPII (Schnellepegeldifferenzen)

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DeSPIII (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPIII, WuSPIV (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt Vibroakustik	Planinhalt Decke Leno 162 (Bauteil Nr. 42) Im L-Stoß	Maßstab 1 : 25
Ansicht von oben Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)		Datum 22.01.2015
Anregungspunkt (Modalshaker)		gezeichnet Kriuse
Messpunkt		

D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung, ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. MR154-178

D.2.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

Abbildung 57 Detailabbildung des L-STOSS S3. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

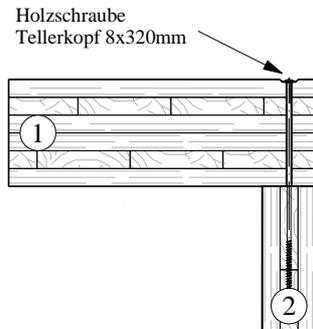


Tabelle 19 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S3

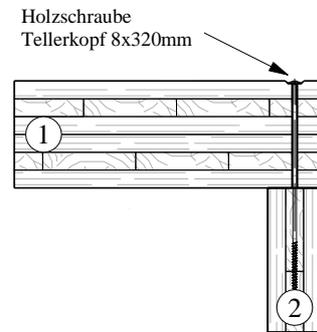
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	26...48	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	8	

Tabelle 20 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S3. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

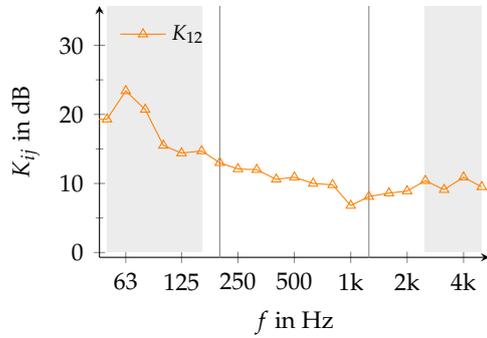
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{12}	$\overline{D_{v,12}}$	$\eta_{tot,1}$	$\eta_{tot,2}$	M_1	M_2
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,3	14,7	2,1	1,6	0,02	0,02
63	23,4	21,8	5,1	2,0	0,03	0,01
80	20,7	18,3	3,5	1,6	0,14	0,06
100	15,5	13,9	3,0	2,2	0,11	0,41
125	14,4	12,8	2,8	1,9	0,21	0,13
160	14,7	14,6	3,9	2,1	0,24	0,32
200	13,0	12,4	2,7	1,9	0,53	0,54
250	12,1	11,9	2,9	1,7	0,46	0,39
315	12,0	12,0	2,4	1,8	0,43	0,74
400	10,6	11,4	2,5	2,0	0,80	0,67
500	10,9	11,9	2,0	2,1	0,93	1,37
630	10,0	11,6	2,2	2,0	1,60	1,80
800	9,8	12,1	2,2	2,2	3,03	2,28
1 000	6,8	9,6	2,0	2,5	3,25	3,35
1 250	8,1	11,2	2,1	2,2	-	-
1 600	8,6	12,0	2,1	1,9	-	-
2 000	8,9	12,6	1,8	2,1	-	-
2 500	10,4	14,2	1,7	1,9	-	-
3 150	9,1	13,2	1,7	1,7	-	-
4 000	10,9	14,8	1,3	1,7	-	-
5 000	9,5	14,7	1,8	1,7	-	-

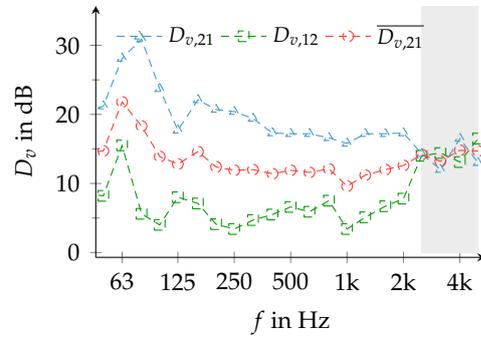
(b) Stoßabbildung



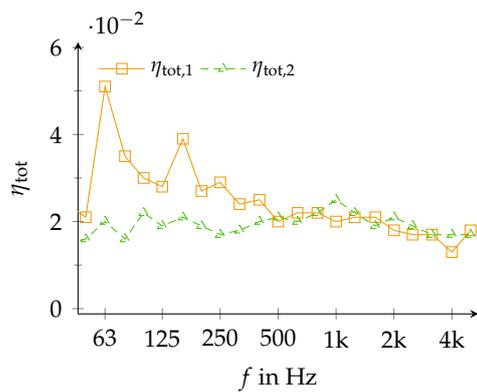
D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung



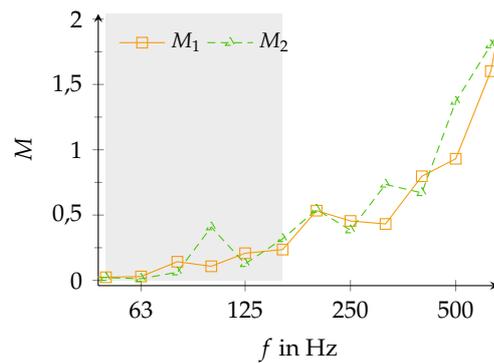
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 10.4\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 58 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{\text{tot},j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S3. Weiter Infos in Tab. 19. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

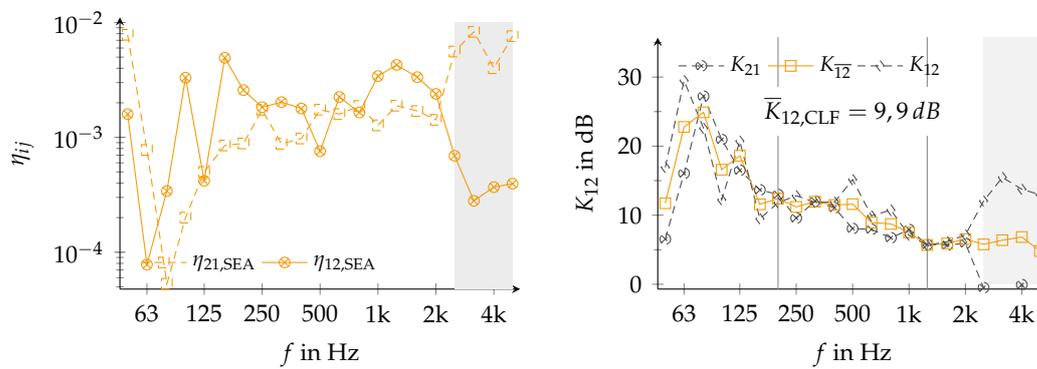
D.2.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

Tabelle 21 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße aus experimenteller SEA bzw. PIM am L-STOSS S3 ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$. η_{ij} mit $N \geq 23$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 8$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	78,20	15,92	6,5	16,9	11,7
63	7,78	0,78	16,1	29,5	22,8
80	0,53	3,41	27,2	22,6	24,9
100	2,00	33,07	21,0	12,2	16,6
125	5,00	4,19	16,5	20,7	18,6
160	8,50	49,31	13,7	9,5	11,6
200	8,85	25,81	13,0	11,8	12,4
250	17,39	18,29	9,6	12,8	11,2
315	8,79	20,28	12,0	11,9	12,0
400	9,78	17,84	11,1	11,9	11,5
500	17,44	7,57	8,1	15,1	11,6
630	15,94	22,48	8,0	9,9	8,9
800	18,77	16,48	6,7	10,7	8,7
1 000	12,73	34,20	7,9	7,1	7,5
1 250	18,87	42,73	5,7	5,6	5,7
1 600	16,96	33,45	5,7	6,2	5,9
2 000	14,23	23,89	5,9	7,1	6,5
2 500	55,93	6,91	-0,5	12,1	5,8
3 150	83,00	2,80	-2,7	15,5	6,4
4 000	40,04	3,69	-0,1	13,8	6,8
5 000	76,15	3,95	-3,3	13,0	4,8

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.1})$$

D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung



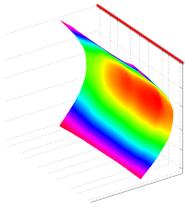
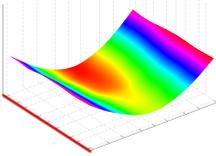
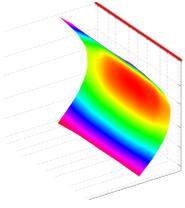
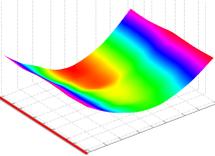
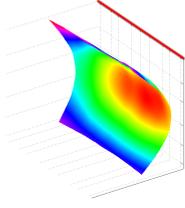
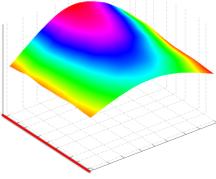
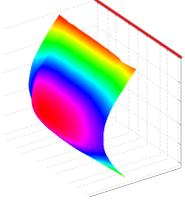
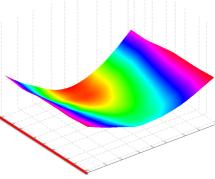
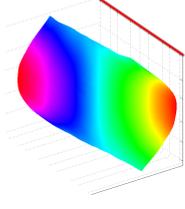
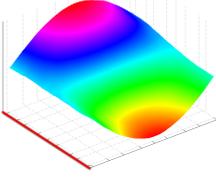
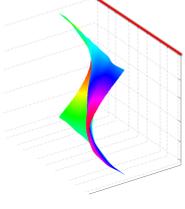
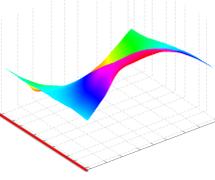
(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N \geq 23$

(b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 59 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S3 ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1} / m_{tot,2} = 2,79$.

D.2.3 Schwingformen

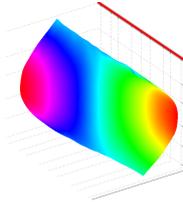
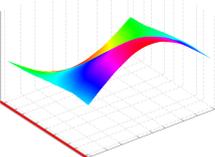
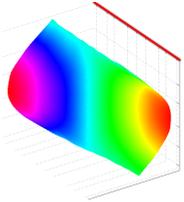
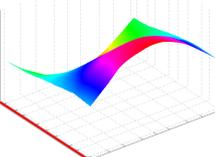
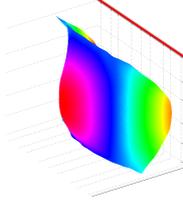
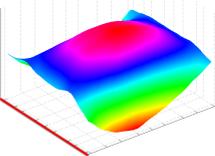
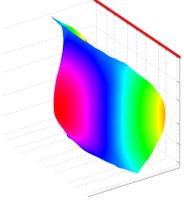
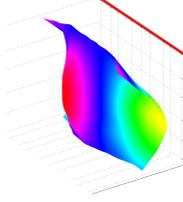
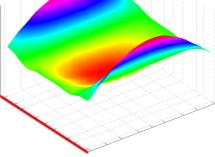
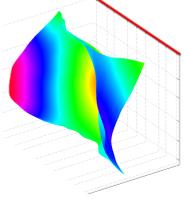
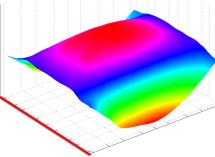
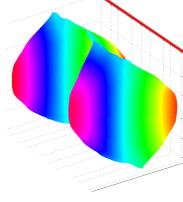
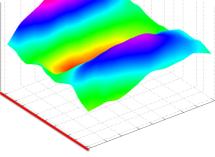
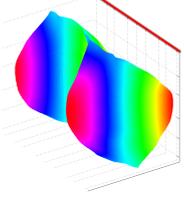
Tabelle 22 Schwingformen und Resonanzfrequenzen von Wand- und Deckenelement im L-STOSS S3 ohne zusätzl. Pressung und ohne Elastomer in der Stoßfuge (Stoßfuge Nr.3) aus der BSA. Der Amplitudenfaktor A_F ist normiert auf die maximale Amplitude des direkt angeregten Bauteils. Die rote Linie kennzeichnet die Kopplungsstelle der beiden Bauteile.

Nr.	Wand, angeregt a) WuSPIV	Decke	Wand	Decke, angeregt a) DeSPIII
1a)				
f in Hz	25,0	25,0	25,1	25,1
A_F		0,62		1,16
2a)				
f in Hz	26,5	26,5	26,5	26,5
A_F		0,98		0,68
3a)				
f in Hz	28,9	28,9	29,1	29,1
A_F		0,43		1,91

Fortsetzung nächste Seite ...

D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung

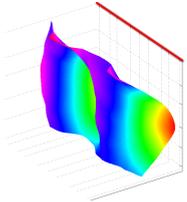
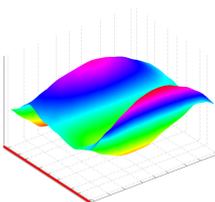
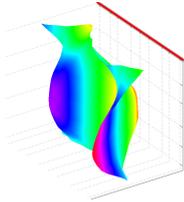
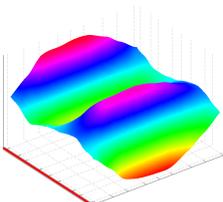
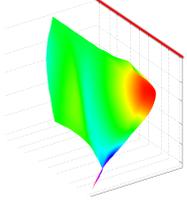
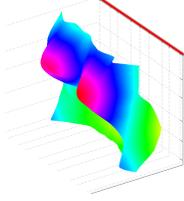
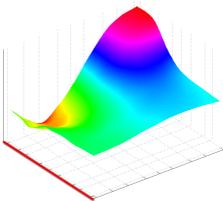
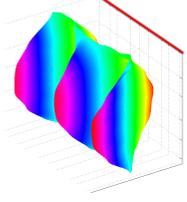
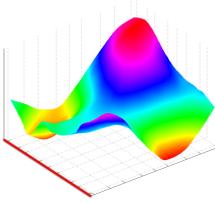
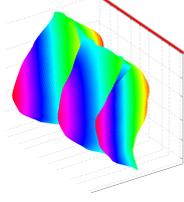
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
4a)				
f in Hz	31,1	31,0	31,2	31,2
A_F		0,74		1,43
5a)				-
f in Hz	36,1	36,3	36,5	-
A_F		0,05		-
6a)				
f in Hz	42,5	42,9	43,2	43,2
A_F		5,8		0,23
7a)				-
f in Hz	47,5	47,7	48,1	-
A_F		0,09		-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

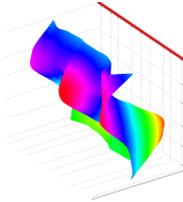
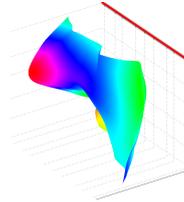
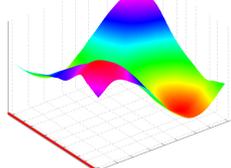
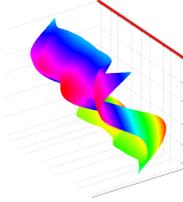
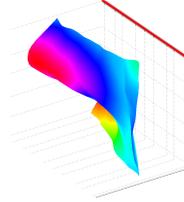
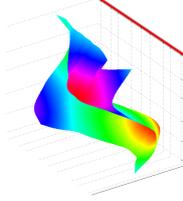
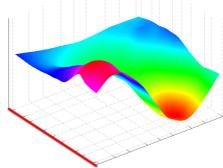
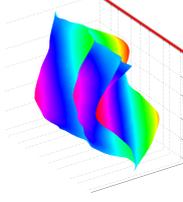
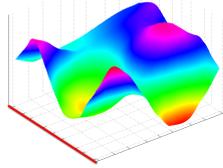
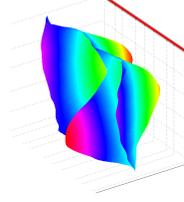
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
8a)				
f in Hz	53,0	53,4	53,4	53,2
A_F		1,7		0,16
9a)		-	-	-
f in Hz	70,2	-	-	-
A_F		-	-	-
10a)	-	-		
f in Hz	-	-	75,2	75,2
A_F		-		0,09
11a)				-
f in Hz	77,0	77,1	77,5	-
A_F		0,02		-

Fortsetzung nächste Seite ...

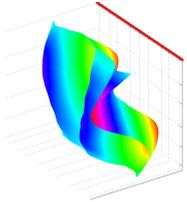
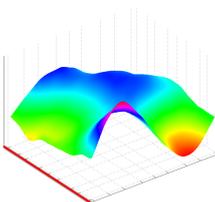
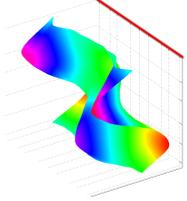
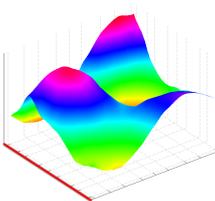
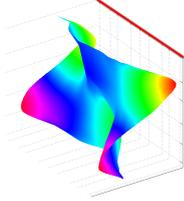
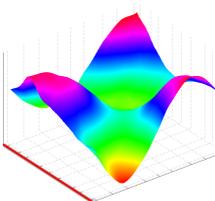
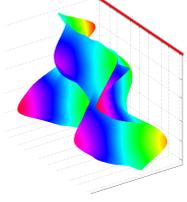
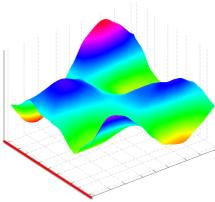
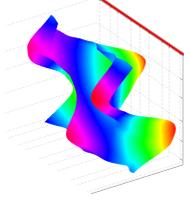
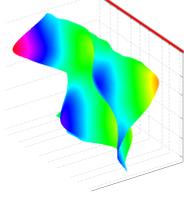
D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung

Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt a) WuSPIV	Decke	Wand	Decke, angeregt a) DeSPIII
12a)		-		
f in Hz	85,0	-	85,3	84,9
A_F	-	-	0,19	
13a)		-		-
f in Hz	88,5	-	87,7	-
A_F	-	-	-	-
14a)			-	-
f in Hz	91,8	92,2	-	-
A_F	0,15		-	-
15a)				-
f in Hz	100,2	100,3	100,4	-
A_F	0,03		-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

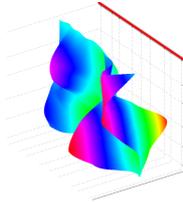
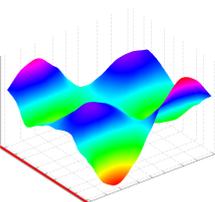
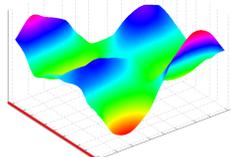
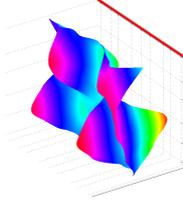
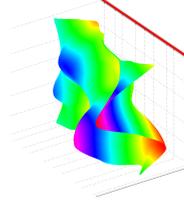
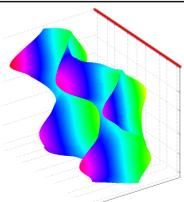
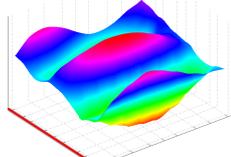
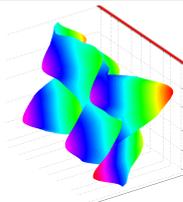
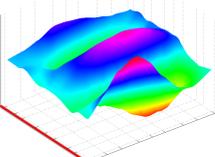
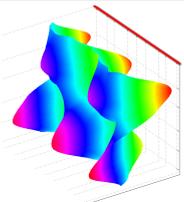
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
16a)			-	-
f in Hz	103,6	105,6	-	-
A_F	0,22		-	-
17a)				
f in Hz	106,9	107,4	106,4	106,5
A_F	0,19		0,83	
18a)				-
f in Hz	110,9	111,3	109,1	-
A_F	0,05		-	-
19a)?	-	-		-
f in Hz	-	-	112,2	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung

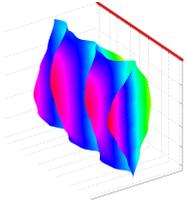
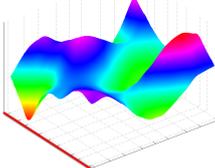
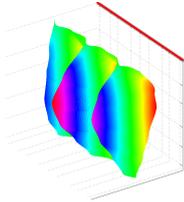
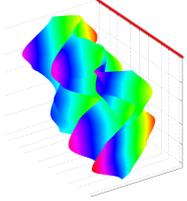
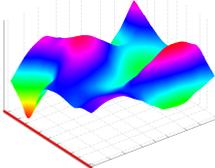
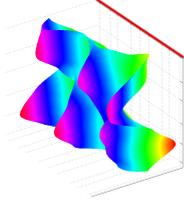
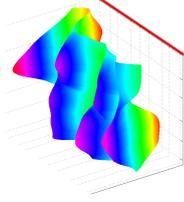
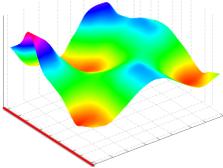
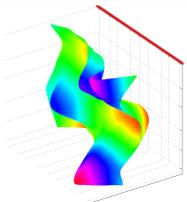
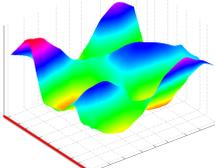
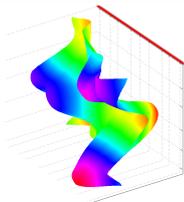
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
20a)			-	
f in Hz	117,9	118,7	-	118,7
A_F		2,5	-	
21a)		-		-
f in Hz	122,2	-	121,0	-
A_F		-	-	-
22a)	-	-		
f in Hz	-	-	127,4	127,3
A_F	-	-		0,22
23a)				-
f in Hz	131,5	131,3	132,5	-
A_F		0,05	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

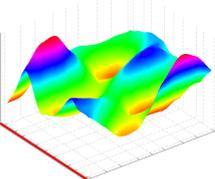
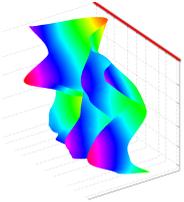
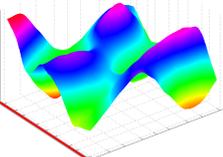
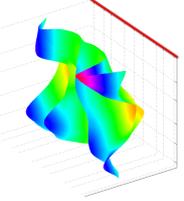
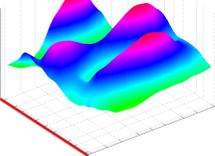
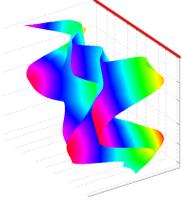
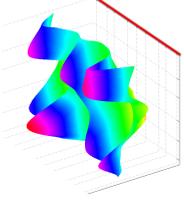
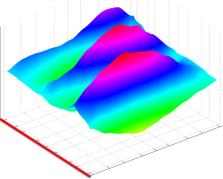
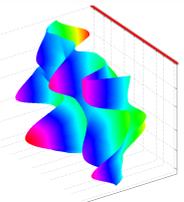
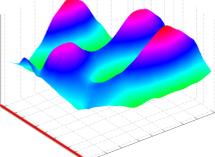
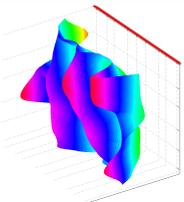
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
24a)				-
f in Hz	144,2	143,9	144,5	-
A_F		0,08		-
25a)				-
f in Hz	148,2	148,1	149,5	-
A_F		0,12		-
26a)	-	-		
f in Hz	-	-	157,9	157,8
A_F		-		0,18
27a)				-
f in Hz	163,8	163,7	163,1	-
A_F		0,15		-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.2 Stoßfuge S3 mit stirnseitiger Verschraubung

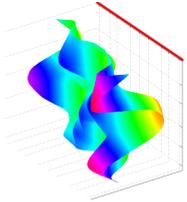
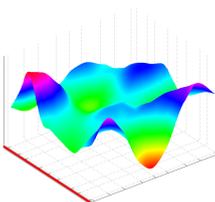
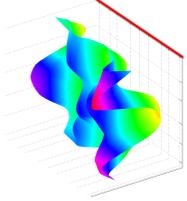
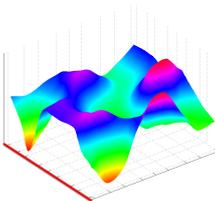
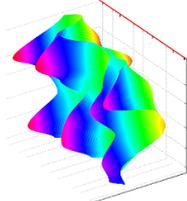
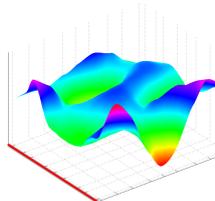
Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt a) WuSPIV	Decke	Wand	Decke, angeregt a) DeSPIII
28a)	-			
f in Hz	-	169,0	168,6	168,8
A_F	-	-	0,12	
29a)				-
f in Hz	180,7	186,9	179,9	-
A_F	-	0,05	-	-
30a)	-	-		
f in Hz	-	-	187,5	187,1
A_F	-	-	0,51	
31a)				-
f in Hz	190,2	190,2	192,1	-
A_F	-	0,19	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

Tabelle 22 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV		a) DeSPIII	
32a)			-	-
f in Hz	196,9	196,4	-	-
A_F	0,15		-	-
33a)				
f in Hz	199,5	199,5	198,9	199,0
A_F	0,28		0,24	

D.3 Stoßfuge S1 mit stirnseitiger Verschraubung unter zusätzlicher Stoßpressung

D.3 Stoßfuge S1 mit stirnseitiger Verschraubung, ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. MR284-299

D.3.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

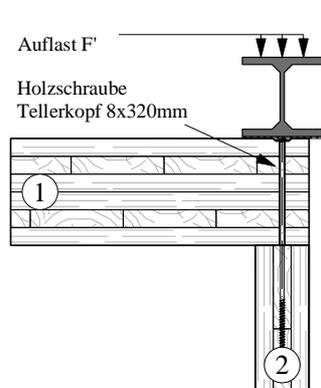


Abbildung 60 Detailabbildung des L-STOSS S1 mit direkter Verschraubung und zusätzlicher Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 23 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S1

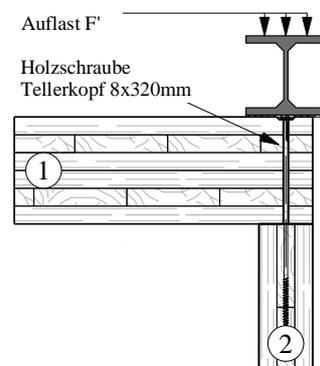
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0.27N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	10...12	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 24 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S1. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

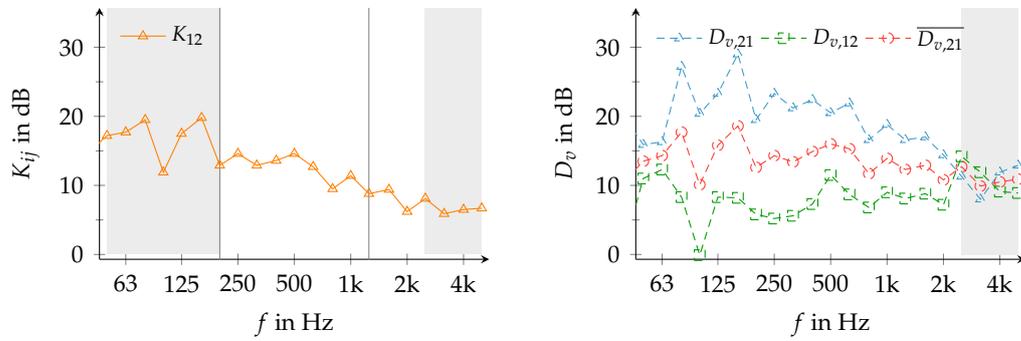
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{12}	$\overline{D_{v,12}}$	$\eta_{tot,1}$	$\eta_{tot,2}$	M_1	M_2
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	17,2	13,5	3,1	1,6	0,04	0,03
63	17,7	14,3	2,2	2,1	0,03	0,01
80	19,5	17,7	4,5	1,7	0,13	0,08
100	11,9	10,1	3,2	2,0	0,15	0,36
125	17,5	15,8	2,8	1,7	0,23	0,10
160	19,8	18,6	2,8	1,8	0,09	0,29
200	12,9	12,6	3,2	1,9	0,63	0,51
250	14,6	14,3	2,7	1,8	0,45	0,41
315	12,9	13,4	2,5	2,2	0,57	0,84
400	13,6	14,9	2,8	2,2	0,74	0,88
500	14,6	16,0	2,5	2,0	1,31	1,09
630	12,7	15,3	3,0	2,5	1,99	2,17
800	9,5	11,7	1,8	2,6	2,57	2,96
1 000	11,4	13,9	1,9	2,3	3,11	2,57
1 250	8,8	12,3	2,3	2,4	-	-
1 600	9,4	12,9	2,1	2,0	-	-
2 000	6,2	10,8	2,4	2,4	-	-
2 500	8,1	12,7	2,4	2,0	-	-
3 150	5,9	9,9	1,6	1,8	-	-
4 000	6,5	10,5	1,5	1,5	-	-
5 000	6,7	10,9	1,3	1,5	-	-

(b) Stoßabbildung

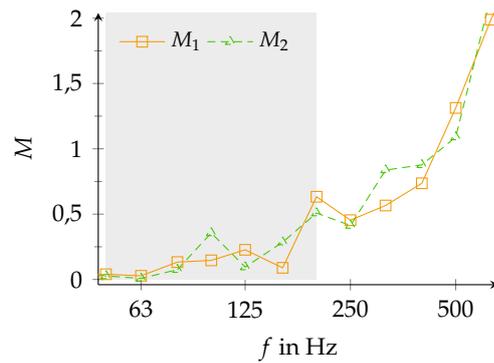
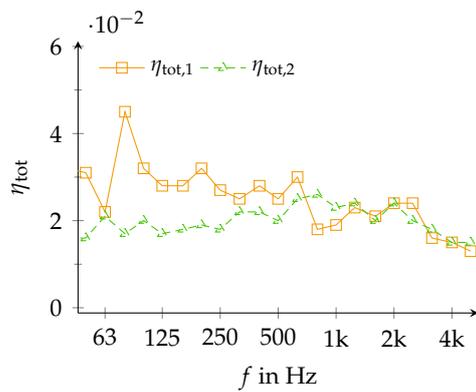


