

# **BAM-BERICHT Nr. 37**

DER BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Die stoßartige Beanspruchung leichter,  
nichtragender Bauteile durch einen  
mit der Schulter gegenprallenden  
Menschen, Vorschlag für ein Prüfverfahren**

von Dr.-Ing. Werner Struck

X, 85 Seiten mit 127 Abbildungen, 27 Tabellen und Diagrammen im Anhang

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)  
1 Berlin 45, Unter den Eichen 87  
Telefon (030) 8104-1  
Telex 01-83 261 bamb d

Zur Beurteilung des Widerstandes leichter, nichttragender Bauteile gegenüber der stoßartigen Beanspruchung durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen wurde ein Prüfverfahren entwickelt. Die Ergebnisse aus Versuchen mit Schulterstößen gegen Wandausschnitte leichter Trennwände bilden die Grundlage dazu. Für die Aufprallstelle "Schulter" konnte daraus eine "Federkonstante" in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit bestimmt werden. So kann der mit einer Schulter gegenprallende menschliche Körper durch ein Masse-Feder-System mit dieser Federkonstanten simuliert werden. Dabei stimmen der Maximalwert der Stoßkraft zwischen Schulter und Bauteil und der Maximalwert der Durchbiegung des Bauteils sowie die Zeitdauern von Stoßbeginn bis zum Erreichen dieser Maximalwerte mit der Wirklichkeit überein. Eine vergleichende Auswertung von Stoßversuchen mit Sandsackpendel zeigt, daß mit solchen Stoßkörpern ohne andere Hilfsmittel der Widerstand leichter Bauteile gegenüber Stößen durch gegenprallende menschliche Körper weder absolut noch vergleichend richtig beurteilt werden kann.

Mitarbeiter des Laboratoriums 2.24 "Grundlagen und Sonderprobleme" der Fachgruppe 2.2 "Tragfähigkeit der Baukonstruktionen" in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, führten die Versuche durch.

Das Vorhaben wurde finanziell unterstützt aus Mitteln des ERP-Sondervermögens.

Die Firma RIGIPS Vertriebs-GmbH stellte die Wandausschnitte zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verzeichnis der Bilder	V
Bezeichnungen	IX
0. Zusammenfassung	1
1. Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Problemstellung	3
2. Versuche mit gegenstoßenden Menschen (Schulterstoß)	4
2.1 Versuchsbeschreibung	4
2.1.1 Versuchsablauf	4
2.1.2 Versuchseinrichtung	5
2.1.3 Stoßender Mensch	6
2.1.4 Gestoßene Wandausschnitte	6
2.2 Versuchsergebnisse	8
2.3 Aufbereitung der Versuchsergebnisse	16
2.4 Auswertung der Versuchsergebnisse	22
2.5 Deutung der ausgewerteten Ergebnisse	32
3. Vorschlag für ein Prüfverfahren	32
3.1 Grundgedanken	32
3.2 Beschreibung des Prüfverfahrens	33
3.2.1 Probekörper und Stoßstelle	33
3.2.2 Bestimmung der Eigenschwingungsdauer	33
3.2.3 Ermittlung der Versagensenergie (Bruchenergie)	33
3.2.4 Auswertung der Versuche	34
3.2.5 Hinweise zur Beurteilung der Prüfergebnisse	35
3.2.6 Schema für das Prüfverfahren	37
3.3 Orientierungsversuche zum Prüfverfahren	38
3.3.1 Probekörper	39
3.3.2 Versuchseinrichtung und -durchführung	39
3.3.3 Versuchsergebnisse	39
3.3.4 Auswertung der Ergebnisse	43
3.4 Kontrollversuche mit verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten	46
3.4.1 Zweck der Versuche	46
3.4.2 Versuchsbeschreibung	46
3.4.3 Ergebnisse	47
4. Hinweise zum Sandsackpendel als Prüfkörper	48
4.1 Vergleich von Sandsack-Stoßversuchen und menschlichen Schulterstößen	48
4.2 Folgerungen für Prüfverfahren	50
Anhang I : Tabellen und Diagramme zum Masse-Feder-Masse-Feder-Schwinger mit elastischer bzw. elasto-plastischer Federkennlinie von Dipl. -Ing. E. Limberger	53
Anhang II : Einfluß der Stoßstellenlage auf die Größe der erforderlichen Energieaufnahme $E_A$	81
Anhang III : Einfluß der Vereinfachung der Federkennlinie des gestoßenen Bauteils durch Annahme einer linear elastischen/ideal plastischen Form auf den Wert der erforderlichen Energieaufnahme	85

## Verzeichnis der Bilder

	Seite		Seite
Bild 2.1.1/1 Ausgangsstellung beim Schulterstoß a) 1. Stoßart      b) 2. Stoßart	4	Bild 2.2/13 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 5 + 6)	11
Bild 2.1.1/2 Beispiel einer Registrierung von a) Schulterweg und -geschwindigkeit sowie von b) Stoßkraft und Stoßstellenweg	5	Bild 2.2/14 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 5 + 6)	11
Bild 2.1.2/1 Einbau des Ausschnittes der Leichtskelettwand (Wand Nr. 7) in den Versuchsstand	5	Bild 2.2/15 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 5 + 6)	11
Bild 2.1.2/2 Gesamtansicht der Versuchseinrichtung	5	Bild 2.2/16 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 5 + 6)	12
Bild 2.1.2/3 Details der Versuchseinrichtung: Kraftmeßdose, Trägerfrequenzmeßverstärker, Speicheroszillograph	6	Bild 2.2/17 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 8)	12
Bild 2.1.2/4 Details der Versuchseinrichtung: Weggeber in Wandausschnittmitte, Kanthölzer am Aufspannfeld und am Träger für unteren und oberen Wandanschluß	6	Bild 2.2/18 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 8)	12
Bild 2.1.2/5 Details der Versuchseinrichtung: Elektrooptischer Weggeber, Integrator-Differenziergerät, Speicheroszillograph	6	Bild 2.2/19 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 8)	12
Bild 2.1.4/1 Übersicht über die verwendeten Wandausschnitte Abmessungen in m, Höhe aller Wände 3 m (Wand Nr. 1 – 7)	7	Bild 2.2/20 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 8)	13
Bild 2.1.4/2 Übersicht über die verwendeten Wandausschnitte Abmessungen in m, Höhe aller Wände 3 m (Wand Nr. 8 – 11)	7	Bild 2.2/21 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 11)	13
Bild 2.2/1 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 1)	8	Bild 2.2/22 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 11)	13
Bild 2.2/2 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 1)	8	Bild 2.2/23 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 11)	13
Bild 2.2/3 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 1)	8	Bild 2.2/24 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 11)	14
Bild 2.2/4 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 1)	9	Bild 2.2/25 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 10)	14
Bild 2.2/5 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 4)	9	Bild 2.2/26 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 10)	14
Bild 2.2/6 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 4)	9	Bild 2.2/27 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 10)	14
Bild 2.2/7 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 4)	9	Bild 2.2/28 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 10)	15
Bild 2.2/8 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 4)	10	Bild 2.2/29 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 1	15
Bild 2.2/9 Maximaler Weg $x_{2max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 7)	10	Bild 2.2/30 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 4	15
Bild 2.2/10 Maximale Stoßkraft $P_{s max}$ (Wand Nr. 7)	10	Bild 2.2/31 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 7	15
Bild 2.2/11 Zeit $T_{2max}$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand (Wand Nr. 7)	10	Bild 2.2/32 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 5 + 6	15
Bild 2.2/12 Zeit $T_{max}$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft (Wand Nr. 7)	11	Bild 2.2/33 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 8	15

	Seite		Seite
Bild 2.2/34 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 11	16	Bild 2.3/21 Mitwirkende Masse $m_2$ des Wandsimulators (einschließlich Kraftmeßdose) (Wand Nr. 1 – 7)	21
Bild 2.2/35 Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 10	16	Bild 2.3/22 Mitwirkende Masse $m_2$ des Wandsimulators (einschließlich Kraftmeßdose) (Wand Nr. 8 – 11)	21
Bild 2.3/1 Bezogene Zeit $\tau_{2\max} = T_{2\max} \cdot \omega_{e2}$ vom Beginn des Stoßes mit dem Aufprallimpuls $m_1 \cdot v_a$ bis zum Erreichen des maximalen Weges der Masse $m_2$	17	Bild 2.4/1 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 1)	22
Bild 2.3/2 Bezogene Zeit $\tau_{\max} = T_{\max} \cdot \omega_{e2}$ vom Beginn des Stoßes mit dem Aufprallimpuls $m_1 \cdot v_a$ bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft $P_{s\max} = c_1 \cdot x_{\max}$ in der Feder 1	17	Bild 2.4/2 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 1)	22
Bild 2.3/3 Bezogener maximaler Widerstand $K_E = \frac{c_2 \cdot x_{2\max}}{m_1 \cdot v_a \cdot \omega_{e2}}$ in der Feder 2 infolge des Stoßes mit dem Aufprallimpuls $m_1 \cdot v_a$	17	Bild 2.4/3 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 4)	23
Bild 2.3/4 Bezogene maximale Stoßkraft $K_S = \frac{c_1 \cdot x_{\max}}{m_1 \cdot v_a \cdot \omega_{e2}}$ in der Feder 1 infolge des Stoßes mit dem Aufprallimpuls $m_1 \cdot v_a$	17	Bild 2.4/4 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 4)	23
Bild 2.3/5 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 1)	18	Bild 2.4/5 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 7)	23
Bild 2.3/6 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 1)	18	Bild 2.4/6 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 7)	23
Bild 2.3/7 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 4)	18	Bild 2.4/7 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 5 + 6)	24
Bild 2.3/8 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 4)	18	Bild 2.4/8 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 5 + 6)	24
Bild 2.3/9 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 7)	18	Bild 2.4/9 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 8)	24
Bild 2.3/10 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 7)	19	Bild 2.4/10 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 8)	24
Bild 2.3/11 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 5 + 6)	19	Bild 2.4/11 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 11)	25
Bild 2.3/12 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 5 + 6)	19	Bild 2.4/12 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 11)	25
Bild 2.3/13 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 8)	19	Bild 2.4/13 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 10)	25
Bild 2.3/14 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 8)	19	Bild 2.4/14 Auf $m_1$ bezogener maximaler Weg $x_{2\max}$ der Wand an der Stoßstelle (Wand Nr. 10)	25
Bild 2.3/15 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 11)	19	Bild 2.4/15 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s\max}$ (Wand Nr. 1)	26
Bild 2.3/16 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 11)	20	Bild 2.4/16 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s\max}$ (Wand Nr. 1)	26
Bild 2.3/17 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 10)	20	Bild 2.4/17 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s\max}$ (Wand Nr. 4)	26
Bild 2.3/18 Wirkende Masse $m_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 10)	20	Bild 2.4/18 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s\max}$ (Wand Nr. 4)	26
Bild 2.3/19 Federkonstante $c_2$ des Wandsimulators (Wand Nr. 1 – 7)	20		
Bild 2.3/20 Federkonstante $c_2$ des Wandsimulators (Wand Nr. 8–11)	20		

	Seite		Seite
Bild 2.4/19 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 7)	27	Bild 2.5/1 Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators bezogen auf seine wirkende Masse $m_1$ in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit	32
Bild 2.4/20 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 7)	27	Bild 3.2.3/1 Einzelkraft $R$ in Abhängigkeit von der Durchbiegung $f$ an der Kräfteinleitungsstelle	34
Bild 2.4/21 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 5+6)	27	Bild 3.2.5/1 Faktoren $\gamma_v$ zur Berechnung des maßgebenden Verhältnisses Versagensenergie oder Bruchenergie zur erforderlichen Energieaufnahme aus den Zentralwerten der Versuchsergebnisse	36
Bild 2.4/22 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 5 + 6)	27	Bild 3.2.6/1 Schema für das Prüfverfahren „Widerstand der Gesamtkonstruktion gegenüber Schulterstoß“	37
Bild 2.4/23 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 8)	28	Bild 3.3.2/1 Hydraulikzylinder mit Lasteinleitungsplatte und Kraftmeßdose zu Beginn eines Versuches zum Ermitteln der Versagens-(Bruch-)energie	39
Bild 2.4/24 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 8)	28	Bild 3.3.3/1 Einzelkraft $R$ in Abhängigkeit von der Durchbiegung $f$ an der Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung (Wand Nr. 1)	39
Bild 2.4/25 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 11)	28	Bild 3.3.3/2 Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element mit angestauchten Pappwaben als Kernschicht, Wand Nr. 1 a) Zustand der Wand nach Versagen am oberen Auflager, Seite mit eingesteckter Feder aus Spanplattenstreifen b) wie a), jedoch von der Seite ohne Feder	40
Bild 2.4/26 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 11)	28	Bild 3.3.3/3 Einzelkraft $R$ in Abhängigkeit von der Durchbiegung $f$ an der Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung (Wand Nr. 4)	40
Bild 2.4/27 Auf $m_1 \cdot \omega_{e2}$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 10)	29	Bild 3.3.3/4 Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element, Wand Nr. 4 a) Riß in zugbeanspruchter Beplankung in Wandmitte b) Erweiterung des Biegebruches c) Zustand der Wand nach dem Versuch d) wie c), jedoch von der Seite mit der Holzfeder	41
Bild 2.4/28 Auf $m_1$ bezogene maximale Stoßkraft $P_{s \max}$ (Wand Nr. 10)	29	Bild 3.3.3/5 Einzelkraft $R$ in Abhängigkeit von der Durchbiegung $f$ an der Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung (Wand Nr. 7)	41
Bild 2.4/29 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 1)	29	Bild 3.3.3/6 Leichtskelettwand in Ständerbauart, Wand Nr. 7 a) Einbrechen der Beplankung an der Belastungsseite b) Lösen der Beplankung in der Fuge über dem Mittelstiel c) Zustand der Wand nach Versagen durch Ablösen der Beplankung d) Zustand des Mittelstieles nach dem Versuch	42
Bild 2.4/30 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 4)	29	Bild 3.3.3/7 Einzelkraft $R$ in Abhängigkeit von der Durchbiegung $f$ an der Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung (Wand Nr. 5 + 6)	43
Bild 2.4/31 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 7)	30	Bild 3.3.3/8 Elementwand in Mehrschichtbauart, 2 Elemente, Wand Nr. 5 + 6 a) Aufgerissene Fuge zwischen den Wandelementen b) Zustand des Wandausschnittes nach Versagen am oberen Auflager c)	43
Bild 2.4/32 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 5 + 6)	30	Bild 3.3.4/1 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren ( $m_1 = 90 \text{ kg}$ , $v_a = 2,0 \text{ m/s}$ )	44
Bild 2.4/33 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 8)	30	Bild 3.3.4/2 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren ( $m_1 = 90 \text{ kg}$ , $v_a = 2,6 \text{ m/s}$ )	44
Bild 2.4/34 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 11)	30		
Bild 2.4/35 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators (Wand Nr. 10)	31		
Bild 2.4/36 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten $v_a$ und Federkonstanten $c_2$ des gestoßenen Bauteiles	31		
Bild 2.4/37 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten $v_a$ und mitwirkenden Massen $m_2$ der Wandsimulatoren	31		
Bild 2.4/38 Auf $m_1$ bezogene Federkonstante $c_1$ des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten $v_a$ und Eigenschwingungsdauern $T_{e2}$ der Wandsimulatoren	32		

	Seite
Bild 3.3.4/3 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren ( $m_1 = 50 \text{ kg}$ , $v_a = 2,0 \text{ m/s}$ )	45
Bild 3.3.4/4 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren ( $m_1 = 50 \text{ kg}$ , $v_a = 2,6 \text{ m/s}$ )	45
Bild 3.4.2/1 Servohydraulisch geregelter Prüfzylinder mit Lasteinleitungsplatte, Kraftmeßdose und eingebautem Weggeber zu Beginn eines Versu- ches mit konstant geregelter Weggeschwindigkeit	46
Bild 3.4.3/1 Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element mit angestauch- ten Pappwaben als Kernschicht, Zustand der Wand nach Bruch im Auflagerbereich. Durchbiegungsgeschwindigkeit $v_f$ :	
a) 0,333 m/s (Wand Nr. 2)	46
b) 0,667 m/s (Wand Nr. 3)	47
Bild 3.4.3/2 Einzelkraft R in Abhängigkeit von der Durchbiegung f an der Krafteinleitungsstelle bei konstanter Durchbiegungsgeschwindig- keit (0,333 m/s; Wand Nr. 2)	47
Bild 3.4.3/3 Einzelkraft R in Abhängigkeit von der Durchbiegung f an der Krafteinleitungsstelle bei konstanter Durchbiegungsgeschwindig- keit (0,667 m/s; Wand Nr. 3)	48
Bild 4.1/1 Vergleich der Beanspruchungen in zwei verschieden steifen und verschieden schweren Bauteilen infolge Stoß durch ein 50 kg schweres Sandsackpendel und infolge Gegenprallen eines 90 kg schweren menschlichen Körpers mit der Schulter bei gleicher Auf- prallenergie	49
Bild 4.1/2 Vergleich der Beanspruchungen in zwei verschieden steifen und verschieden schweren Bauteilen infolge Stoß durch ein 50 kg schweres Sandsackpendel und infolge Gegenprallen eines 50 kg schweren Anteils eines menschlichen Körpers mit der Schulter bei gleicher Aufprallenergie	49

$c_1$	: Federkonstante des Menschensimulators
$c_2$	: Federkonstante des Bauteilsimulators (s. Bild 3.2.3/1)
$c_{2,a}$	: Anfangssteifigkeit des Bauteils (s. Bild 3.2.3/1)
$E_a$	: Aufprallenergie = $m_1 \cdot v_a^2 / 2$
$E_A$	: erforderliche Energieaufnahme
$E_{Br}$	: Bruchenergie des Bauteils (s. Bild 3.2.3/1)
$E_V$	: Versagensenergie des Bauteils
$f$	: Durchbiegung an der Krafteinleitungsstelle infolge Einzelkraft $R$
$K$	: Faktor zur Berechnung von $x_{2 \max}$ bei elastoplastischem Verhalten, $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ (s. Anhang I)
$K_E$	: Faktor zur Berechnung von $x_{2 \max}$ bei elastischem Verhalten, $K_E = K_E(M; \Omega)$ , (s. Bild 2.3/3)
$K_S$	: Faktor zur Berechnung von $P_s \max$ bei elastischem Verhalten, $K_S = K_S(M; \Omega)$ , (s. Bild 2.3/4)
$m_1$	: Masse des Menschensimulators oder Masse des gegenprallenden menschlichen Körpers
$m_2$	: Masse des Bauteilsimulators oder mitwirkende Masse des Bauteils
$M$	: $m_1/m_2$
$n$	: Anzahl der Einzelversuche einer Versuchsserie (Stichprobe)
$P_s$	: Zwischen Schulter und Bauteil wirkende Stoßkraft
$P_s \max$	: Größter Wert von $P_s$ bei einem Stoßvorgang
$R$	: Einzelkraft, an der gedachten Stoßstelle auf das Bauteil wirkend, zum Erzwingen der Bauteilverfor- mung bis zum Versagen oder Bruch (s. Bild 3.2.3/1)
$R_{\max}$	: Größter Wert von $R$ während eines Versuches
$s$	: Standardabweichung der Ergebnisse einer Versuchs- serie (Stichprobe)
$S$	: Sicherheit, $(1 - S) =$ Versagenswahrscheinlichkeit
$T_{e1}$	: Eigenschwingungsdauer des Menschensimulators
$T_{e2}$	: Eigenschwingungsdauer des Bauteils bei kleineren Verformungen
$T_{\max}$	: Zeitdauer vom Stoßbeginn bis zum Erreichen von $P_s \max$
$T_{2 \max}$	: Zeitdauer vom Stoßbeginn bis zum Erreichen von $x_{2 \max}$
$v_a$	: Aufprallgeschwindigkeit
$\bar{v}_a$	: $v_a / (x_{2,0} \cdot \omega_{e2})$
$\bar{v}_{a,el}$	: Wert von $\bar{v}_a$ , bei dem die Grenze zwischen rein elastischer und elastoplastischer Reaktion des Bauteilsimulators liegt
$v_f$	: Geschwindigkeit des Weges der Krafteinleitungs- stelle
$V$	: Variationsquotient der Ergebnisse einer Ver- suchsserie (Stichprobe)

W	: Aussagewahrscheinlichkeit
x	: Zusammendrückung der Feder des Menschensimulators
$x_1$	: $x_2 + x$
$x_2$	: Weg der Masse $m_2$ des Bauteilsimulators oder Weg der Stoßstelle am Bauteil
$x_{2,0}$	: Grenze der elastischen Zusammendrückung der Feder des Bauteilsimulators (s. Bild 3.2. 3/1)
$x_{2 \max}$	: Größter Wert von $x_2$ infolge eines Stoßes
$x_\nu$	: Einzelergebnis, ermittelt am $\nu$ -ten Probekörper einer Versuchsserie (Stichprobe)
$\bar{x}$	: arithmetischer Mittelwert aller $x_\nu$ einer Versuchsserie (Stichprobe)
$\tilde{x}$	: geometrischer Mittelwert aller $x_\nu$ einer Versuchsserie (Stichprobe)
$\gamma$	: Sicherheitsfaktor zur Absicherung aller durch statistische Auswertung der Versuchsergebnisse nicht zu erfassenden Unsicherheiten
$\gamma_V$	: Faktor zur Ermittlung des maßgebenden Wertes einer Prüfung über $\tilde{x}/\gamma_V$
$\nu$	: Ordnungszahl der Einzelwerte einer Versuchsserie (Stichprobe)
$\tau_{\max}$	: $T_{\max} \cdot \omega_{e2}$
$\tau_{2 \max}$	: $T_{2 \max} \cdot \omega_{e2}$
$\omega_{e2}$	: $\sqrt{c_1/m_1}$
$\omega_{e2}$	: $\sqrt{c_2/m_2}$
$\omega_{e2, a}$	: $2\pi / T_{e2, a}$
$\Omega$	: $\omega_{e1}/\omega_{e2}$