D.3 Stoßfuge S1 mit stirnseitiger Verschraubung unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe: $\bar{K}_{12} = 12,3$ dB

(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile

(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 61 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S1. Weiter Infos in Tab. 23. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.3.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

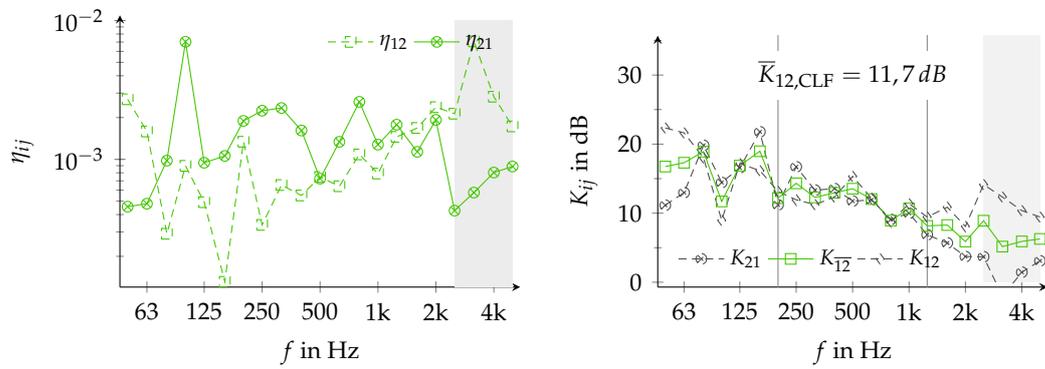
Tabelle 25 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S1 ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St}=0.27\text{N}/\text{mm}^2$. Der Achsabstand der durchgehenden Schrauben zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{\text{tot},1}/m_{\text{tot},2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N = 12 \cdot 2$ für $\langle v_{\text{eff}} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	27,08	4,56	11,2	22,3	16,8
63	15,87	4,79	13,0	21,6	17,3
80	2,91	9,79	19,8	18,0	18,9
100	8,98	70,29	14,4	9,0	11,7
125	4,91	9,45	16,6	17,2	16,9
160	1,31	10,58	21,8	16,2	19,0
200	13,39	18,92	11,2	13,2	12,2
250	3,37	22,42	16,7	11,9	14,3
315	6,53	23,43	13,3	11,2	12,3
400	5,49	16,13	13,6	12,3	13,0
500	7,46	7,26	11,8	15,3	13,5
630	6,40	13,37	11,9	12,2	12,0
800	10,85	25,96	9,1	8,8	8,9
1 000	7,90	12,77	10,0	11,4	10,7
1 250	14,52	17,77	6,9	9,5	8,2
1 600	16,84	11,33	5,7	10,9	8,3
2 000	23,76	19,24	3,7	8,1	5,9
2 500	21,32	4,27	3,7	14,1	8,9
3 150	70,72	5,76	-2,0	12,3	5,2
4 000	28,26	8,03	1,5	10,4	5,9
5 000	17,27	8,88	3,1	9,5	6,3

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{\text{tot},j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{\text{eff}} \rangle_j^2}{\langle v_{\text{eff}} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.2})$$

D.3 Stoßfuge S1 mit stirnseitiger Verschraubung unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 62 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S1 ohne Elastomer bei einer Stoßpressung von $p_{St}=0,27\text{N}/\text{mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

**D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer
Sylodyn ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$.
MR180-200**

D.4.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

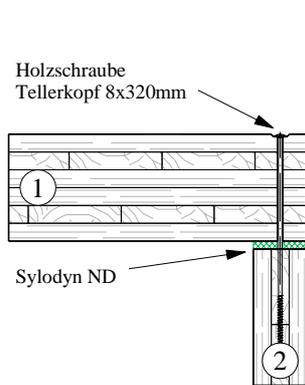


Abbildung 63 Detailabbildung des L-STOSS S2 mit Elastomer SYLODYN ND und direkter Verschraubung. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 26 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S2

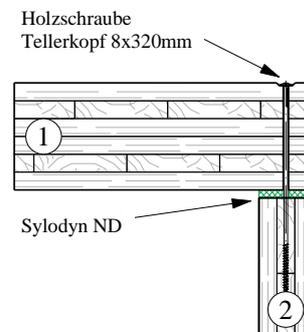
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,02 N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN ND; direkte, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	26...49	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 27 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S2. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

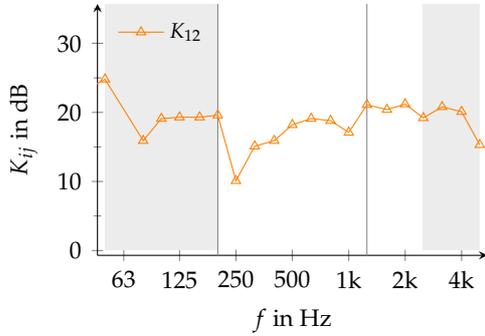
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	24,8	21,1	2,3	2,1	0,03	0,03
63	NaN	19,5	5,6	NaN	0,14	NaN
80	15,9	15,8	3,4	4,7	0,36	0,20
100	19,1	18,9	3,1	4,0	0,29	0,18
125	19,3	19,3	3,7	2,9	0,39	0,20
160	19,3	19,3	2,8	3,1	0,48	0,21
200	19,6	19,2	2,1	2,6	0,34	0,51
250	10,1	10,9	2,8	2,8	1,02	0,49
315	15,1	16,4	2,7	2,9	0,87	0,55
400	15,9	17,1	2,2	2,7	0,81	0,89
500	18,2	19,3	2,3	2,0	1,41	0,98
630	19,1	21,1	2,4	2,3	2,17	1,72
800	18,8	20,6	2,4	1,6	2,59	2,30
1 000	17,1	19,8	2,1	2,2	2,60	3,82
1 250	21,1	23,4	2,6	1,2	-	-
1 600	20,4	23,7	2,6	1,5	-	-
2 000	21,2	24,8	1,9	1,9	-	-
2 500	19,2	24,8	4,6	1,5	-	-
3 150	20,8	24,9	1,8	1,6	-	-
4 000	20,1	24,4	1,6	1,5	-	-
5 000	15,3	20,5	2,2	1,4	-	-

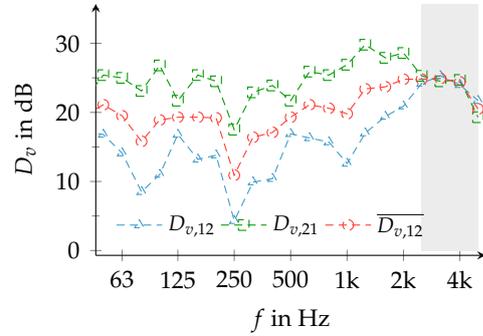
(b) Stoßabbildung



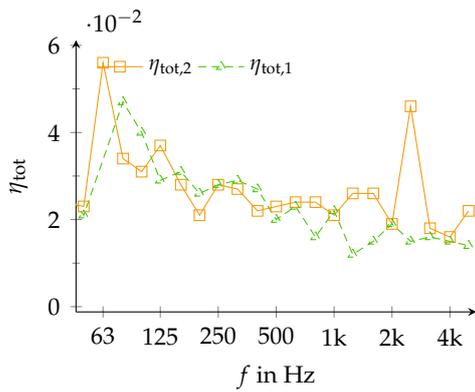
D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer



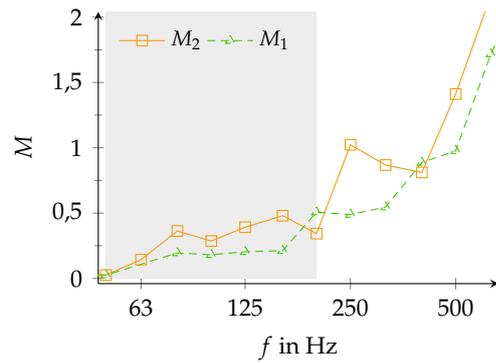
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 17.2\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 64 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S2. Weiter Infos in Tab. 26. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

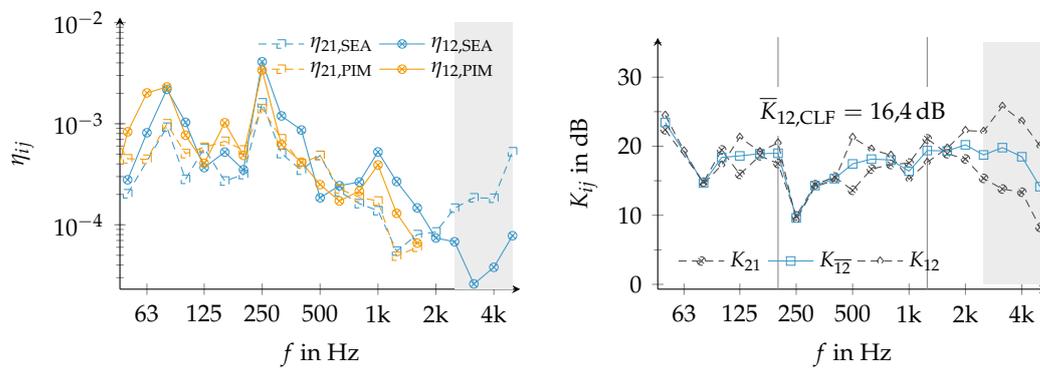
D.4.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

Tabelle 28 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S2 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N \geq 43$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	2,03	2,79	22,4	24,5	23,4
63	NaN	8,14	NaN	19,3	NaN
80	9,24	21,87	14,8	14,5	14,7
100	2,82	10,31	19,5	17,3	18,4
125	5,71	3,68	15,9	21,3	18,6
160	2,71	5,24	18,6	19,2	18,9
200	3,14	3,50	17,5	20,5	19,0
250	16,10	41,00	9,9	9,3	9,6
315	5,07	11,95	14,4	14,2	14,3
400	3,47	8,66	15,6	15,0	15,3
500	4,85	1,85	13,6	21,3	17,4
630	2,13	2,44	16,7	19,6	18,1
800	1,62	2,65	17,4	18,7	18,0
1 000	1,38	5,26	17,6	15,2	16,4
1 250	0,55	2,68	21,1	17,7	19,4
1 600	0,80	1,47	18,9	19,7	19,3
2 000	0,85	0,74	18,2	22,3	20,2
2 500	1,46	0,68	15,3	22,2	18,7
3 150	1,85	0,26	13,8	25,8	19,8
4 000	1,83	0,38	13,3	23,6	18,5
5 000	5,28	0,78	8,3	20,0	14,1

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.3})$$

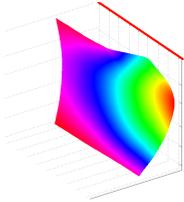
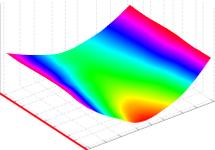
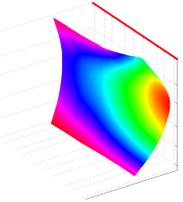
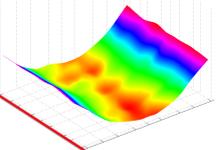
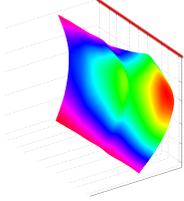
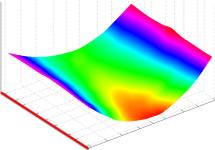
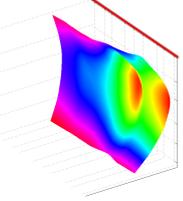
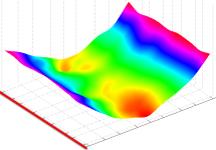
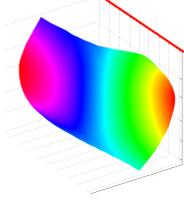
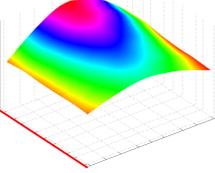
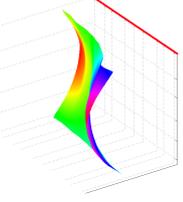
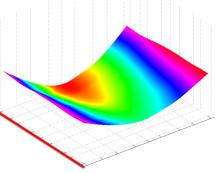


(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 65 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße aus experimenteller SEA bzw. PIM am L-STOSS S2 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der durchgehenden Schrauben zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1} / m_{tot,2} = 2,79$.

D.4.3 Schwingformen

Tabelle 29 Schwingformen und Resonanzfrequenzen von Wand- und Deckenelement im L-STOSS S2 ohne zusätzl. Pressung, Elastomer SYLODYN ND in der Stoßfuge aus der BSA. Der Amplitudenfaktor A_F ist normiert auf die maximale Amplitude des direkt angeregten Bauteils. Die rote Linie kennzeichnet die Kopplungsstelle der beiden Bauteile.

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII			
1a)				
f in Hz	22,6	22,6	22,9	23,0
A_F	0,14		5,60	
1b)				
f in Hz	22,6	22,6	22,9	23,0
A_F	0,19		5,00	
2a)				
f in Hz	25,5	25,5	25,5	25,6
A_F	0,59		1,10	

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

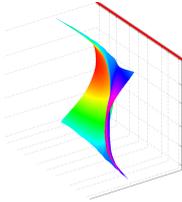
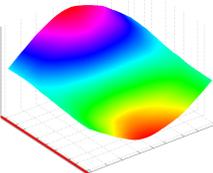
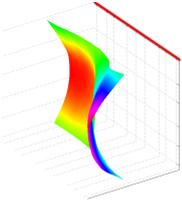
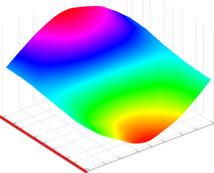
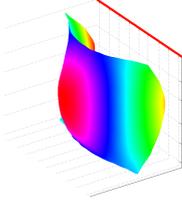
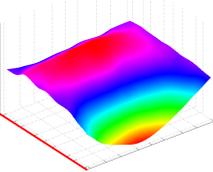
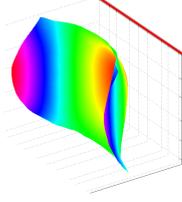
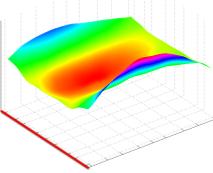
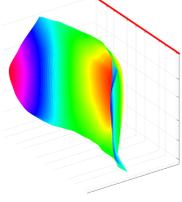
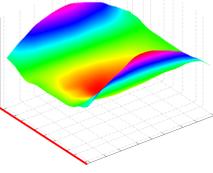
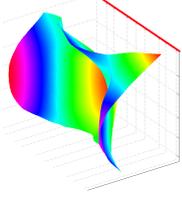
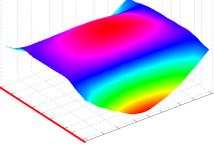
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
2b)				
f in Hz	25,5	25,5	25,6	25,6
A_F	0,47		0,92	
3a)				-
f in Hz	26,3	26,3	26,2	-
A_F	0,27		-	-
3b)				-
f in Hz	26,2	26,2	26,4	-
A_F	0,34		-	-
4a)				
f in Hz	29,1	28,9	29,0	29,0
A_F	1,64		0,55	

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

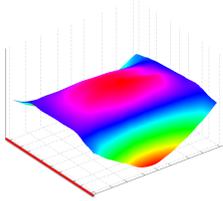
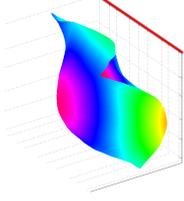
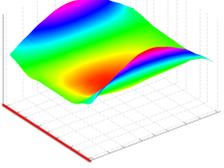
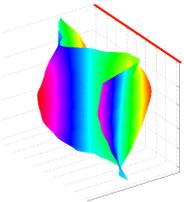
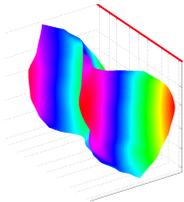
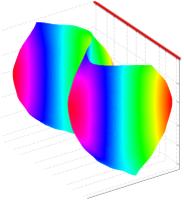
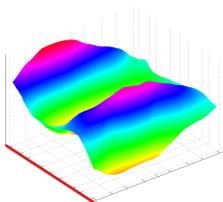
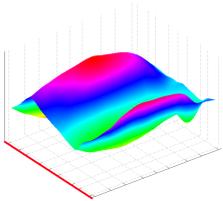
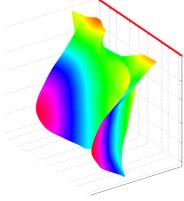
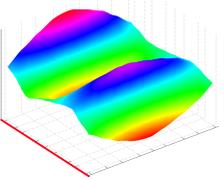
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
4b)				
f in Hz	29,2	29,3	29,2	29,2
A_F		1,00		0,61
5a)			-	-
f in Hz	32,8	32,6	-	-
A_F		0,07		-
5b)				-
f in Hz	32,5	32,6	32,8	-
A_F		0,05		-
6a)	-			
f in Hz	-	41,8	42,6	42,2
A_F		-		0,07

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

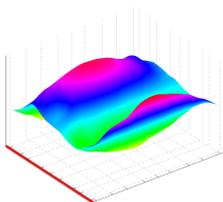
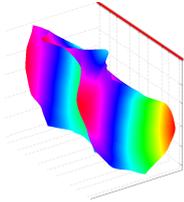
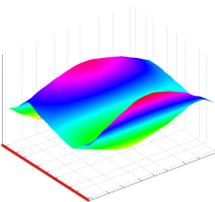
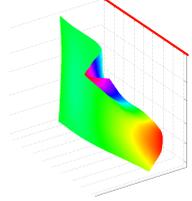
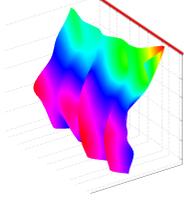
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
6b)	-			
f in Hz	-	42,1	42,3	42,1
A_F	-	-	-	0,09
7a)		-		-
f in Hz	44,9	-	45,6	-
A_F	-	-	-	-
7b)			-	-
f in Hz	44,1	44,2	-	-
A_F	-	0,02	-	-
8a)	-			
f in Hz	-	52,7	54,4	54,0
A_F	-	-	-	0,05

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

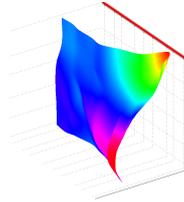
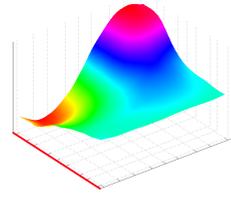
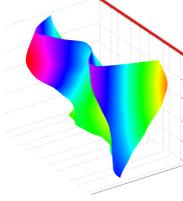
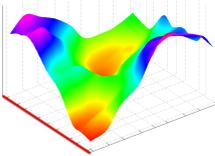
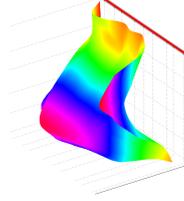
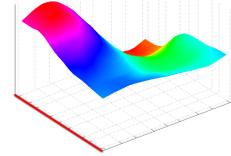
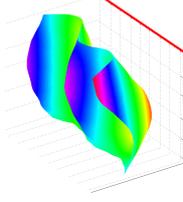
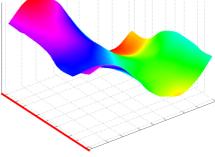
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII			a) DeSPIII, b) DeSPII
8b)	-			
f in Hz	-	52,7	54,0	53,6
A_F	-	-	0,06	-
9a)		-	-	-
f in Hz	60,4	-	-	-
A_F	-	-	-	-
9b)	-	-		-
f in Hz	-	-	60,8	-
A_F	-	-	-	-
10a)	-	-	-	-
f in Hz	-	-	-	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

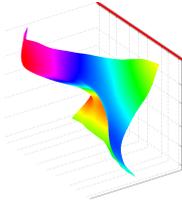
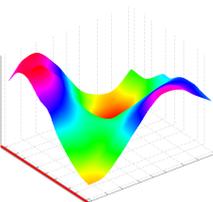
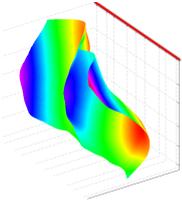
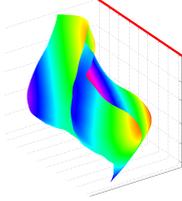
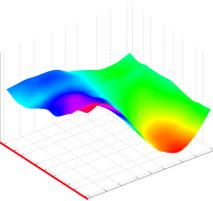
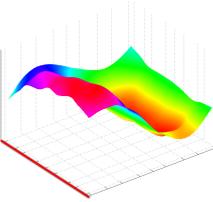
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
10b)	-	-		-
f in Hz	-	-	64,5	-
A_F	-	-	-	-
11a)	-	-	-	
f in Hz	-	-	-	72,9
A_F	-	-	-	-
11b)				
f in Hz	72,6	72,6	73,3	72,5
A_F	-	0,02	-	0,21
12a)			-	-
f in Hz	74,9	74,9	-	-
A_F	-	0,03	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

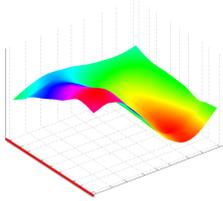
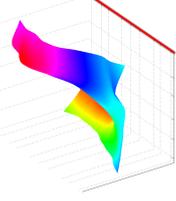
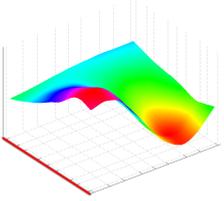
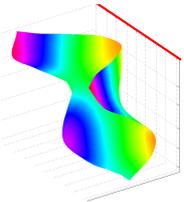
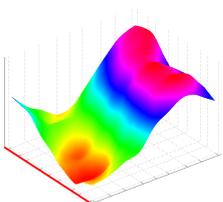
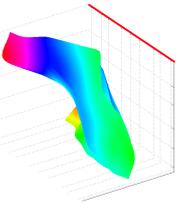
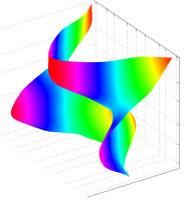
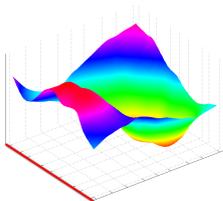
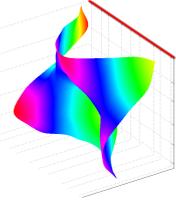
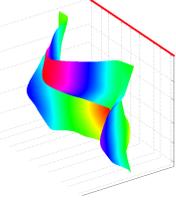
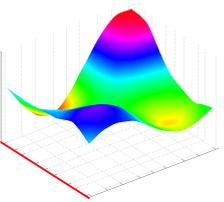
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII			a) DeSPIII, b) DeSPII
12b)				-
f in Hz	75,5	75,6	75,5	-
A_F	0,05		-	-
13a)			-	-
f in Hz	77,2	77,0	-	-
A_F	0,06		-	-
13b)			-	-
f in Hz	-	77,8	-	-
A_F	-	-	-	-
14a)	-	-	-	-
f in Hz	-	-	-	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

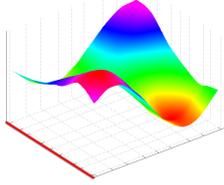
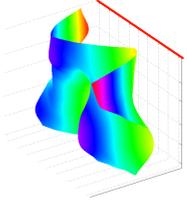
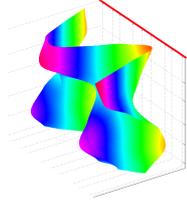
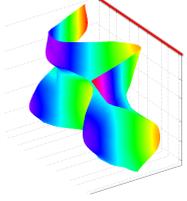
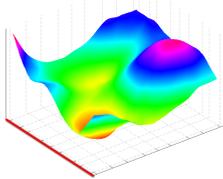
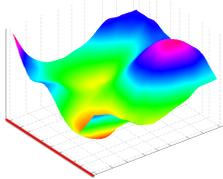
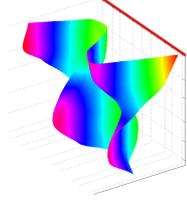
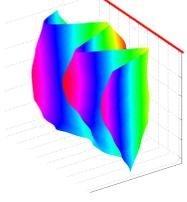
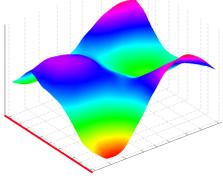
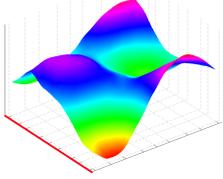
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt a) WuSPIV, b) WuSPII	Decke	Wand	Decke, angeregt a) DeSPIII, b) DeSPII
14b)	-			
f in Hz	-	78,7	79,4	79,9
A_F	-	-	0,44	
15a)				-
f in Hz	82,2	81,5	81,9	-
A_F	0,08		-	-
15b)				-
f in Hz	81,7	82,1	82,1	-
A_F	0,05		-	-
16a)	-	-		
f in Hz	-	-	85,1	84,7
A_F	-	-	0,14	

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

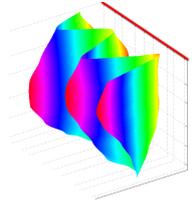
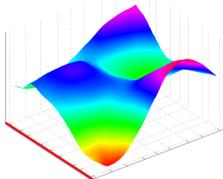
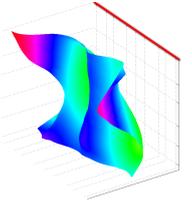
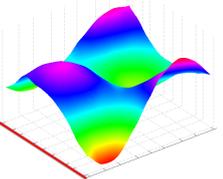
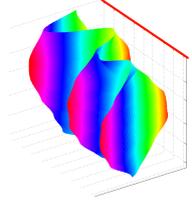
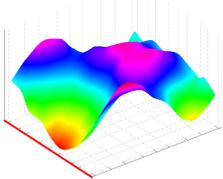
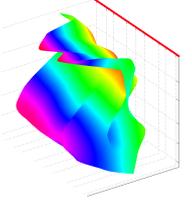
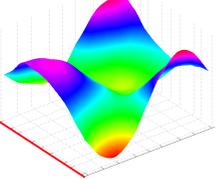
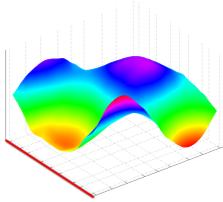
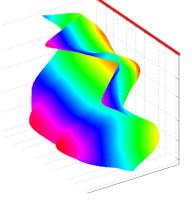
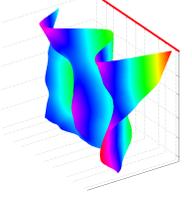
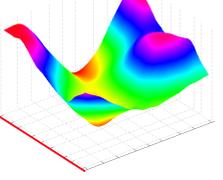
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
16b)	-	-	-	
f in Hz	-	-	-	83,6
A_F	-	-	-	-
17a)		-		-
f in Hz	92,0	-	93,0	-
A_F	-	-	-	-
17b)	 			-
f in Hz	90,9	90,9	92,5	-
A_F	-	0,02	-	-
18a)	 		-	-
f in Hz	98,4	99,4	-	-
A_F	-	0,05	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

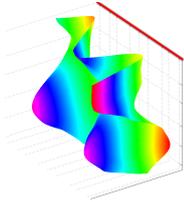
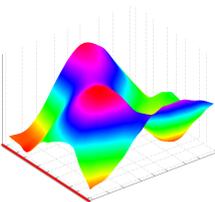
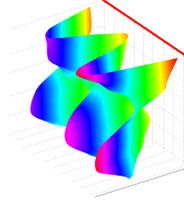
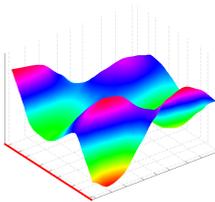
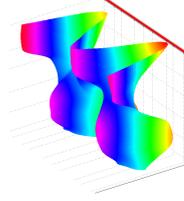
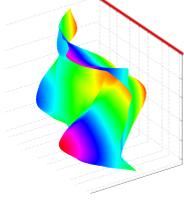
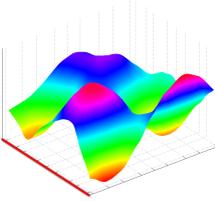
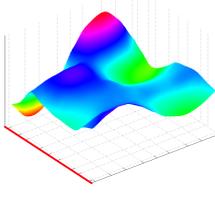
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
18b)				
f in Hz	98,2	99,4	101,6	100,8
A_F		0,13		0,2
19a)				
f in Hz	103,5	103,2	102,2	103,2
A_F		0,15		0,13
19b)	-			-
f in Hz	-	102,7	103,1	-
A_F	-	-	-	-
20a)	-	-		
f in Hz	-	-	109,4	109,4
A_F	-	-		0,33

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

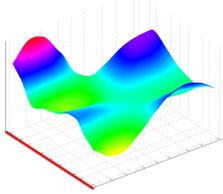
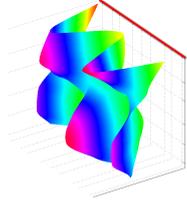
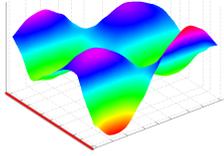
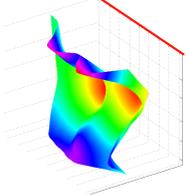
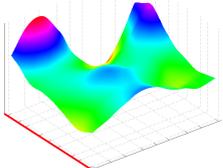
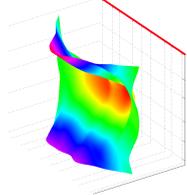
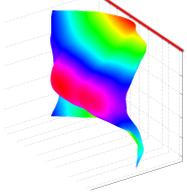
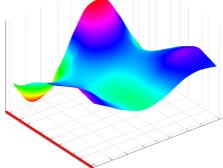
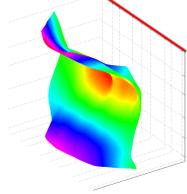
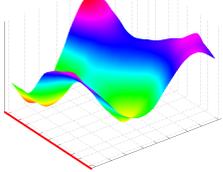
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
20b)	-	-		
f in Hz	-	-	108,6	-
A_F	-	-	-	0,18
21a)			-	-
f in Hz	112,8	112,7	-	-
A_F	-	0,06	-	-
21b)		-		
f in Hz	112,6	-	112,3	111,9
A_F	-	-	-	0,18
22a)	-		-	-
f in Hz	-	115,3	-	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

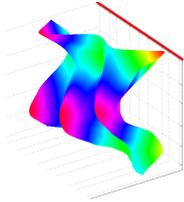
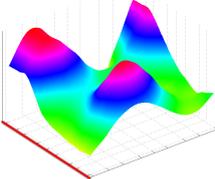
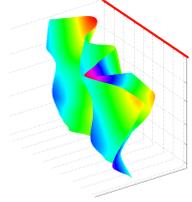
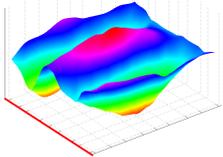
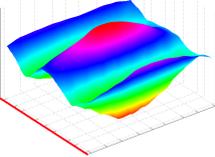
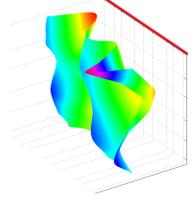
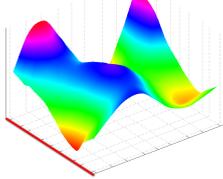
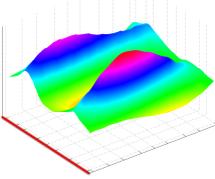
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
22b)	-			
f in Hz	-	115,3	114,6	115,6
A_F	-	-	0,27	-
23a)				-
f in Hz	121,8	121,9	123,1	-
A_F	-	0,15	-	-
23b)				-
f in Hz	120,9	121,3	121,8	-
A_F	-	0,26	-	-
24a)	-		-	-
f in Hz	-	126,5	-	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

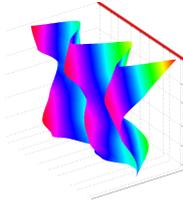
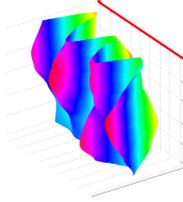
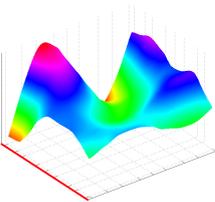
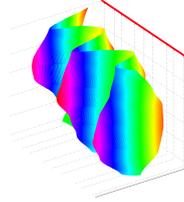
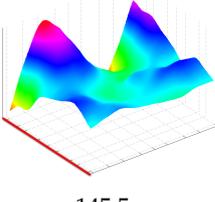
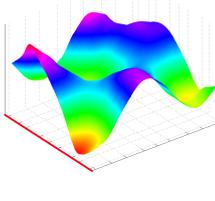
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
24b)	-	-		
f in Hz	-	-	126,5	126,3
A_F	-	-	-	0,55
25a)			-	
f in Hz	131,2	129,4	-	129,8
A_F	-	0,03	-	-
25b)			-	
f in Hz	130,9	130,1	-	129,7
A_F	-	0,03	-	-
26a)	-	-	-	-
f in Hz	-	-	-	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

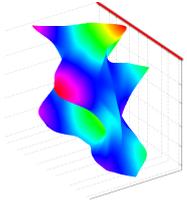
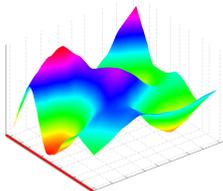
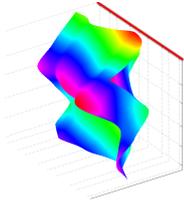
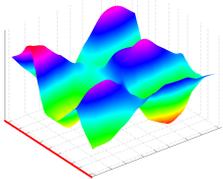
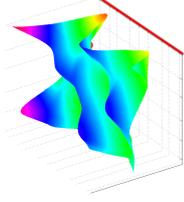
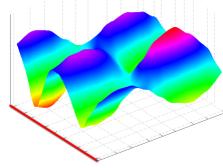
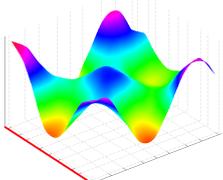
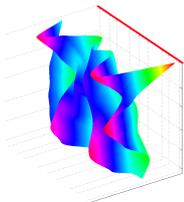
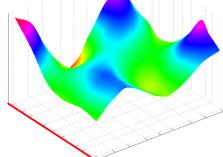
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt	Decke	Wand	Decke, angeregt
	a) WuSPIV, b) WuSPII			a) DeSPIII, b) DeSPII
26b)		-	-	-
f in Hz	140,2	-	-	-
A_F	-	-	-	-
27a)				-
f in Hz	145,7	145,5	148,6	-
A_F	-	0,05	-	-
27b)	-		-	-
f in Hz	-	145,5	-	-
A_F	-	-	-	-
28a)	-	-	-	
f in Hz	-	-	-	155,5
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

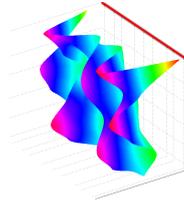
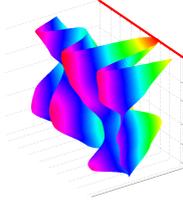
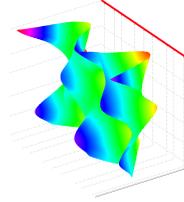
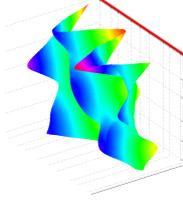
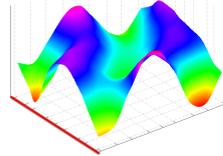
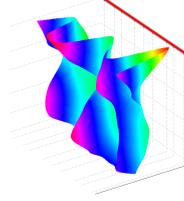
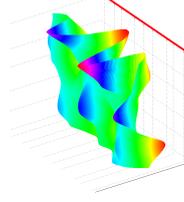
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
28b)				-
f in Hz	157,2	157,5	157,5	-
A_F		0,03		-
29a)	-		-	-
f in Hz	-	163,6	-	-
A_F	-	-	-	-
29b)	-	-		
f in Hz	-	-	166,6	166,5
A_F	-	-		0,10
30a)	-			
f in Hz	-	175,1	174,4	174,2
A_F	-	-		0,51

Fortsetzung nächste Seite ...

D.4 Stoßfuge S2 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer

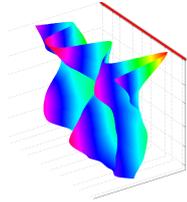
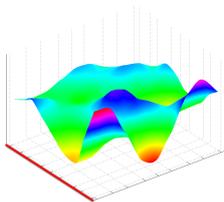
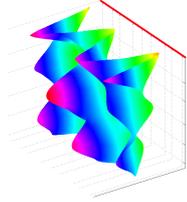
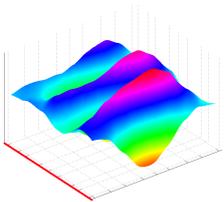
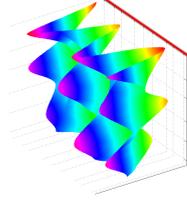
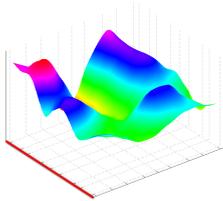
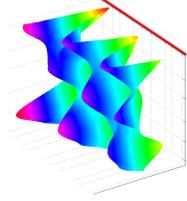
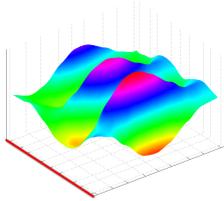
Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
30b)	-	-		-
f in Hz	-	-	176,5	-
A_F	-	-	-	-
31a)		-		-
f in Hz	178,8	-	179,0	-
A_F	-	-	-	-
31b)	 	-		-
f in Hz	178,3	178,5	181,5	-
A_F	-	0,06	-	-
32a)	-	-		-
f in Hz	-	-	187,9	-
A_F	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite ...

D L-Stoß

Tabelle 29 – Fortsetzung

Nr.	Wand, angeregt		Decke, angeregt	
	a) WuSPIV, b) WuSPII		a) DeSPIII, b) DeSPII	
32b)	-	-		
f in Hz	-	-	181,5	185,5
A_F	-	-	0,21	
33a)	-	-		
f in Hz	-	-	197,8	198,2
A_F	-	-	0,10	
33b)				
f in Hz	197,6	197,4	198,5	198,7
A_F	0,05		0,18	

D.5 Stoßfuge S4 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer Syلودyn ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$.
MR234-249

D.5.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

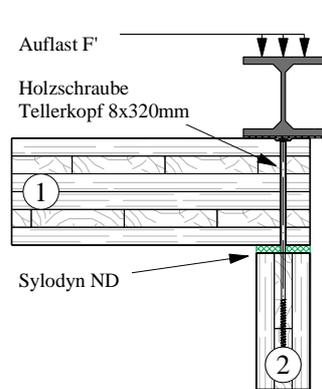


Abbildung 66 Detailabbildung des L-STOSS S4 mit Elastomer SYLODYN ND und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 30 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S4

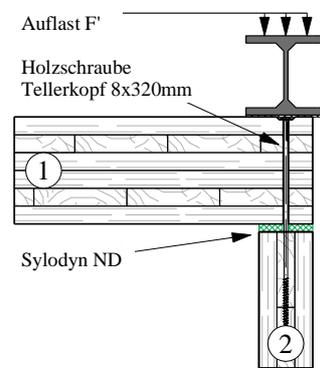
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0.27N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN ND; direkte, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	26...49	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 31 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S4. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

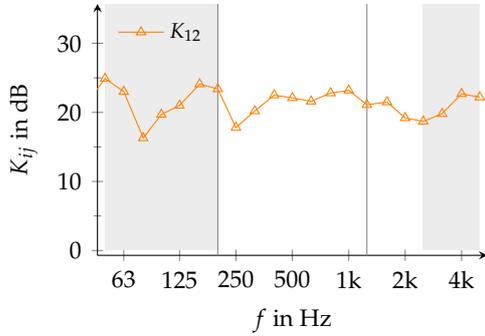
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	24,9	21,6	2,8	2,1	0,03	0,02
63	23,0	21,5	3,0	3,7	0,04	0,03
80	16,3	15,5	2,8	4,3	0,29	0,14
100	19,7	18,5	2,9	2,8	0,27	0,14
125	21,0	21,0	3,9	2,7	0,44	0,20
160	24,1	24,2	3,1	2,9	0,50	0,14
200	23,4	23,4	2,4	2,8	0,40	0,51
250	17,8	18,2	2,6	2,5	0,88	0,44
315	20,2	21,7	2,8	3,1	1,01	0,70
400	22,5	23,9	2,3	2,8	0,78	0,71
500	22,1	23,8	2,4	2,5	1,41	1,30
630	21,6	23,9	2,5	2,5	2,13	1,69
800	22,8	25,3	2,9	1,9	3,14	2,69
1 000	23,2	25,9	2,1	2,4	2,32	3,89
1 250	21,1	24,3	2,3	2,1	-	-
1 600	21,5	25,1	2,2	2,1	-	-
2 000	19,2	23,4	2,2	2,1	-	-
2 500	18,7	23,1	2,6	1,6	-	-
3 150	19,8	24,3	2,1	1,6	-	-
4 000	22,7	27,6	1,8	1,9	-	-
5 000	22,2	26,3	1,6	1,2	-	-

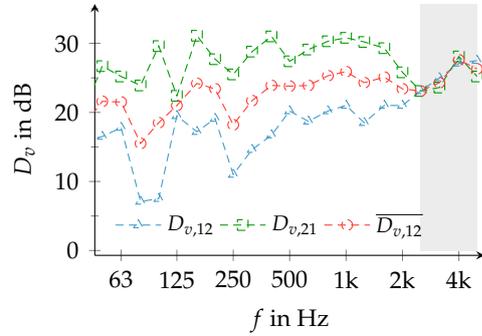
(b) Stoßabbildung



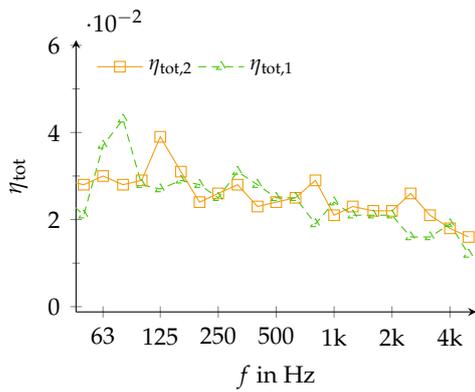
D.5 Stoßfuge S4 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



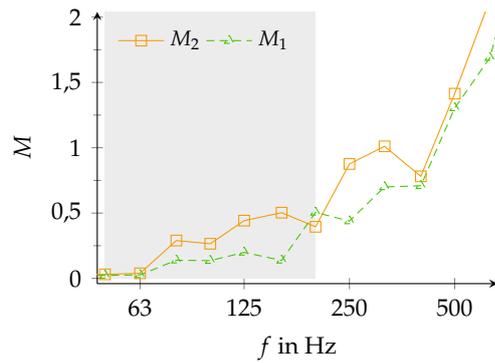
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 21.7\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 67 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S4. Weiter Infos in Tab. 30. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.5.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

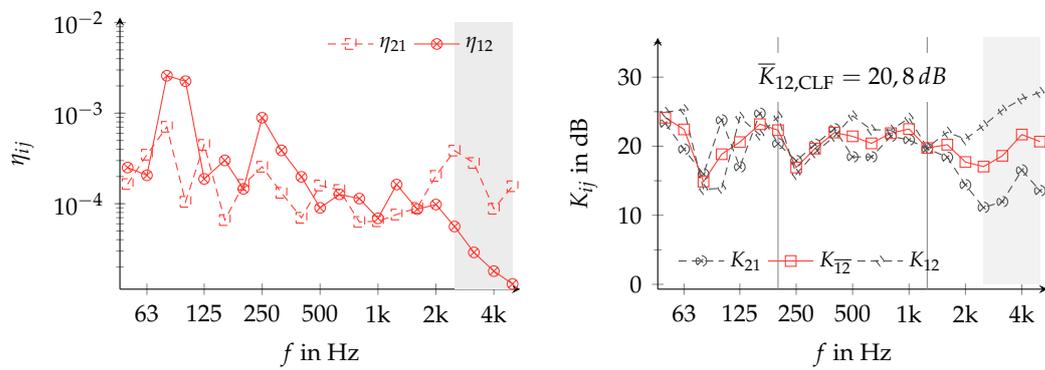
Tabelle 32 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S4 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N \geq 43$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	1,65	2,51	23,3	24,9	24,1
63	3,48	2,06	19,6	25,3	22,4
80	7,07	25,93	16,0	13,8	14,9
100	1,05	22,55	23,8	13,9	18,8
125	4,47	1,88	17,0	24,2	20,6
160	0,66	3,01	24,8	21,6	23,2
200	1,62	1,46	20,4	24,3	22,3
250	2,56	8,91	17,9	15,9	16,9
315	1,32	3,88	20,3	19,0	19,7
400	0,70	1,98	22,5	21,4	22,0
500	1,59	0,90	18,5	24,4	21,4
630	1,42	1,27	18,4	22,4	20,4
800	0,63	1,14	21,4	22,3	21,9
1 000	0,64	0,69	20,9	24,1	22,5
1 250	0,76	1,63	19,7	19,8	19,7
1 600	0,90	0,87	18,4	22,0	20,2
2 000	2,03	0,98	14,4	21,0	17,7
2 500	3,86	0,56	11,1	23,0	17,1
3 150	2,82	0,29	12,0	25,2	18,6
4 000	0,88	0,18	16,5	26,9	21,7
5 000	1,56	0,13	13,6	27,8	20,7

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.4})$$

D.5 Stoßfuge S4 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 68 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S4 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

D.6 Stoßfuge S5 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung

D.6 Stoßfuge S5 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer Syلودyn ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. MR300-315

D.6.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

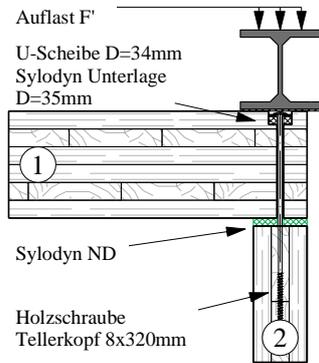


Abbildung 69 Detailabbildung des L-STOSS S5 mit Elastomer SYLODYN ND und elastisch gelagerter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 33 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S5

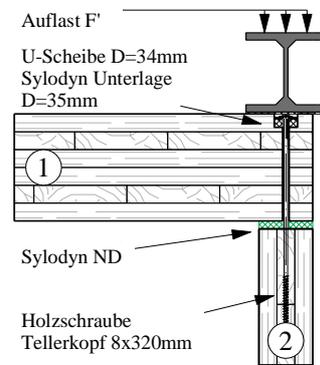
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0.27N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN ND; elastisch gelagerte Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	10...12	

Tabelle 34 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S5. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

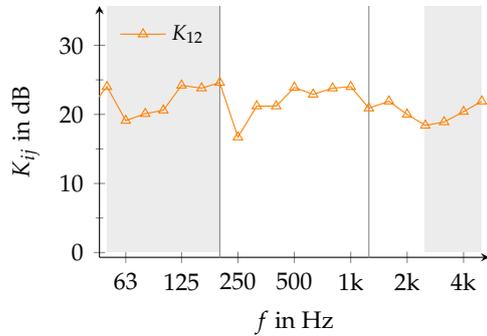
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	24,0	20,9	3,1	2,2	0,04	0,02
63	19,1	17,1	2,9	3,1	0,04	0,03
80	20,1	17,9	2,6	2,5	0,27	0,08
100	20,6	19,4	2,9	2,7	0,26	0,13
125	24,2	24,0	3,8	2,7	0,45	0,19
160	23,8	23,5	3,2	2,3	0,50	0,12
200	24,6	24,7	2,4	3,0	0,40	0,52
250	16,7	17,9	3,2	2,9	1,08	0,50
315	21,2	22,4	2,9	2,5	1,04	0,58
400	21,2	22,7	2,5	2,9	0,84	0,72
500	23,9	25,7	2,6	2,4	1,52	1,30
630	22,9	25,3	2,4	2,7	2,13	1,82
800	23,8	26,2	2,5	2,0	2,80	2,84
1 000	24,0	27,3	2,7	2,3	3,09	3,81
1 250	20,9	24,3	2,7	1,9	-	-
1 600	21,9	25,8	2,5	2,1	-	-
2 000	20,0	24,5	2,4	2,2	-	-
2 500	18,4	22,9	2,5	1,8	-	-
3 150	18,9	23,2	1,9	1,6	-	-
4 000	20,4	24,8	1,7	1,6	-	-
5 000	21,9	25,7	1,2	1,3	-	-

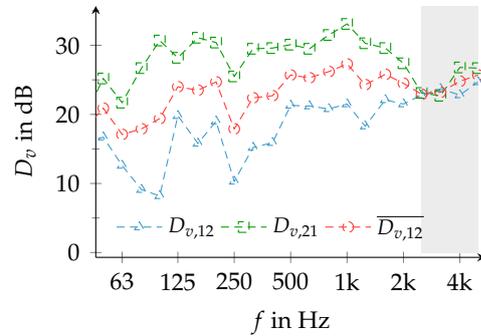
(b) Stoßabbildung



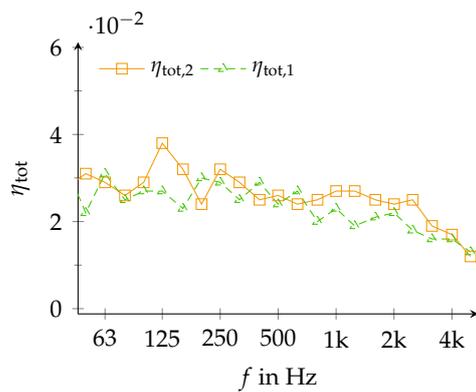
D.6 Stoßfuge S5 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



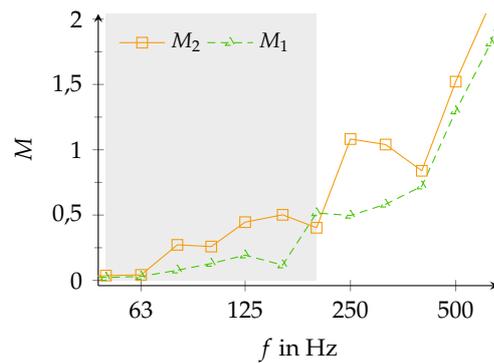
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 22.1\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 70 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S5. Weiter Infos in Tab. 33. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.6.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

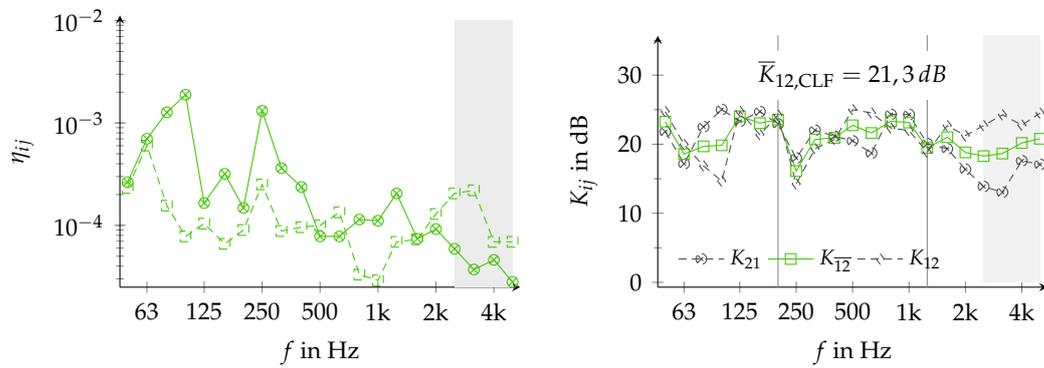
Tabelle 35 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S5 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N = 12 \cdot 2$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	2,32	2,64	21,8	24,7	23,3
63	6,02	7,01	17,2	20,0	18,6
80	1,56	12,72	22,5	16,9	19,7
100	0,78	18,91	25,0	14,7	19,8
125	1,04	1,65	23,3	24,8	24,1
160	0,66	3,19	24,7	21,4	23,1
200	0,90	1,48	22,9	24,2	23,6
250	2,51	13,14	18,0	14,3	16,1
315	0,88	3,62	22,0	19,4	20,7
400	0,96	2,37	21,2	20,7	20,9
500	1,00	0,78	20,5	25,0	22,7
630	1,34	0,78	18,7	24,5	21,6
800	0,33	1,14	24,3	22,4	23,3
1 000	0,29	1,11	24,3	22,0	23,1
1 250	0,69	2,05	20,1	18,8	19,5
1 600	0,73	0,74	19,3	22,7	21,0
2 000	1,29	0,92	16,4	21,3	18,8
2 500	2,05	0,59	13,9	22,7	18,3
3 150	2,20	0,37	13,1	24,3	18,7
4 000	0,69	0,46	17,6	22,8	20,2
5 000	0,69	0,28	17,1	24,5	20,8

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.5})$$

D.6 Stoßfuge S5 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 71 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S5 mit Elastomer SYLODYN ND bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1} / m_{tot,2} = 2,79$.

D.7 Stoßfuge S6 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer Syلودyn NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. MR251-267

D.7.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

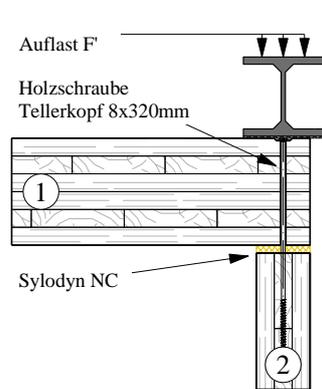


Abbildung 72 Detailabbildung des L-STOSS S6 mit Elastomer SYLODYN NC und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 36 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S6

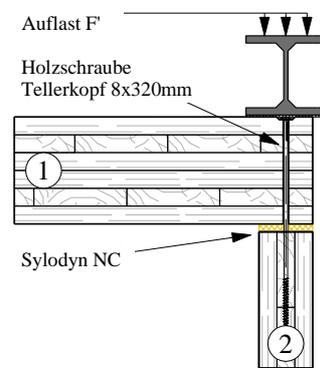
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0.12N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN NC; direkte, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	26...49	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 37 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S6. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

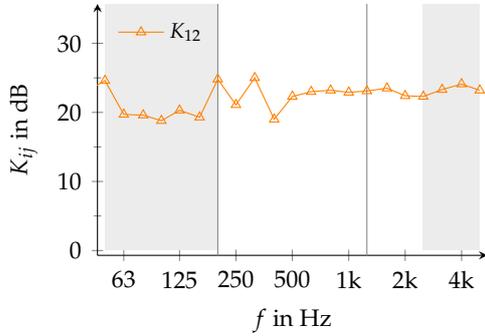
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	24,6	22,0	4,0	2,1	0,03	0,02
63	19,7	17,5	3,7	2,1	0,17	0,03
80	19,6	18,0	2,9	2,9	0,27	0,08
100	18,8	17,6	2,9	2,8	0,20	0,14
125	20,3	20,2	3,7	2,8	0,48	0,23
160	19,3	19,0	2,6	2,8	0,42	0,14
200	24,8	24,8	2,2	3,2	0,35	0,56
250	21,1	21,7	2,4	3,1	0,87	0,58
315	25,0	26,2	2,5	3,0	0,89	0,69
400	19,0	20,9	2,6	3,1	0,87	0,89
500	22,3	24,4	2,7	2,6	1,66	1,37
630	23,0	25,1	2,2	2,7	1,99	1,93
800	23,2	26,2	2,9	2,3	3,16	3,47
1 000	22,9	25,8	2,2	2,4	2,40	4,20
1 250	23,1	26,1	2,7	1,6	-	-
1 600	23,5	27,8	2,6	2,3	-	-
2 000	22,4	26,2	2,0	2,0	-	-
2 500	22,3	26,6	2,4	1,6	-	-
3 150	23,3	27,8	2,0	1,8	-	-
4 000	24,1	28,3	1,5	1,6	-	-
5 000	23,2	27,5	1,5	1,3	-	-

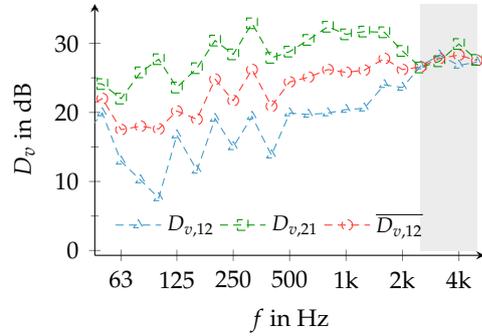
(b) Stoßabbildung



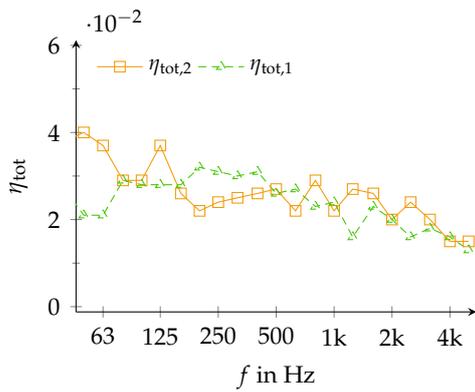
D.7 Stoßfuge S6 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



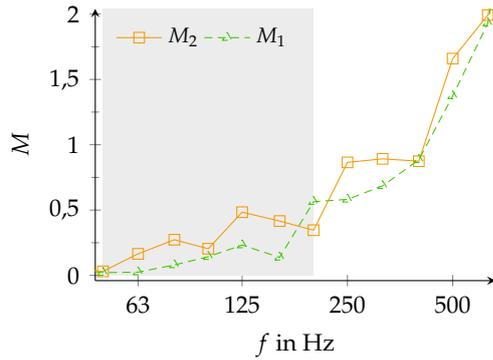
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 22.7\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 73 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S6. Weiter Infos in Tab. 36. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.7.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

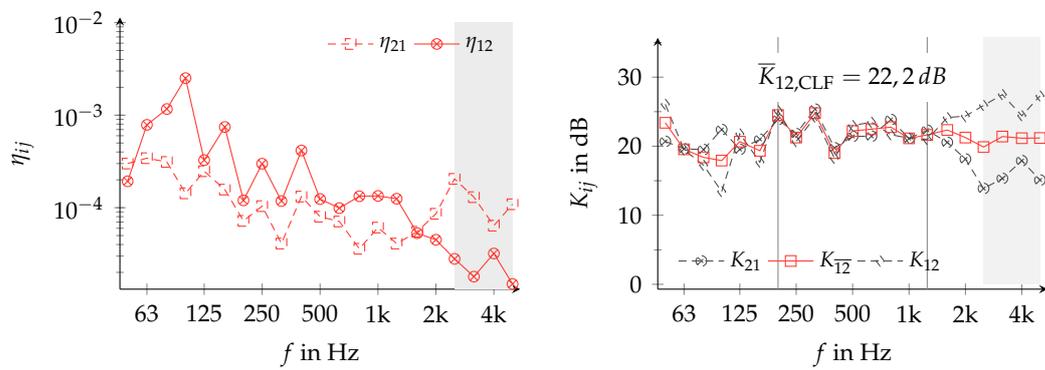
Tabelle 38 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S6 mit Elastomer SYLODYN NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N \geq 43$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	3,00	1,93	20,7	26,1	23,4
63	3,43	7,86	19,6	19,5	19,6
80	3,12	11,65	19,5	17,3	18,4
100	1,43	25,13	22,4	13,4	17,9
125	2,48	3,27	19,5	21,8	20,7
160	1,57	7,45	21,0	17,7	19,3
200	0,72	1,20	23,9	25,1	24,5
250	1,04	2,99	21,8	20,7	21,3
315	0,41	1,18	25,4	24,2	24,8
400	1,32	4,15	19,8	18,2	19,0
500	0,80	1,24	21,4	23,0	22,2
630	0,71	0,99	21,5	23,5	22,5
800	0,36	1,33	23,9	21,7	22,8
1 000	0,61	1,34	21,1	21,2	21,1
1 250	0,41	1,25	22,3	21,0	21,6
1 600	0,55	0,53	20,6	24,1	22,4
2 000	0,86	0,45	18,1	24,4	21,3
2 500	2,05	0,28	13,9	25,9	19,9
3 150	1,30	0,18	15,3	27,5	21,4
4 000	0,64	0,32	17,9	24,4	21,2
5 000	1,09	0,15	15,1	27,3	21,2

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.6})$$

D.7 Stoßfuge S6 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 74 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S6 mit Elastomer SYLODYN NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1} / m_{tot,2} = 2,79$.