Für leichte, nichttragende, vertikal eingebaute Bauteile kann der Aufprall eines menschlichen Körpers mit der Schulter die maßgebende Beanspruchung im Bauteil hervorrufen. Bei diesem "weichen" Stoß mit "langer" Stoßdauer wird ein Bauteil vorwiegend als Gesamtkonstruktion beansprucht. Ausreichende Unterlagen über den Menschen als Stoßkörper existieren bisher nicht. Die Simulation solcher Stoßbelastung durch einen "weichen" Prüfkörper, z. B. Sandsack, kann aus grundsätzlichen Überlegungen nicht a priori ohne Überprüfung als ausreichend real und objektiv angesehen werden. (s. Abschn. 1)

In Versuchen zur Ermittlung von Kennwerten über einen menschlichen Körper als Stoßkörper stieß ein Mensch (Abschn. 2.1.3) mit seiner Schulter mittig gegen sieben Wandausschnitte verschiedener Art und Eigenschaften (Abschn. 2.1.4 sowie Bild 2.1.4/1 und 2). Dabei wurden seine Aufprallgeschwindigkeit sowie die zwischen Mensch und Wandelement wirkende Kraft  $P_S$  und der Weg  $x_2$  des Wandelementes an der Stoßstelle in Abhängigkeit von der Zeit gemessen (Abschn. 2.1.1 und 2.1.2 sowie Bilder 2.1.1/1, 2.1.1/2, 2.1.2/1 bis 2.1.2/5). Die Maximalwerte  $x_{2\max}$  und  $P_{S\max}$  dieser Meßgrößen und die Zeitdauern  $T_{2\max}$  und  $T_{\max}$  vom Stoßbeginn bis zum Erreichen von  $x_{2\max}$  und  $P_{S\max}$  sind für alle Versuche je Wandausschnitt in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit ermittelt worden (Bilder 2.2/1 bis 2.2/28). Außerdem wurden die vollständigen Weg- und Kraft-Zeit-Verläufe im Bereich der Stoßdauer je Wandausschnitt an je 3 typischen Beispielen dargestellt (Bilder 2.2/29 bis 2.2/35). Das größte Maximum des Stoßstellenweges lag immer innerhalb der Stoßdauer. (Abschnitt 2.2)

Zur Aufbereitung der Versuchsergebnisse sind für den Menschen und das Bauteil einfache Masse-Feder-Systeme angenommen worden. Für jeden Versuch wurden die vier freien Werte für die mitwirkende Masse  $m_1$  und die Federkonstante  $c_1$  des den Menschen simulierenden Systems und die entsprechenden Werte  $m_2$  und  $c_2$  des das Bauteil simulierenden Systems so bestimmt, daß bei einem Aufprall des Systems (1) auf das System (2) in den beiden Federn maximal die im Versuch gemessenen Maximalwerte innerhalb der gleichen Zeitintervalle entstehen würden. Grundlage dieser Umrechnung bilden die Unterlagen über den elastischen Zweimassen-Schwinger nach Limberger (Bilder 2.3/1 bis 2.3/4). Die Werte für  $c_1$  zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$ , die Werte für  $m_1$  und  $m_2$  dagegen nicht, sie streuen nur mehr oder minder stark; die Abhängigkeit der Werte  $c_2$  von  $v_a$  läßt sich durch die gekrümmten Federkennlinien der Wandausschnitte erklären (Bilder 2.3/5 bis 2.3/22). Ein Vergleich zeigt, daß die Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators auch unabhängig von der Steifigkeit  $c_2$  des gestoßenen Bauteils von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  abhängig ist. (Abschn. 2.3)

Überlegungen zur Beurteilung leichter Trennwände ergaben, daß Stöße mit Aufprallgeschwindigkeiten von 2,0 bis 2,6 m/s als real anzusehen sind. Schulterstöße mit solchen Geschwindigkeiten hätten nicht ohne Verletzung der Versuchsperson ausgeführt werden können. Deshalb mußten die Versuchsergebnisse extrapoliert werden. Dazu erwies es sich als zweckmäßig, zur Reduktion der Einzelabweichungen bezogene Werte zu ermitteln und mit diesen die Extrapolation vorzunehmen (Bilder 2.4/1 bis 2.4/35). Dabei zeigten sich systematische Abweichungen, die sich aus Meßfehlern erklären ließen und bei der Extrapolation nicht berücksichtigt wurden. Auf diese Weise konnte für die vier Aufprallgeschwindigkeiten  $v_a = 1,0; 1,5; 2,0$  und  $2,6$  m/s die auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  in Abhängigkeit von der Steifigkeit und der mitwirkenden Masse des gestoßenen Körpers sowie von dessen Eigenschwingungsdauer dargestellt werden (Bilder 2.4/36 bis 2.4/38). (Abschn. 2.4).

Im untersuchten Bereich, Steifigkeit  $c_2$  des gestoßenen Bauteiles ca. 50 bis 1200 kN/m, mitwirkende Masse  $m_2$  ca. 50 bis 450 kg und Eigenschwingungsdauer  $T_{e2}$  ca. 0,1 bis 0,25 s, ist eine sinnvoll erscheinende Abhängigkeit der Wertepaare  $(c_1/m_1; c_2)$ ,  $(c_1/m_1; m_2)$  oder  $(c_1/m_1; T_{e2})$  nicht erkennbar. Dagegen ergibt sich eine klare

Abhängigkeit der Werte  $c_1/m_1$  des Menschensimulators von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  nach Bild 2.5/1. (Abschn. 2.5)

Aufgrund dieser Unterlagen wird als Prüfverfahren zur Beurteilung des Widerstandes eines Bauteils gegenüber Stoß durch menschlichen Körper folgendes vorgeschlagen:

Diejenige Energie, die von dem Bauteil aufgenommen werden muß, um einen Stoß von der Aufprallenergie  $E_a$  abzufangen, hier als "erforderliche Energieaufnahme  $E_A$ " bezeichnet, wird verglichen mit derjenigen Energie, die ein Bauteil bis zu einem Versagenszustand oder bis zum Bruch aufnehmen kann, hier als "Versagensenergie  $E_V$ " oder "Bruchenergie  $E_{Br}$ " bezeichnet. Zur Ermittlung von  $E_A$  wird der menschliche Körper als Masse-Feder-System mit einer Federkonstante  $c_1$  nach Bild 2.5/1, das gestoßene Bauteil als elatoplastisch reagierendes Masse-Feder-System gedacht. Bei den hier betrachteten "langsamen" Stößen unterscheidet sich das Verformungsverhalten der Gesamtkonstruktion des Bauteils nicht wesentlich von dem bei statischer Belastung. So können Federkennlinie für den Bauteilsimulator und Versagens- oder Bruchenergie aus einem statischen Versuch mit einer Einzelkraft an der gedachten Stoßstelle entsprechend Bild 3.2.3/1 ermittelt werden. Die mitwirkende Masse  $m_2$  des Bauteils errechnet sich aus der Eigenschwingungsdauer  $T_{e,2,a}$  aus einem Ausschwingversuch und der Anfangsfederkonstanten  $c_{2,a}$  der Federkennlinie. Das Verhältnis  $E_A/E_a$  kann dann mit Hilfe der Ergebnisse für den Zwei-Massen-Schwinger mit elastischer/elatoplastischer Federkennlinie nach Limberger (1975) (s. auch Anhang I) ermittelt und mit dem Verhältnis  $E_V/E_a$  oder  $E_{Br}/E_a$  verglichen werden. (Abschn. 3.1). Einzelheiten zur Versuchsdurchführung und -auswertung sowie Hinweise zur Berücksichtigung von Streuungen und Sicherheitsüberlegungen sind in den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.5 und Bild 3.2.5/1 zu finden. Ein zusammenfassendes Schema des Prüfverfahrens liefert Bild 3.2.6/1 in Verbindung mit Abschn. 3.2.6. Einen Hinweis auf die Größenordnungen der bei solchen Versuchen auftretenden Zahlenwerte lieferten 4 Einzelversuche an 4 verschiedenen Ausschnitten leichter Trennwände, wobei das Verfahren für einen 90 kg und für einen 50 kg schweren Anteil eines menschlichen Körpers und für 2,0 m/s Aufprallgeschwindigkeit (Bilder 3.3.4/1 und 3) sowie für 2,6 m/s (Bild 3.3.4/2 und 4) durchgeführt wurde. (Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.4 und Bilder 3.3.2/1 bis 3.3.3/8)

Versuche mit Zwangsverformung über eine Einzelkraft in Wandelementmitte bei Durchbiegungsgeschwindigkeiten von 0,333 m/s und 0,667 m/s wurden zusätzlich an einer der Wandbauarten durchgeführt. Dazwischen liegt nämlich die maximale Durchbiegungsgeschwindigkeit, mit der bei dieser Art Probekörper bei einem menschlichen Stoß mit 2,0 m/s Aufprallgeschwindigkeit zu rechnen ist. Die Ergebnisse sprechen nicht gegen die Ermittlung von  $E_V$  oder  $E_{Br}$  im statischen Versuch. (Abschn. 3.4.1 bis 3.4.3 und Bilder 3.4.2/1 sowie 3.4.3/1 bis 3.4.3/3 sowie 3.3.3/1 und 3.3.3/2)

Bisher wurden zur Beurteilung des Widerstandes der Gesamtkonstruktion von Bauteilen gegenüber stoßartiger Beanspruchung Versuche mit Sandsackpendel herangezogen, auch dann, wenn der reale Stoß durch einen menschlichen Körper verursacht wird. Die vorliegenden Unterlagen über das Verhalten des menschlichen Körpers als Stoßkörper ermöglichen jetzt einen zahlenmäßigen Vergleich mit Sandsack-Stoßversuchen. Dieser Vergleich ist durchgeführt worden an zwei verschiedenen Bauteilen, an denen aus Belgien Ergebnisse aus Stoßversuchen mit einem 50-kg-Sandsack vorlagen. Dabei wurde zum einen ein 90 kg schwerer menschlicher Körper, Bild 4.1/1, und zum anderen ein 50 kg schwerer Anteil eines solchen, Bild 4.1/2, in Betracht gezogen. (Abschn. 4.1)

Aus dem Vergleich wird gefolgert:

Mit einem Sandsackpendel als Prüfkörper kann ohne andere Hilfsmittel das Verhalten von leichten Bauteilen infolge Gegenprallen eines menschlichen Körpers weder absolut noch vergleichend richtig beurteilt werden. Ein Prüfverfahren mit Sandsackpendel wäre in diesem

Zusammenhang nur gerechtfertigt, wenn jedes Mal für den jeweils zu untersuchenden Probekörper (Bauteil) die Bedingung

$$(E_A/E_a)_{\text{Sandsack}} \cdot E_{a, \text{Prüfung}} = (E_A/E_a)_{\text{Mensch}} \cdot E_{a, \text{real}}$$

erfüllt wird. Kenntnislücken und versuchstechnische Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dieser Bedingung, sowie größerer Versuchsumfang, um gleiche Aussagesicherheit zu erhalten, bzw. wenn die Bestimmung von  $E_V$  oder  $E_{Br}$  bei auch plastisch reagierenden Bauteilen allein durch Stoßversuche erfolgt, bedingen, daß das in Abschnitt 3 beschriebene Prüfverfahren vorgeschlagen wird. (Abschn. 4. 2)

## 1. Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Im allgemeinen Hochbau (Wohnungen, Büros, Schulen, Krankenhäuser, Versammlungsstätten) werden wirtschaftlich bedeutsam zunehmend leichte Bauelemente, gegliederte Konstruktionen mit Beplankungen oder Ausfachungen und Konstruktionen aus Sonderbaustoffen, wie Glas und sprödbrechende Kunststoffe, verwendet. Die Anwendung dieser leichten Baustoffe und Bauarten erzwingt die Berücksichtigung stoßartiger Belastungen auch dort, wo bisher bei der herkömmlichen massiven Bauweise dieses nicht erforderlich war. Bei Bauteilen, bei denen Abmessungen und Materialfestigkeiten nicht durch Gebäude mittragende Funktionen bestimmt sind, kann schon die im Gebrauchsfall auftretende stoßartige Belastung die maßgebenden Beanspruchungen im Bauteil hervorrufen. Dazu gehören vor allem leichte Trennwände und Füllelemente von Leichtfassaden, die im wesentlichen nur raumabschließende Funktionen haben.

Auf dem Gebiet der stoßartigen Belastung fehlt die Erfahrung aus jahrhundertelanger Beschäftigung, wie sie bei statischen Problemen vorliegt. Da die Probleme außerdem sehr komplex sind und eine Vielzahl von Einflußparametern auftreten - s. a. Struck, Limberger (1970); Limberger, Struck (1971); sowie Struck, Limberger, Eifler (1973) -, können sie nur unter Zuhilfenahme größerer Vereinfachungen näherungsweise gelöst werden.

Zu diesen Vereinfachungen gehört es auch, daß man die Auswirkungen einer stoßartigen Belastung aufteilt in örtliche Beanspruchungen an der Stoßstelle und in Beanspruchungen der Gesamtkonstruktion des gestoßenen Bauteiles.

Die örtlichen Beanspruchungen erreichen ihre Größtwerte meist bevor die Spannungswellen die gesamte Konstruktion des Bauteiles erfaßt haben und von den Rändern reflektiert werden (erste und zweite Stoßphase, Schmidt (1966)), Rühl, Emschermann, Floßmann, Jänicke (1962). Sie können örtliche Zerstörungen wie Eindringen, Durchstoßen oder Ausbrechen verursachen, wie sie ähnlich auftreten würden, wenn das Bauteil um die Stoßstelle herum direkt unterstützt wäre. Die Gefahr örtlicher Zerstörung ist besonders groß, wenn "harte" Stoßkörper mit kleiner Aufprallfläche und großer Geschwindigkeit aufprallen. Die Bean-

spruchung der Gesamtkonstruktion ist dabei meist verhältnismäßig gering, so daß das Bauteil nicht in seiner Gesamtheit zusammenbricht. Eine Ausnahme bilden dabei Bauteile, die vorwiegend aus sprödbrechendem Material wie Glas bestehen und nach eingeleiteten örtlichen Zerstörungen insgesamt zersplittern können. Dagegen kann ein Bauteil bei stoßartiger Belastung auch insgesamt versagen, ohne daß primär örtliche Zerstörungen auftreten. Dies geschieht bei Massestößen vor allem bei "weichen" Stoßkörpern und großen Aufprallflächen.

Ein Überblick über die Größenordnungen der Aufprallenergie oder des Aufprallimpulses von stoßartigen Belastungen, wie sie in Wirklichkeit bei den hier betrachteten leichten nichttragenden Bauteilen auftreten können (reale Stöße), zeigt, daß der Aufprall eines menschlichen Körpers sehr oft die größte stoßartige Beanspruchung der Gesamtkonstruktion darstellt, Struck, Böhmert (1967). Bei der Beurteilung einer leichten Trennwand, eines leichten Faasadenfüllelementes oder ähnlicher Bauteile hinsichtlich ihres Widerstandes gegenüber stoßartiger Belastung im Gebrauchsfall muß also auch der Stoß eines menschlichen Körpers berücksichtigt werden. Da es sich hierbei um einen "weichen" Stoßkörper handelt, ist die stoßartige Beanspruchung der Gesamtkonstruktion zu untersuchen.

### 1.2 Problemstellung

Über den menschlichen Körper als Stoßkörper sind bisher keine ausreichenden Unterlagen vorhanden. Untersuchungen, bei denen der Mensch als gestoßener Körper fungierte, zeigen das komplizierte Eigenverhalten des menschlichen Körpers als schwingendes System, Goldman und von Gierke (1961). Die Auswertung erster Tastversuche, bei denen Menschen mit verschiedenen Körperstellen gegen oder auf Bauteile stießen oder prallten, Struck, Böhmert (1971), mittels eines einfachen Masse - Feder - Gedankenmodells, Limberger, Struck (1972), ließen auf eine erfolgreiche Anwendung dieses Gedankenmodells zur Beurteilung dieserart Beanspruchung hoffen. Simuliert man den mit einer Teilfläche seines Rumpfes gegenstoßenden menschlichen Körper und auch das gestoßene Bauteil je durch ein Masse-Feder-System mit linear elastischer bzw. linear elastischer/ideal plastischer Federkennlinie, Limberger (1975), so

kann man abschätzen, bei welcher Rumpfstelle als Aufprallfläche die größte Beanspruchung zu erwarten ist. Unter sonst gleichen Verhältnissen (gleiches gestoßenes Bauteil  $m_2/c_2$ ; gleiche Stoßkörpermasse  $m_1$ ; gleiche Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$ ) wächst nämlich die Beanspruchung im gestoßenen Teil mit wachsender Federkonstante  $c_1$  des stoßenden Körpers. Somit ist vorauszusetzen, daß das Auftreffen mit dem Oberarm in Höhe der Schulter bei vertikal eingebauten Teilen die größte Beanspruchung hervorrufen kann.

Seit längerer Zeit versucht man, Bauteile hinsichtlich ihres Verhaltens bei Stößen durch "weiche" Körper mittels Sandsack-Stoßversuche zu beurteilen. Oft soll der Sandsack dabei als Simulator für einen anderen in Wirklichkeit möglichen Stoßkörper, wie der menschliche Körper, dienen. Dabei wird außer Acht gelassen, daß bei einer stoßartigen Belastung die Beanspruchung im gestoßenen Bauteil von der Wechselbeziehung Bauteilverhalten und Stoßkörperverhalten abhängt. Ist ein Prüfkörper (Stoßkörper) auf einen bestimmten Probekörper (Bauteil) so abgestimmt, daß er den realen Stoß richtig simuliert, so kann er in einem sich anders verhaltenden Probekörpers eine vom realen Stoß völlig abweichende Beanspruchung hervorrufen, Limberger, Struck (1972). Soll derselbe Prüfkörper bei verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlichen Eigenschaften die stoßartige Belastung desselben realen Stoßes simulieren, so muß die Aufprallgeschwindigkeit jedesmal neu im Vergleich zur Auswirkung des realen Stoßes auf den jeweiligen Probekörper eingeeicht werden. Diese Forderung gilt ganz allgemein, sofern der Prüfkörper nicht mit dem bei realem Stoß wirkenden Stoßkörper identisch ist. Sie gilt somit auch für die Kombination Sandsack als Prüfkörper und Stoß mit dem menschlichen Körper als realer Stoß. Auch hierzu ist also die Kenntnis erforderlich, welche Eigenschaften man dem menschlichen Körper als Stoßkörper zuschreiben kann.

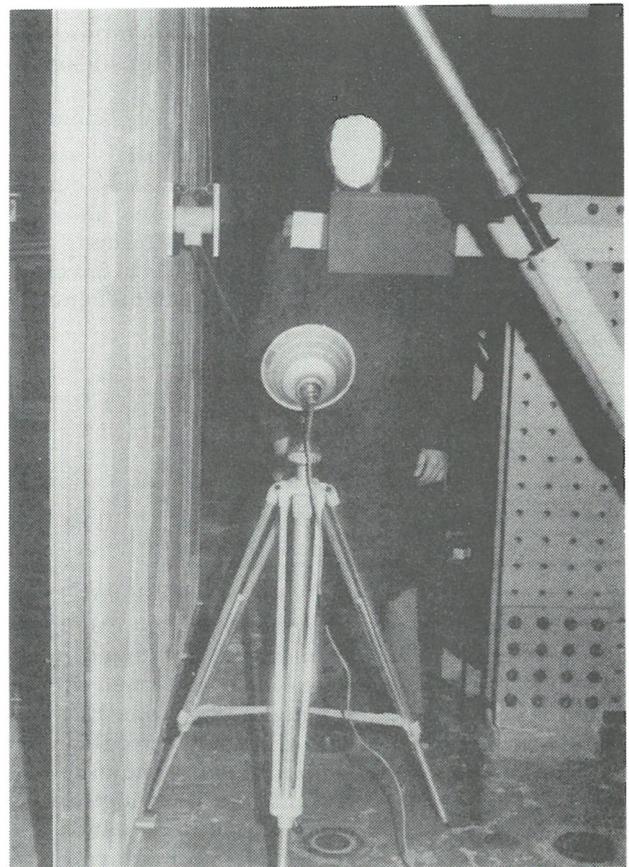
Im folgenden werden deshalb Untersuchungen und ihre Ergebnisse beschrieben, bei denen ein Mensch mit der Schulter gegen Wandelemente stieß. Dabei wurden Aufprallgeschwindigkeit und Wandeigenschaften variiert. Die Auswertung der Ergebnisse zielt auf ein möglichst einfaches mechanisches Modell als Simulator hin. Dann wird ein Prüfverfahren vorgeschlagen, das zur Beurteilung leichter Bauteile dient hinsichtlich des Widerstandes ihrer Gesamtkonstruktion gegenüber Aufprallen eines menschlichen Körpers mit der Schulter.