D.8 Stoßfuge S7 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer Syلودyn NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. MR316-331

D.8.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

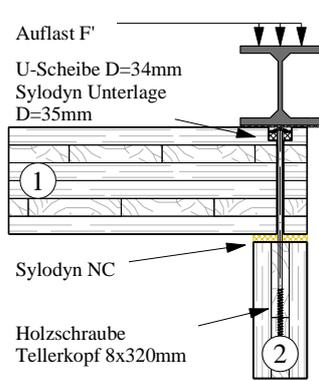


Abbildung 75 Detailabbildung des L-STOSS S7 mit Elastomer SYLOUDYN NC und elastisch gelagerter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 39 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S7

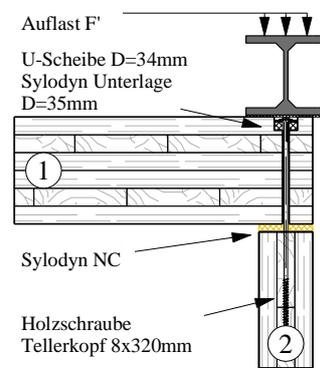
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,12 N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLOUDYN NC; elastisch gelagerte Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	10...12	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 40 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S7. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

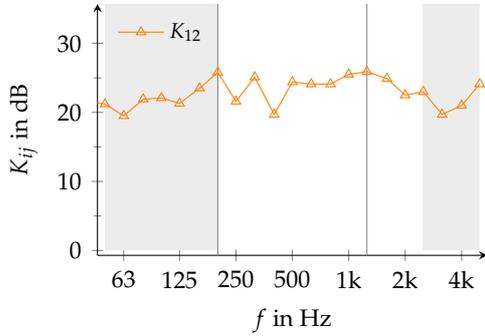
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	21,2	18,9	4,2	2,4	0,03	0,02
63	19,5	18,1	3,8	2,9	0,15	0,05
80	21,9	20,1	2,9	2,5	0,28	0,06
100	22,1	21,0	2,9	2,9	0,19	0,14
125	21,3	21,3	3,2	3,5	0,42	0,27
160	23,5	23,2	2,5	3,0	0,38	0,15
200	25,8	25,8	2,3	3,0	0,36	0,50
250	21,6	22,2	2,6	2,8	0,93	0,52
315	25,1	26,5	2,8	3,1	0,94	0,70
400	19,7	21,4	2,6	3,0	0,86	0,79
500	24,4	26,5	2,9	2,4	1,76	1,25
630	24,1	26,8	2,3	3,2	2,05	2,23
800	24,1	26,7	2,6	2,3	2,78	3,25
1 000	25,5	28,6	2,3	2,5	2,70	4,15
1 250	25,9	29,2	2,8	1,8	-	-
1 600	24,9	28,5	2,3	2,0	-	-
2 000	22,5	26,8	2,4	2,1	-	-
2 500	23,0	27,6	2,6	1,9	-	-
3 150	19,7	24,6	2,2	1,9	-	-
4 000	21,0	25,2	1,6	1,5	-	-
5 000	24,1	28,0	1,4	1,3	-	-

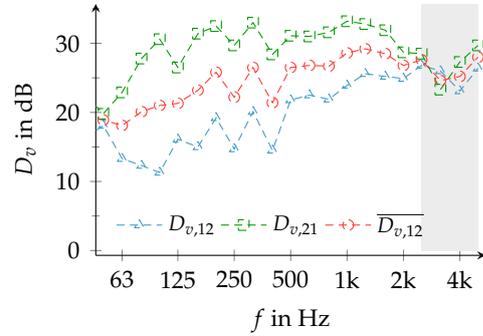
(b) Stoßabbildung



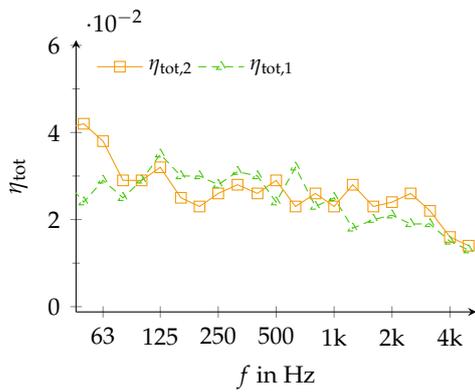
D.8 Stoßfuge S7 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



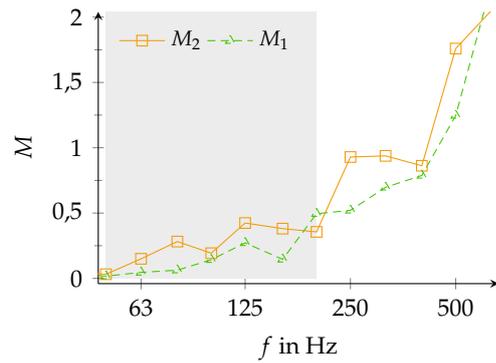
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 24.0\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 76 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S7. Weiter Infos in Tab. 39. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.8.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

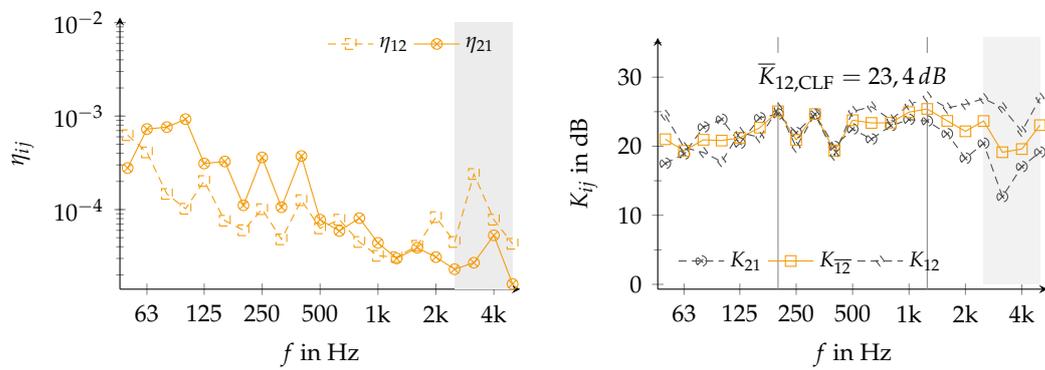
Tabelle 41 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S7 mit Elastomer SYLODYN NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden, entkoppelten Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N = 12 \cdot 2$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	6,25	2,78	17,5	24,5	21,0
63	4,09	7,27	18,9	19,8	19,3
80	1,47	7,62	22,8	19,1	20,9
100	1,02	9,27	23,9	17,8	20,8
125	2,02	3,11	20,4	22,0	21,2
160	0,76	3,27	24,1	21,3	22,7
200	0,60	1,11	24,7	25,5	25,1
250	1,01	3,61	22,0	19,9	20,9
315	0,48	1,06	24,6	24,7	24,7
400	1,26	3,74	20,0	18,7	19,3
500	0,63	0,78	22,5	25,0	23,8
630	0,78	0,59	21,0	25,7	23,4
800	0,45	0,81	23,0	23,8	23,4
1 000	0,32	0,44	23,9	26,0	24,9
1 250	0,31	0,30	23,6	27,2	25,4
1 600	0,41	0,39	21,8	25,6	23,7
2 000	0,83	0,31	18,3	26,1	22,2
2 500	0,45	0,23	20,4	26,9	23,7
3 150	2,40	0,27	12,7	25,6	19,1
4 000	0,78	0,53	17,0	22,2	19,6
5 000	0,43	0,16	19,1	27,0	23,1

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.7})$$

D.8 Stoßfuge S7 mit stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 77 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S7 mit Elastomer SYLODYN NC bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden, entkoppelten Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1} / m_{tot,2} = 2,79$.

D.9 Stoßfuge S8 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer Syلودyn NE bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$.
MR268-283

D.9.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

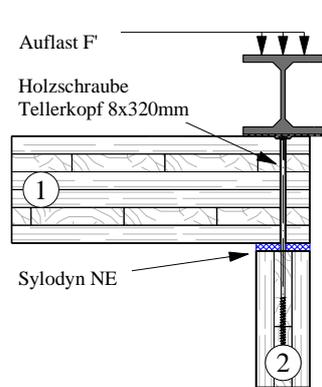


Abbildung 78 Detailabbildung des L-STOSS S8 mit Elastomer SYLODYN NE und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 42 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S8

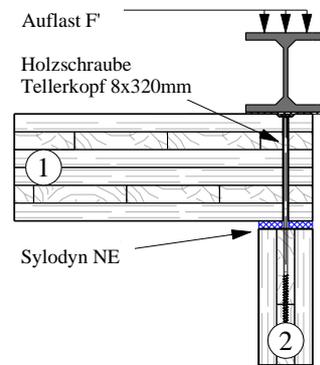
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN NE; direkte, durchgehende Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	26...49	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 43 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S8. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

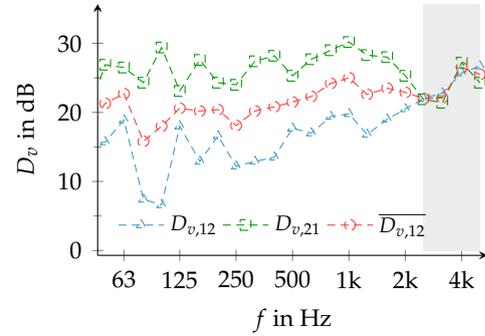
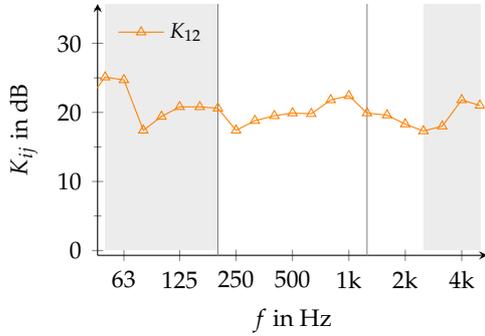
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	25,1	21,3	2,4	2,0	0,03	0,02
63	24,7	22,7	3,0	2,9	0,02	0,02
80	17,4	15,8	2,5	3,3	0,26	0,11
100	19,4	18,0	2,7	2,7	0,28	0,13
125	20,8	20,6	3,6	2,7	0,35	0,21
160	20,8	20,2	2,7	2,5	0,48	0,10
200	20,6	20,4	2,4	2,8	0,41	0,51
250	17,4	18,1	2,7	2,8	0,86	0,48
315	18,8	20,2	3,0	2,7	1,08	0,61
400	19,5	20,8	2,5	2,7	0,83	0,70
500	19,9	21,5	2,6	2,2	1,52	1,12
630	19,8	22,3	2,6	2,8	2,20	1,86
800	21,8	24,2	2,7	1,9	2,95	2,77
1 000	22,4	25,0	2,1	2,1	2,38	3,47
1 250	19,9	22,6	2,3	1,7	-	-
1 600	19,6	23,5	2,3	2,2	-	-
2 000	18,3	22,9	2,5	2,2	-	-
2 500	17,3	22,0	2,4	1,9	-	-
3 150	18,0	22,1	1,8	1,6	-	-
4 000	21,8	26,5	1,9	1,6	-	-
5 000	21,0	25,5	1,6	1,4	-	-

(b) Stoßabbildung

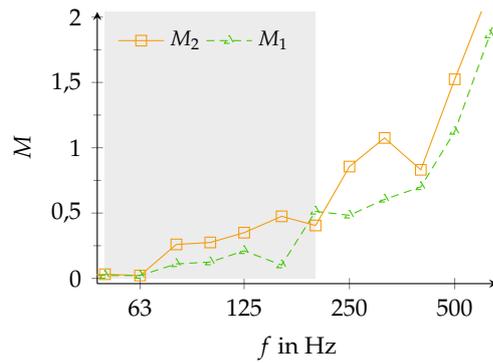
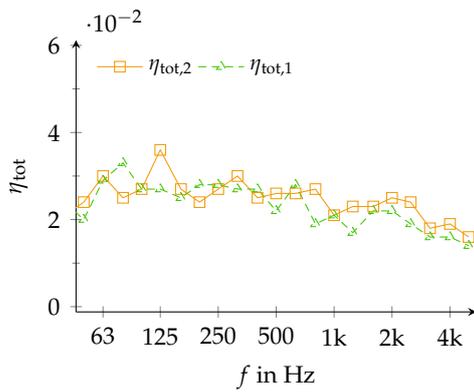


D.9 Stoßfuge S8 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 20.0\text{dB}$

(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile

(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 79 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S8. Weiter Infos in Tab. 42. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

D.9.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

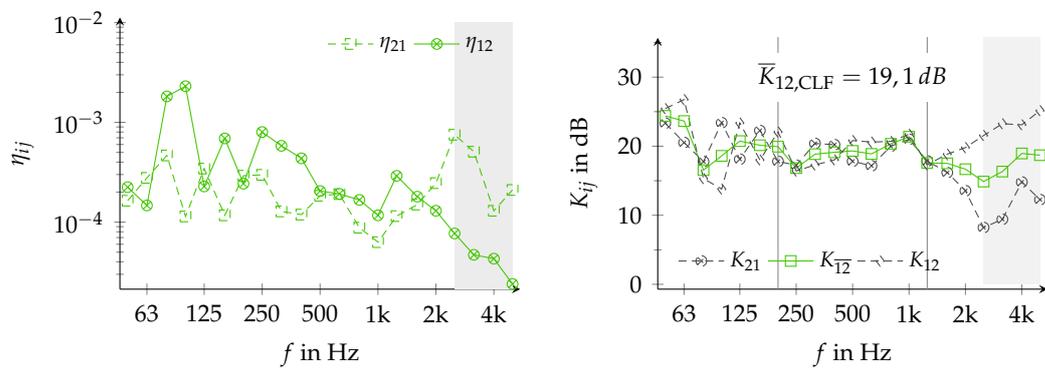
Tabelle 44 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S8 mit Elastomer SYLODYN NE bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

η_{ij} mit $N \geq 43$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	1,64	2,24	23,3	25,4	24,4
63	2,78	1,47	20,5	26,8	23,6
80	4,66	18,21	17,8	15,3	16,5
100	1,14	23,05	23,4	13,8	18,6
125	3,44	2,28	18,1	23,4	20,7
160	1,17	6,91	22,3	18,0	20,1
200	2,92	2,43	17,8	22,1	19,9
250	2,98	8,00	17,2	16,4	16,8
315	1,28	5,82	20,4	17,3	18,9
400	1,19	4,36	20,2	18,0	19,1
500	1,84	2,05	17,8	20,8	19,3
630	1,91	1,92	17,2	20,6	18,9
800	0,88	1,67	20,0	20,7	20,4
1 000	0,63	1,17	21,0	21,7	21,4
1 250	1,15	2,91	17,9	17,3	17,6
1 600	1,50	1,80	16,2	18,9	17,5
2 000	2,46	1,30	13,6	19,8	16,7
2 500	7,52	0,77	8,2	21,6	14,9
3 150	5,08	0,47	9,4	23,3	16,3
4 000	1,30	0,43	14,8	23,1	19,0
5 000	2,10	0,24	12,3	25,2	18,7

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.8})$$

D.9 Stoßfuge S8 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 80 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S8 mit Elastomer SYLODYN NE bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

**D.10 Stoßfuge S9 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer Regufoam 570Plus bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$.
MR217-233**

D.10.1 Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

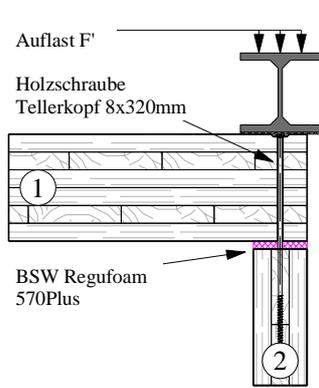


Abbildung 81 Detailabbildung des L-STOSS S9 mit Elastomer REGUFOAM 570PLUS und direkter Verschraubung bei einer zusätzlichen Last auf die Stoßfuge. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 45 Dokumentation zur Messung des L-STOSS S9

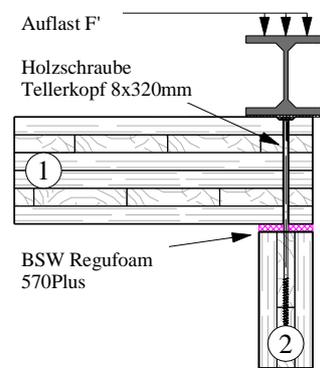
Bauteilnummer	①	②
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm
S_i	10,35 m ²	7,50 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	160 Hz bis 650 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²	
Verbindung ① ↔ ②	REGUFOAM 570PLUS; direkte Verschraubung alle 40 cm	
Kopplungslänge l_{ij}	3 m	
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus	
Anregepositionen pro Bauteil	2	
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	10...12	
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12	

Tabelle 46 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S9. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

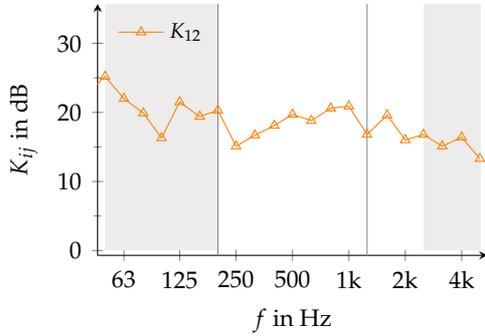
(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	25,2	21,3	2,3	2,1	0,03	0,02
63	22,0	19,7	3,0	2,5	0,02	0,02
80	19,9	18,6	2,3	4,1	0,19	0,14
100	16,3	14,9	2,5	2,9	0,36	0,14
125	21,5	21,1	3,2	2,8	0,17	0,21
160	19,4	18,9	2,6	2,7	0,56	0,11
200	20,3	20,4	2,1	3,3	0,37	0,62
250	15,1	16,1	2,8	3,1	0,86	0,54
315	16,7	17,9	2,7	2,8	0,94	0,62
400	18,1	19,6	2,4	2,8	0,83	0,75
500	19,7	21,6	3,0	2,3	1,79	1,21
630	18,8	21,1	2,4	2,7	2,09	1,84
800	20,6	22,9	2,5	2,0	2,77	2,83
1 000	20,9	23,3	2,0	2,2	2,26	3,59
1 250	16,8	20,5	2,9	2,1	-	-
1 600	19,6	22,7	1,8	2,1	-	-
2 000	16,0	20,2	2,4	1,9	-	-
2 500	16,8	21,0	2,2	1,8	-	-
3 150	15,1	19,5	2,0	1,6	-	-
4 000	16,4	20,9	1,8	1,6	-	-
5 000	13,3	17,6	1,4	1,5	-	-

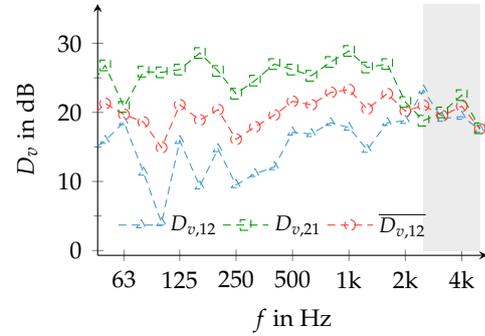
(b) Stoßabbildung



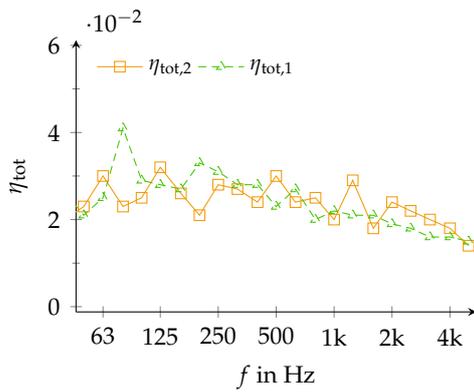
D.10 Stoßfuge S9 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



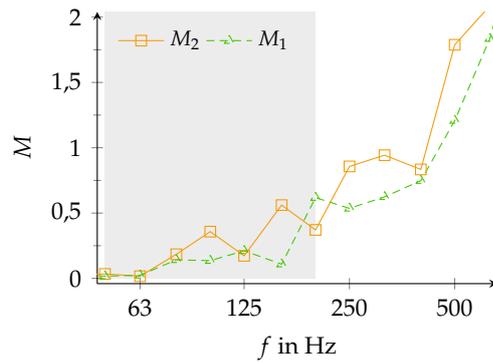
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangabe:
 $\bar{K}_{12} = 18.6\text{dB}$



(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Median der Gesamt-Verlustfaktoren
der zwei Bauteile



(d) Modaler Überlappungsfaktor der zwei
Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 82 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,j}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am L-STOSS S9. Weiter Infos in Tab. 45. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

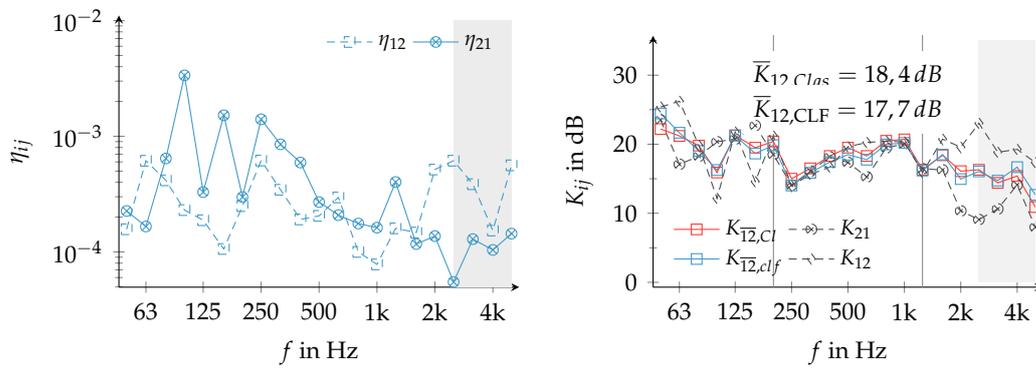
D.10.2 Kennwerte aus experimenteller SEA

Tabelle 47 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S9 mit Elastomer REGUFOAM 570PLUS bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der *durchgehenden Schrauben* zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$. η_{ij} mit $N = 12 \cdot 2$ für $\langle v_{eff} \rangle_i$ und $N = 12 \cdot 2$ für η_i je Bauteil

f	η_{21}	η_{12}	$K_{2 \rightarrow 1}$	$K_{1 \rightarrow 2}$	K_{12}
Hz	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	dB	dB	dB
50	1,57	2,26	23,5	25,4	24,5
63	6,14	1,66	17,1	26,2	21,7
80	4,16	6,43	18,3	19,8	19,0
100	2,30	33,65	20,4	12,2	16,3
125	1,88	3,29	20,7	21,8	21,3
160	1,06	15,19	22,7	14,6	18,7
200	2,49	2,98	18,5	21,2	19,9
250	6,17	14,02	14,1	14,0	14,0
315	3,45	8,52	16,1	15,6	15,9
400	1,91	5,93	18,2	16,7	17,4
500	2,05	2,70	17,4	19,6	18,5
630	2,96	2,08	15,3	20,3	17,8
800	1,00	1,76	19,5	20,5	20,0
1 000	0,78	1,62	20,1	20,3	20,2
1 250	1,60	4,02	16,5	15,9	16,2
1 600	1,47	1,17	16,3	20,7	18,5
2 000	5,16	1,37	10,3	19,6	15,0
2 500	6,15	0,55	9,1	23,0	16,1
3 150	3,85	1,29	10,6	18,8	14,7
4 000	1,53	1,04	14,1	19,3	16,7
5 000	5,61	1,44	8,0	17,4	12,7

$$\eta_{ij} \approx \frac{E_j}{E_i} \cdot \eta_{tot,j} = \frac{m_j}{m_i} \cdot \frac{\langle v_{eff} \rangle_j^2}{\langle v_{eff} \rangle_i^2} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) \quad (\text{D.9})$$

D.10 Stoßfuge S9 mit stirnseitiger Verschraubung und Elastomer unter zusätzlicher Stoßpressung



(a) Kopplungsverlustfaktoren, $N = 12 \cdot 2$ (b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 83 Kopplungsverlustfaktoren und Stoßstellendämm-Maße am L-STOSS S9 mit Elastomer REGUFOAM 570PLUS bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. Der Achsabstand der durchgehenden Schrauben zueinander beträgt 40 cm und das Massenverhältnis der Subsysteme $m_{tot,1}/m_{tot,2} = 2,79$.

E T-Stoß mit unterbrochener Wand [39]

E.1 Zeichnungen

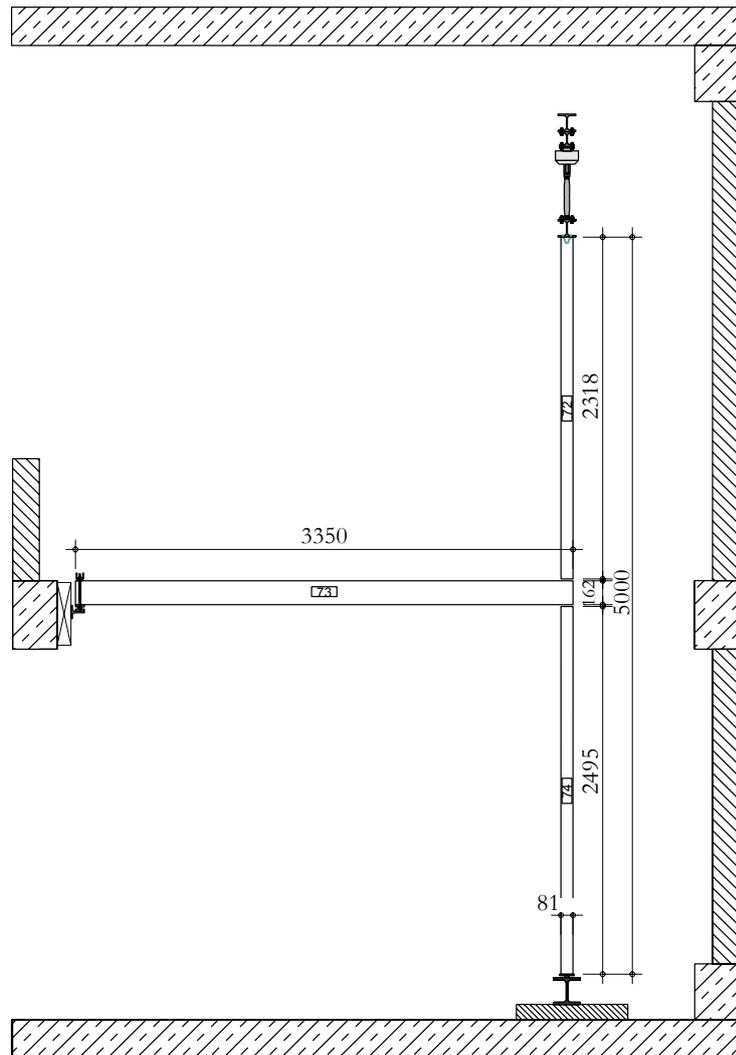
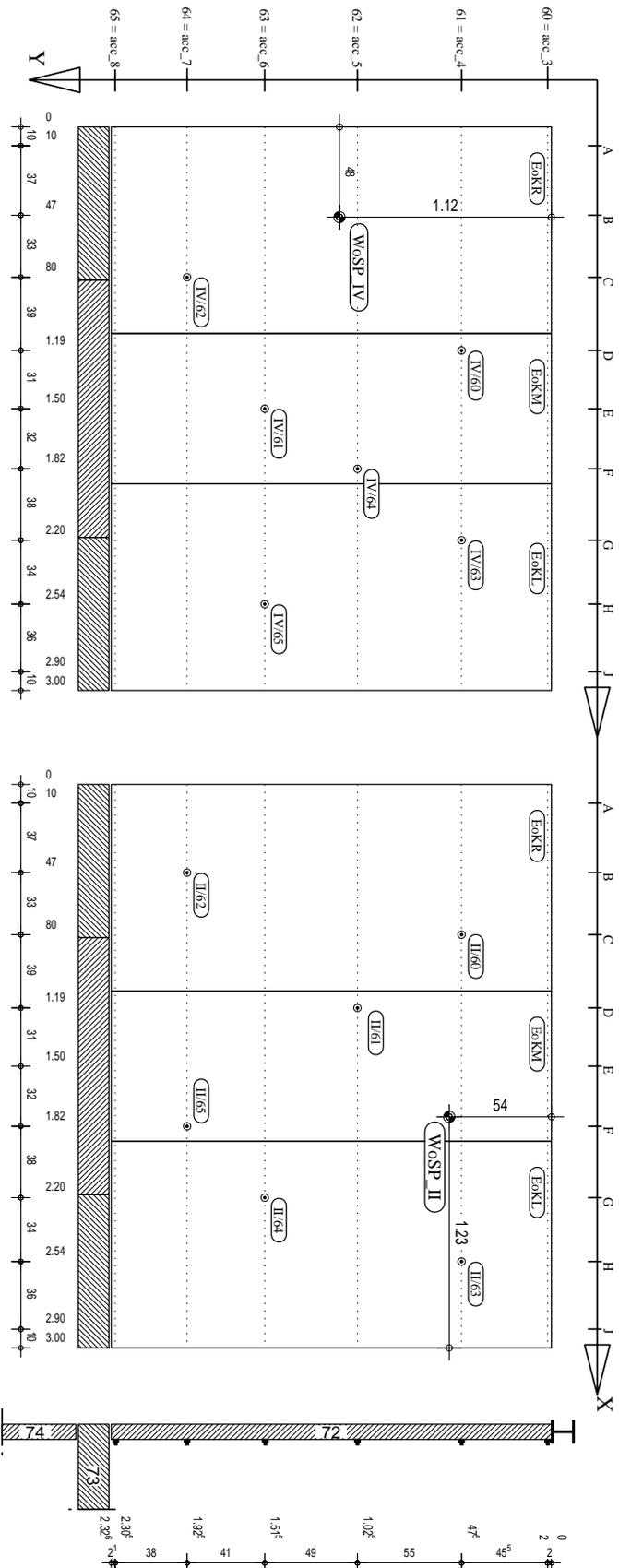


Abbildung 84 Abmessungen des T-förmigen Bauteilstoßes mit durchlaufender Wand im Prüfstand der HS Rosenheim. Die Kopplungslänge $l_{12} = l_{14}$ beträgt 3 m. Die Bauhöhe von 5 m wird bei Verwendung von Elastomerlagern ($z = 12,5$ mm) in den Stoßfugen erreicht.