## 2. Versuche mit gegenstoßendem Menschen (Schulterstoß)

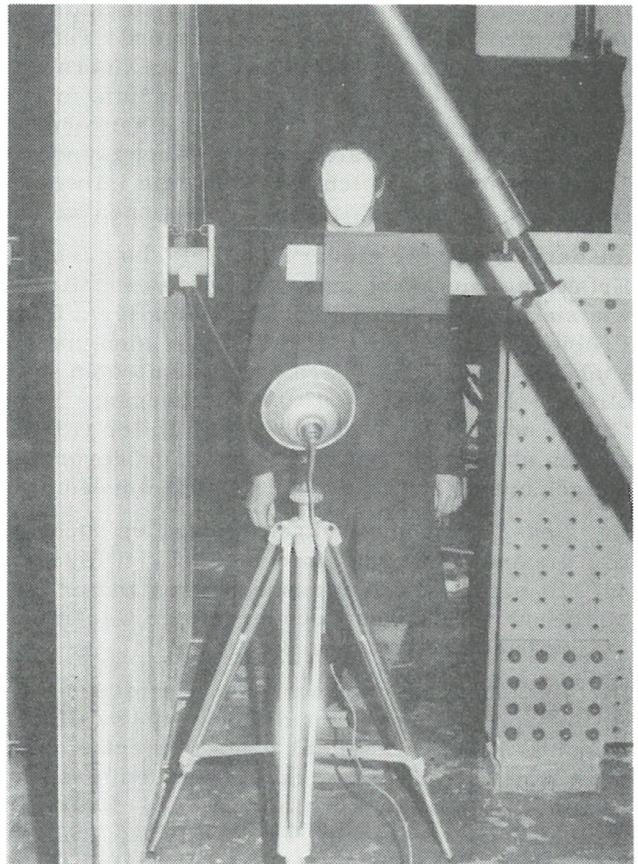
### 2.1 Versuchsbeschreibung

#### 2.1.1 Versuchsablauf

Ein Mensch stieß mit seiner rechten Schulter mittig gegen unten und oben abgestützte Wandelemente. Dabei stand er in der Ausgangsstellung ca. 0,5 m von der Wand entfernt mit geraden Beinen und beiden Füßen auf Fußbodenhöhe, 1. Stoßart, oder 0,16 m erhöht mit gewinkelten Knien, 2. Stoßart, Bild 2.1.1/1. An der Stoßstelle in Wand-



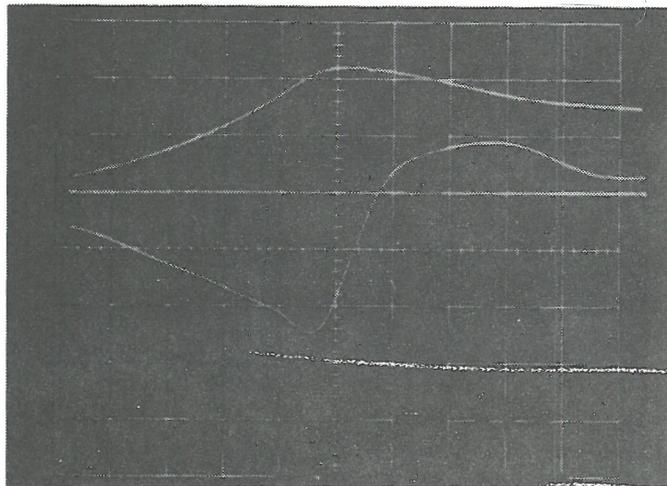
a



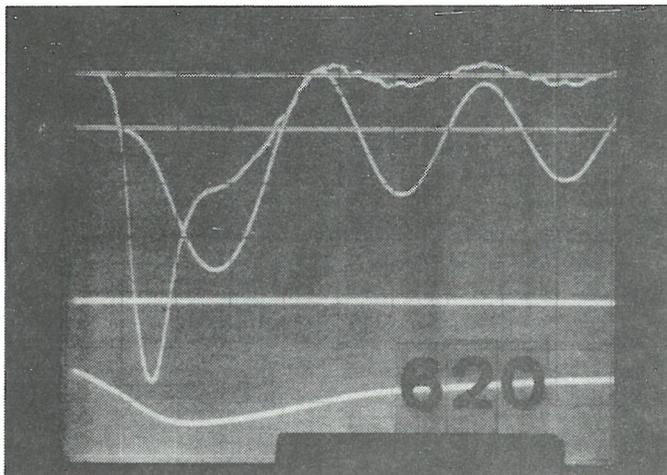
b

Bild 2.1.1/1  
Ausgangsstellung beim Schulterstoß  
a) 1. Stoßart b) 2. Stoßart

elementmitte war eine Kraftmeßdose befestigt. Die Entfernung zwischen Kraftmeßdose und Oberarmfläche in Schulterhöhe betrug in der Ausgangsstellung ca. 0,1 m bis 0,15 m. Beim Schulterstoß verringerte die Versuchsperson diese Entfernung durch Gleichgewichtsverlagerung erst langsam und dann immer schneller bis zum Aufprall. Dabei wurden der Weg der Schulter und daraus durch Differentiation die Aufprallgeschwindigkeit sowie nach Stoßbeginn die zwischen Mensch und Wandelement wirkende Kraft und der Weg der Stoßstelle am Wandelement gemessen und über der Zeit aufgezeichnet, Bild 2.1.1/2.



a



b

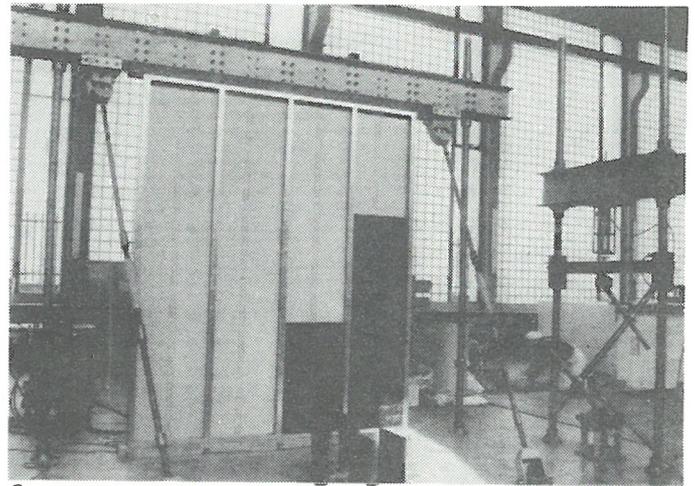
Bild 2.1.1/2

Beispiel einer Registrierung von  
a) Schulterweg und -geschwindigkeit sowie von  
b) Stoßkraft und Stoßstellenweg

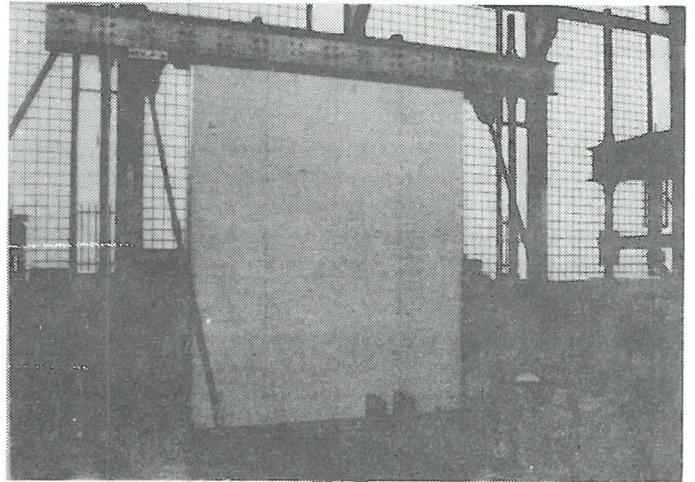
### 2.1.2 Versuchseinrichtung

Die Wandausschnitte waren senkrecht entsprechend ihrer jeweiligen Konstruktionsart errichtet und unten und oben an einem Kantholz 8/8 befestigt worden, z. B. Bild 2.1.2/1. Die Kanthölzer sind unten mit dem Aufspannfeld und oben mit einem vertikal und horizontal gestützten Träger verbunden, Bild 2.1.2/2.

Die Stoßkraft zwischen Wandausschnitt und gegenstoßendem Menschen maß eine 10 kN-Kraftmeßdose nach dem Dehnungsmeßstreifenprinzip zu-



a



b

Bild 2.1.2/1

Einbau des Ausschnittes der Leichtskelettwand (Wand Nr. 7) in den Versuchsstand

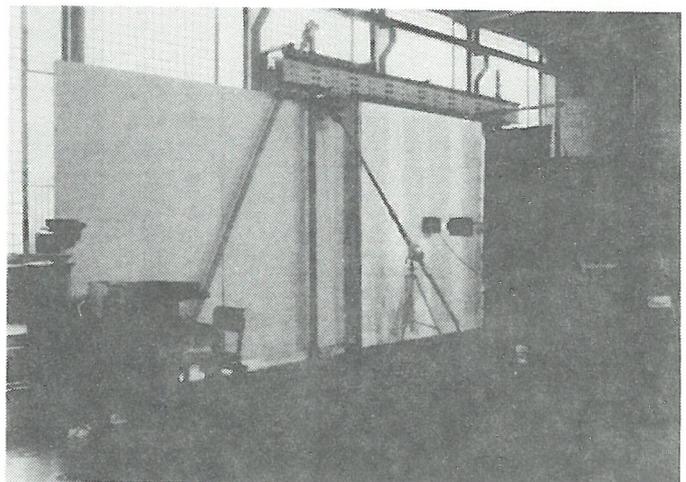


Bild 2.1.2/2

Gesamtansicht der Versuchseinrichtung

sammen mit einem 5-kHz-Trägerfrequenz-Meßverstärker. An beiden Enden waren 0,2 m x 0,2 m-Stahlplatten angeschraubt, von denen eine als Aufprallfläche diente und die andere starr mit dem Wandausschnitt verbunden war, Bilder 2.1.1/1 und 2.1.2/3. Diese Vorrichtung hat eine Masse von 12,5 kg.

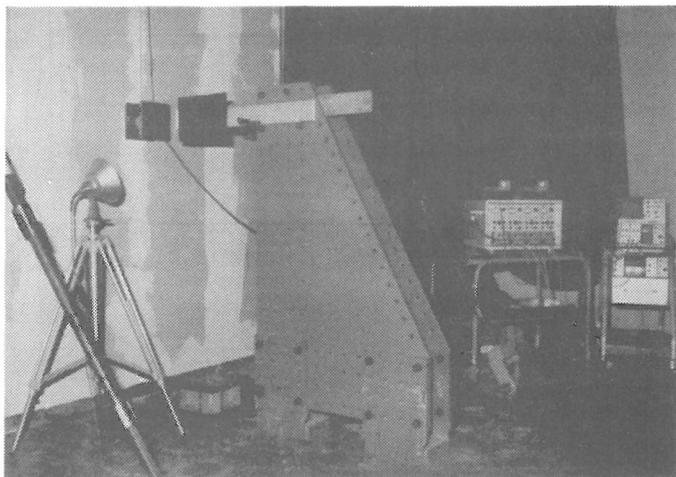


Bild 2.1.2/3  
 Details der Versuchseinrichtung: Kraftmeßdose, Trägerfrequenz-Meßverstärker, Speicherzillograph

Der Weg der Stoßstelle (Wandausschnittmitte) wurde mittels eines induktiven Weggebers und eines 5 - kHz - Trägerfrequenz - Meßverstärkers gemessen. Als Meßbasis diente das Aufspannfeld, Bild 2.1.2/4. Der Anker des Gebers war starr mit dem Wandausschnitt verbunden.

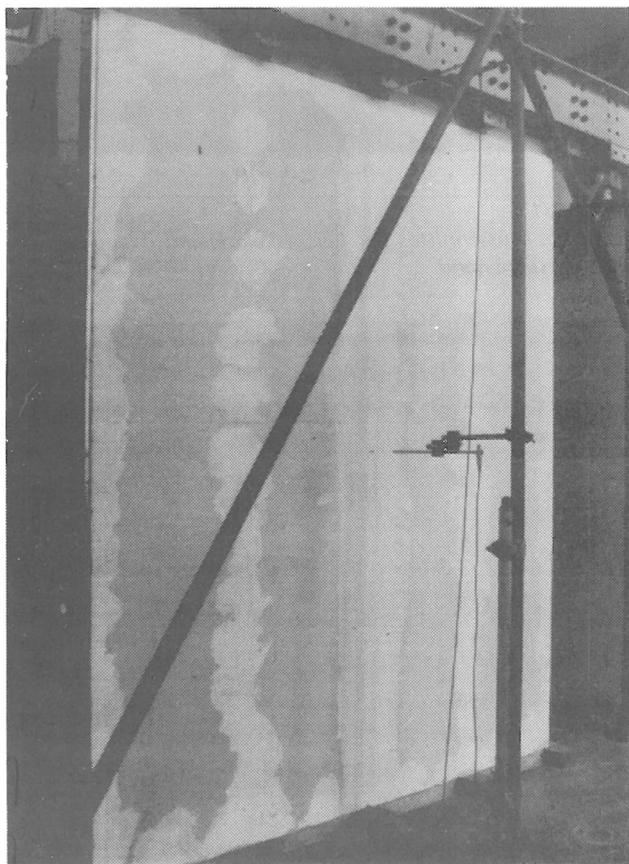


Bild 2.1.2/4  
 Details der Versuchseinrichtung: Weggeber in Wandausschnittmitte, Kanthölzer am Aufspannfeld und am Träger für unteren und oberen Wandanschluß

Den Weg der Schulter des gestoßenden Menschen verfolgte ein elektro-optischer Weggeber über eine in Schulterhöhe am Menschen befestigte Mar-

ke mit einer schwarz/weiß Grenze. Eine Differenzier - Einheit lieferte daraus die Geschwindigkeit der Schulterbewegung, Bilder 2.1.2/2 und 2.1.2/5.

Alle Meßwerte wurden zeitabhängig mittels Mehr-Kanal-Speicherzillographen und photographischen Schirmbildaufnahmen registriert.

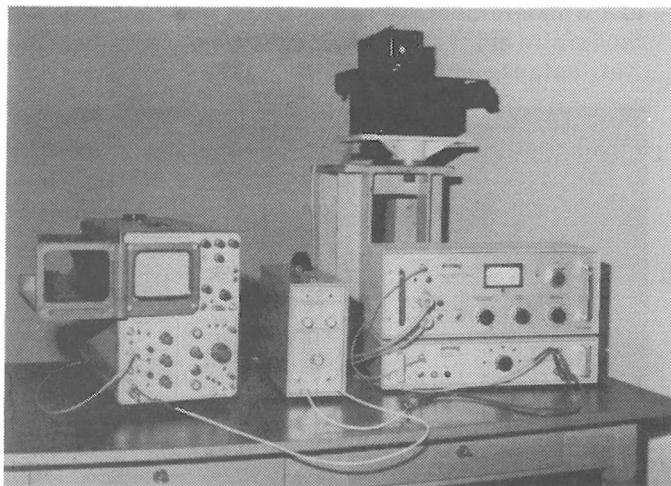


Bild 2.1.2/5  
 Details der Versuchseinrichtung: Elektrooptischer Weggeber, Integrier-Differenziergerät u. Speicherzillograph

### 2.1.3 Stoßender Menschen

Gegen die Wandausschnitte stieß ein Mensch mit

- 89 kg Gewicht (einschließlich Kleidung)
- 1,92 m Körpergröße )
- 1,63 m Schulterhöhe ) einschließlich Schuhe
- 1,03 m Hüftgelenkhöhe)
- 0,46 m Schulterbreite

### 2.1.4 Gestoßene Wandausschnitte

Eine Übersicht über die verwendeten Wandausschnitte zeigen die Bilder 2.1.4/1 und 2. Dazu noch folgende Einzelheiten:

#### Wand Nr. 1:

Ein ca. 0,08 m dicker, 1,25 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus einer Elementwand in Mehrschicht-(Sandwich-) Bauart mit äußeren Deckschichten aus 12,5 mm dickem Gipskarton und einer Kernschicht aus angestauchten Pappwaben.

Der Wandausschnitt bestand aus einem Element. Als Befestigung an oberen und unteren Auflager waren Holzfedern an die Kanthölzer genagelt, an die die Deckschichten aus Gipskarton mit ihren Innenseiten anlagen. Auf beiden Seiten befanden sich eingeleimte Spanplattenstreifen, auf der einen Seite war die zugehörige Feder aus Spanplattenstreifen eingesteckt.

Das Element wog 112 kg.

#### Wand Nr. 4:

Ein gleicher Wandausschnitt wie Wand Nr. 1, jedoch mit einer Kernschicht aus Pappwaben, die nicht angestaucht waren.

Der Wandausschnitt bestand ebenfalls aus einem Einzelement. Auf der einen Seite war eine Holzfeder 55 mm x 55 mm eingenaagelt, auf der anderen Seite die Kernschicht frei sichtbar.

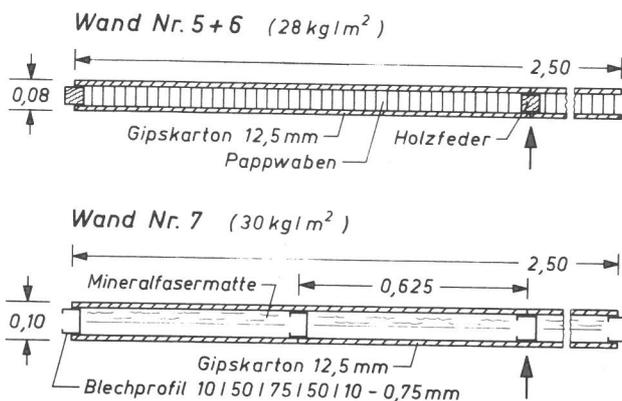
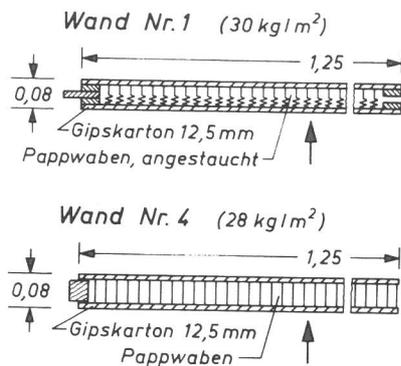


Bild 2.1.4/1  
Übersicht über die verwendeten Wandausschnitte  
Abmessungen in m, Höhe aller Wände 3 m

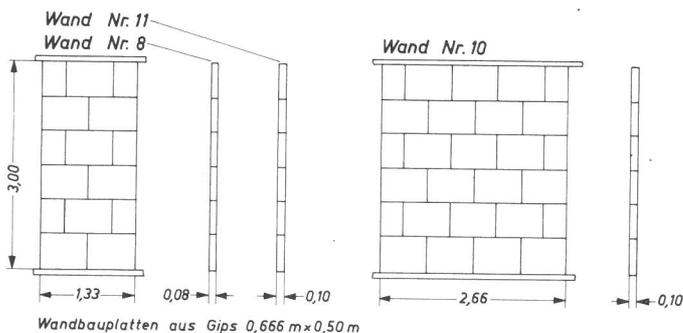


Bild 2.1.4/2  
Übersicht über die verwendeten Wandausschnitte  
Abmessungen in m, Höhe aller Wände 3 m

Das Element wog 104 kg.

Wand Nr. 5 + 6:

Ein ca. 0,08 m dicker, 2,5 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus einer Elementwand in Mehrschicht- (Sandwich-) Bauart mit äußeren Deckschichten aus 12,5 mm dickem Gipskarton und einer Kernschicht aus Pappwaben.

Die Wandbauart entspricht also der Wand Nr. 4, nur daß der Wandausschnitt aus zwei Einzelementen bestand. Die beiden Elemente waren über die beim einen Element eingenaagelte, beim anderen Element eingesteckte Holzfeder, 55 mm x

55 mm, in Wandausschnittmitte verbunden. (Die Holzfeder war oben und unten nicht an den Auflagern befestigt.)

Die beiden Elemente wogen zusammen 209 kg.

Wand Nr. 7:

Ein 0,1 m dicker, 2,50 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus einer Leichtskelettwand in Ständerbauart als Einfachwand mit Ständern aus Blechprofilen  $\square$  10/50/75/50/10-0,75 und beidseitiger Beplankung mit 12,5 mm dicken Gipskartonplatten.

Der Wandausschnitt bestand aus 5 Ständern im Abstand von 0,625 m, oben und unten eingesetzt in horizontal liegende Blechprofile  $\square$  40/75/40-0,75, die mittels selbstklebenden Dichtungsstreifen und je 4 Schrauben im Abstand von 0,75 m an den Kanten hölzernen oben und unten befestigt waren. Die der Belastung abgewandte Seite war mit 2 Gipskarton-Bauplatten 3,0 m x 1,25 m beplankt mit der Fuge über dem Stiel in Wandausschnittmitte. Bei der der Beplankung zugewandten Seite bedeckte eine gleiche Bauplatte den Mittelstiel und die beiden angrenzenden Felder, während die beiden Randfelder mit jeder Hälfte einer solchen Platte beplankt waren. Zwischen den Beplankungen lag eine Lage Mineralfasermatten (ca. 2,6 kg/m<sup>2</sup>). Schrauben im Abstand von 0,25 m verbanden Gipskartonplatten und Blechprofile. Siehe auch Bild 2.1.2/1.

Der Wandausschnitt wog insgesamt 224 kg.

Wand Nr. 8:

Ein 0,08 m dicker, 1,335 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus Wandbauplatten aus Gips.

Für den Wandausschnitt waren 12 Wandbauplatten 66,7 x 50 x 8, z. T. halbiert, verwendet worden. Sie saßen im Gipsbett auf dem unteren Kantenholz. Die Fuge oben zwischen Platten und Kantenholz war mit Gips ausgedrückt worden.

Der Wandausschnitt wog insgesamt ca. 252 kg.

Wand Nr. 11:

Ein 0,1 m dicker, 1,335 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus Wandbauplatten aus Gips.

Es waren Wandbauplatten (66,7 x 50 x 10) verwendet worden. Zusätzlich zu den Anschlüssen an das obere und untere Kantenholz wie bei Wand Nr. 8 bildeten auf der stoßabgewandten Seite die Schmalseiten von 30 mm dicken Brettern Sicherungen gegen horizontale Verschiebungen der Wandanschlüsse.

Der Wandausschnitt wog insgesamt 315 kg.

Wand Nr. 10:

Ein 0,1 m dicker, 2,67 m breiter und 3 m hoher Wandausschnitt aus Wandbauplatten aus Gips.

Bis auf die doppelte Breite und das doppelte Gewicht entsprach alles der Wand Nr. 11.

Die Wandausschnitte waren so ausgesucht worden, daß zum einen ihre Bauart und damit ihre Eigenschaften heutzutage häufig verwendeten leichten Trennwandarten entsprachen und zum anderen die Hauptparameter wie Steifigkeit an der Stoßstelle und mitwirkende Masse sich deutlich unterschieden. Von Wand 1 und Wand 4 war zu erwarten, daß sie verschiedene Steifigkeit bei etwa gleicher Masse haben würden (angestauchte und nicht angestauchte Pappwaben als Kernschicht). Von Wand 5 + 6 war erwartet worden, daß sie an der Stoßstelle sicher noch steifer sein würde (Holzfeder, mehr flächenhafte Abtragung der Einzellast wegen doppelter Breite). Bei Wand 7 wurde eine geringe mitwirkende Masse vermutet (keine flächenhafte Schubverbindungen zwischen den Beplankungen). An den Wänden Nr. 8 bis 11 sollten auch die Verhältnisse beim Stoß auf steifere und schwerere Körper untersucht werden. Zu beachten ist dabei, daß bei dieser Versuchsanordnung die Masse der Kraftmeßdose den Wert der mitwirkenden Masse beeinflusst.

## 2.2 Versuchsergebnisse

Aus den Oszillographenbildern mit den Kurven Weg des Wandausschnittes an der Stoßstelle und Stoßkraft zwischen Wand und Mensch in Abhängigkeit von der Zeit wurden die Maximalwerte  $x_{2 \max}$  und  $P_{S \max}$  dieser Meßgrößen und die Zeitdauern  $T_{2 \max}$  und  $T_{\max}$  vom Stoßbeginn bis zum Erreichen der Maximalwerte entnommen. Diese Werte sind in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  für jede Wand auf den Bildern 2.2/1 bis 2.2/28 dargestellt. Die Bilder wurden dabei hinsichtlich der bei der Aufbereitung der Ergebnis-

se (Abschnitt 2.3) sich ergebenden Steifigkeit der Wände in der Reihenfolge 1, 4, 7, 5 + 6, 8, 11, 10 geordnet.

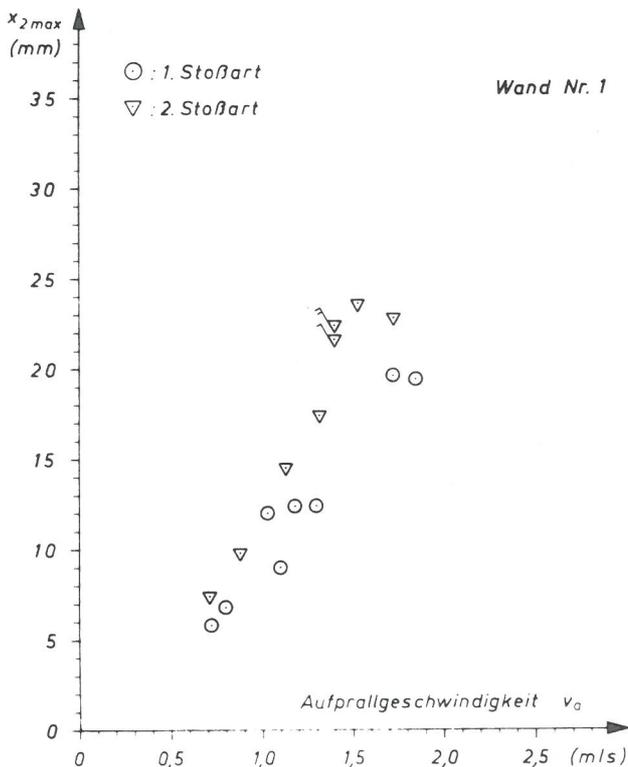


Bild 2.2/1  
Maximaler Weg  $x_{2 \max}$  der Wand an der Stoßstelle

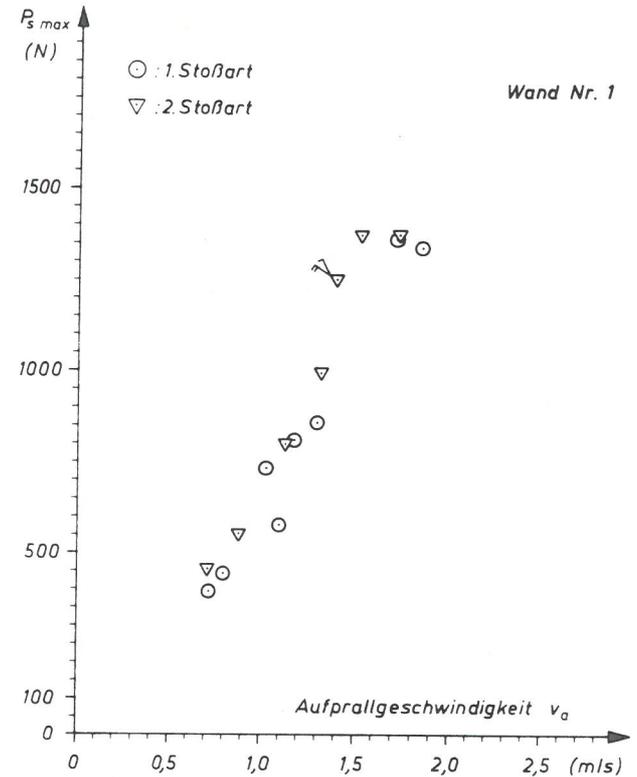


Bild 2.2/2  
Maximale Stoßkraft  $P_{S \max}$

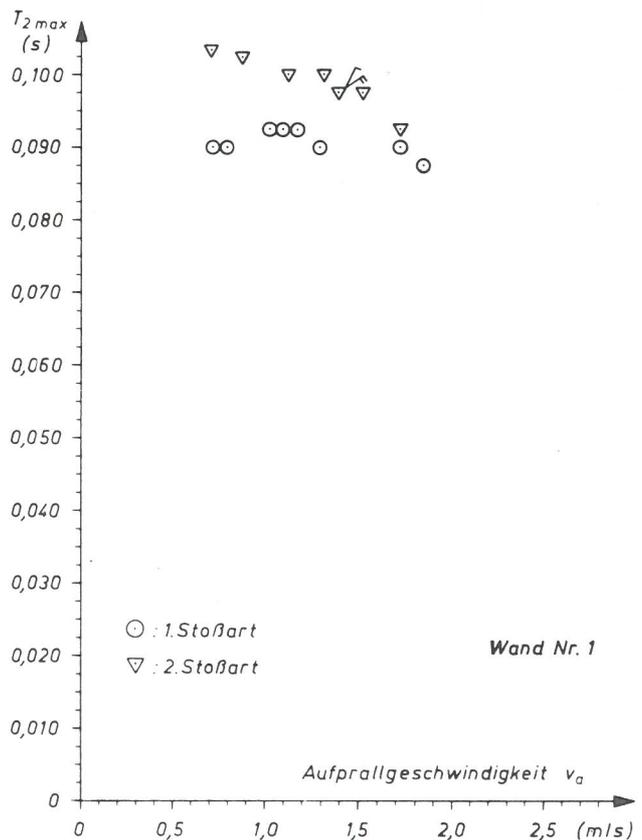


Bild 2.2/3  
Zeit  $T_{2 \max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit-Verlauf und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf zeigen für die Zeitdauer des Stoßes die Bilder 2.2/29 bis 2.2/35. Hierzu sind für jede der Wandarten jeweils die Meßwertschriebe für drei unterschiedliche Auf-

prallgeschwindigkeiten herausgezeichnet worden. Bei allen durchgeführten Versuchen lag das größte Maximum des Weges der Stoßstelle innerhalb der Stoßdauer.

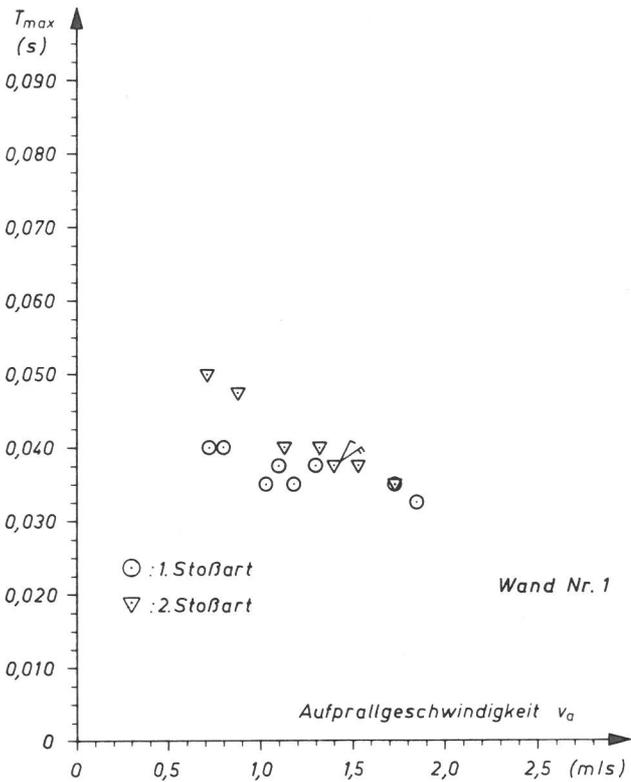


Bild 2.2/4  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

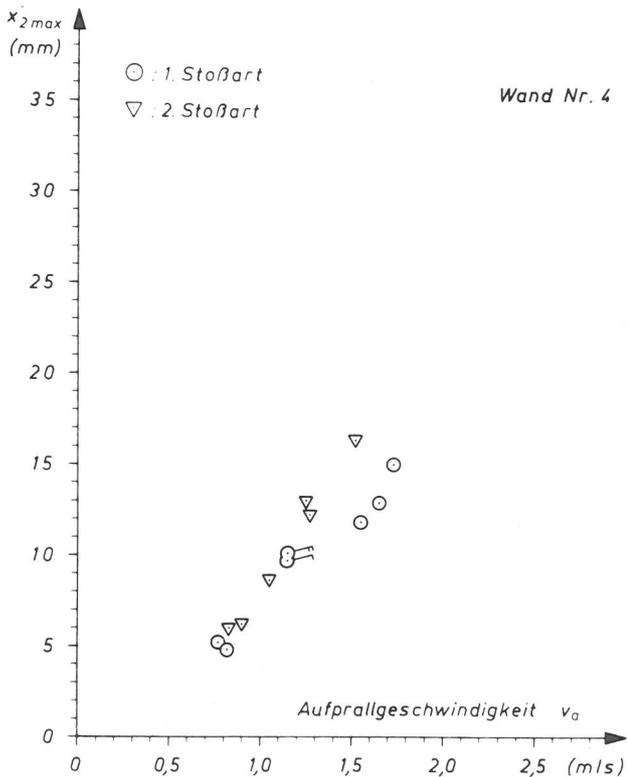


Bild 2.2/5  
Maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

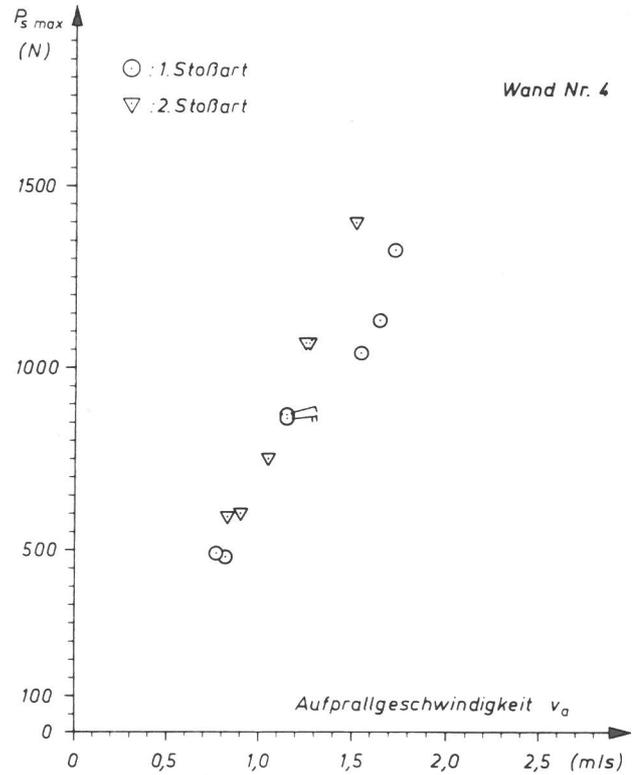


Bild 2.2/6  
Maximale Stoßkraft  $P_s max$

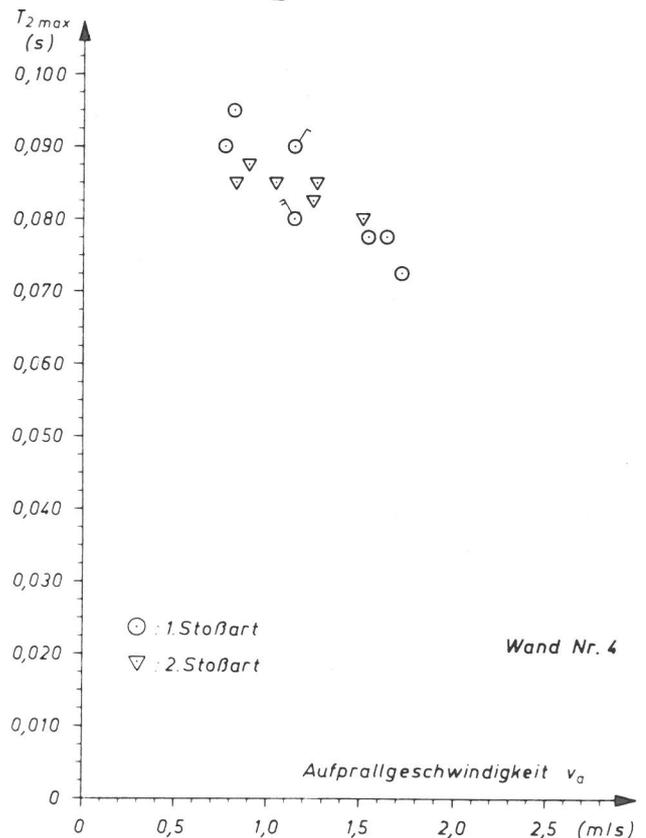


Bild 2.2/7  
Zeit  $T_{2max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

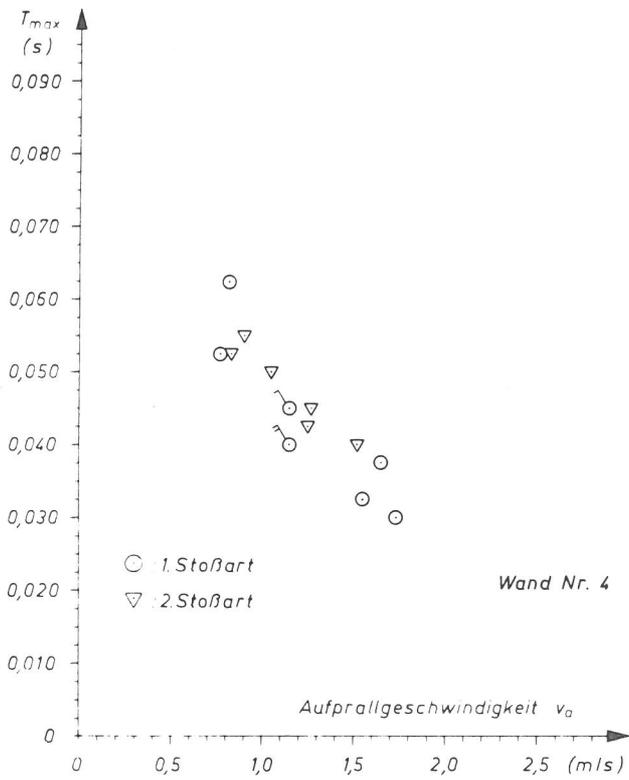


Bild 2.2/8  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

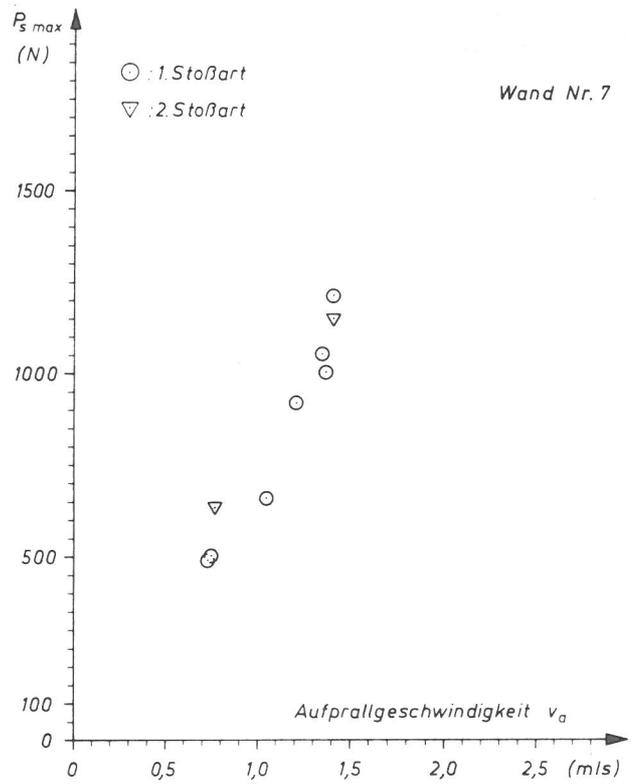


Bild 2.2/10  
Maximale Stoßkraft  $P_s max$

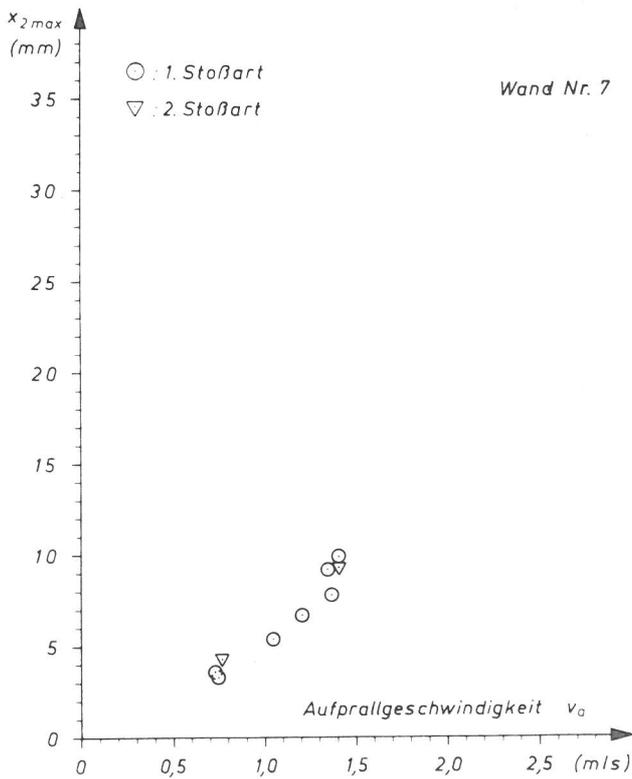


Bild 2.2/9  
Maximaler Weg  $x_{2 max}$  der Wand an der Stoßstelle

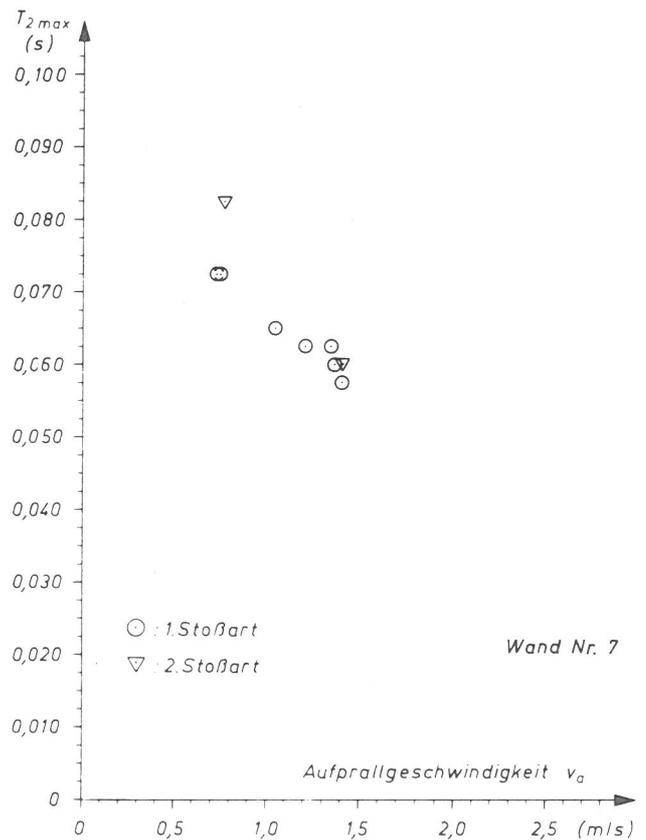


Bild 2.2/11  
Zeit  $T_{2 max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