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WoSPiV (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPiII, WoSPiV, WoSPiV (Schnellepegeldifferenzen)

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WoSPiI (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPiI, WoSPiI, WoSPiI (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt
 Vibroakustik

Planinhalt
 Wand Leno 81 oben (Bauteil Nr. 72)
 Im T-Stoß unterbrochene Wand

Maßstab
 1 : 33

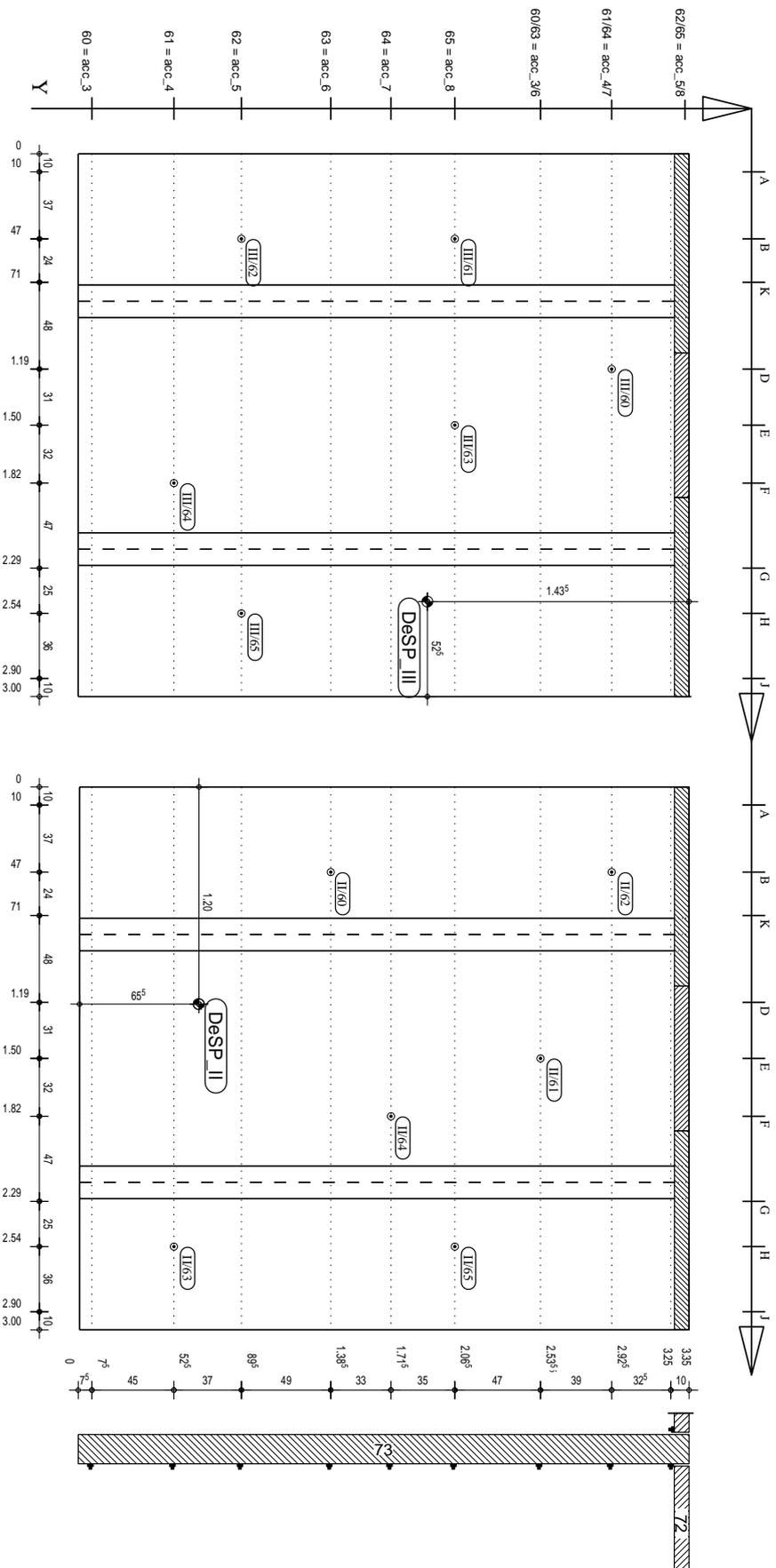
Ansicht von Deckenseite -
 Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der
 Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)

Anregungspunkt
 (Modilstaker)
 Messpunkt

Datum
 26.11.2014
 gezeichnet
 Kruse

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DesP III (Verlustfaktormessungen)
 - DesP III, WoSP IV, WoSP IV (Schnellepegeldifferenzen)

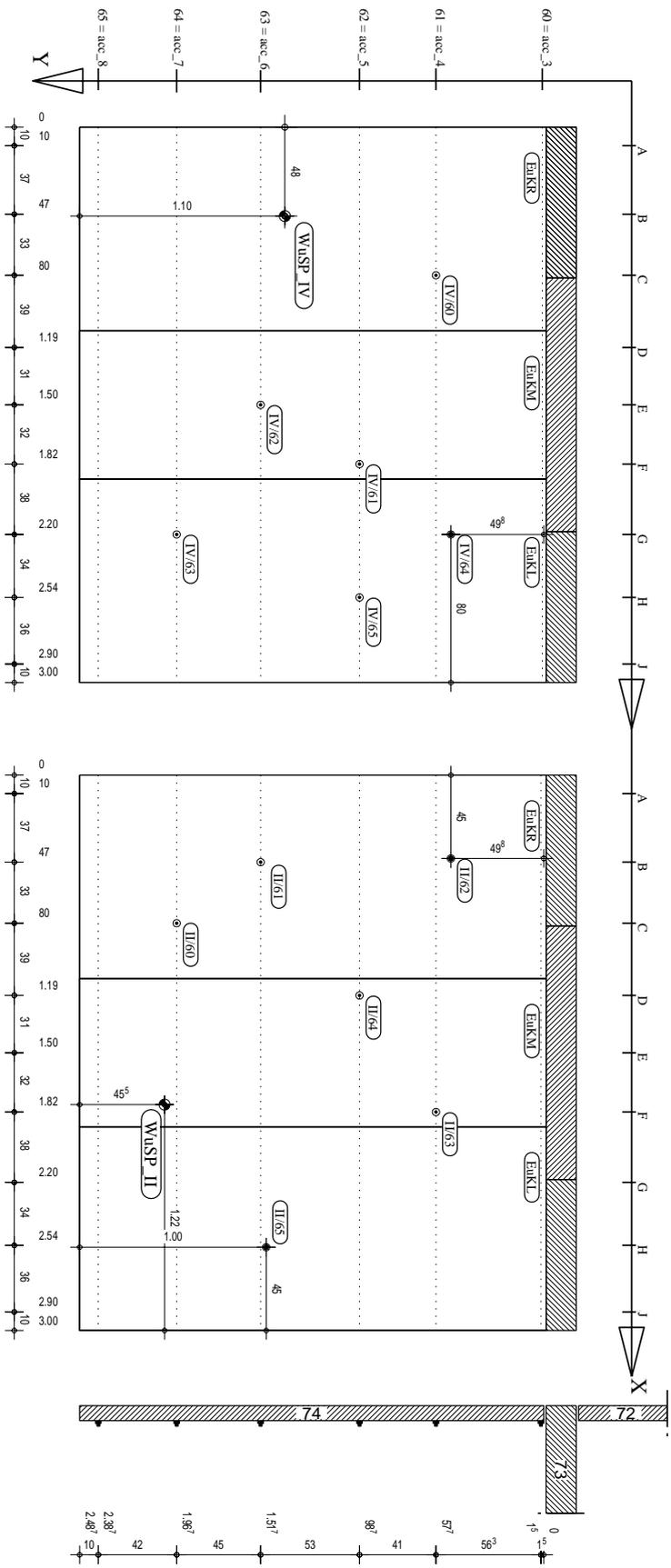
Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DesP II (Verlustfaktormessungen)
 - DesP II, WoSP II, WoSP II (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt	Planinhalt	Maststab
Vibroakustik	Decke Leno 162 (Bauteil Nr. 73) Im T-Stoß unterbrochene Wand	1 : 33
Ansicht von oben - Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)	Anregungspunkt (Modalsäker) <input checked="" type="radio"/> Messpunkt <input type="radio"/>	Datum 26.11.2014
		gezeichnet Krusse

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WüSPiV (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPiII, WüSPiV, WöSPiV (Schnellepegeldifferenzen)

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WüSPiII (Verlustfaktormessungen)
 - DeSPiII, WüSPiII, WöSPiII (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt
 Vibroakustik

Planinhalt
 Wand Leno 81 unten (Bauteil Nr. 74)
 Im T-Stoß unterbrochene Wand

Maßstab
 1 : 33

Ansicht von Deckenseite -
 Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der
 Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)

Anregungspunkt
 (Modalsäker)
 Messpunkt

Datum
 26.11.2014
 gezeichnet
 Kluse

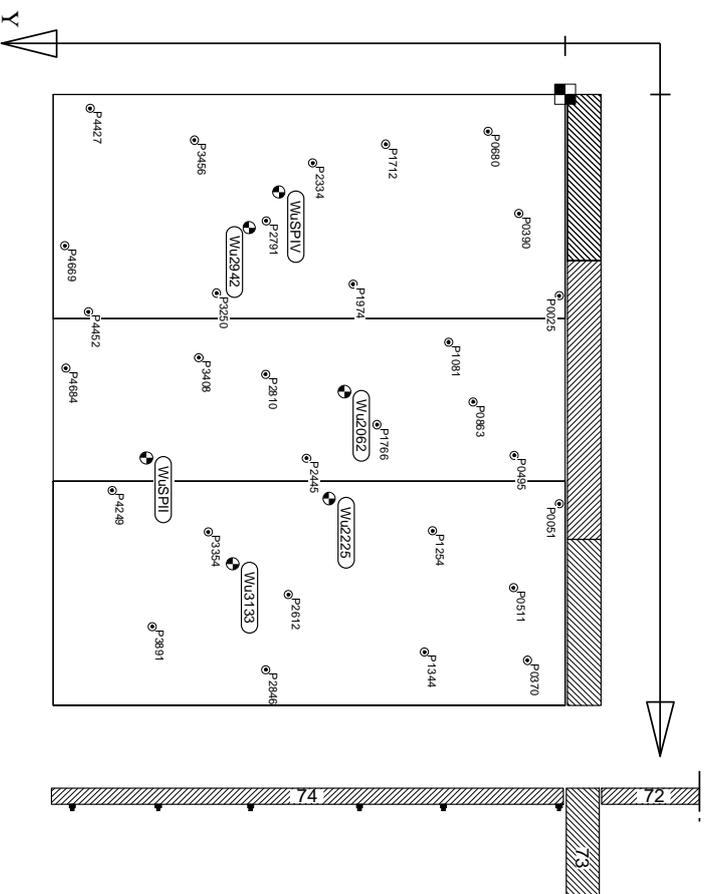
Messpositionen

Pos.	XPosInMeter	YPosInMeter
P3408	1.293	1.785
P1766	1.622	0.916
P1081	1.217	0.568
P3250	0.976	1.698
P2846	2.825	1.458
P4427	0.069	2.315
P0680	0.182	0.376
P2791	0.621	1.457
P1974	0.932	1.033
P0025	0.989	0.028
P2334	0.337	1.230
P0511	2.423	0.251
P3354	2.149	1.739
P2445	1.787	1.260
P1254	2.143	0.645
P0390	0.586	0.225
P0370	2.779	0.184
P0863	1.51	0.448
P4669	0.744	2.438
P1344	2.739	0.685
P4452	1.068	2.323
P4684	1.345	2.433
P3456	0.225	1.807
P4249	1.945	2.207
P0495	1.772	0.874
P2612	2.457	1.348
P2810	1.374	1.460
P0051	2.011	0.028
P3891	2.613	2.011

Anregpositionen

Pos	XPosInMeter	YPosInMeter
WuSPiV	0.480	1.395
Wu2942	0.655	1.540
Wu2062	1.460	1.075
WuSPiI	1.785	2.040
Wu2225	1.985	1.150
Wu3133	2.305	1.620

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
- WuSPiV, Wu2942, Wu2062, WuSPiI, Wu2225, Wu3133

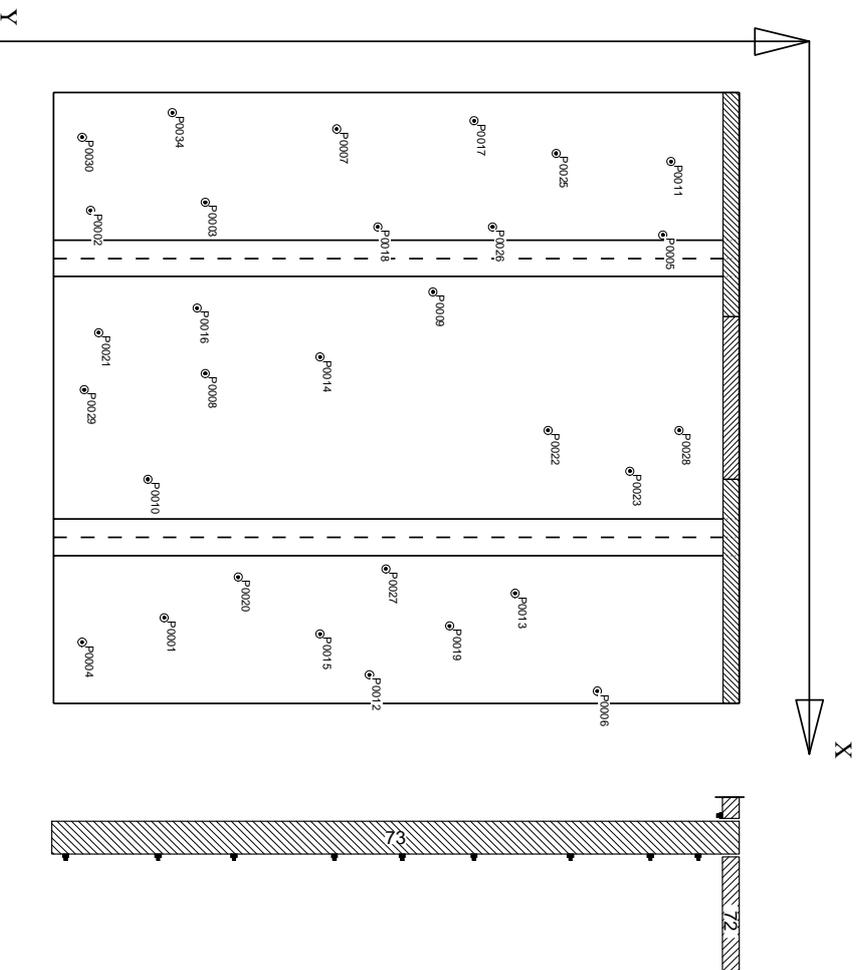


Forschungsprojekt Vibroakustik	Planinhalt Wand Leno 81 unten (Bauteil Nr. 74) Im T-Stoß unterbrochene Wand	Maßstab 1 : 33
Ansicht von Deckenseite - Positionen bei Messung der Schnellegegel zur Messungen der BA SchieBengraber MR645 bis MR656	Anregungspunkt (Modalshaker)	Datum 07.11.2016
Messpunkt	gezeichnet Kruse	Datum 07.11.2016

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WuSPV, Wu2942, Wu2062, WuSPIL, Wu2225, Wu3133

Messpositionen

Pos.	XPostInMeter,	YPostInMeter
P0034	0,100	0,580
P0017	0,140	2,050
P0007	0,180	1,380
P0030	0,220	0,140
P0025	0,300	2,450
P0011	0,340	3,010
P0003	0,540	0,740
P0002	0,580	0,180
P0018	0,660	1,580
P0026	0,660	2,140
P0005	0,700	2,970
P0009	0,980	1,850
P0016	1,060	0,700
P0021	1,180	0,220
P0014	1,300	1,300
P0008	1,380	0,740
P0029	1,460	0,150
P0022	1,660	2,410
P0028	1,660	3,050
P0023	1,860	2,810
P0010	1,900	0,460
P0027	2,340	1,620
P0020	2,380	0,900
P0013	2,460	2,250
P0001	2,580	0,540
P0019	2,620	1,930
P0015	2,660	1,300
P0004	2,700	0,140
P0012	2,860	1,540
P0006	2,940	2,650



Forschungsprojekt Vibroakustik

Planinhalt Decke Leno 162 (Bauteil Nr. 73) Im T-Stoß unterbrochene Wand

Ansicht von oben - Positionen bei Messung der Schnellepegel zur Messungen der BA Scheibengraber MR645 bis MR656

Anregungspunkt (Modalsiraker) Messpunkt

Maßstab 1 : 33

Datum 07.11.2016
 gezeichnet Kriuse

E.2 Stoßfuge S21 mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung

E.2 Stoßfuge S21 mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$.
MR406-436

Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

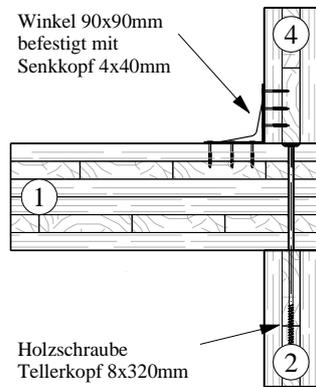


Abbildung 85 Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S21. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 48 Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S21

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,49 m ²	6,95 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²		
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, direkt verschraubte Bauwinkel alle 40 cm		
Verbindung ① ↔ ④	kein Elastomer, durchgehende, direkte Verschraubung, alle 40 cm		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	7...12		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	11...12		

E T-Stoß mit unterbrochener Wand

Tabelle 49 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S21. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,3	15,4	2,1	2,2	0,05	0,05
63	19,9	16,2	1,9	2,2	0,01	0,03
80	21,3	18,0	1,6	2,5	0,08	0,04
100	11,2	9,1	1,8	3,1	0,30	0,19
125	14,1	12,1	1,6	2,9	0,12	0,26
160	17,8	15,8	1,6	2,2	0,19	0,08
200	10,7	9,7	1,9	2,4	0,55	0,37
250	17,1	16,7	1,5	3,2	0,31	0,61
315	13,9	14,3	2,2	2,5	0,85	0,70
400	13,2	13,9	1,8	2,7	0,73	0,62
500	14,1	14,9	2,0	2,0	1,03	0,96
630	11,4	13,5	2,3	2,7	1,93	1,94
800	10,7	14,0	2,7	3,0	3,42	4,36
1000	13,8	16,4	2,2	2,1	2,66	3,09
1250	11,7	13,8	1,9	1,6	-	-
1600	5,7	9,1	1,9	2,2	-	-
2000	4,6	8,4	1,8	2,3	-	-
2500	5,2	10,0	1,8	2,8	-	-
3150	6,6	11,2	1,8	2,1	-	-
4000	5,4	10,1	1,8	1,8	-	-
5000	5,1	10,0	1,5	1,8	-	-

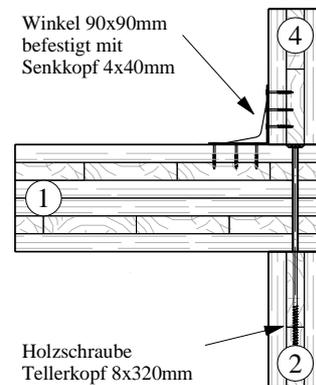
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	15,8	11,4	1,8	2,2	0,06	0,05
63	NaN	12,7	NaN	2,2	NaN	0,03
80	22,5	19,4	1,8	2,5	0,10	0,04
100	14,7	12,7	2,0	3,1	0,23	0,19
125	10,8	9,5	2,3	2,9	0,27	0,26
160	16,5	14,8	2,0	2,2	0,21	0,08
200	15,1	13,8	1,7	2,4	0,31	0,37
250	11	11,0	2,0	3,2	0,60	0,61
315	9,4	9,8	2,3	2,5	0,61	0,70
400	9,2	9,8	1,9	2,7	0,58	0,62
500	12,1	13,0	2,4	2,0	1,62	0,96
630	10,8	12,9	2,4	2,7	1,88	1,94
800	8,8	11,6	2,4	3,0	2,58	4,36
1000	14,0	16,7	2,5	2,1	3,12	3,09
1250	10,1	12,4	2,2	1,6	-	-
1600	5,6	9,4	2,4	2,2	-	-
2000	NaN	10,2	NaN	2,3	-	-
2500	8,4	13,0	1,9	2,8	-	-
3150	8,3	13,5	2,6	2,1	-	-
4000	4,7	9,6	2,0	1,8	-	-
5000	2,5	7,9	2,1	1,8	-	-

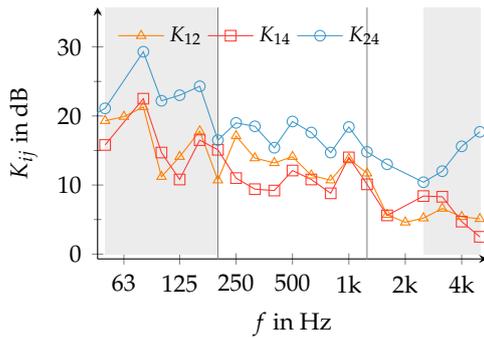
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	21,1	15,9	2,1	1,8	0,05	0,06
63	NaN	22,2	1,9	NaN	0,01	NaN
80	29,3	24,5	1,6	1,8	0,08	0,10
100	22,2	18,4	1,8	2,0	0,30	0,23
125	23,0	19,7	1,6	2,3	0,12	0,27
160	24,3	21,3	1,6	2,0	0,19	0,21
200	16,5	13,9	1,9	1,7	0,55	0,31
250	19,0	16,8	1,5	2,0	0,31	0,60
315	18,5	17,9	2,2	2,3	0,85	0,61
400	15,4	14,5	1,8	1,9	0,73	0,58
500	19,2	19,6	2,0	2,4	1,03	1,62
630	17,6	18,6	2,3	2,4	1,93	1,88
800	14,7	16,7	2,7	2,4	3,42	2,58
1000	18,4	20,6	2,2	2,5	2,66	3,12
1250	14,8	16,7	1,9	2,2	-	-
1600	13,0	15,8	1,9	2,4	-	-
2000	NaN	14,7	1,8	NaN	-	-
2500	10,4	13,5	1,8	1,9	-	-
3150	12,0	16,3	1,8	2,6	-	-
4000	15,6	19,8	1,8	2,0	-	-
5000	17,7	22,2	1,5	2,1	-	-

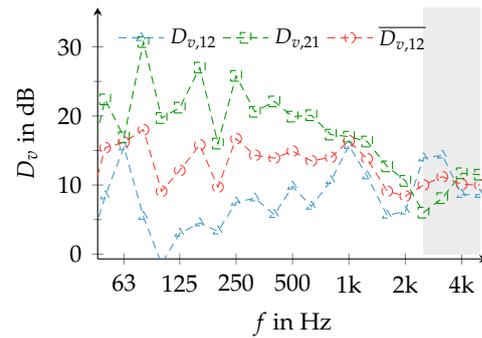
(d) Stoßabbildung



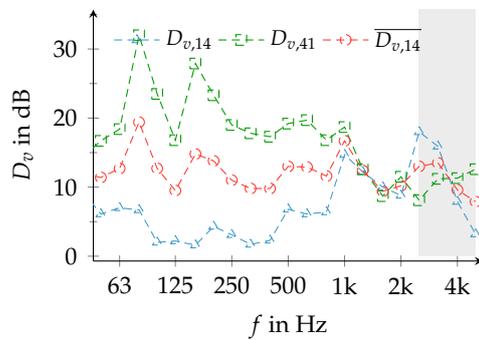
E.2 Stoßfuge S21 mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung



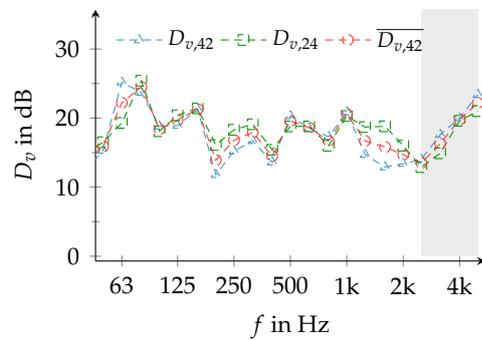
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 12.9\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 11.2\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 17.1\text{dB}$



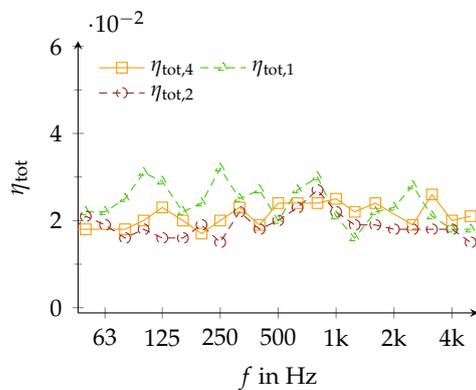
(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



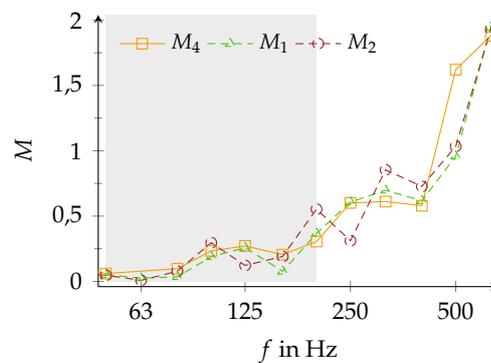
(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④



(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile



(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 86 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S21. Weiter Infos in Tab. 48. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

E.3 Stoßfuge S21a mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung

**E.3 Stoßfuge S21a mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$.
MR621-644 (Rastermessung)**

Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

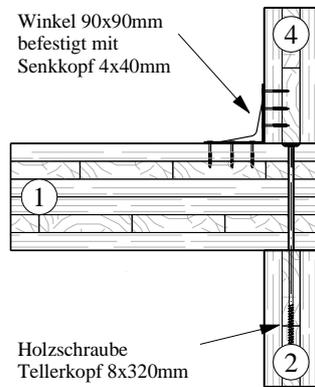


Abbildung 87 Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S21A. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. Hinweis: Aufbau identisch mit T-Stoß S21. Die Messpunktanzahl ist höher. [39]

Tabelle 50 Dokumentation zur Raster-Messung des durchlaufenden T-STOSS S21A

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,49 m ²	6,95 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²		
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, direkt verschraubte Bauwinkel alle 40 cm		
Verbindung ① ↔ ④	kein Elastomer, durchgehende, direkte Verschraubung, alle 40 cm		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	25...49		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12		

E T-Stoß mit unterbrochener Wand

Tabelle 51 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S21A. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,8	14,2	1,4	1,6	0,03	0,04
63	20,7	16,5	1,6	2,0	0,01	0,02
80	22,0	19,1	1,3	3,8	0,06	0,07
100	10,7	8,4	1,4	3,5	0,25	0,24
125	14,6	12,3	1,6	2,5	0,15	0,21
160	17,2	15,3	1,6	2,4	0,14	0,10
200	10,9	9,6	1,5	2,5	0,49	0,32
250	15,7	15,0	1,5	2,7	0,32	0,50
315	14,1	14,5	2,0	2,7	0,79	0,67
400	11,2	11,8	2,1	2,2	0,79	0,51
500	13,1	14,3	2,3	2,1	1,22	1,13
630	10,9	13,1	2,0	3,1	1,65	2,00
800	10,3	12,9	2,4	2,5	2,91	3,71
1000	8,5	11,3	2,4	2,1	3,33	3,09
1250	9,7	12,1	2,1	1,7	-	-
1600	6,7	10,2	2,2	2,0	-	-
2000	7,0	10,5	1,7	2,1	-	-
2500	7,2	10,9	1,7	1,9	-	-
3150	4,8	9,3	2,0	1,8	-	-
4000	5,9	10,4	1,6	1,8	-	-
5000	9,3	13,7	1,3	1,7	-	-