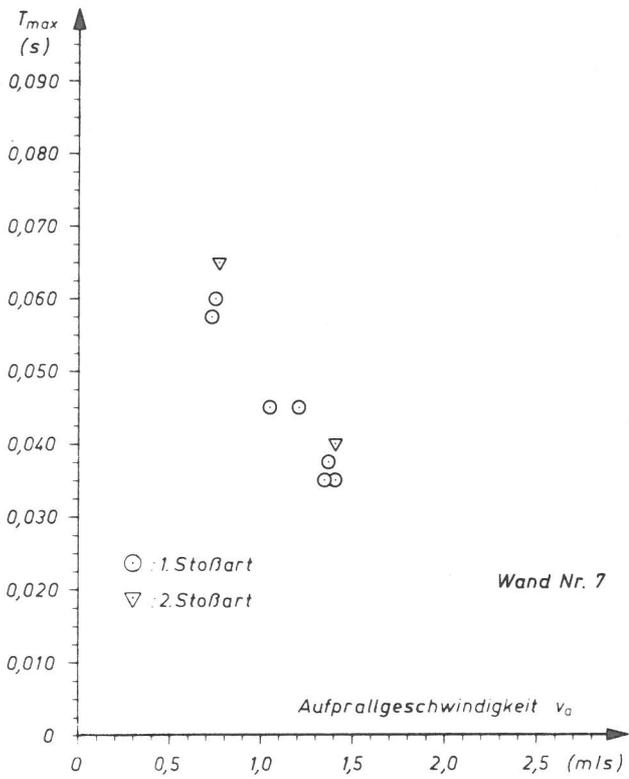


Bild 2.2/12  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

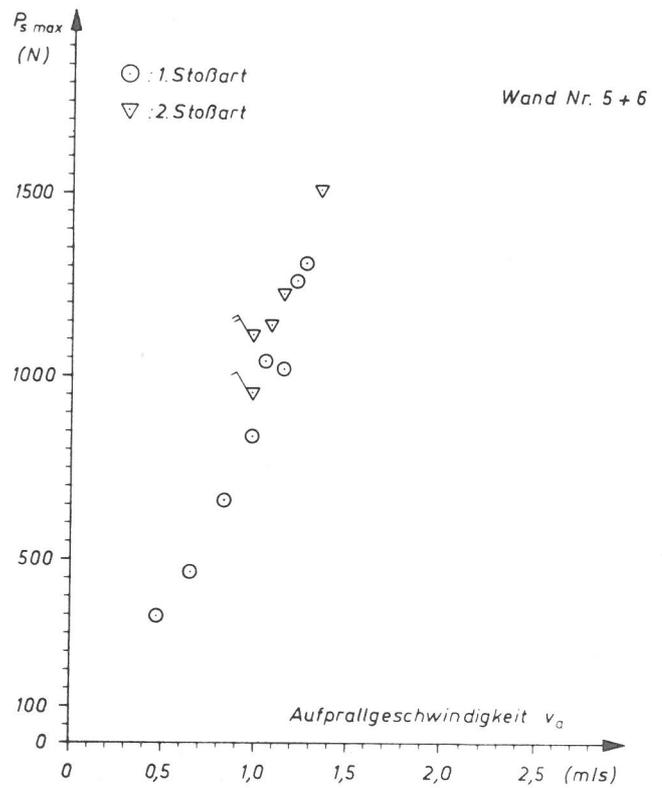


Bild 2.2/14  
Maximale Stoßkraft  $P_s max$

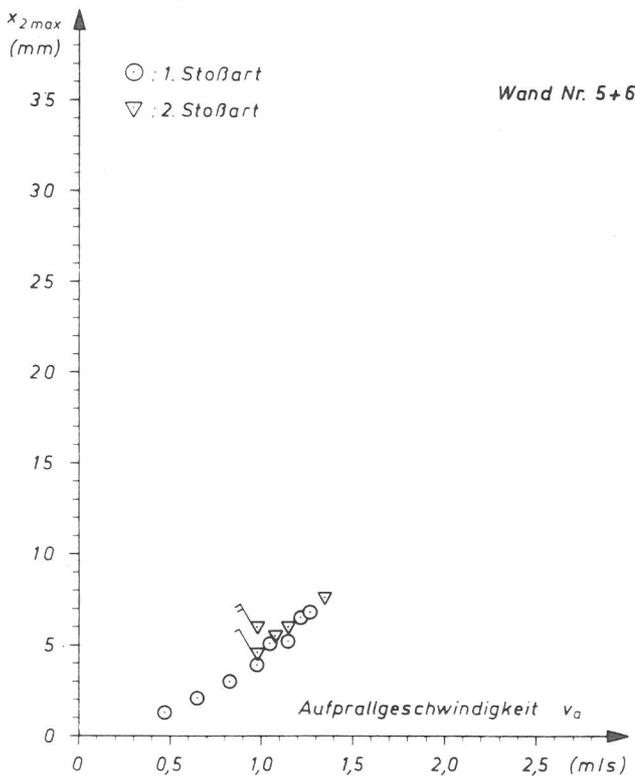


Bild 2.2/13  
Maximaler Weg  $x_{2 max}$  der Wand an der Stoßstelle

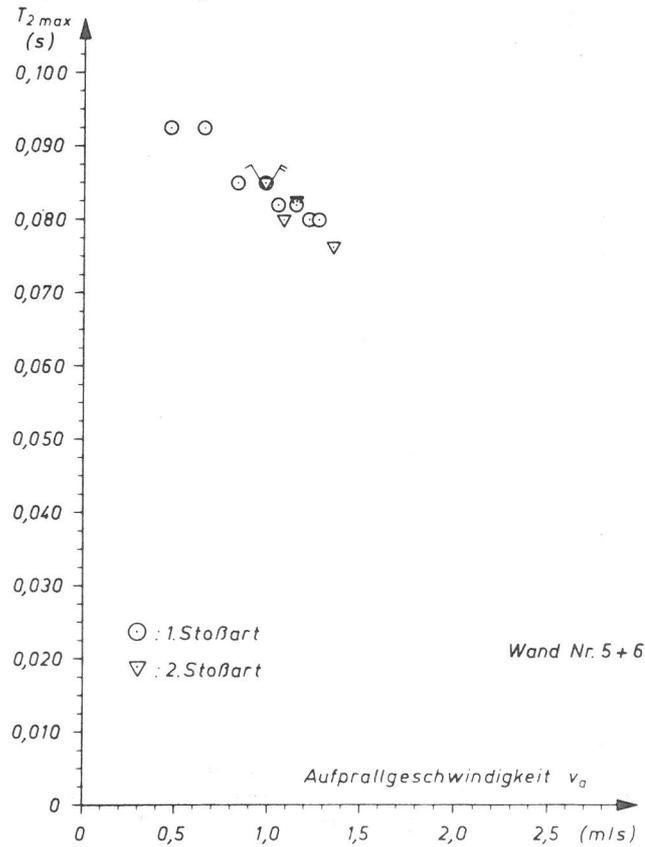


Bild 2.2/15  
Zeit  $T_{2 max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

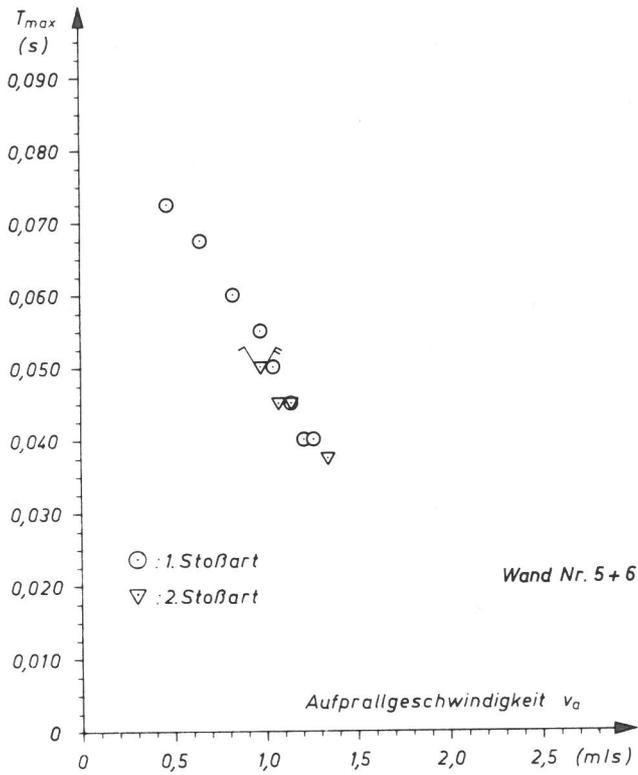


Bild 2.2/16  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

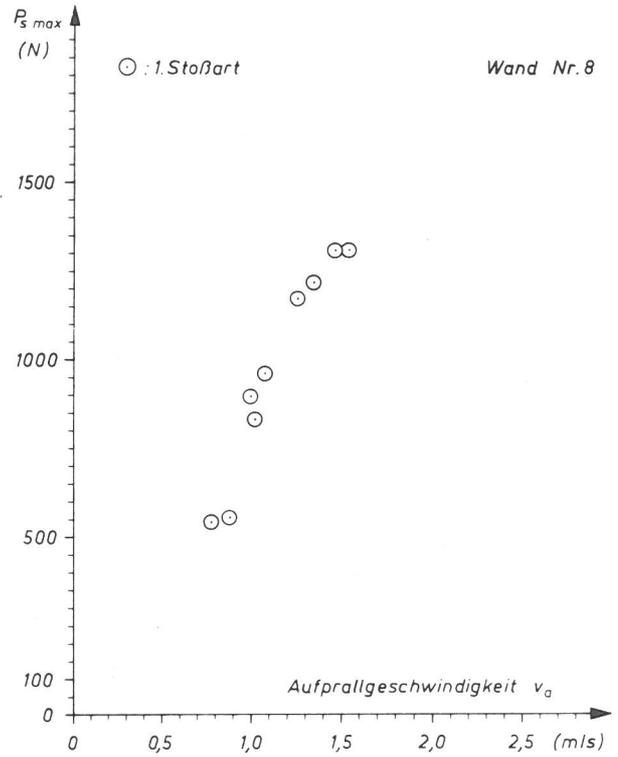


Bild 2.2/18  
Maximale Stoßkraft  $P_s\ max$

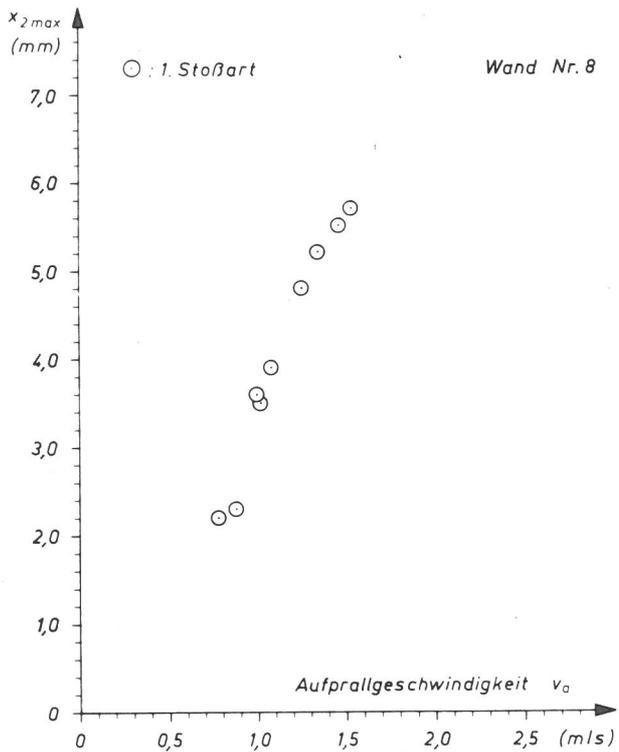


Bild 2.2/17  
Maximaler Weg  $x_{2\ max}$  der Wand an der Stoßstelle

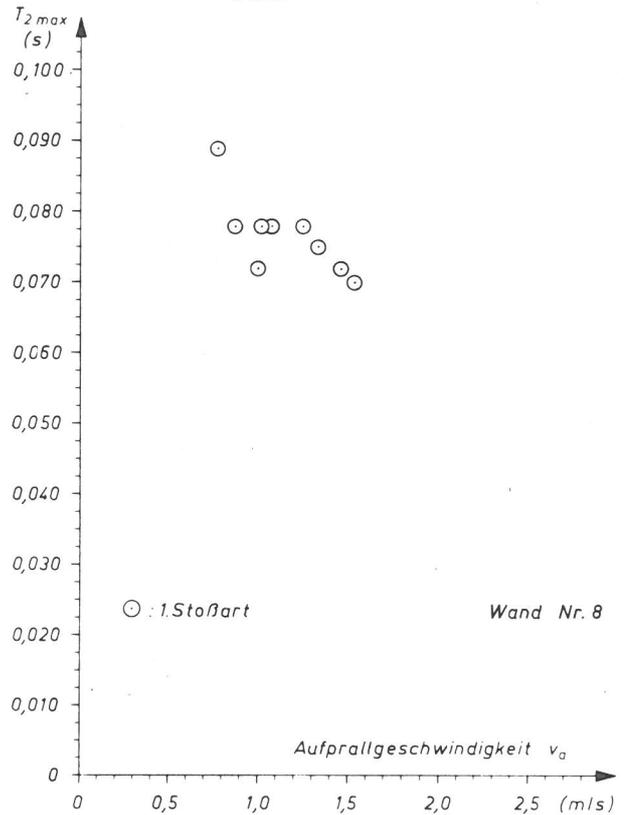


Bild 2.2/19  
Zeit  $T_{2\ max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

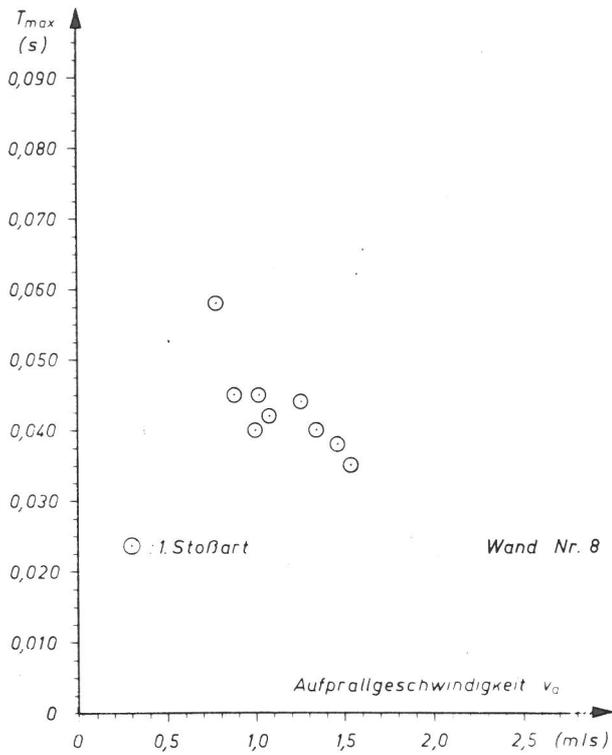


Bild 2.2/20  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

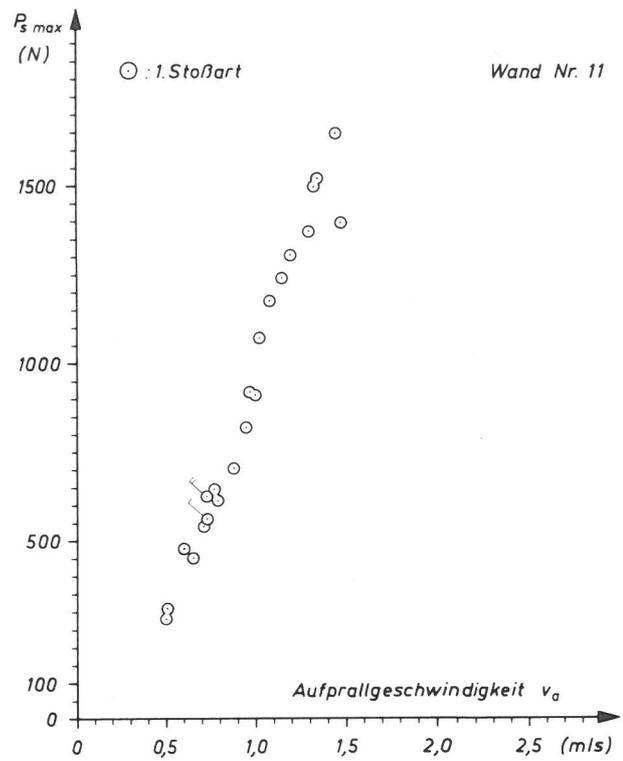


Bild 2.2/22  
Maximale Stoßkraft  $P_s max$

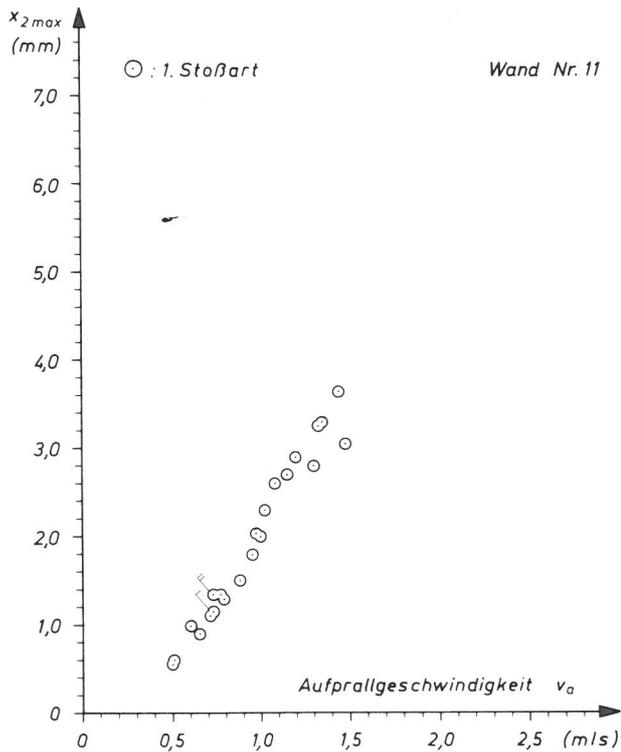


Bild 2.2/21  
Maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

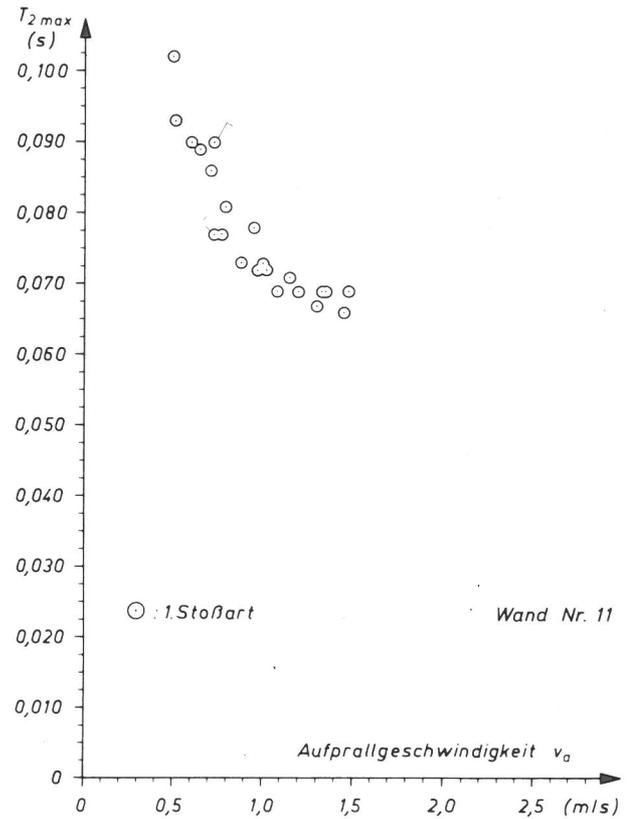


Bild 2.2/23  
Zeit  $T_{2max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

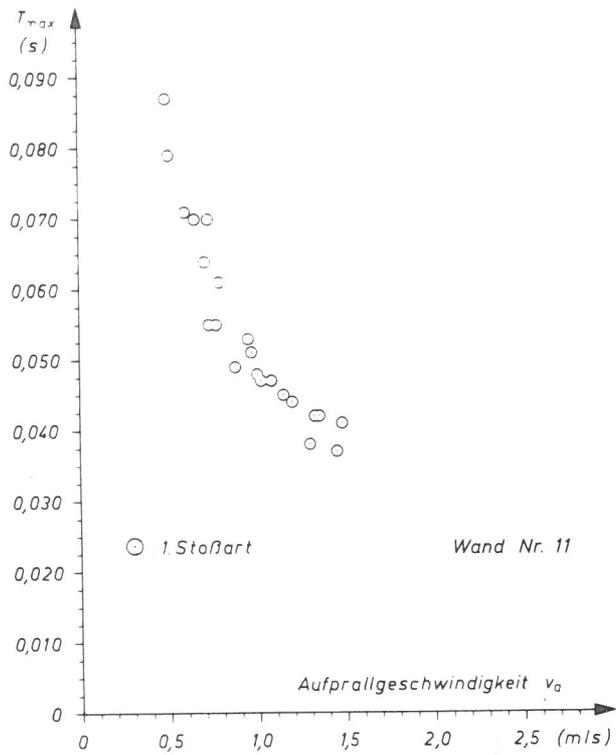


Bild 2.2/24  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

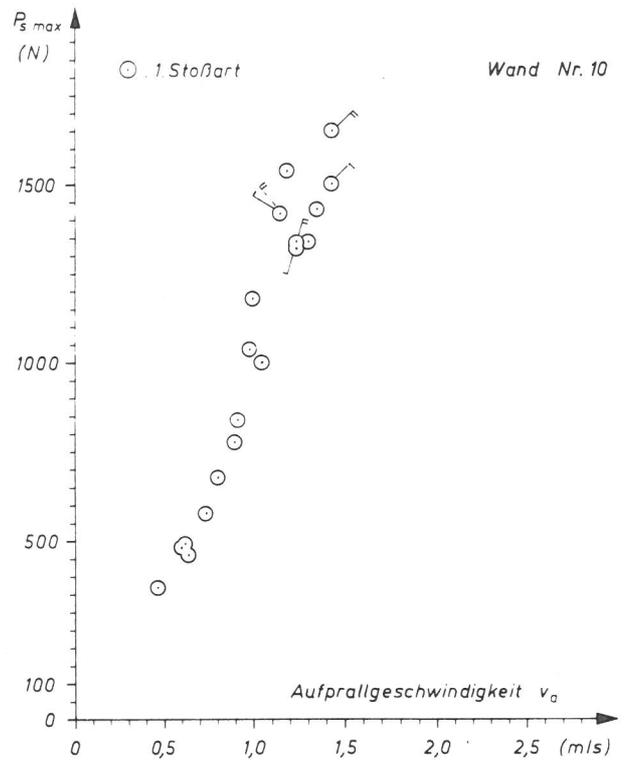


Bild 2.2/26  
Maximale Stoßkraft  $P_s max$

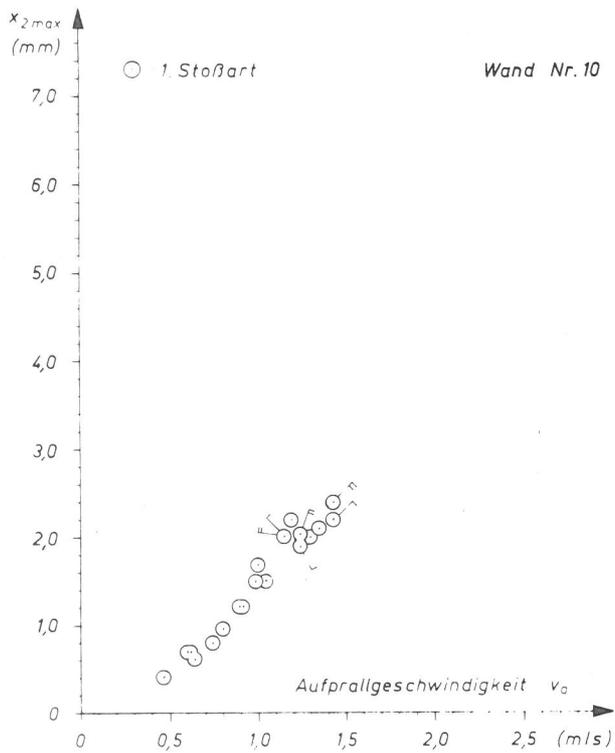


Bild 2.2/25  
Maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

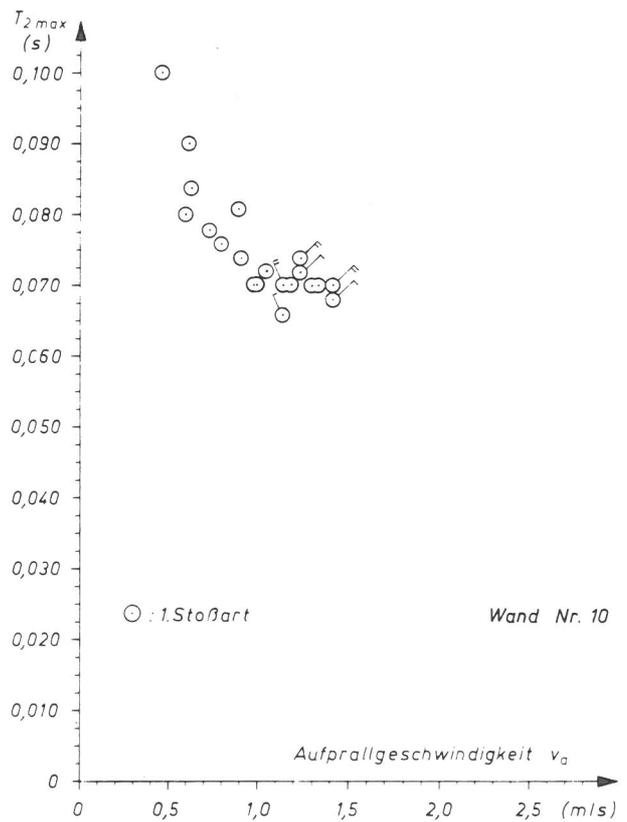


Bild 2.2/27  
Zeit  $T_{2max}$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Wand