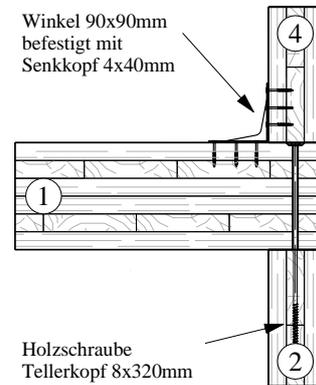
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	14,1	8,7	1,6	1,6	0,06	0,04
63	16,1	11,3	1,3	2,0	0,01	0,02
80	21,1	18,5	1,6	3,8	0,08	0,07
100	14,4	12,4	1,7	3,5	0,20	0,24
125	10,3	8,9	2,6	2,5	0,36	0,21
160	15,7	14,1	2,0	2,4	0,16	0,10
200	10,9	9,4	1,6	2,5	0,30	0,32
250	9,2	9,1	2,2	2,7	0,69	0,50
315	10,8	11,3	2,3	2,7	0,55	0,67
400	10,8	11,3	2,2	2,2	0,67	0,51
500	11,5	13,0	2,9	2,1	2,10	1,13
630	7,8	11,0	3,4	3,1	2,68	2,00
800	8,6	11,7	3,1	2,5	3,19	3,71
1000	8,9	11,7	2,6	2,1	3,03	3,09
1250	8,6	11,4	2,6	1,7	-	-
1600	6,6	9,8	2,1	2,0	-	-
2000	4,7	8,6	2,2	2,1	-	-
2500	5,1	9,5	2,4	1,9	-	-
3150	4,4	9,0	2,2	1,8	-	-
4000	5,9	11,0	2,2	1,8	-	-
5000	6,8	11,7	1,8	1,7	-	-

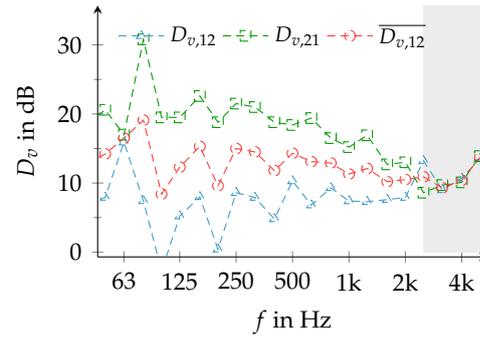
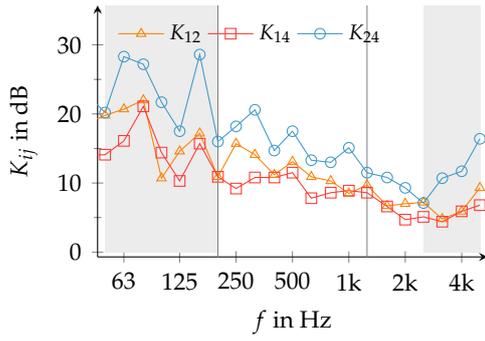
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	20,2	14,0	1,4	1,6	0,03	0,06
63	28,3	22,2	1,6	1,3	0,01	0,01
80	27,2	21,7	1,3	1,6	0,06	0,08
100	21,7	17,1	1,4	1,7	0,25	0,20
125	17,5	14,4	1,6	2,6	0,15	0,36
160	28,6	25,5	1,6	2,0	0,14	0,16
200	16,0	12,9	1,5	1,6	0,49	0,30
250	18,2	16,2	1,5	2,2	0,32	0,69
315	20,6	19,8	2,0	2,3	0,79	0,55
400	14,7	14,5	2,1	2,2	0,79	0,67
500	17,5	18,6	2,3	2,9	1,22	2,10
630	13,3	14,9	2,0	3,4	1,65	2,68
800	13,0	15,2	2,4	3,1	2,91	3,19
1000	15,1	17,4	2,4	2,6	3,33	3,03
1250	11,5	14,1	2,1	2,6	-	-
1600	10,8	13,6	2,2	2,1	-	-
2000	9,3	12,1	1,7	2,2	-	-
2500	7,1	10,5	1,7	2,4	-	-
3150	10,7	14,8	2,0	2,2	-	-
4000	11,7	15,8	1,6	2,2	-	-
5000	16,4	20,2	1,3	1,8	-	-

(d) Stoßabbildung

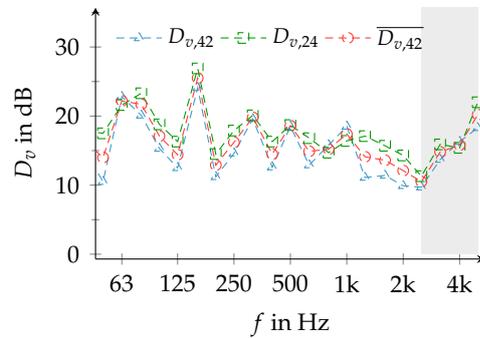
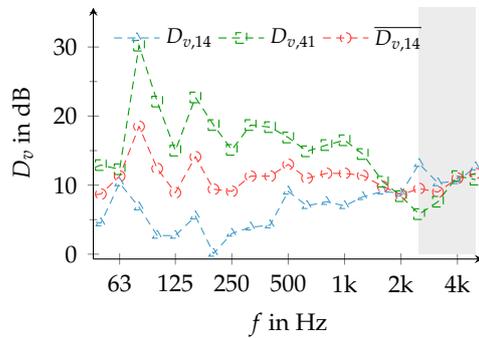


E.3 Stoßfuge S21a mit stirnseitiger Verschraubung unten und Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung



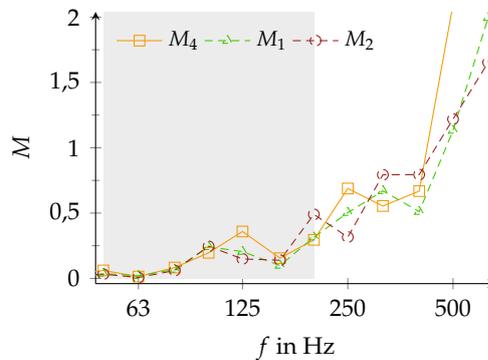
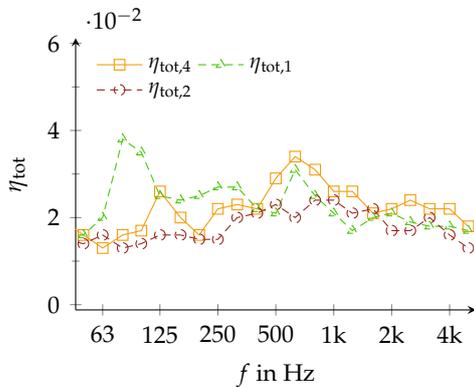
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzehlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 11.6\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 9.7\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 15.5\text{dB}$

(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④

(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile

(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 88 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S21A. Weiter Infos in Tab. 50. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

E.4 Stoßfuge S22 mit stirnseitiger, elastisch gelagert Verschraubung unten und elastisch gelagerten Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung

E.4 Stoßfuge S22 mit stirnseitiger, elastisch gelagert Verschraubung unten und elastisch gelagerten Bauwinkeln oben bei einer Stoßpressung von $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. MR438-464

Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

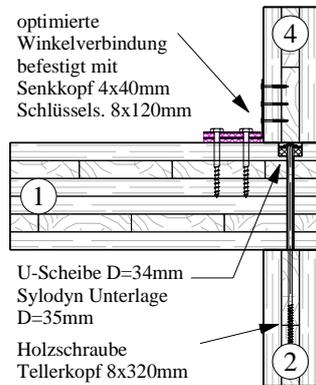


Abbildung 89 Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S22. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 52 Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S22

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,49 m ²	6,95 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²		
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, elast. gelagerte Winkel alle 40 cm		
Verbindung ① ↔ ④	kein Elastomer, durchgehende, elastische Verschraubung, alle 40 cm		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	7...12		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	11...12		

E T-Stoß mit unterbrochener Wand

Tabelle 53 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S22. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	NaN	14,9	NaN	2,2	NaN	0,05
63	NaN	16,1	1,8	NaN	0,01	NaN
80	NaN	19,6	1,5	NaN	0,07	NaN
100	10,3	8,9	1,7	4,3	0,29	0,26
125	13,4	11,6	1,7	2,9	0,13	0,26
160	17,8	16,1	1,6	2,5	0,19	0,09
200	11,5	10,1	1,6	2,4	0,48	0,36
250	16,5	16,2	1,9	2,6	0,41	0,49
315	13,3	13,9	2,1	2,8	0,82	0,75
400	12,2	13,1	1,9	2,8	0,75	0,67
500	13,6	14,4	2,1	2,0	1,03	0,96
630	11,6	13,8	2,3	2,7	2,02	1,96
800	12,4	14,9	2,5	2,3	3,10	3,31
1000	10,7	13,6	2,3	2,4	2,89	3,47
1250	11,0	13,7	2,0	1,9	-	-
1600	6,1	9,6	1,8	2,5	-	-
2000	5,1	8,9	1,8	2,3	-	-
2500	5,3	9,9	1,7	2,7	-	-
3150	6,7	11,3	1,9	1,9	-	-
4000	3,7	9,1	2,1	2,1	-	-
5000	3,9	9,6	1,8	2,2	-	-

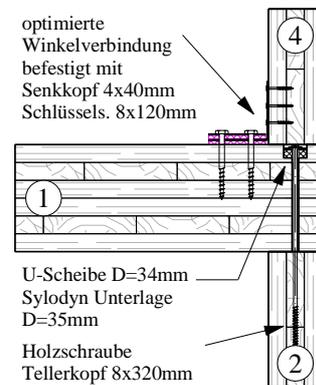
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,2	14,9	1,9	2,2	0,07	0,05
63	NaN	15,7	NaN	NaN	NaN	NaN
80	NaN	20,8	1,8	NaN	0,10	NaN
100	12,9	11,7	2,1	4,3	0,25	0,26
125	11,2	9,9	2,3	2,9	0,25	0,26
160	16,1	14,8	2,1	2,5	0,23	0,09
200	15,7	14,6	2,0	2,4	0,36	0,36
250	12,3	12,3	2,3	2,6	0,68	0,49
315	11,4	12,4	2,7	2,8	0,75	0,75
400	10,8	11,6	1,9	2,8	0,57	0,67
500	13,3	14,3	2,4	2,0	1,67	0,96
630	11,9	14,8	3,4	2,7	2,64	1,96
800	10,0	12,3	2,5	2,3	2,72	3,31
1000	11,6	14,7	2,7	2,4	3,38	3,47
1250	12,2	15,0	2,4	1,9	-	-
1600	11,4	15,5	2,5	2,5	-	-
2000	NaN	11,1	NaN	2,3	-	-
2500	NaN	13,7	NaN	2,7	-	-
3150	10,8	15,5	2,2	1,9	-	-
4000	NaN	12,2	NaN	2,1	-	-
5000	NaN	10,5	NaN	2,2	-	-

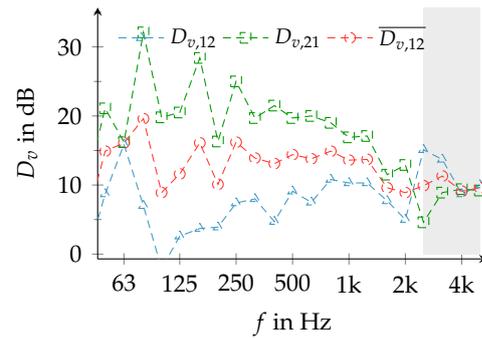
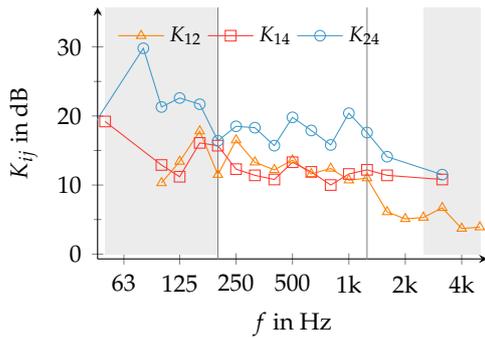
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	NaN	17,7	NaN	1,9	NaN	0,07
63	NaN	23,3	1,8	NaN	0,01	NaN
80	29,8	24,9	1,5	1,8	0,07	0,10
100	21,3	17,5	1,7	2,1	0,29	0,25
125	22,6	19,5	1,7	2,3	0,13	0,25
160	21,7	18,8	1,6	2,1	0,19	0,23
200	16,4	13,8	1,6	2,0	0,48	0,36
250	18,5	17,1	1,9	2,3	0,41	0,68
315	18,3	18,1	2,1	2,7	0,82	0,75
400	15,7	15,0	1,9	1,9	0,75	0,57
500	19,8	20,2	2,1	2,4	1,03	1,67
630	17,9	19,7	2,3	3,4	2,02	2,64
800	15,8	17,7	2,5	2,5	3,10	2,72
1000	20,4	22,8	2,3	2,7	2,89	3,38
1250	17,6	19,9	2,0	2,4	-	-
1600	14,1	16,8	1,8	2,5	-	-
2000	NaN	17,5	1,8	NaN	-	-
2500	NaN	14,3	1,7	NaN	-	-
3150	11,5	15,6	1,9	2,2	-	-
4000	NaN	19,7	2,1	NaN	-	-
5000	NaN	21,3	1,8	NaN	-	-

(d) Stoßabbildung

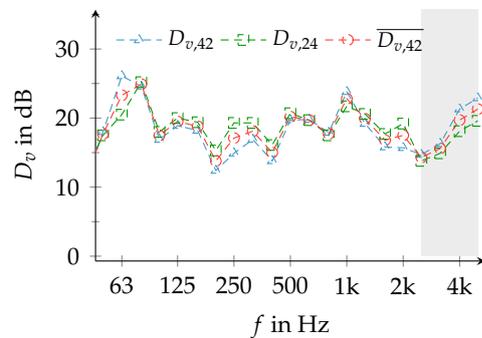
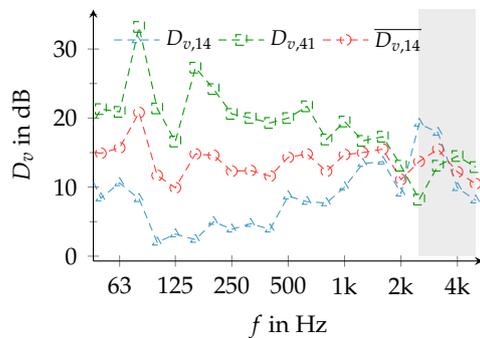


E.4 Stoßfuge S22 mit stirnseitiger, elastisch gelagert Verschraubung unten und elastisch gelagerten Bauwinkeln oben unter zusätzlicher Stoßpressung



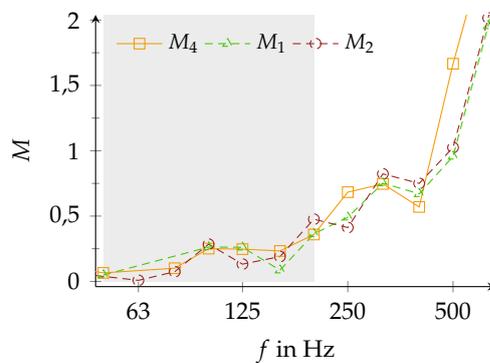
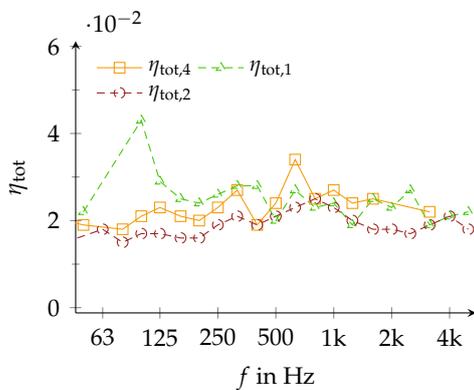
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 12.5\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 12.1\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 17.8\text{dB}$

(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④

(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile

(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 90 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S22. Weiter Infos in Tab. 52. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

E.5 Stoßfuge S23 mit Elastomeren und stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und elastisch gelagerten Bauwinkeln unter zusätzl. Stoßpressung

E.5 Stoßfuge S23 mit Sylodyn ND und stirnseitiger, elast. gelagerter Verschraubung unten und elast. gelagerten Bauwinkeln oben;
 $p_{St} = 0,27 \text{ N/mm}^2$. MR465-500;MR535-547

Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848.

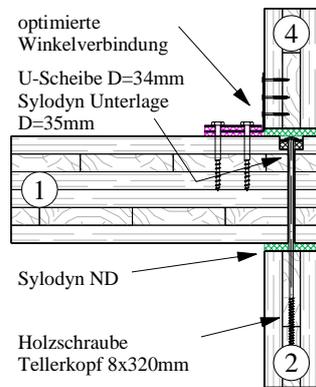


Abbildung 91 Detailabbildung des unterbrochenen T-STOSS S23. Kennzeichnung der Bauteilnummern in den Kreisen. [39]

Tabelle 54 Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S23

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,49 m ²	6,95 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Stoßpressung p_{St}	0,27 N/mm ²		
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN ND, elast. gelagerte Winkel alle 40 cm		
Verbindung ① ↔ ④	SYLODYN ND, durchgehende, elastische Verschraubung, alle 40 cm		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	25...49		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12		

E T-Stoß mit unterbrochener Wand

Tabelle 55 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S23. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	21,5	18,6	3,7	2,0	0,02	0,04
63	24,6	22,5	3,2	2,6	0,06	0,03
80	19,8	19,4	2,9	5,2	0,34	0,09
100	19,6	19,5	3,9	3,4	0,33	0,22
125	26,1	25,8	3,5	2,9	0,50	0,18
160	24,5	24,5	3,6	2,5	0,50	0,19
200	21,6	21,7	2,3	3,2	0,41	0,53
250	15,8	17,4	3,1	3,8	1,09	0,57
315	19,0	20,6	3,1	3,0	1,08	0,81
400	12,8	14,5	2,3	3,4	0,89	1,03
500	18,7	20,4	2,4	2,6	1,44	1,16
630	19,5	22,6	2,8	3,4	2,35	2,59
800	23,7	26,7	2,8	2,5	3,27	3,81
1000	20,9	23,9	2,0	2,9	2,60	4,48
1250	24,3	26,1	1,4	1,7	-	-
1600	23,5	27,6	2,5	2,3	-	-
2000	21,7	25,6	2,0	2,1	-	-
2500	23,2	27,2	1,7	2,1	-	-
3150	22,9	27,2	1,9	1,7	-	-
4000	22,9	28,1	1,8	2,1	-	-
5000	22,7	28,0	1,9	1,7	-	-

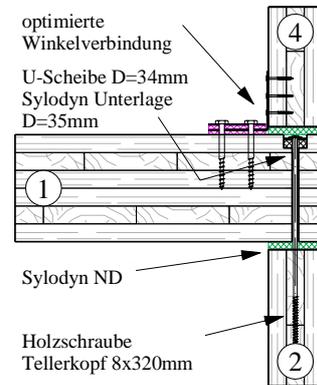
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	17,5	13,4	2,2	2,0	0,03	0,04
63	18,7	15,2	1,8	2,6	0,02	0,03
80	17,3	16,2	2,2	5,2	0,14	0,09
100	11,2	9,9	2,5	3,4	0,37	0,22
125	17,1	16,7	3,7	2,9	0,32	0,18
160	17,0	16,9	3,7	2,5	0,54	0,19
200	15,3	15,0	2,0	3,2	0,38	0,53
250	13,3	14,8	3,3	3,8	0,78	0,57
315	16,1	17,4	2,9	3,0	0,87	0,81
400	13,4	15,7	3,2	3,4	1,18	1,03
500	18,2	20,2	3,0	2,6	1,92	1,16
630	15,9	18,9	2,9	3,4	2,52	2,59
800	13,6	16,2	2,5	2,5	2,82	3,81
1000	19,5	23,0	2,6	2,9	3,01	4,48
1250	24,5	27,0	2,2	1,7	-	-
1600	21,4	25,9	3,4	2,3	-	-
2000	21,9	26,0	2,4	2,1	-	-
2500	23,4	28,0	2,5	2,1	-	-
3150	20,9	25,3	2,2	1,7	-	-
4000	23,0	28,1	1,9	2,1	-	-
5000	24,2	28,9	1,6	1,7	-	-

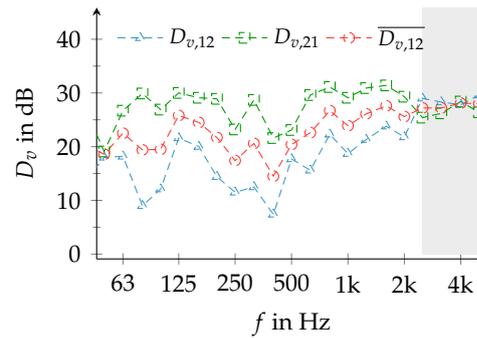
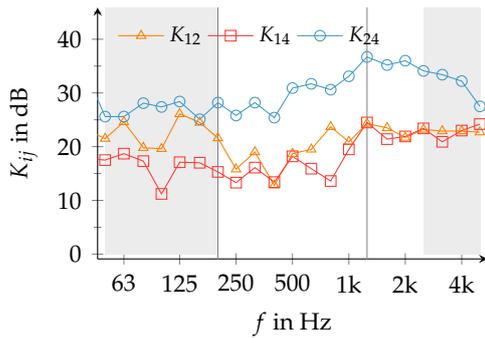
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	25,6	22,0	3,7	2,2	0,02	0,03
63	25,6	21,9	3,2	1,8	0,06	0,02
80	28,1	25,1	2,9	2,2	0,34	0,14
100	27,4	25,8	3,9	2,5	0,33	0,37
125	28,4	27,9	3,5	3,7	0,50	0,32
160	25,1	25,2	3,6	3,7	0,50	0,54
200	28,2	26,4	2,3	2,0	0,41	0,38
250	25,8	26,2	3,1	3,3	1,09	0,78
315	28,2	28,9	3,1	2,9	1,08	0,87
400	25,4	26,2	2,3	3,2	0,89	1,18
500	30,9	32,1	2,4	3,0	1,44	1,92
630	31,7	33,6	2,8	2,9	2,35	2,52
800	30,6	32,8	2,8	2,5	3,27	2,82
1000	33,1	35,1	2,0	2,6	2,60	3,01
1250	36,7	38,1	1,4	2,2	-	-
1600	35,2	39,3	2,5	3,4	-	-
2000	36,0	39,3	2,0	2,4	-	-
2500	34,1	37,7	1,7	2,5	-	-
3150	33,4	37,5	1,9	2,2	-	-
4000	32,2	36,4	1,8	1,9	-	-
5000	27,5	31,7	1,9	1,6	-	-

(d) Stoßabbildung

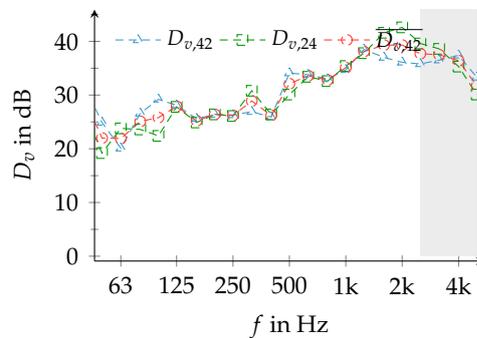
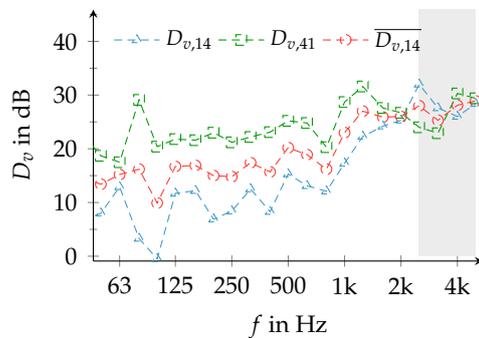


E.5 Stoßfuge S23 mit Elastomeren und stirnseitiger, elastisch gelagerter Verschraubung und elastisch gelagerten Bauwinkeln unter zusätzl. Stoßpressung



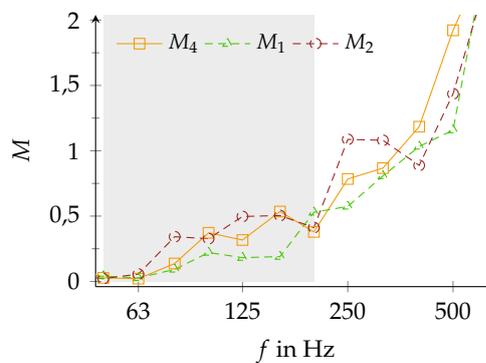
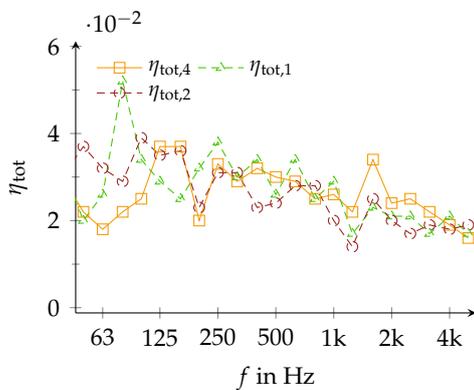
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 19.6\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 16.6\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 30.1\text{dB}$

(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④

(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile

(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 92 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S23. Weiter Infos in Tab. 54. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

F T-Stoß mit durchlaufender Wand [39]

F.1 Zeichnungen

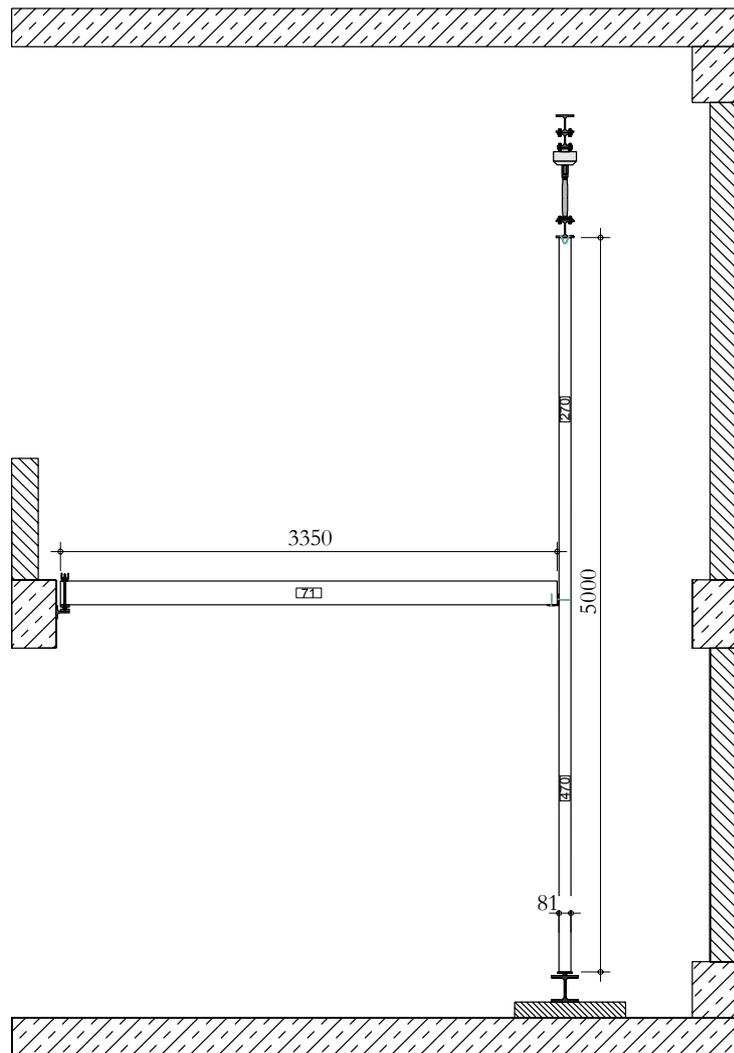
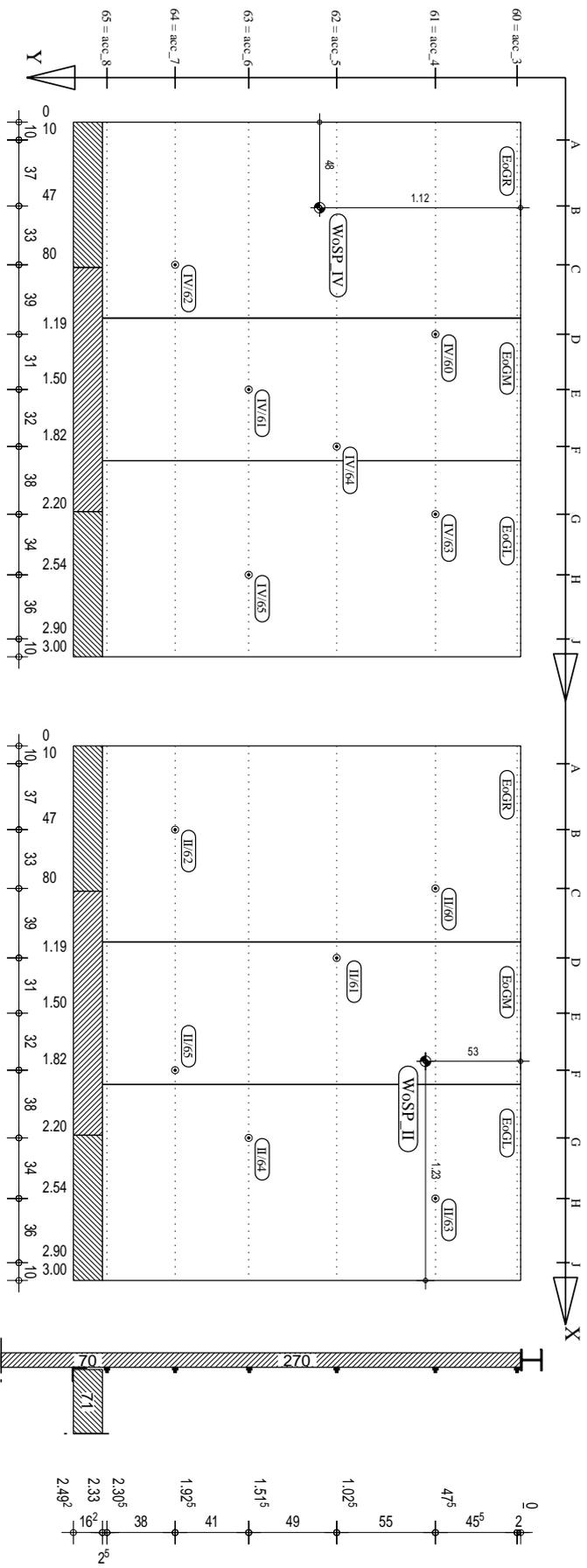


Abbildung 93 Abmessungen des T-förmigen Bauteilstoßes Nr.11 mit durchlaufender Wand im Prüfstand der HS Rosenheim. Die Kopplungslänge $l_{12} = l_{14}$ beträgt 3 m.

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WoSP IV (Verlustfaktormessungen)
 - DesP III, WoSP IV, WoSP IV (Schnellepegeldifferenzen)

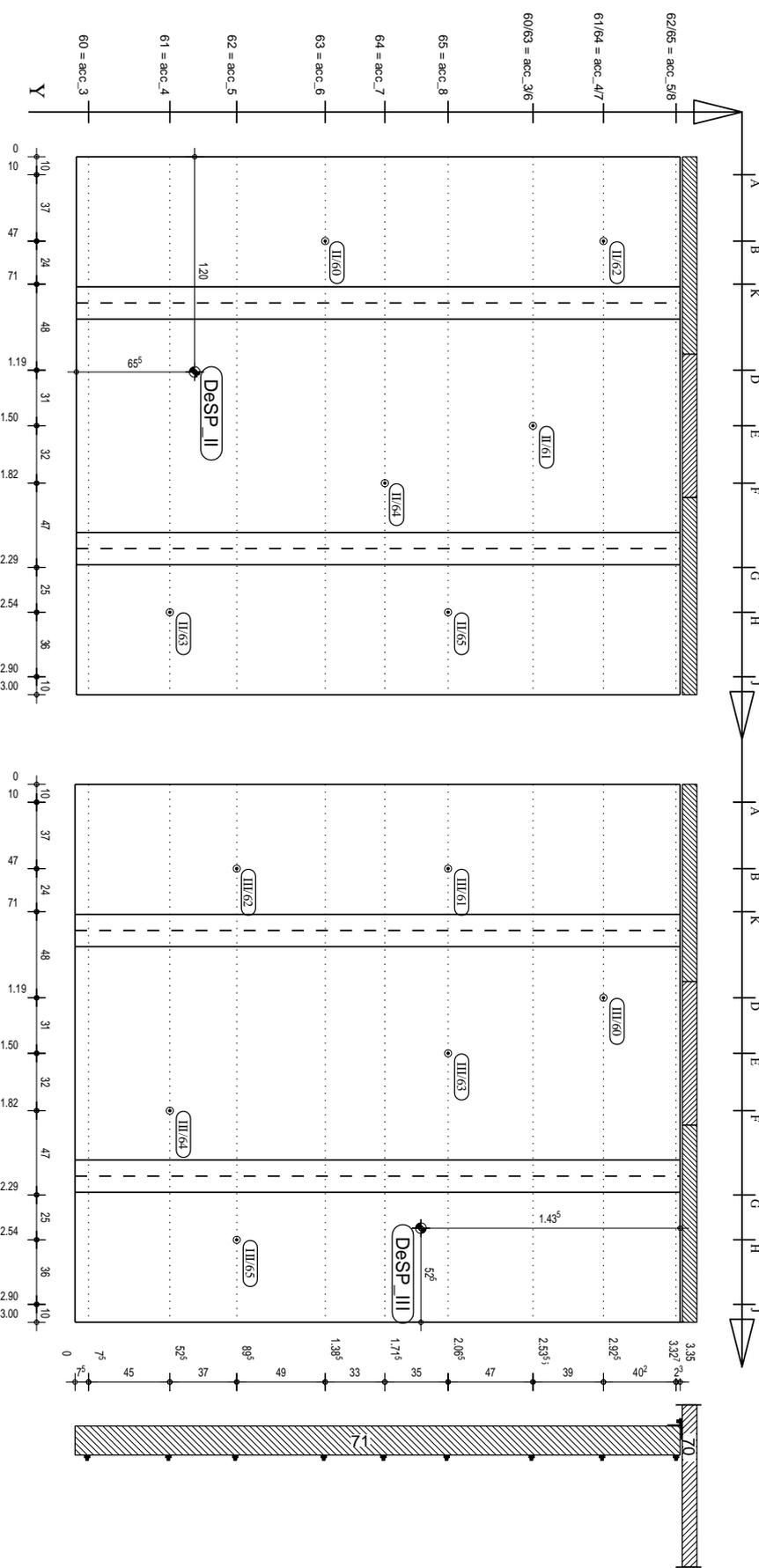
Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WoSP II (Verlustfaktormessungen)
 - DesP II, WoSP II, WoSP II (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt Vibroakustik	Planinhalt Wand Leno 81 oben (Bauteil Nr. 70 / 270) Im T-Stoß durchgehende Wand	Masstab 1 : 33	Datum 26.11.2014
Ansicht von Deckenseite - Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)		Anregungspunkt (Modellshaker) Messpunkt	gezeichnet Kluse

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DeSP II (Verlustfaktormessungen)
 - DeSP II, WoSP II, WoSP II (Schnellepegeldifferenzen)

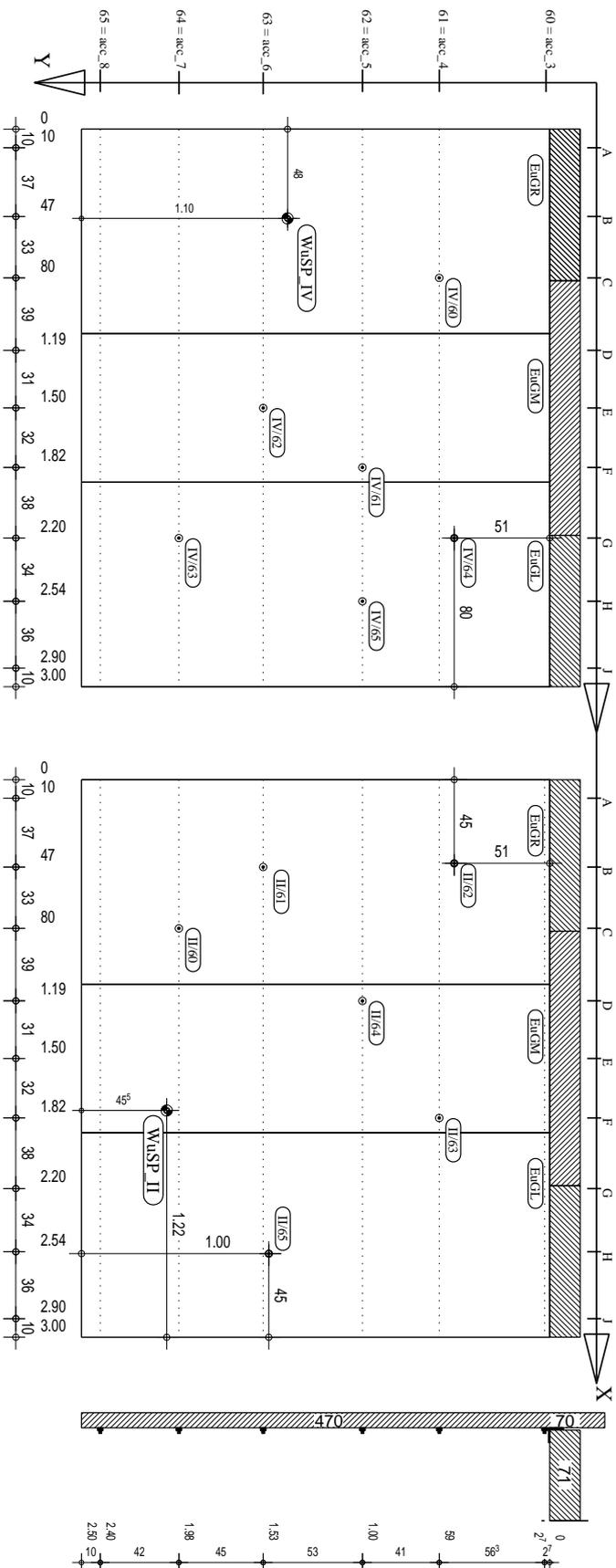
Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - DeSP III (Verlustfaktormessungen)
 - DeSP II, WoSP IV, WoSP IV (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt Vibroakustik	Planinhalt Decke Leno 162 (Bauteil Nr. 71) Im T-Stoß durchgehende Wand	Maststab 1 : 33
Ansicht von Deckenseite - Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)	Anregungspunkt (Modellschaker) Messpunkt	Datum 25.11.2014
		gezeichnet Kriuse

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WUSPIV (Verlustfaktormessungen)
 - DesSPII, WusSPIV, WosSPIV (Schnellepegeldifferenzen)

Messpunkte anzuwenden bei Anregungspositionen:
 - WUSPII (Verlustfaktormessungen)
 - DesSPII, WusSPII, WosSPII (Schnellepegeldifferenzen)



Forschungsprojekt
 Vibroakustik

Planinhalt
 Wand Leno 81 unten (Bauteil Nr. 70 / 470)
 Im T-Stoß durchgehende Wand

Maßstab
 1 : 33

Ansicht von Deckenseite -
 Positionen bei Ermittlung der Verlustfaktoren und der
 Schnellepegeldifferenzen (reduzierte Messpunkanzahl)

Anregungspunkt
 (Modalsaker)
 Messpunkt

Datum
 10.02.2015
 gezeichnet
 Kruse

F.2 Stoßfuge S11 mit verschraubter Stahlkonsole bei einer zusätzlichen Last auf der Wand von $F' = 20\text{kN/m}$. MR335-368

Kennwerte zur Stoßstelle in Anlehnung an DIN EN ISO 10848

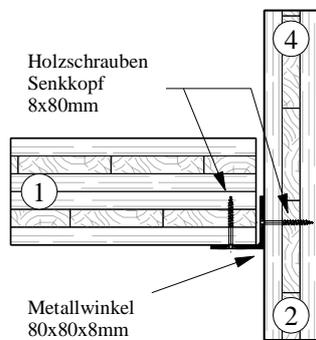


Abbildung 94 Detailabbildung des durchlaufenden T-STOSS S11 mit verschraubter Stahlkonsole

Tabelle 56 Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S11

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,53 m ²	7,47 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Verbindung ① ↔ ②	kein Elastomer, durchgehende Stahlkonsole, alle 40 cm verschraubt		
Verbindung ① ↔ ④	kein Elastomer, durchgehende Stahlkonsole, alle 40 cm verschraubt		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	7...12		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12		

F T-Stoß mit durchlaufender Wand

Tabelle 57 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S11. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	14,8	10,1	1,9	1,7	0,07	0,02
63	NaN	19,0	NaN	2,3	NaN	0,03
80	18,4	15,6	1,5	3,2	0,08	0,11
100	11.6	9,4	1,9	2,8	0,32	0,14
125	19,1	17,4	2,1	2,5	0,13	0,15
160	16,0	14,9	2,6	2,0	0,36	0,11
200	11.0	10,2	2,0	2,5	0,54	0,46
250	12,6	12,2	1,7	2,8	0,36	0,48
315	9,1	10,1	2,7	2,6	1,10	0,57
400	8.9	9,8	2,2	2,5	0,84	0,81
500	10,5	12,1	2,6	2,2	1,37	1,00
630	9,0	11,1	2,1	2,7	1,79	1,94
800	6,6	9,2	2,4	2,4	3,00	3,61
1000	6,4	9,4	2,3	2,5	2,97	3,70
1250	9,0	11,9	2,3	1,9	-	-
1600	7,2	11,4	2,3	2,6	-	-
2000	7,8	12,0	2,4	2,1	-	-
2500	12,4	16,5	1,7	2,1	-	-
3150	15,3	19,9	2,3	1,7	-	-
4000	16,7	21,3	1,7	1,7	-	-
5000	12,9	18,0	2,0	1,5	-	-

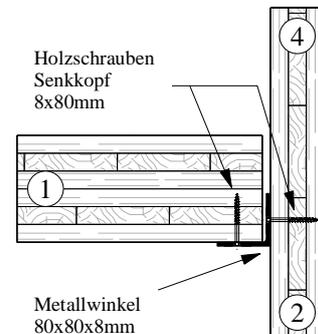
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,9	15,0	1,7	1,7	0,07	0,02
63	NaN	19,2	NaN	2,3	NaN	0,03
80	19,3	16,6	1,6	3,2	0,09	0,11
100	10.8	8,6	1,9	2,8	0,29	0,14
125	13.4	11,7	2,1	2,5	0,19	0,15
160	14,8	12,9	1,8	2,0	0,24	0,11
200	10.5	9,4	1,7	2,5	0,37	0,46
250	10.2	10,2	2,1	2,8	0,56	0,48
315	9,6	10,1	2,2	2,6	0,68	0,57
400	8.2	8,7	1,8	2,5	0,57	0,81
500	8,9	10,4	2,5	2,2	1,82	1,00
630	8,5	10,6	2,3	2,7	1,91	1,94
800	6.2	8,5	2,1	2,4	2,56	3,61
1000	5.9	9,0	2,4	2,5	3,12	3,70
1250	7,8	10,4	2,0	1,9	-	-
1600	4,0	8,5	2,6	2,6	-	-
2000	7,4	11,5	2,3	2,1	-	-
2500	8,1	12,8	2,3	2,1	-	-
3150	12,2	17,0	2,5	1,7	-	-
4000	13,8	18,6	1,9	1,7	-	-
5000	14,9	19,7	1,8	1,5	-	-

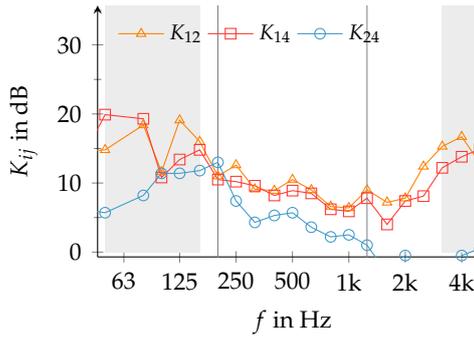
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	5.7	0,4	1,9	1,7	0,07	0,07
63	NaN	13,2	NaN	NaN	NaN	NaN
80	8.2	3,2	1,5	1,6	0,08	0,09
100	11,4	7,8	1,9	1,9	0,32	0,29
125	11,4	8,8	2,1	2,1	0,13	0,19
160	11,8	9,8	2,6	1,8	0,36	0,24
200	13,0	10,8	2,0	1,7	0,54	0,37
250	7,4	5,7	1,7	2,1	0,36	0,56
315	4,3	4,2	2,7	2,2	1,10	0,68
400	5,3	4,8	2,2	1,8	0,84	0,57
500	5,7	6,8	2,6	2,5	1,37	1,82
630	3,6	4,7	2,1	2,3	1,79	1,91
800	2.2	3,8	2,4	2,1	3,00	2,56
1000	2,5	4,8	2,3	2,4	2,97	3,12
1250	1.0	3,4	2,3	2,0	-	-
1600	-3.1	0,5	2,3	2,6	-	-
2000	-0.5	3,3	2,4	2,3	-	-
2500	-3.5	0,1	1,7	2,3	-	-
3150	-4.3	0,6	2,3	2,5	-	-
4000	-0,5	3,7	1,7	1,9	-	-
5000	0,5	5,3	2,0	1,8	-	-

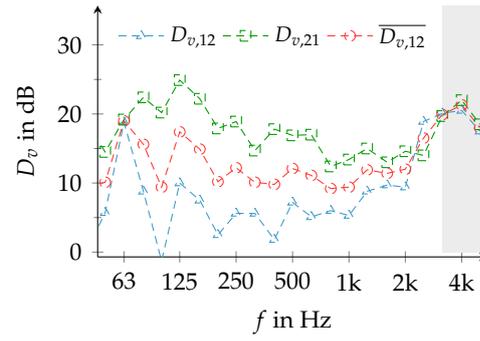
(d) Stoßabbildung



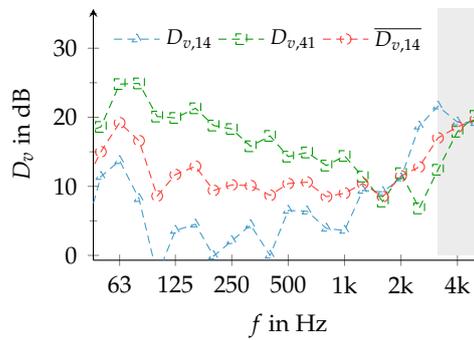
F.2 Stoßfuge S11 mit verschraubter Stahlkonsole



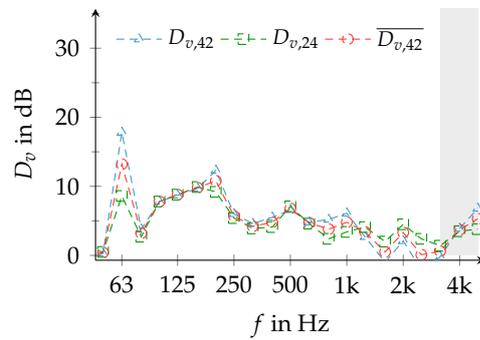
(a) Stoßstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 9.2\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 8.4\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 5.0\text{dB}$



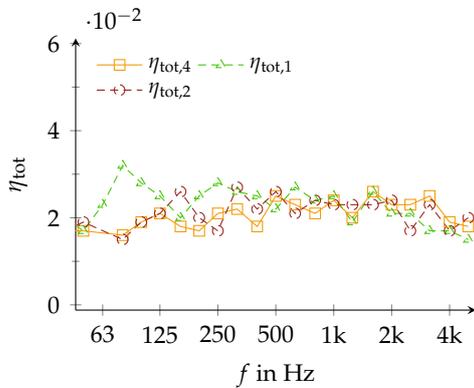
(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



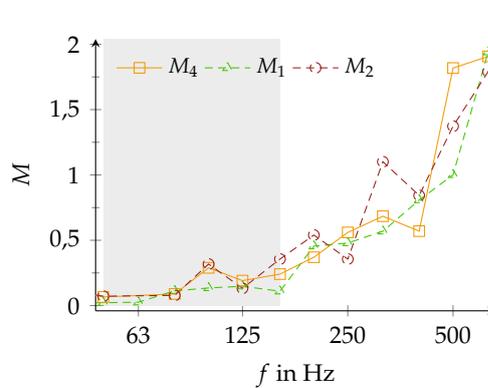
(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④



(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile



(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 95 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{\text{tot},i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S11. Weiter Infos in Tab. 56. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

**F.3 Stoßfuge S12 mit verschraubter Stahlkonsole und Elastomer
Sylodyn ND bei einer zusätzlichen Last auf der Wand von
 $F' = 20\text{kN/m}$. MR370-399**

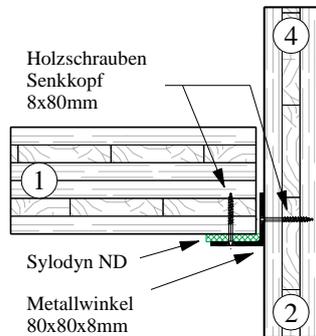


Abbildung 96 Detailabbildung des durchlaufenden T-STOSS S12 mit direkt verschraubten Winkel auf gesamter Wandbreite [39]

Tabelle 58 Dokumentation zur Messung des durchlaufenden T-STOSS S12

Bauteilnummer	①	②	④
m'_i	73,7 kg/m ²	36,5 kg/m ²	36,5 kg/m ²
z_i	162 mm	81 mm	81 mm
S_i	10,05 m ²	7,53 m ²	7,47 m ²
$f_{c,1,i} \dots f_{c,2,i}$	90 Hz bis 150 Hz	161 Hz bis 647 Hz	161 Hz bis 647 Hz
Verbindung ① ↔ ②	SYLODYN ND, durchgehende Stahlkonsole, alle 40 cm verschraubt		
Verbindung ① ↔ ④	SYLODYN ND, durchgehende Stahlkonsole, alle 40 cm verschraubt		
Kopplungslänge l_{ij}	3 m		
Anregung	Körperschall, logarithmischer Gleitsinus		
Anregepositionen pro Bauteil	2		
Messpositionen ($D_{v,ij}$) je Anregeposition	7...12		
Messpositionen (η_{tot}) je Anregeposition	12		

F T-Stoß mit durchlaufender Wand

Tabelle 59 Stoßstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $\overline{D_{v,ij}}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S12. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering. Für K_{ij} -Werte in **rot** kann eine starke Kopplung [4] vorliegen. [39]

(a) Übertragungsweg ① ↔ ②

f	K_{21}	$\overline{D_{v,21}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,1}$	M_2	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	22,6	18,3	1,7	2,2	0,04	0,02
63	NaN	18,5	NaN	3,0	NaN	0,03
80	12	9,9	3,0	2,2	0,22	0,06
100	7.1	5,3	2,2	2,9	0,34	0,18
125	14,0	12,3	1,9	2,7	0,10	0,14
160	14,9	13,3	1,8	2,3	0,27	0,26
200	13,0	13,0	1,7	4,1	0,43	0,41
250	13,8	13,4	1,6	3,0	0,40	0,64
315	13,7	13,9	1,9	2,7	0,69	0,53
400	13,3	14,2	2,2	2,5	0,87	0,76
500	13,0	14,2	2,4	2,1	1,25	0,99
630	10,8	13,3	2,4	2,9	2,03	2,06
800	7,6	10,5	2,5	2,8	3,06	4,10
1000	9,8	12,4	2,3	2,1	2,89	3,17
1250	10,5	14,0	2,7	2,0	-	-
1600	13,7	17,9	2,1	2,8	-	-
2000	14,9	18,8	2,2	1,9	-	-
2500	21,9	26,0	1,7	2,1	-	-
3150	25,7	30,9	2,3	2,1	-	-
4000	23,4	28,8	2,3	1,9	-	-
5000	NaN	28,2	NaN	1,4	-	-

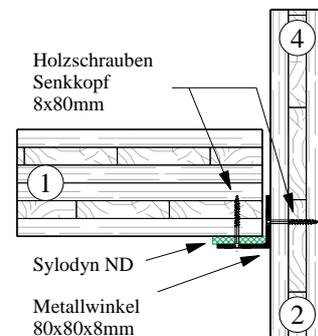
(b) Übertragungsweg ① ↔ ④

f	K_{41}	$\overline{D_{v,41}}$	$\eta_{tot,4}$	$\eta_{tot,1}$	M_4	M_1
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	19,9	15,7	1,9	2,2	0,05	0,02
63	18,3	15,5	2,1	3,0	0,02	0,03
80	13.1	9,7	1,7	2,2	0,12	0,06
100	10.9	9,1	2,1	2,9	0,31	0,18
125	14,8	13,3	2,1	2,7	0,17	0,14
160	13,7	12,1	1,9	2,3	0,27	0,26
200	14,1	14,2	1,8	4,1	0,39	0,41
250	12,1	12,3	2,1	3,0	0,57	0,64
315	13,2	13,7	2,1	2,7	0,62	0,53
400	13,2	13,8	2,0	2,5	0,64	0,76
500	12,2	13,4	2,3	2,1	1,68	0,99
630	9,7	12,3	2,6	2,9	2,10	2,06
800	8,3	11,1	2,3	2,8	2,88	4,10
1000	7,9	10,4	2,1	2,1	2,76	3,17
1250	9,7	12,4	2,0	2,0	-	-
1600	10,8	15,3	2,5	2,8	-	-
2000	14,6	17,6	1,5	1,9	-	-
2500	19,6	24,1	2,2	2,1	-	-
3150	24,7	29,3	1,8	2,1	-	-
4000	21,1	25,9	1,7	1,9	-	-
5000	22,2	27,1	2,0	1,4	-	-

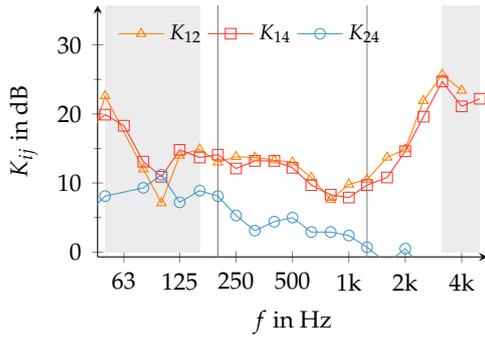
(c) Übertragungsweg ② ↔ ④

f	K_{24}	$\overline{D_{v,24}}$	$\eta_{tot,2}$	$\eta_{tot,4}$	M_2	M_4
Hz	dB	dB	$\cdot 10^{-2}$	$\cdot 10^{-2}$	-	-
50	8.1	2,8	1,7	1,9	0,04	0,05
63	NaN	15,4	NaN	2,1	NaN	0,02
80	9,3	6,0	3,0	1,7	0,22	0,12
100	11,2	8,2	2,2	2,1	0,34	0,31
125	7.2	4,3	1,9	2,1	0,10	0,17
160	8,9	6,2	1,8	1,9	0,27	0,27
200	8,1	5,7	1,7	1,8	0,43	0,39
250	5,3	3,5	1,6	2,1	0,40	0,57
315	3.1	2,1	1,9	2,1	0,69	0,62
400	4,4	4,2	2,2	2,0	0,87	0,64
500	5,0	5,8	2,4	2,3	1,25	1,68
630	2,9	4,5	2,4	2,6	2,03	2,10
800	2,9	4,8	2,5	2,3	3,06	2,88
1000	2,4	4,4	2,3	2,1	2,89	2,76
1250	0.7	3,5	2,7	2,0	-	-
1600	-1.6	1,6	2,1	2,5	-	-
2000	0.5	3,3	2,2	1,5	-	-
2500	-2.5	1,0	1,7	2,2	-	-
3150	-2.8	1,4	2,3	1,8	-	-
4000	-1,0	3,6	2,3	1,7	-	-
5000	NaN	3,9	NaN	2,0	-	-

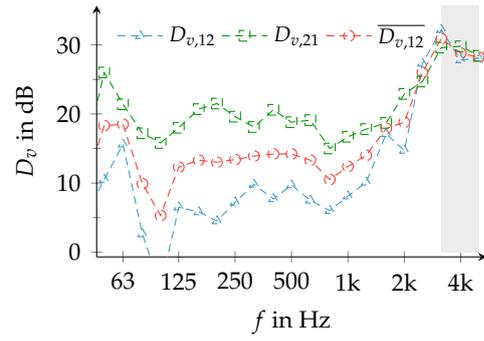
(d) Stoßabbildung



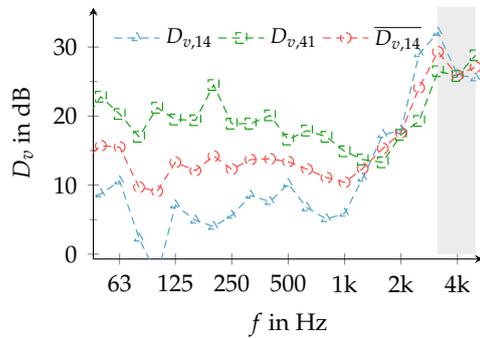
F.3 Stoßfuge S12 mit verschraubter Stahlkonsole und Elastomer



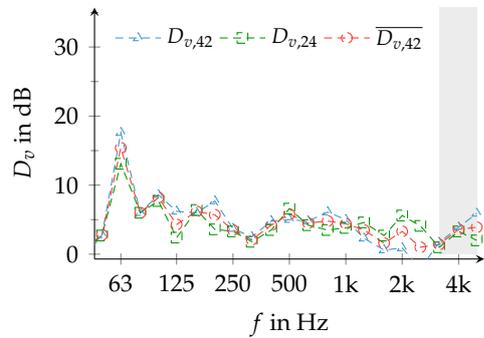
(a) Stößstellendämm-Maße;
Einzahlangaben:
 $\bar{K}_{12} = 11.7\text{dB}$; $\bar{K}_{14} = 11.2\text{dB}$; $\bar{K}_{24} = 3.9\text{dB}$



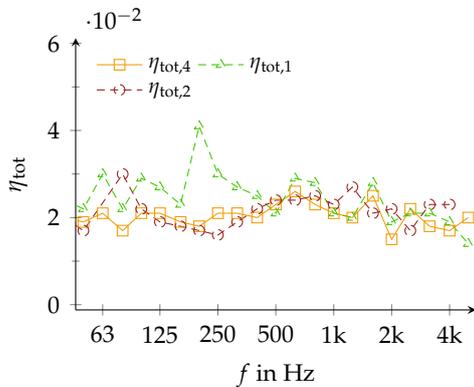
(b) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ②



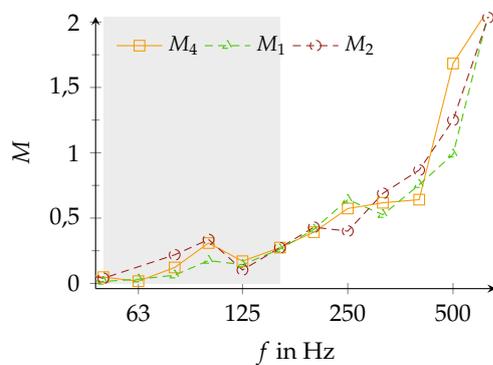
(c) Schnellepegeldifferenzen ① ↔ ④



(d) Schnellepegeldifferenzen ② ↔ ④



(e) Median der Gesamt-Verlustfaktoren der drei Bauteile



(f) Modaler Überlappungsfaktor der drei Bauteile. Im grauen Bereich $M < 0,25$

Abbildung 97 Stößstellendämm-Maße K_{ij} , Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$, Gesamtverlustfaktoren $\eta_{tot,i}$ und die modalen Überlappungsfaktoren M_i der Bauteile am durchlaufenden T-STOSS S12. Weiter Infos in Tab. 58. Im grau hinterlegten Bereich liegt ein geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vor. Die Genauigkeit der K_{ij} für $M < 0,25$ ist sehr gering.