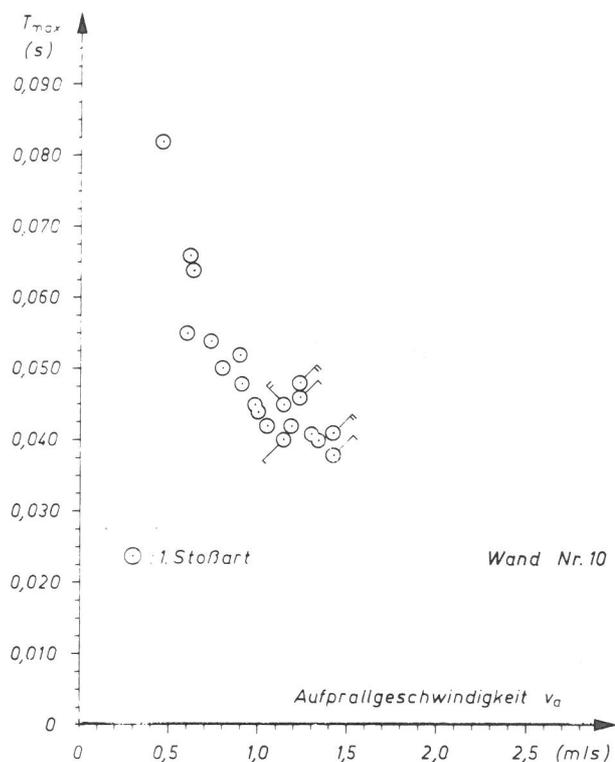


Bild 2.2/28  
Zeit  $T_{max}$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft

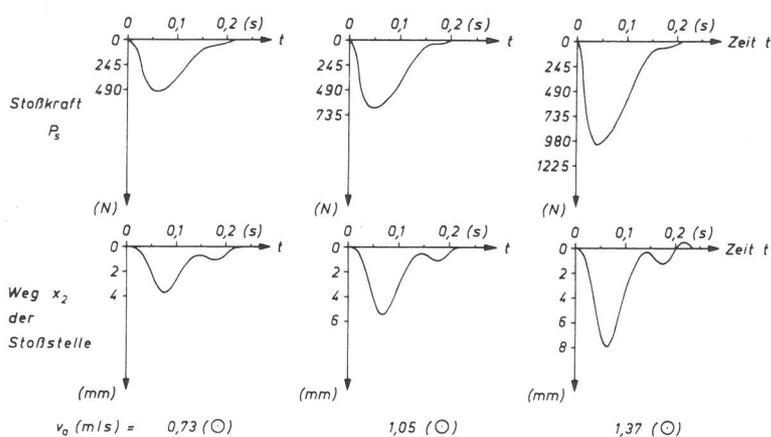


Bild 2.2/31  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 7

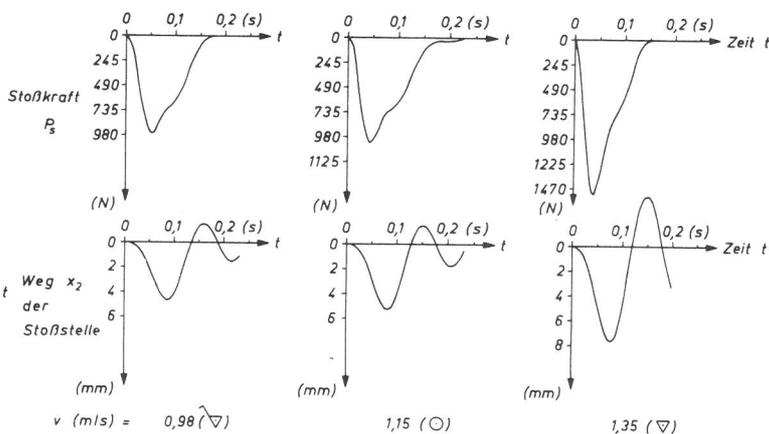


Bild 2.2/32  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 5 + 6

Bild 2.2/29  
Beispiele für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 1

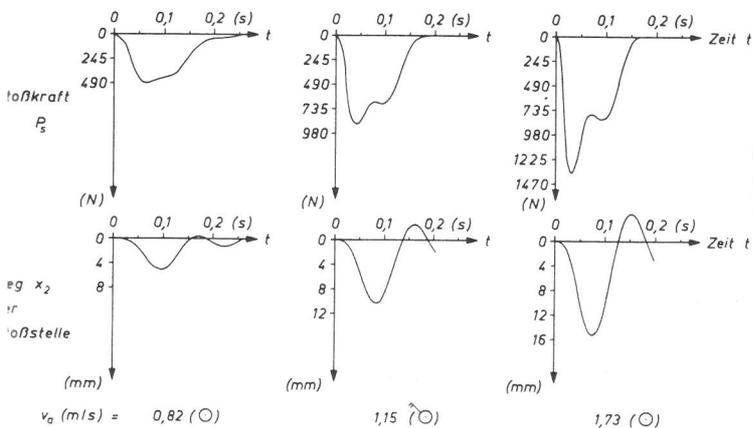


Bild 2.2/30  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 4

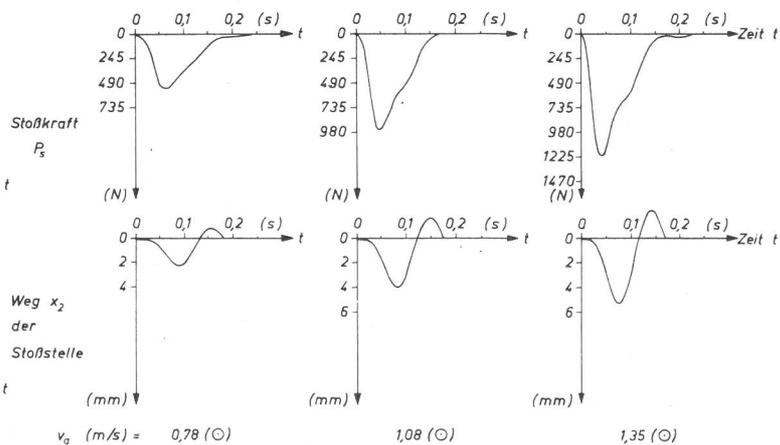


Bild 2.2/33  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 8

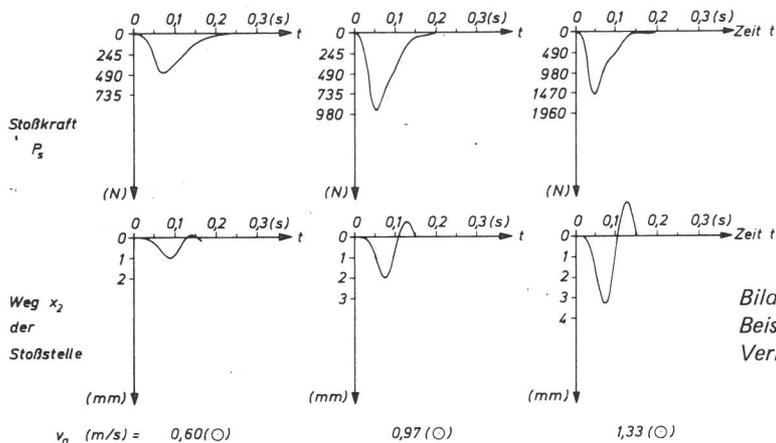


Bild 2.2/34  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 11

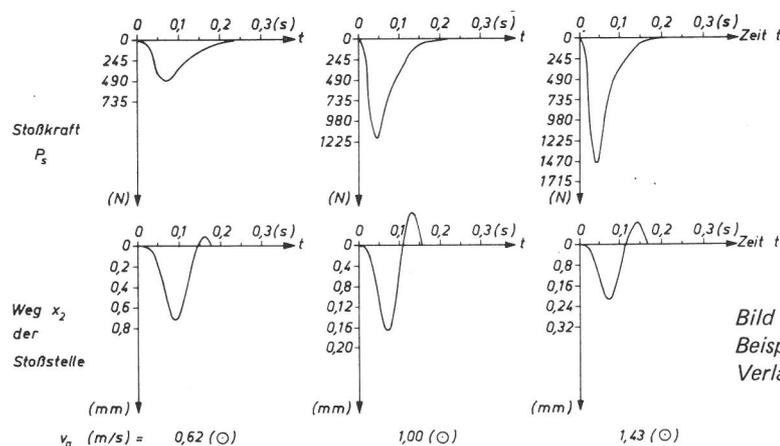


Bild 2.2/35  
Beispiel für den Stoßstellenweg-Zeit- und den Stoßkraft-Zeit-Verlauf beim Schulterstoß gegen Wand Nr. 10

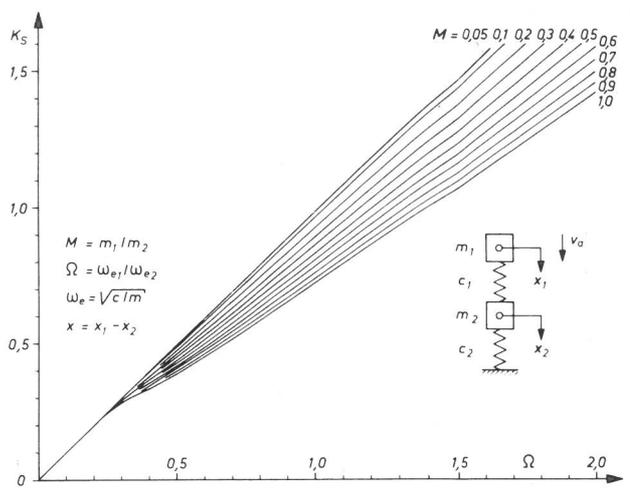
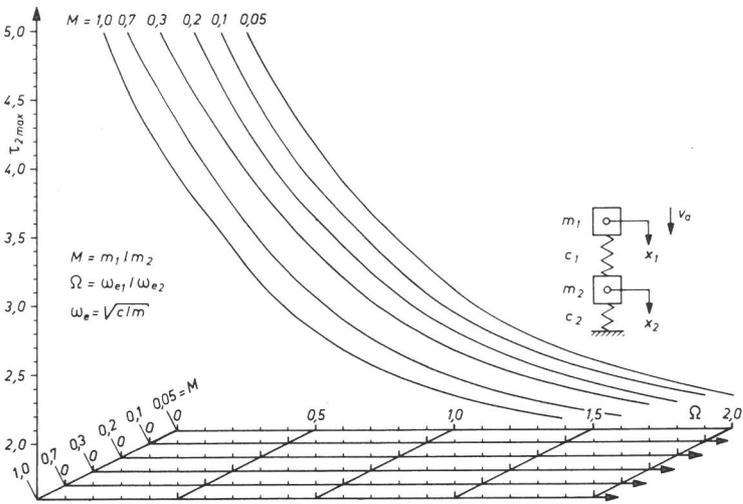
### 2.3 Aufbereitung der Versuchsergebnisse

Das einfachste mechanische Modell, mit dem der mit der Schulter gegenstoßende Mensch simuliert werden kann, ist ein Masse-Feder-System mit linear elastischer Federkennlinie. Dazu muß man für jeden der durchgeführten Versuche dasjenige System ermitteln, das bei einem Aufprall mit gleicher Geschwindigkeit wie im Versuch den gleichen Maximalwert für den Stoßstellenweg und die gleiche Zeitdauer vom Stoßbeginn bis zum Erreichen dieses Maximalwertes im gestoßenen Teil erzwingen würde. Eine besondere Schwierigkeit ist hier nur, daß für die zur Debatte stehenden komplizierten Bauteile das Verhalten unter so einem Massestoß nicht exakt theoretisch erfaßt werden kann. Deswegen ist es erforderlich, auch das Bauteil durch ein einfaches Masse-Feder-System sich ersetzt zu denken. Damit sind vier Größen aus den Versuchsergebnissen zu bestimmen, nämlich die wirkende Masse  $m_1$  und die Federkonstante  $c_1$  des den Menschen simulierenden Systems und die mitwirkende Masse  $m_2$  und die Federkonstante  $c_2$  des das Bauteil simulierenden Systems. Hierzu werden außer dem Maximalwert des Stoßstellenweges und der Zeitdauer  $T_{2\max}$ , bis er erreicht ist, auch der Maximalwert der Stoßkraft  $P_{s\max}$  und die entsprechende Zeitdauer  $T_{\max}$  herangezogen. Die Versuchsergebnisse werden also so aufbereitet, daß man die Kennwerte eines Zwei-Massen-Schwingers erhält, bei dem bei einem Stoß des einen Masse-Feder-Systems gegen das andere sich die Feder

des gestoßenen Systems soweit zusammengedrückt wie der Maximalwert des Weges der Stoßstelle am Bauteil beim Schulterstoß und in der Feder zwischen der stoßenden und der gestoßenen Masse maximal eine Kraft entsteht, die gleich der gemessenen maximalen Stoßkraft zwischen Mensch und Bauteil ist. Außerdem stimmen auch die Zeitdauern bis zum Erreichen dieser Maximalwerte bei dem Stoß am Zwei-Massen-Schwinger mit denen beim Schulterstoß überein.

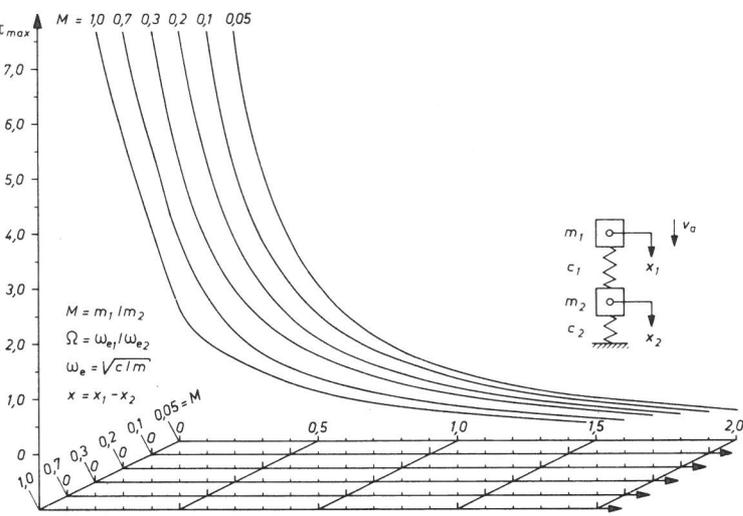
Grundlage dieser Umrechnung sind die Ergebnisse der Berechnungen am Masse-Feder-Masse-Feder-Schwinger von Limberger (1971), die im hier benötigten Parameterbereich vergrößert und ergänzt in den Bildern 2.3/1 bis 2.3/4 dargestellt sind. Damit können die gesuchten Kenngrößen  $c_1$ ,  $m_1$ ,  $c_2$  und  $m_2$  wie folgt bestimmt werden:

Aus dem Versuch stehende Werte  $T_{2\max}$ ,  $T_{\max}$ ,  $x_{2\max}$ ,  $v_a$  und  $P_{s\max}$  zur Verfügung. Mit den ersten beiden und den Bildern 2.3/1 und 2.3/2 lassen sich zwei Kurvenscharen  $\Omega = \Omega(\omega_{e2})$  mit dem Parameter  $M$  konstruieren, deren Schnittpunkte Wertetripel  $(\omega_{e2}; \Omega; M)$  liefern, für die  $\tau_{2\max}/\omega_{e2} = T_{2\max}$  und  $\tau_{\max}/\omega_{e2} = T_{\max}$  immer gleich den Versuchswerten sind. Die Übereinstimmung der Zeitdauern bis zum Erreichen der Maximalwerte  $x_{2\max}$  und  $P_{s\max}$  zwischen Wirklichkeit und Modell ist damit erreicht. Die Wertepaare  $(\Omega; M)$  aus diesen Wertetripeln er-



**Bild 2.3/1**  
 Bezogene Zeit  $\tau_{2max} = T_{2max} \cdot \omega_{e2}$  vom Beginn des Stoßes mit dem Aufprallimpuls  $m_1 \cdot v_a$  bis zum Erreichen des maximalen Weges der Masse  $m_2$

**Bild 2.3/4**  
 Bezogene maximale Stoßkraft  $K_S = \frac{c_1 \cdot x_{max}}{m_1 \cdot v_a \cdot \omega_{e2}}$  in der Feder 1 infolge des Stoßes mit dem Aufprallimpuls  $m_1 \cdot v_a$



geben aus Bild 2.3/3 eine Kurve  $K_E(M)$ . Mit den Versuchswerten  $x_2 \max$  und  $v_a$  und den Wertepaaren  $(\omega_{e2}; M)$  aus den o.a. Wertetripeln erhält man eine weitere Kurve  $K_E = K_E(M)$  mittels

$$K_E = \frac{\omega_{e2} \cdot x_2 \max}{M \cdot v_a} \quad (2.3-1)$$

Der Schnittpunkt dieser beiden Kurven liefert das gesuchte  $M$  und damit über  $\Omega(M)$  und  $\omega_{e2}(M)$  aus den Wertetripeln die zugehörigen Werte für  $\Omega$  und  $\omega_{e2}$ . Jetzt stimmen auch die maximalen Verformungen  $x_2 \max$  der gestoßenen Teile in Wirklichkeit und im Modell überein. Mit diesen drei Werten und den Versuchswerten  $P_{S \max}$  und  $v_a$  errechnet sich unter Verwendung von  $K_S(M; \Omega)$  aus Bild 2.3/4 die Kenngröße  $c_2$  zu

$$c_2 = \frac{\omega_{e2} \cdot P_{S \max}}{K_S \cdot M \cdot v_a} \quad (2.3-2)$$

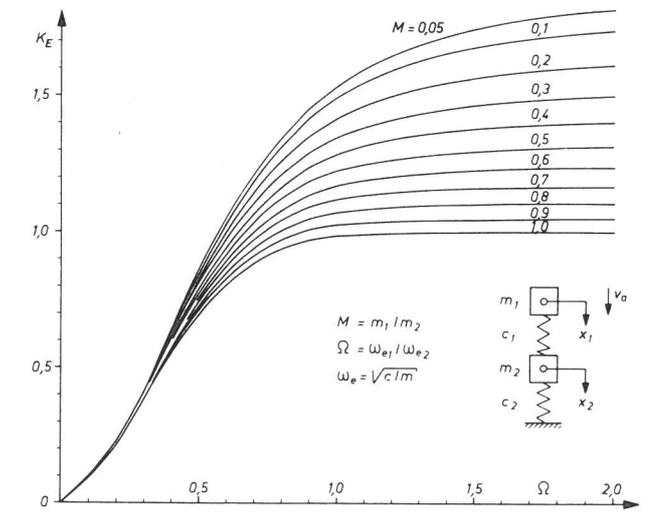
Damit ist die geforderte Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen aus dem Schulterstoß und den entsprechenden Werten am Modell erreicht. Die anderen Kenngrößen für den Menschen- und für den Bauteilsimulator ergeben sich dann aus

$$c_1 = c_2 \cdot M \cdot \Omega^2 \quad (2.3-3)$$

$$m_2 = c_2 / \omega_{e2}^2 \quad (2.3-4)$$

$$m_1 = M \cdot m_2 \quad (2.3-5)$$

**Bild 2.3/2**  
 Bezogene Zeit  $\tau_{max} = T_{max} \cdot \omega_{e2}$  vom Beginn des Stoßes mit dem Aufprallimpuls  $m_1 \cdot v_a$  bis zum Erreichen der maximalen Stoßkraft  $P_{S \max} = c_1 \cdot x_{max}$  in der Feder 1



**Bild 2.3/3**  
 Bezogener maximaler Widerstand  $K_E = \frac{c_2 \cdot x_2 \max}{m_1 \cdot v_a \cdot \omega_{e2}}$  in der Feder 2 infolge des Stoßes mit dem Aufprallimpuls  $m_1 \cdot v_a$

Die so ermittelten Werte für  $c_1$  und  $m_1$  für den Menschensimulator sind für jede untersuchte Wandart in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  in den Bildern 2.3/5 bis 2.3/18 aufge-

tragen. Die Werte  $c_2$  und  $m_2$  für die Bauteilsimulatoren sind entsprechend in den Bildern 2.3/19 bis 2.3/22 dargestellt. (Bei den gestrichelt eingefassten Werten handelt es sich um Versuchsergebnisse, die mit einem systematischen Fehler behaftet sind, wie die weitere Auswertung zeigte, s. a Bilder 2.4/29 und 2.4/32).

Aus diesen Bildern läßt sich folgendes ersehen:

Für die mitwirkende Masse  $m_1$  des Menschensimulators ergab sich erwartungsgemäß selbst bei gleicher Wand und praktisch gleicher Aufprallgeschwindigkeit kein konstanter Wert. Die Versuchsperson war verständlicherweise nicht in der Lage, jeden Stoß exakt gleich auszuführen.

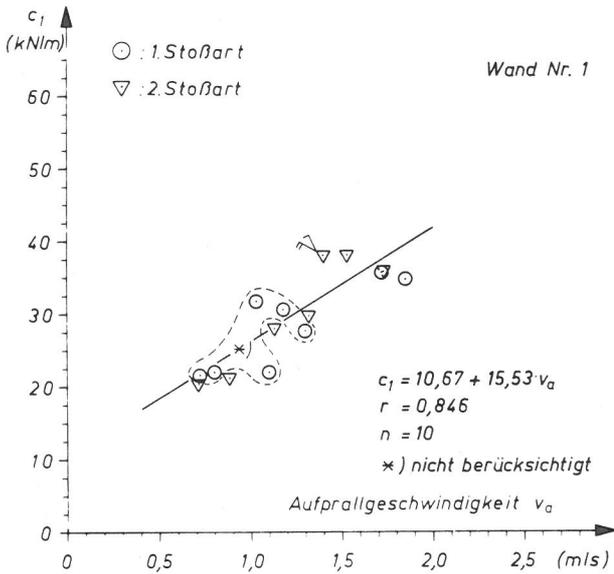


Bild 2.3/5  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 1)

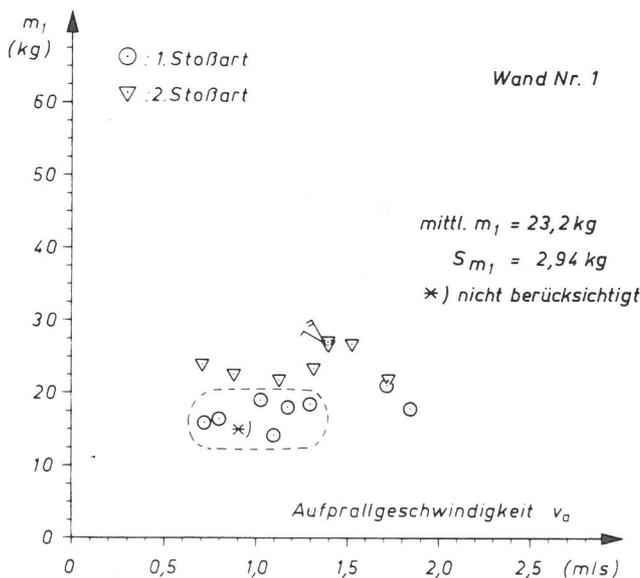


Bild 2.3/6  
Wirkende Masse  $m_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 1)

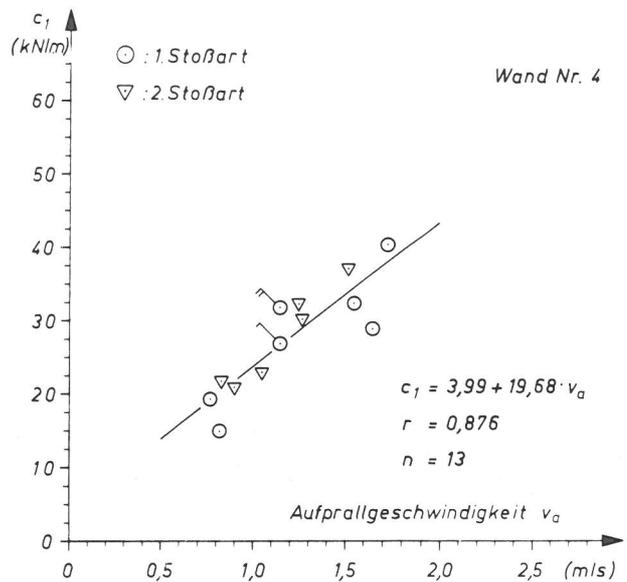


Bild 2.3/7  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 4)

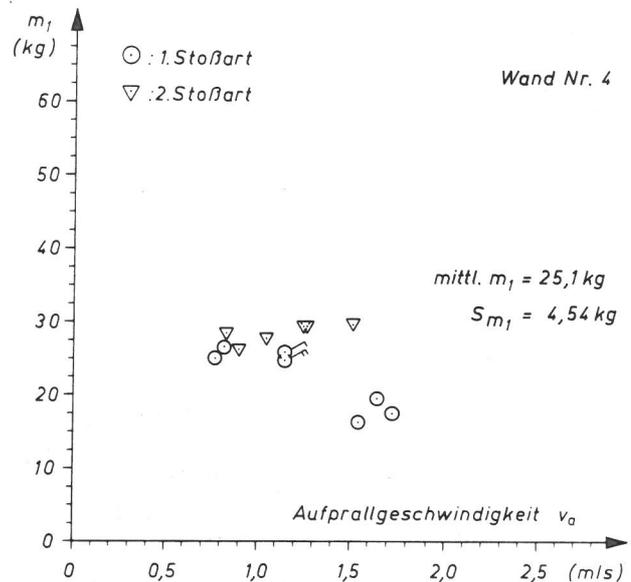


Bild 2.3/8  
Wirkende Masse  $m_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 4)

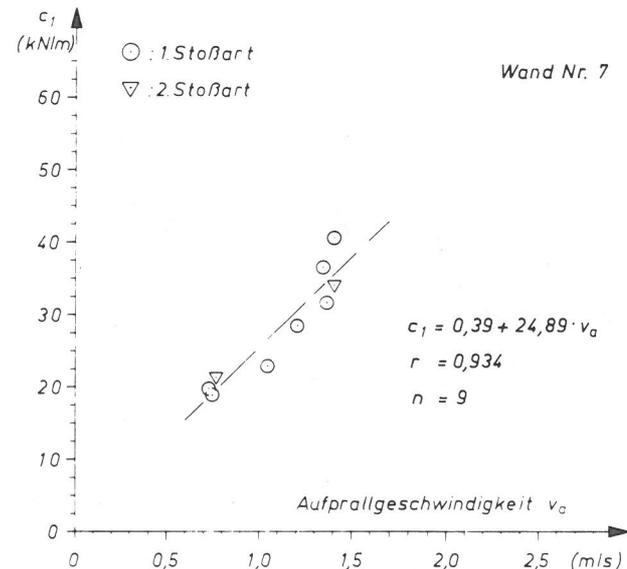


Bild 2.3/9  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 7)

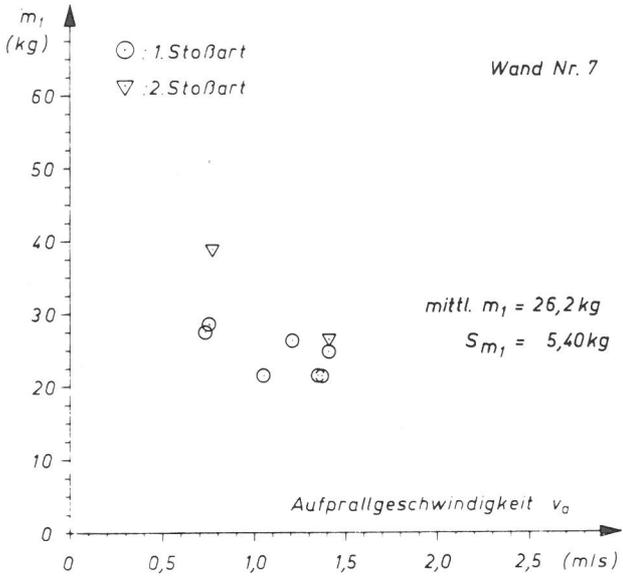


Bild 2.3/10  
Wirksame Masse  $m_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 7)

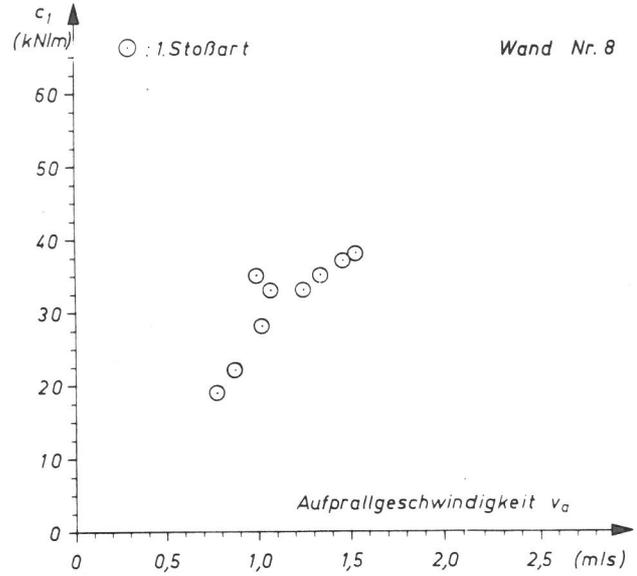


Bild 2.3/13  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 8)

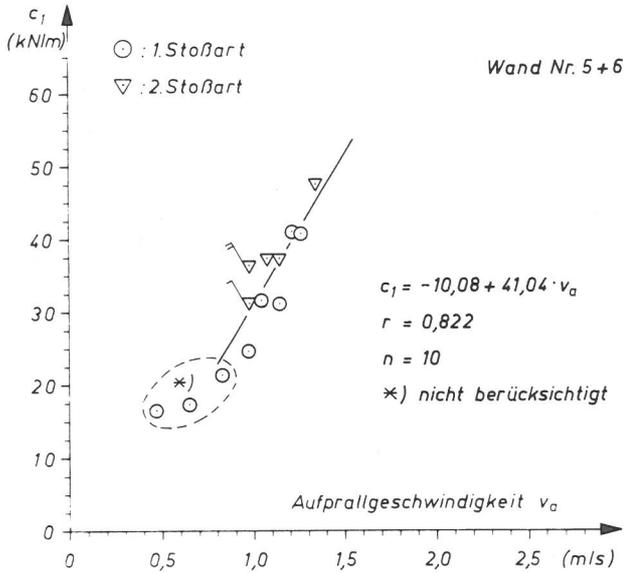


Bild 2.3/11  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 5 + 6)

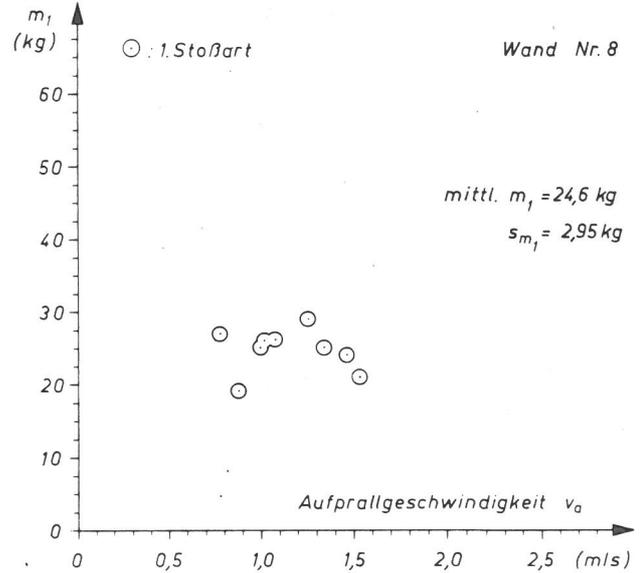


Bild 2.3/14  
Wirksame Masse  $m_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 8)

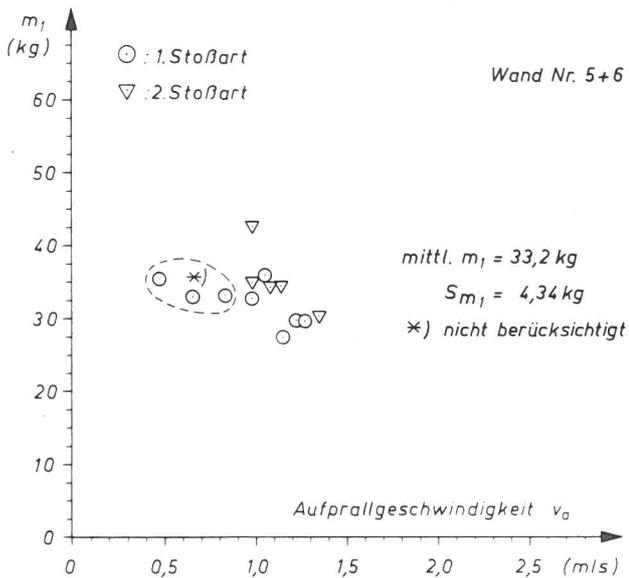


Bild 2.3/12  
Wirksame Masse  $m_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 5 + 6)

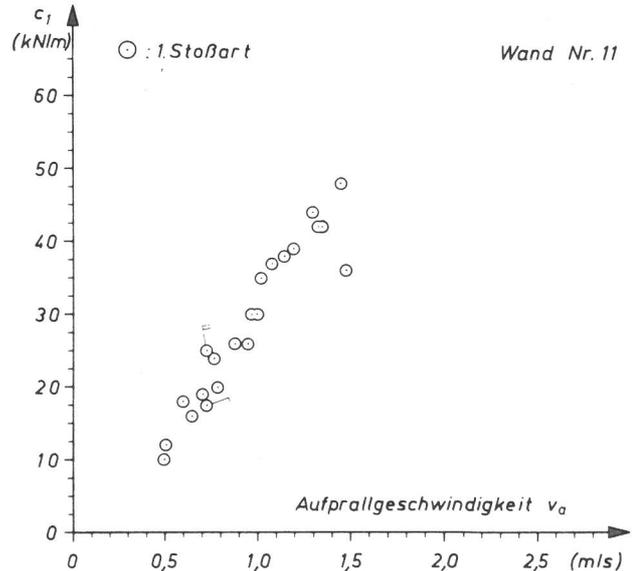


Bild 2.3/15  
Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators (Wand Nr. 11)

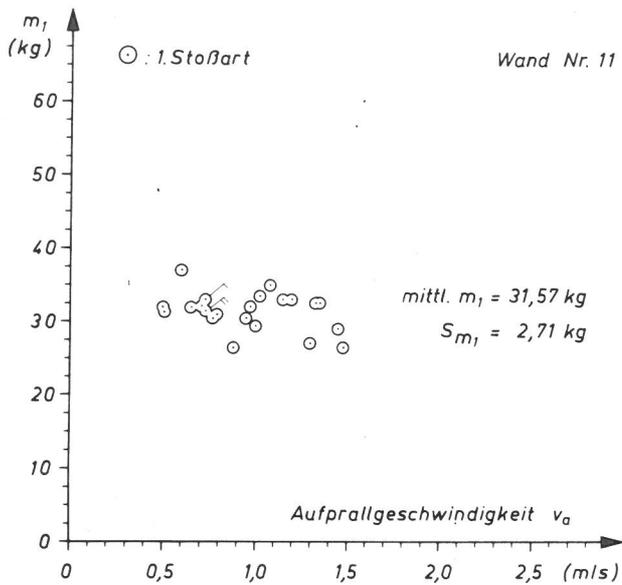


Bild 2.3/16  
Wirkende Masse  $m_1$  des Menschengesimsulators (Wand Nr. 11)

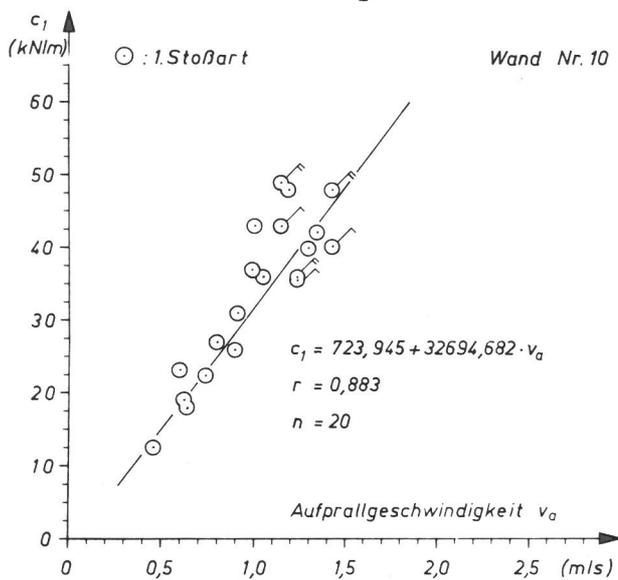


Bild 2.3/17  
Federkonstante  $c_1$  des Menschengesimsulators (Wand Nr. 10)

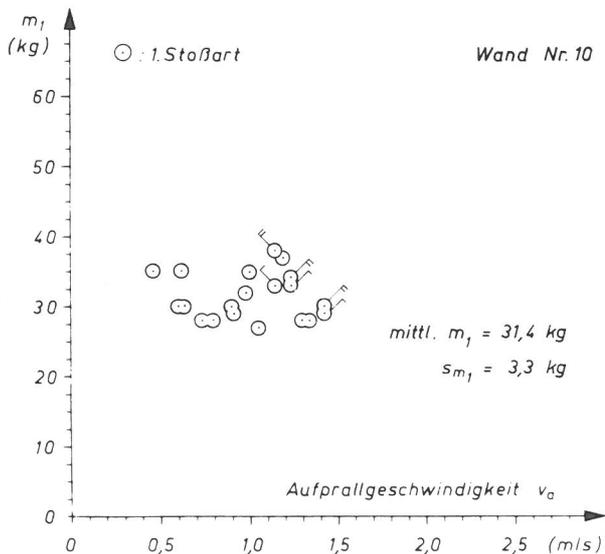


Bild 2.3/18  
Wirkende Masse  $m_1$  des Menschengesimsulators (Wand Nr. 10)

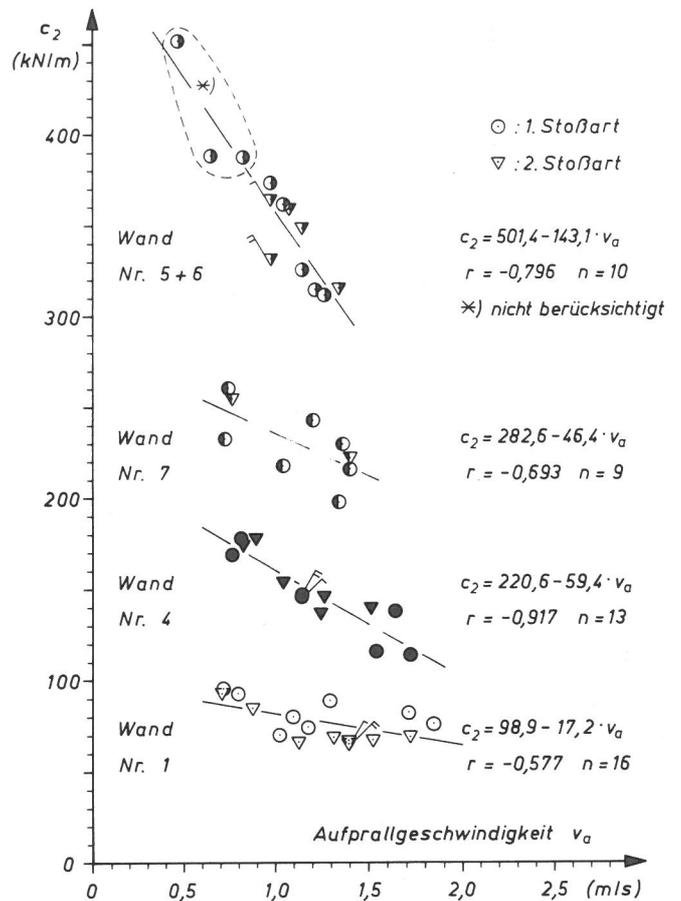


Bild 2.3/19  
Federkonstante  $c_2$  des Wandsimulators

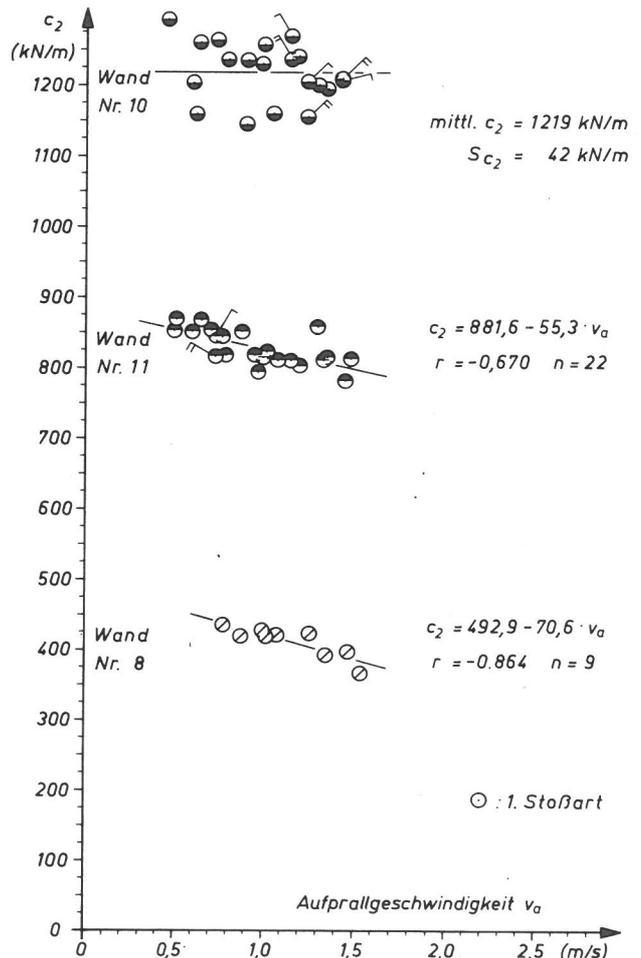


Bild 2.3/20  
Federkonstante  $c_2$  des Wandsimulators

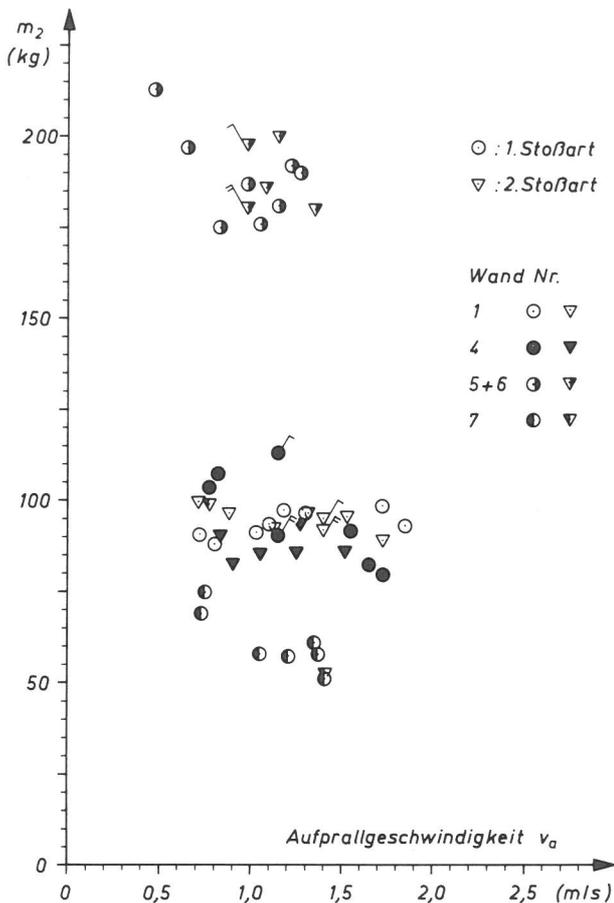


Bild 2.3/21  
Mitwirkende Masse  $m_2$  des Wandsimulators (einschließlich Kraftmeßdose)