Danksagung

Die IGF-Vorhaben 17328 N/1 und 18724 N der Forschungsvereinigung internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH) wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Das Forschungsprojekt wurde in beratender Funktion durch eine projektbegleitende Arbeitsgruppe betreut. Den Mitgliedern des Beratergremiums gilt besonderer Dank:

Herr Wittenberg	AUTODESK GMBH	München
Herr Gücker	BERLEBURGER SCHAUMSTOFFWERKE BSW GMBH	Bad Berleburg
Herr Sleik	BINDERHOLZ BAUSYSTEME	Fügen
Herr Abt	CADWORK INFORMATIK STUTTGART	Sindelfingen
Herr Schmitz	CALENBERG INGENIEURE	Salzhemmendorf
Herr Sponfeldner	FERMACELL GMBH	Bad Grund
Herr Reichelt	GETZNER WERKSTOFF GMBH	Bürs
Herr Wiederin	GETZNER WERKSTOFF GMBH	Bürs
Herr Diebold	HOLZFORSCHUNG MÜNCHEN	München
Herr Huber	HUBER & SOHN GMBH & CO. KG	Bachmehring
Herr Peteratzinger	HUBER & SOHN GMBH & CO. KG	Bachmehring
Herr Amorth	MERK TIMBER GMBH	Aichach
Prof. Dr. Grimminger	KONBAU GMBH	Butzbach
Herr Schläpfer	LIGNATUR AG	Waldstatt
Herr Eckert	LIGNOTREND	Weilheim-Bannholz
Herr Rombach	ROMBACH BAUHOLZ+ABBUND GMBH	Oberharmersbach
Herr Koch	SAINT-GOBAIN RIGIPS AUSTRIA GESMBH	Wien
Prof. Dr.-Ing. Katz	SOFISTIK AG	Oberschleissheim
Herr Riesterer	STEIGER&RIESTERER GMBH	Staufen

Des Weiteren gilt auch folgenden Industriepartnern dank, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen des Projektes beigetragen haben:

Herr Blanchet	ESI GROUP	D-63263 Neu-Isenberg
Herr Simon	MÜLLER BBM GMBH	D-82152 Planegg

Literatur

- [1] DIN EN ISO 140-11:2005-08. *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (clone): Teil 11: Messung der Trittschallminderung durch Deckenauflagen auf leichten Bezugsdecken in Prüfständen.*
- [2] DIN EN ISO 10140-3:2015-11. *Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Teil 3: Messung der Trittschalldämmung.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.
- [3] DIN 52210-1:1984-08. *Bauakustische Prüfungen: Teil 1: Luft- und Trittschalldämmung - Meßverfahren: zurückgezogen.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.
- [4] DIN EN ISO 10848-1:2006-08. *Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen.*
- [5] DIN EN 12354-1:2000-12. *Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen.*
- [6] E DIN EN ISO 12354-1:2016-03. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen.*
- [7] *Vier- und achtgeschossige Wohn- und Bürogebäude in Massivholzbauweise. Standort Bad Aibling, Bauherr B&O Wohnungswirtschaft GmbH, Planung Architekturbüro Schankula und bauart Konstruktions GmbH, schalltechnische Begleitung ift Rosenheim.*
- [8] Rabold, A. „Trittschalldämmung richtig bewerten“. In: *HBS: Schall & Akustik.* Hrsg. von Forum Holzbau. 2011.
- [9] Châteauvieux-Hellwig, C. u. a. „Anwendung zur SEA basierten Berechnung nach EN 12354 für Massivholzelemente“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA.* (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen, 2016.
- [10] Hveem, S. u. a. *Low-frequency footfall noise in multi-storey timber frame buildings: NKB Committee and Work Reports.* 1996.
- [11] Jeon, J. Y., Jeong, J.-H. und Ando, Y. „Objective and Subjective Evaluation of Floor Impact Noise“. In: *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment* 2.1 (2002), S. 20–28.
- [12] Warnock, A. C. C. *Impact sound rating of floor toppings.* Hrsg. von National Research Council Canada. 2000.
- [13] Scholl, W. „Das Normtrittschallhammerwerk muß laufen lernen!“ In: *DAGA.* Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2001.
- [14] Burkhart, C. „Tieffrequenter Trittschall - Messergebnisse, Mögliche Ursachen“. In: *DAGA.* Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2002.

Literatur

- [15] Rasmussen, B. und Rindel, J. H. „Sound insulation of dwellings – Legal requirements in Europe and subjective evaluation of acoustical comfort“. In: CFA/DAGA. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2003, S. 118–121.
- [16] Kühn, B. und Blickle, R. *Berechnung der Gehgeräusche-Immission und Trittschalldämmung von Geschossdecken aus Holz im Frequenzbereich von 16 Hz bis 200 Hz*. 2004.
- [17] Lang, J. *Schallschutz im Wohnungsbau: Endbericht*. Hrsg. von TU Wien. 2006.
- [18] Rabold, A. „Schalltechnische Lösungen für Massivholzelemente in der Geschossbauweise“. In: *EBH*. Hrsg. von Forum Holzbau. 2011.
- [19] Rabold, A., Schanda, U. und Hessinger, J. „Korrelation zwischen Geher und Norm-Hammerwerk bei der Trittschallübertragung“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2011.
- [20] Jean, P. und Rondeau, Jean - Francois. „A simple decoupled modal calculation of sound transmission between volumes“. In: *Acta Acustica united with Acustica* 88 (2002), S. 924–933.
- [21] Gagliardini, L., Roland, J. und Guyader, J.-L. „The use of a functional basis to calculate acoustic transmission between rooms“. In: *Journal of Sound and Vibration* 145.3 (1991), S. 457–478. ISSN: 0022460X.
- [22] Petyt, M. und Lim, S. P. „Finite element analysis of the noise inside a mechanically excited cylinder“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 13 (1978), S. 109–122.
- [23] Goransson, J. P. E. und Davidsson, C. F. „A three dimensional infinite element for wave propagation“. In: *Journal of Sound and Vibration* 115.3 (1987), S. 556–559. ISSN: 0022460X.
- [24] Dhainaut, M. „Finite element procedures for fluid-structure interactions in acoustics“. Dissertation. University of Science and Technology Trondheim, 1996.
- [25] Ackermann, L. „Simulation der Schalltransmission durch Wände“. Dissertation. TU Braunschweig, 2001.
- [26] Davidsson, P. „Structure-acoustic analysis; finite element modelling and reduction methods“. Dissertation. Lund Institute of Technology, 2004.
- [27] Rabold, A., Bacher, S. und Hessinger, J. *Abschlussbericht: Holzbalkendecken in der Altbausanierung*. Hrsg. von ift Rosenheim. 2008.
- [28] Rabold, A. u. a. „Optimization of lightweight floors in the low frequency range with a FEM based prediction model“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2009.
- [29] Rabold, A. und Rank, E. *Anwendung der Finiten Elemente Methode auf die Trittschallberechnung: Teilbericht zum Forschungsvorhaben: Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen von Holzdecken und Deckenauflage zur Entwicklung neuartiger Schallschutzmaßnahmen*. Hrsg. von Lehrstuhl für Computation in Engineering, Technische Universität München. 2009.

- [30] Rabold, A. „Anwendung der Finite Element Methode auf die Trittschallberechnung“. Dissertation. Technische Universität München, 2010.
- [31] Kohrmann, M. „Numerical Methods for the Vibro-Acoustic Assessment of Timber Floor Constructions“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2017.
- [32] Mecking, S. „Material- und Bauteilsammlung im Holzmassivbau“. Projektarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2014.
- [33] Timpte, A. „Stoßstellen im Massivholzbau: Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose“. Masterarbeit. Berlin: Technische Universität Berlin und Hochschule Rosenheim, 2016.
- [34] Timpte, A. u. a. „Stoßstellendämm-Maße von Brettsperrholzkonstruktionen“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany, 2017. ISBN: 978-3-939296-12-6.
- [35] Timpte, A. u. a. „Vibration reduction indices of CLT junctions“. In: *ICSV*. (23.–27. Juli 2017). Hrsg. von The International Institute of Acoustics and Vibration. London, UK, 2017.
- [36] Andrae, M. „Experimentelle Untersuchung an massiven Holzdecken-Elementen zur Ermittlung von Materialkennwerten“. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2014.
- [37] Mecking, S. „Bauteilstöße im Holzmassivbau - Messtechnische Bestimmung von Eingangsgrößen für eine Schallschutzprognose“. Masterarbeit. Hochschule Rosenheim, 2014.
- [38] Haut, S. „Experimentelle Untersuchungen zur Schallabstrahlung von orthotropen Platten“. Masterarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2016.
- [39] Kruse, T. „Messtechnische Untersuchung zur Stoßstellendämmung und Ausbreitungsdämpfung von Brettsperrholzbauteilen“. Bachelorarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2015.
- [40] Kruse, T. und Schanda, U. „Ausbreitungsdämpfung von Körperschall in plattenförmigen Strukturen“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen, 2016.
- [41] Kruse, T. „Messung und Analyse des Schwingungsverhaltens von gekoppelten Bauteilen aus Brettsperrholz“. Masterarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2016.
- [42] Haut, S., Mecking, S. und Schanda, U. „Experimentelle Bestimmung des Abstrahlgrades und des inneren Verlustfaktors orthotroper Platten“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany, 2017. ISBN: 978-3-939296-12-6.
- [43] Scholl, W. und Bietz, H. *Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109: Abschlussbericht*. Hrsg. von PTB Braunschweig. 2004.

Literatur

- [44] Holtz, F. u. a. *Ergänzende Deckenmessungen zum laufenden Vorhaben: Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109: Abschlussbericht*. Hrsg. von Labor für Schall- und Wärmemesstechnik. 2005.
- [45] Dolezal, F., Bednar, T. und Teibinger, M. „Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen: Teil 2: Einfluss von Befestigungsmitteln auf die Verbesserung durch den Einbau elastischer Zwischenschichten“. In: *Bauphysik* 5 (2008), S. 314–319.
- [46] Dolezal, F. „Körperschall-Längsleitung von Massivholzkonstruktionen“. In: *Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung und Praxis*. 2008, S. 153–158.
- [47] Furrer, B. u. a. *Schallschutz im Holzbau*. Hrsg. von Kooperationsprojekt Lignum Holzwirtschaft Schweiz Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau. 2008.
- [48] Schumacher, R., Pütz, M. und Saß, B. *Grundlagenuntersuchung zum Stoßstellendämmmaß im Holzbau: Abschlußbericht*. Hrsg. von Forschungsbericht des ift Rosenheim. 2001.
- [49] Schumacher, R., Pütz, M. und Saß, B. *Schalllängsdämmung im Mehrgeschoss-Holzbau: DGfH-Forschungsbericht*. Hrsg. von ift Rosenheim. 2002.
- [50] Schramm, M. „Vertikale Flankenübertragung bei Holzmassivdecken“. Diplomarbeit. Hochschule Rosenheim, 2008.
- [51] Schoenwald, S. u. a. „Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems“. In: *Internoise*. 2013.
- [52] Kouyoumji, J.-L., Borello, G. und Thibier, E. „Sound transmission loss of timber constructions, measurements and modeling using SEA-Wood, a Statistical Energy Analysis software for light weight constructions“. In: *Internoise*. 2008.
- [53] Winter, C. u. a. „Modelling the Sound Transmission across Junctions of Building Components by Energy Influence Coefficients“. In: *EURODYN*. Hrsg. von European Association for Structural Dynamics. Porto, Portugal, 2014.
- [54] Mecking, S., Kruse, T. und Schanda, U. „Measurement and calculation of sound transmission across junctions of solid timber building elements“. In: *Euronoise*. (31. Mai–3. Juni 2015). Hrsg. von European Acoustics Association. Maastricht, Netherlands, 2015.
- [55] Mecking, S., Kruse, T. und Schanda, U. „Messung und Berechnung der Körperschallübertragung am Bauteilstoß von Massivholzelementen“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2015.
- [56] Brummer, B. „Rest-Interface für ein Bauteilinformationssystem zur Anbindung an Software zur Gebäudekonstruktion“. Bachelorarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2015.
- [57] Rabold, A., Châteauvieux-Hellwig, C. und Hessinger, J. „Flanking transmission at impact sound excitation - Calculation according to DIN 4109 and prEN ISO 12354-2“. In: *Internoise*. Hamburg, Germany, 2016. ISBN: 978-3-939296-11-9.

- [58] Châteauevieux-Hellwig, C. u. a. „Schallschutzprognose im Holzmassivbau“. In: *Forschungsbericht*. Hrsg. von Hochschule Rosenheim. 2016. URL: <https://www.fh-rosenheim.de/forschungsbericht2016.html>.
- [59] Châteauevieux-Hellwig, C., Rabold, A. und Schramm, M. *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung: Teilprojekt 4: Bauteilprüfung, FEM Modellierung und Validierung: Forschungsbericht*. Hrsg. von ift Rosenheim. 2017.
- [60] Scheibengraber, M. „Simulative Untersuchung der Variabilität des Körperschallfeldes im Holzmassivbau unter Anwendung der Ridge Regression und dem Least Absolute Shrinkage Operator (Lasso) als restringierte Formen des linearen Modells“. Bachelorarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2016.
- [61] Mecking, S. u. a. „Energiebestimmung an Brettsperrholzbauteilen im Holzmassivbau“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany, 2017. ISBN: 978-3-939296-12-6.
- [62] Mecking, S. u. a. „Experimentally based statistical analysis of the vibrational energy of CLT building elements“. In: *ICSV*. (23.–27. Juli 2017). Hrsg. von The International Institute of Acoustics and Vibration. London, UK, 2017.
- [63] Winter, C., Buchschmid, M. und Müller, G. „Beschreibung des Energieflusses über Stoßstellen leichter Massivholzkonstruktionen im mittleren und höheren Frequenzbereich“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany, 2017. ISBN: 978-3-939296-12-6.
- [64] Nightingale, T. R. T. und Bosmans, I. „Expressions for First-Order Flanking Paths in Homogeneous Isotropic and Lightly Damped Buildings“. In: *Acta Acustica united with Acustica* 89 (2003), S. 110–122.
- [65] Hopkins, C. *Sound Insulation*. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 978-0-7506-6526-1.
- [66] Craik, R. J. M. *Sound transmission through buildings: Using Statistical Energy Analysis*. Aldershot, England und Brookfield, Vt., USA: Gower, 1996. ISBN: 0-566-07572-5.
- [67] Kihlman, T. *Transmission of Structure-Borne Sound in Buildings: A theoretical and experimental investigation*. Hrsg. von National Swedish Institute for Building Research. Stockholm, 1967.
- [68] Lyon, R. H. *Statistical energy analysis of dynamical systems - Theory and applications*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975. ISBN: 9780262621755.
- [69] Lyon, R. H. und DeJong, R. G. *Theory and application of statistical energy analysis*. 2nd ed. Newton, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN: 978-0-7506-9111-6.
- [70] Craik, R. J. M. „The prediction of sound transmission through buildings using statistical energy analysis“. In: *Journal of Sound and Vibration* 82.4 (1982), S. 505–516. ISSN: 0022460X.
- [71] Meier, A. „Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand“. Dissertation. RWTH Aachen, 2000.

Literatur

- [72] Rindel, J. H. „Dispersion and absorption of structure-borne sound in acoustically thick plates“. In: *Applied Acoustics* 41.2 (1994), S. 97–111. DOI: 10.1016/0003-682X(94)90063-9.
- [73] Heckl, M. „Measurements of Absorption Coefficients on Plates“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.6 (1962), S. 803–808. ISSN: 00014966. DOI: 10.1121/1.1918199.
- [74] Hopkins, C. „Measurement of the Vibration Reduction Index, Kij on Free-Standing Masonry Wall Constructions“. In: *Building Acoustics* 6.3 (1999), S. 235–257. DOI: 10.1260/1351010991501437.
- [75] Clarkson, B. L. und Pope, R. J. „Experimental determination of modal densities and loss factors of flat plates and cylinders“. In: *Journal of Sound and Vibration* 77.4 (1981), S. 535–549. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1016/S0022-460X(81)80049-1.
- [76] Cremer, L. und Heckl, M. A. *Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1967. ISBN: 978-3-642-49922-7.
- [77] Heckl, M. A. „Untersuchungen an orthotropen Platten: Mitteilung aus dem Institut für Technische Akustik der TU Berlin-Charlottenburg“. In: *Acustica* 10 (1960), S. 109–115.
- [78] Gösele, K. „Schallabstrahlung von Platten, die zu Biegeschwingungen angeregt sind“. In: *Acustica* 3 (1953), S. 243–248.
- [79] Timmel, R. „Der Abstrahlgrad rechteckiger, dünner, homogener Platten in der unendlich großen Schallwand“. In: *Acustica* 73 (1991), S. 1–11.
- [80] Maidanik, G. „Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.6 (1962), S. 809–826. ISSN: 00014966.
- [81] Leppington, F. G., Broadbent, E. G. und Heron, K. H. „The acoustic radiation efficiency of rectangular panels“. In: *Proceedings of the Royal Society A* (1982). ISSN: 1364-5021.
- [82] E DIN EN ISO 12354-1:2016-03. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen: Entwurf*.
- [83] Heckl, M. A. „Schallabstrahlung von Platten bei punktförmiger Anregung: Mitteilung aus dem Institut für Technische Akustik der TU Berlin-Charlottenburg“. In: *Acustica* 9 (1959), S. 371–380.
- [84] Anderson, J. S. und Bratos-Anderson, M. „Radiation Efficiency of Rectangular Orthotropic Plates“. In: *Acta Acustica united with Acustica* 91 (2005), S. 61–76.
- [85] ESI Group. *VA One 2016: Microsoft Enterprise Edition (build 9200), 64-bit*. Version 1.11.0.9. 2016. URL: www.esi-group.com.
- [86] Paolini, A. u. a. „Parameteridentifikation von Brettsperrholz-Elementen mittels Bayesscher Optimierung“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2016.

- [87] Scheidemantel, E. „Modellierungsprozess von Stoßstellen im Holzbau mittels Statistischer Energieanalyse“. Diplomarbeit. Hochschule Rosenheim, 2013.
- [88] Winter, C. u. a. „Ein hybrider FEM/SEA Ansatz zur Prognose der Schallübertragung an Bauteilstößen“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2014.
- [89] Korte, S. „Untersuchung der hochfrequenten akustischen Transmission einer Kfz-Bodengruppe mittels Statistischer Energieanalyse“. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2005.
- [90] Buchschmid, M., Müller, G. und Kropp, A. „Closing the Mid-Frequency-Gap: Acoustic BIW design using a hybrid SEA-FEA approach“. In: *ICSV*. Hrsg. von The International Institute of Acoustics and Vibration. Bd. 16. 2009. URL: http://www.iiav.org/archives_icsv/2009_icsv16/content/technical_papers/70.pdf.
- [91] Mace, B. R. und Shorter, P. J. „Energy flow models from Finite Element Analysis“. In: *Journal of Sound and Vibration* 233.3 (2000), S. 369–389. ISSN: 0022460X. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2812.
- [92] Winter, C., Buchschmid, M. und Müller, G. *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung: Teilprojekt 5: Frequenzbereichsabhängige Modellbildung zur Prognose der Körperschallausbreitung und der Schallabstrahlung in Holzbauten: Forschungsbericht (In Bearbeitung)*. Hrsg. von Technische Universität München. 2017.
- [93] Winter, C., Buchschmid, M. und Müller, G. „Modeling of orthotropic plates out of cross laminated timber in the mid and high frequency range“. In: *X International Conference on Structural Dynamics*. Rom, 2017.
- [94] DIN EN ISO 12354-2:2016-03. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen*.
- [95] DIN 4109-1:2016-07. *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderung*.
- [96] Gerretsen, E. „Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings“. In: *Applied Acoustics* 19 (1986), S. 245–264.
- [97] Gerretsen, E. „European developments in prediction models for building acoustics“. In: *Acta Acustica* 2 (1994), S. 205–214.
- [98] Metzen, H. A. „Accuracy of CEN-prediction models applied to German building situations.“ In: *Journal of Building Acoustics* (1999).
- [99] Gerretsen, E. „Development and Use of Prediction Models in Building Acoustics as in EN 12354“. In: *Forum Acusticum*. Hrsg. von European Acoustics Association. 2005.
- [100] Gerretsen, E. „Acoustic performance of dwellings“. In: *COST FP0702 Final Conference*. 2012.
- [101] Fischer, H.-M., Kohler, K. und Schneider, M. *Schallschutznachweis für die Trittschalldämmung auf der Basis der DIN EN 12354-2*. Hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag. 2006.

Literatur

- [102] Mecking, S. „Messung von Körperschall-Nachhallzeit an Holzbalkendecken“. Diplomarbeit. Hochschule Rosenheim, 2012.
- [103] Gösele, K. „Trittschall-Übertragung bei Holzbalkendecken über die Wände“. In: *Bauphysik* 25.5 (2003), S. 271–278.
- [104] Rabold, A. u. a. „Schalldämmung von Haustrennwänden in Holzbauweise“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2005.
- [105] Crispin, C., De Geetere, L. und Ingelaere, B. „Some considerations about the “element attenuation” (Project AH+, Part 1)“. In: *Internoise*. 2013.
- [106] Crispin, C. und Ingelaere, B. „Laboratory measurements of the new quantities necessary for the flanking transmission prediction in lightweight constructions“. In: *Internoise*. 2013.
- [107] Teibinger, M., Dolezal, F. und Matzinger, I. *Deckenkonstruktionen für den mehrgeschoßigen Holzbau: Schall- und Brandschutz: Detailkatalog*. 11, 1. Aufl. Wien: Holzforschung Austria, 2009.
- [108] Huissel, L. „Ausarbeitung eines aktuellen Bauteilkataloges für den Schallschutz von Holzdecken zur Verwendung in der Fachliteratur und Normung“. Bachelorarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2015. URL: http://www.fh-rosenheim.de/fileadmin/user_upload/Fakultaeten_und_Abteilungen/Fakultaet_ANG/Laboratorien/Schallmesstechnik/Bachelorarbeit_Lukas_Huissel.pdf.
- [109] Kohrmann, M. u. a. *Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken und zur Bewertung und Dimensionierung von angepassten Schwingungsschutzsystemen: Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben “VibWood”*. 2014.
- [110] prEN 12354-1:2013-12 2nd draft. *Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements: Part 1: Airborne sound insulation between rooms*.
- [111] Schroeder, M. R. „New method of measuring reverberation time“. In: *Journal of Sound and Vibration* 4972 (1965), S. 409–412. ISSN: 0022460X.
- [112] Novak, R. A. „Radiation from partially excited plates“. In: *Acta Acustica united with Acustica* Band: 3 ; Seiten: 560-567 (1995).
- [113] Gülzow, A. „Zerstörungsfreie Bestimmung der Biegesteifigkeit von Brettsperrholzplatten“. Dissertation. ETH Zürich, 2008.
- [114] Greim, A. „Identifikation der Materialparameter einer Brettsperrholzdecke durch Kalibrierung eines numerischen Modells mit gemessenen Eigenfrequenzen“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [115] Deutsche Institut für Bautechnik, Hrsg. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung_Z-9.1-501: Anragsteller: Finnforest Merk GmbH*. 2009. (Besucht am 13.01.2013).
- [116] Metsä Wood Merk GmbH, Hrsg. *Leno: Brettsperrholz: Broschüre*. Aichach, 2012. (Besucht am 30.12.2012).
- [117] Niemz, P. *Physik des Holzes*. 1993.

- [118] Finnforest Merk GmbH, Hrsg. *Leno-Massivbau: Lenotec: Material + Konstruktion*. 2004.
- [119] Dunky, M. und Niemz, P. *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. ISBN: 3540429808.
- [120] Mecking, S. u. a. „Methodenvergleich zur Bestimmung von Verlustfaktoren von Massivholzelementen“. In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2014.
- [121] Crocker, M. J. und Price, A. J. „Sound transmission using statistical energy analysis“. In: *Journal of Sound and Vibration* 9.3 (1969), S. 469–486. ISSN: 0022460X.
- [122] Nusser, B., Meistring, P. und Schanda, U. „Innere Verlustfaktoren ausgewählter Leichtbauwerkstoffe und ihre Ermittlung“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Stuttgart, 2007.
- [123] E DIN EN ISO 10848-1:2016-10. *Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von Gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau: Teil 1: Rahmendokument*.
- [124] Schramm, M. „Aspekte zur Wirkungsweise von Helmholtzresonatoren als tieffrequente Trittschallabsorber in Holzdecken“. Masterarbeit. Hochschule Rosenheim, 2010.
- [125] Timppte, A. *Vibration Reduction Indices of Cross Laminated Timber Structures*. 2017. URL: http://www.fh-rosenheim.de/fileadmin/user_upload/Fakultaeten_und_Abteilungen/Fakultaet_ANG/Laboratorien/Schallmesstechnik/Documentation_Kij.pdf.
- [126] Guigou-Carter, C. und Villot, M. „Junction characteristics for predicting acoustic performance of lightweight wood-based buildings“. In: *Internoise*. San Francisco, USA, 2015.
- [127] Rabold, A. und Schramm, M. *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 4: Bauteilprüfung, FEM-Modellierung und Validierung*. Hrsg. von ift Rosenheim. 2015.
- [128] DIN EN ISO 10848-4:2010-12. *Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen: Teil 4: Anwendung auf Stoßstellen mit mindestens einem schweren Bauteil*.
- [129] Mecking, S. u. a. „Körperschallfelder in Brettsperrholzbauteilen des Holzmassivbaus“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen, 2016.
- [130] Rabold, A., Châteauevieux-Hellwig, C. und Mecking, S. „Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109“. In: *Forum Holzbau HBS*. (22.–23. März 2017). Bad Wörishofen, Germany, 2017.
- [131] Mecking, S. u. a. *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung: Teilprojekt 3: Parameterentwicklung und SEA-Modellierung: Forschungsbericht*. 2017. URL: <http://www.fh-rosenheim.de/fileadmin/>

Literatur

- user_upload/Fakultaeten_und_Abteilungen/Fakultaet_ANG/Laboratorien/Schallmesstechnik/2017-06-30-HSRo-Forschungsbericht-Vibroakustik-18724N.pdf.
- [132] Mecking, S. u. a. *Vibroakustik im Planungsprozess von Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung: (in Bearbeitung)*. Hrsg. von Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. 2017. URL: <https://ivth.org/de/publikationen/aif-berichte>.
- [133] Rabold, A., Kollmannsberger, S. und Rank, E. „Integrated Vibro-Acoustical Design Optimization of Multi-storey Buildings“. In: *AIA-DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2013.
- [134] Winter, C. u. a. „A Hybrid FEM/SEA Approach to Predict Sound Transmission via Component Connections“. In: *GACM*. Hamburg, 2013.
- [135] Weise, Y. „Anwendung eines SEA-basierten Berechnungs-programms für die Luft- und Trittschalldämmung im Massivholzbau auf Grundlage eines Bauwerkinformationsmodells“. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2014.
- [136] Haut, S. „Ermittlung vibroakustischer Kenndaten für Brettspertholz anhand von Parameterstudien mit VAOne“. Projektarbeit. Rosenheim: Hochschule Rosenheim, 2015.
- [137] Nusser, B. „Entwicklung bauakustisch optimierter Trennwände aus Leichtbauplatten auf Basis gewonnener Materialkennwerte“. Masterarbeit. Hochschule Rosenheim, 2007.
- [138] Fermacell GmbH, Hrsg. *Technisches Merkblatt_Gipsfaser-Platten*. 2010. (Besucht am 12. 01. 2013).
- [139] Rigips GmbH, Hrsg. *Produkt-Datenblatt_Bauplatte_RB_12_5*. Düsseldorf, 2009. (Besucht am 01. 03. 2013).
- [140] Neuhaus, H. *Lehrbuch des Ingenieurholzbaus*. Stuttgart: Teubner, 1994. ISBN: 3519052482.
- [141] Hearmon, R. F. S. *The elasticity of wood and plywood*. Bd. 7. Special report. London: H.M.S.O., 1948.
- [142] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung_Z-9.1-100: Kerto Q / S: Auftraggeber: Finnforest Oyj Kerto Business Unit*. 2011. (Besucht am 26. 02. 2013).
- [143] Kollmann, F. F. und Côté, W. A. *Principles of Wood Science and Technology: Solid wood*. Bd. 1. Principles of wood science and technology. Berlin: Springer, 1968.
- [144] Märki, C., Niemz, P. und Mannes, D. „Vergleichende Untersuchungen zu ausgewählten mechanischen Eigenschaften von Eibe und Fichte“. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 156 (2005), S. 85–91. (Besucht am 04. 04. 2013).
- [145] Kollmann, F. G. und Krech, H. „Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung: Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 18.2 (1960), S. 41–54.

- [146] Augustin, M. *Abschlussbericht XXL-Wood: Projekt: Materialkenngrößen als Grundlage für innovative Verarbeitungstechnologien und Produkte zur wirtschaftlich nachhaltigen Nutzung der österreichischen Nadelstarkholzreserven*. Hrsg. von Technische Universität Graz - Institut für Holzbau und Holztechnologie. Graz, 2004.
- [147] Schöpfer, F. *Messergebnisse aus Laufzeitmessungen an Holz- und Holzwerkstoffen: unveröffentlicht*. 2013.
- [148] Erfurt, W. „Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit“. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, 2002.