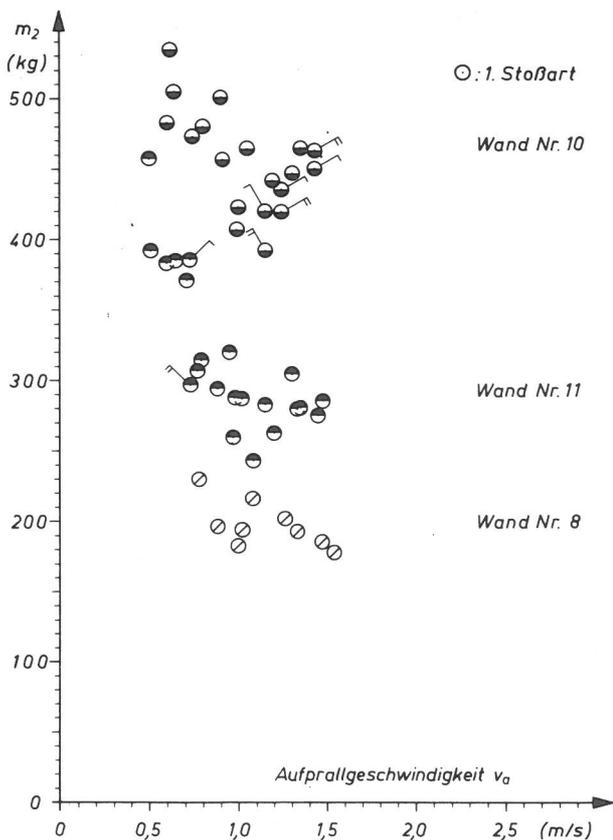


Bild 2.3/22  
Mitwirkende Masse  $m_2$  des Wandsimulators (einschließlich Kraftmeßdose)

Die breite Variation der Werte für  $m_2$  und  $c_2$  zeigt, daß die Auswahl der Wandausschnitte sinnvoll war.

Die Federkonstanten  $c_2$  der Bauteilsimulatoren sind z. T. deutlich von der Aufprallgeschwindigkeit abhängig. Diese Tatsache kann darauf zurückgeführt werden, daß die Kraft-Durchbiegungs-Kurven der Wände eine von Anfang an gekrümmte Form hatten. Mit zunehmendem Weg an der Stoßstelle verringerte sich die Steifigkeit der Wand, so daß ein lineares Masse-Feder-Modell bei größeren Aufprallgeschwindigkeiten, die größeren Stoßstellenwegen entsprechen, kleinere Federkonstante aufweisen muß. Für die Wände Nr. 1, 4 und 5 + 6 war diese gleichlaufende Tendenz für das  $c_2$  der Schulterstoßversuche und das  $c_2$ , ermittelt aus dem Energiebetrag  $E$  der Kraftdurchbiegungskurven im statischen Versuch nach  $c_2 = 2 E / x_{2 \max}$ , bei gleichen Werten von Durchbiegung und Stoßstellenweg eindeutig nachweisbar. Das Verhältnis  $c_2 \text{ Stoß} / c_2 \text{ Energie}$  ergab sich bei den 33 Versuchen im Mittel zu 1,0 mit einer Standardabweichung von 0,11. (Bei Wand Nr. 7 wurde zwischen den Schulterstoßversuchen und der Registrierung der Kraft-Durchbiegungskurve bei statischer Belastung versehentlich eine Belastung aufgebracht, die größere Wege an der Stoßstelle verursachte, als sie bei den Stoßversuchen auftraten. Anscheinend veränderte diese Beanspruchung das Anfangstragverhalten der Wand dergestalt, daß bei darauffolgender Belastung nur noch eine geringere Steifigkeit als bei den Schulterstößen auftrat. Bei Wand Nr. 8 klappte nach dem letzten Stoßversuch eine Fuge zwischen oberem Kantholz und Gipsfüllung, so daß die Wand beim nachfolgenden Versuch mit statischer Belastung von vornherein weniger steif war.) Bei den Wänden Nr. 10 und 11 wurden vor und nach den Schulterstoßversuchen statische Versuche unterhalb der Rißlast durchgeführt. Dabei ergaben sich lineare Kraft-Durchbiegung-Beziehungen mit  $c_2 = 1208 \text{ kN/m}$  und  $1140 \text{ kN/m}$  bei Wand Nr. 10 sowie  $c_2 = 750 \text{ kN/m}$  und  $730 \text{ kN/m}$  bei Wand Nr. 11. Die aus den Schulterstoßversuchen errechneten  $c_2$ -Werte liegen zwischen  $1293 \text{ kN/m}$  und  $1144 \text{ kN/m}$  bei Wand Nr. 10 sowie zwischen  $868 \text{ kN/m}$  und  $782 \text{ kN/m}$  bei Wand Nr. 11, Bild 2.3/20. Die Federkonstanten  $c_2$  der gedachten Bauteilsimulatoren entsprechen also auch hier den Steifigkeitsverhältnissen an den Stoßstellen der Probekörper.

Die Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators kann nicht wie erhofft für den untersuchten Bereich als konstant angesehen werden. Sie ist eindeutig von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  abhängig. Da  $c_2$  auch von  $v_a$  abhängt, könnte die Abhängigkeit  $c_1 = c_1(v_a)$  nur über  $c_2$  erfolgen. Dann müßte immer bei gleichem  $c_2$  gleiches  $c_1$  aufgetreten sein. Das ist aber nicht der Fall. So ergab sich, Bilder 2.3/19 sowie 2.3/5 und 2.3/7:

Wand Nr.	$v_a$ m/s	$c_2$ kN/m	$c_1$ kN/m
1	0,7	95 d. h. um 100	$\approx 21$
4	1,7	115 d. h. um 100	$\approx 38$

Die Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators ist also auch unabhängig von der Steifigkeit  $c_2$  des gestoßenen Bauteils von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  abhängig.

#### 2.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

Überlegungen zur DIN 4103, Leichte Trennwände ergaben, daß als maßgebende stoßartige Beanspruchungen der Gesamtstruktur der Aufprall eines menschlichen Körpers mit einer Aufprallgeschwindigkeit von  $v_a = (2,0 \text{ bis } 2,6) \text{ m/s}$  angesetzt werden muß. Solche Geschwindigkeiten können ohne Verletzungen der Versuchsperson beim Schulterstoß nicht erzielt werden.

Bei dem weichsten untersuchten Wandausschnitt, Wand Nr. 1, lag  $v_a = 1,85 \text{ m/s}$  schon an der zumutbaren Schmerzschwelle sowohl für die Schulter als auch für Kopf und Halswirbel. Um den Kennwert  $c_1$  für den Menschensimulator bis zu  $v_a = 2,6 \text{ m/s}$  zu erhalten, müssen also die Versuchsergebnisse extrapoliert werden. Andererseits war es nicht möglich, beiden Versuchen die Verhältnisse jeweils für einen Wandausschnitt so unverändert zu halten, daß die mitwirkenden Massen  $m_1$  und  $m_2$  für die verschiedenen  $v_a$  konstant blieben. Hinzu kam die Abhängigkeit der Wandfederkonstanten  $c_2$  von  $v_a$ . Somit konnte die Extrapolation der Ergebnisse auf die o. a.  $v_a$ -Werte ohne eine glättende Berücksichtigung der unbeeinflussbar variierenden Parameter nicht vertreten werden.

Deshalb ist jeder einzelne der Versuchswerte  $x_{2 \max}$  und  $P_{S \max}$  und der Simulatorkennwert  $c_1$  mit den Rechenwerten  $m_1$ ,  $\omega_{e2}$  und  $c_2$  aus den jeweiligen Versuchen gekoppelt worden. Dies geschah in der Form, in der sie nach der Theorie direkt abhängig sind, nämlich

$$\frac{c_2 \cdot x_{2 \max}}{\omega_{e2} \cdot m_1} = K_E \cdot v_a \quad (2.4-1)$$

$$x_{2 \max}/m_1 = K_E \cdot v_a \cdot \omega_{e2}/c_2 \quad (2.4-2)$$

Bilder 2.4/1 bis 2.4/14,

$$\frac{P_{S \max}}{\omega_{e2} \cdot m_1} = K_S \cdot v_a \quad (2.4-3)$$

$$P_{S \max}/m_1 = K_S \cdot v_a \cdot \omega_{e2} \quad (2.4-4)$$

Bilder 2.4/15 bis 2.4/28 und

$$c_1/m_1 = \omega_{e1}^2 \quad (2.4-5)$$

Bilder 2.4/29 bis 2.4/35.

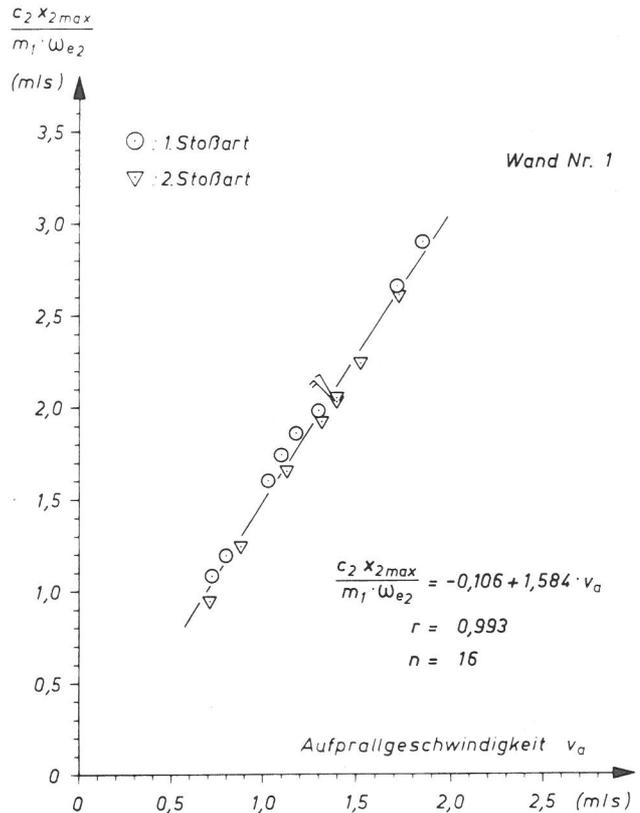


Bild 2.4/1

Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2 \max}$  der Wand an der Stoßstelle

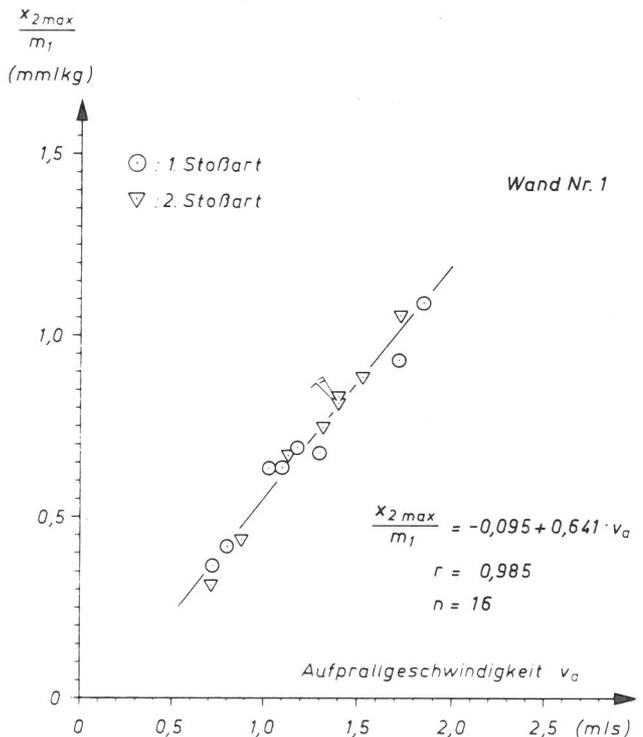


Bild 2.4/2

Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2 \max}$  der Wand an der Stoßstelle

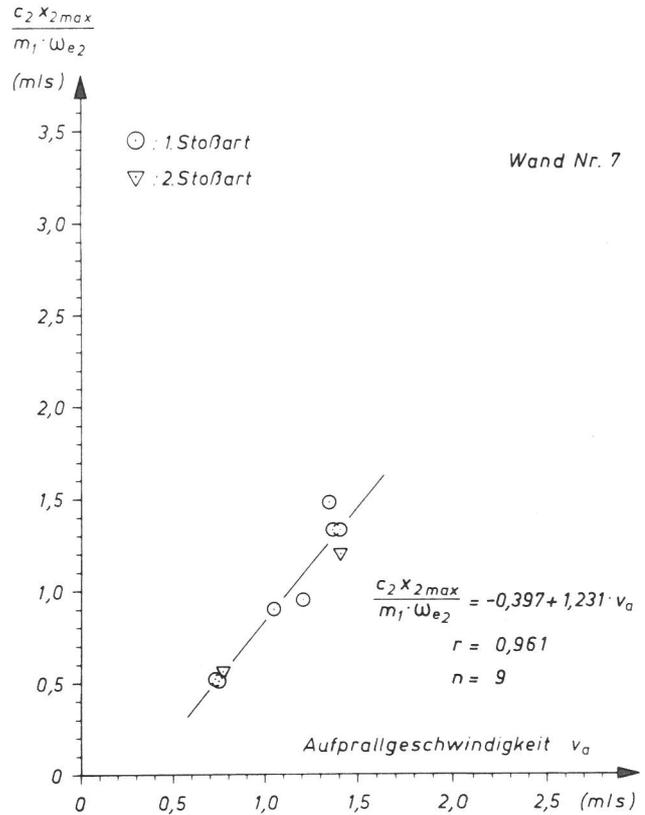
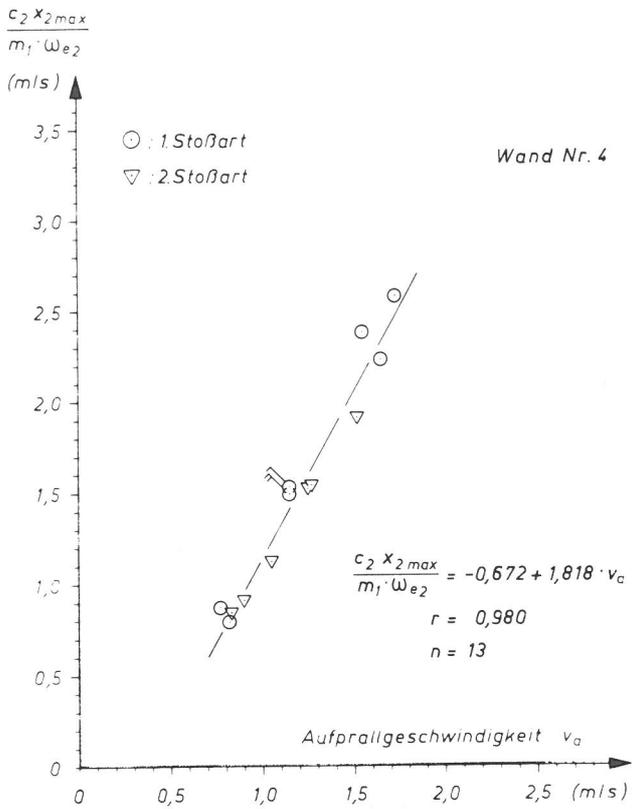


Bild 2.4/3

Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

Bild 2.4/5

Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

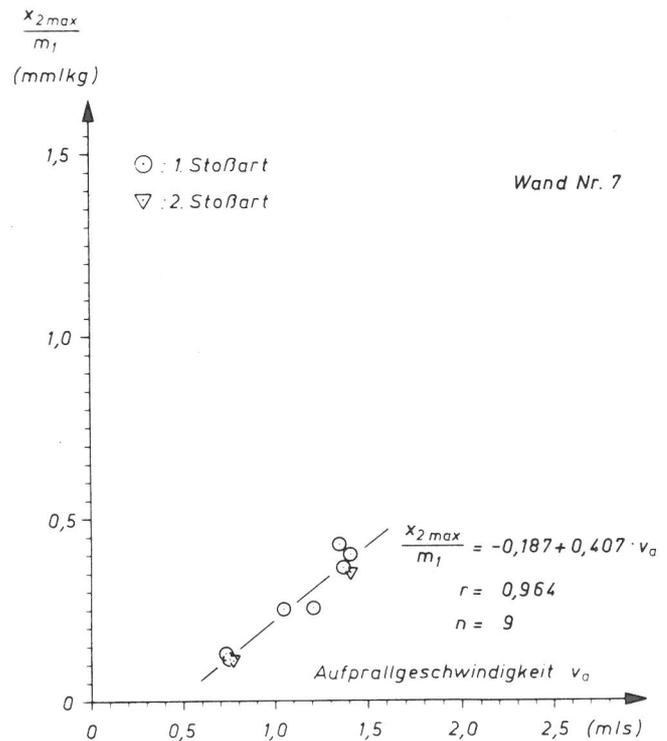
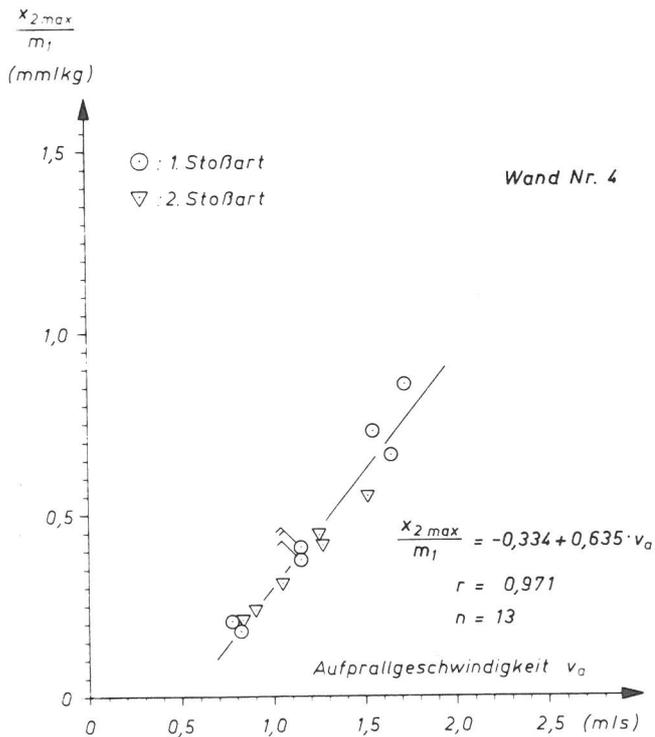


Bild 2.4/4

Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

Bild 2.4/6

Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

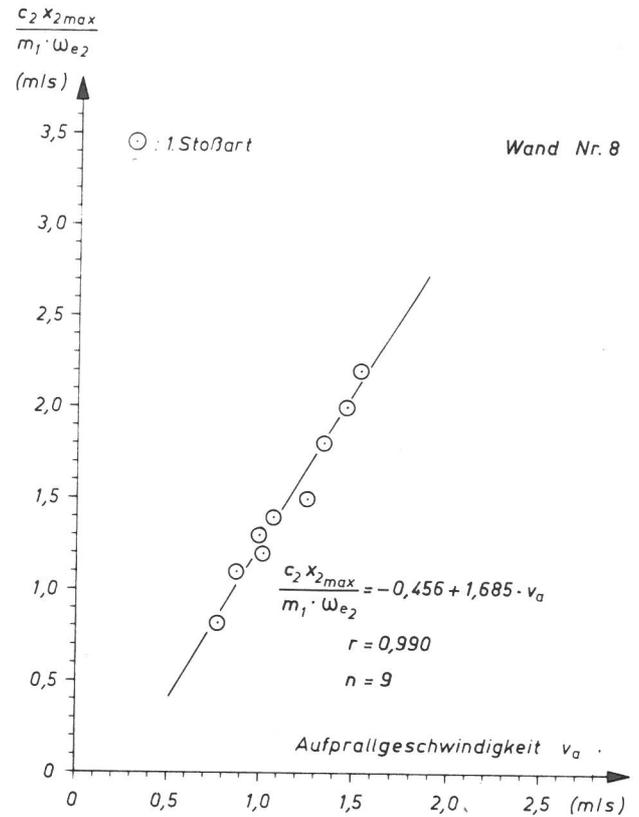
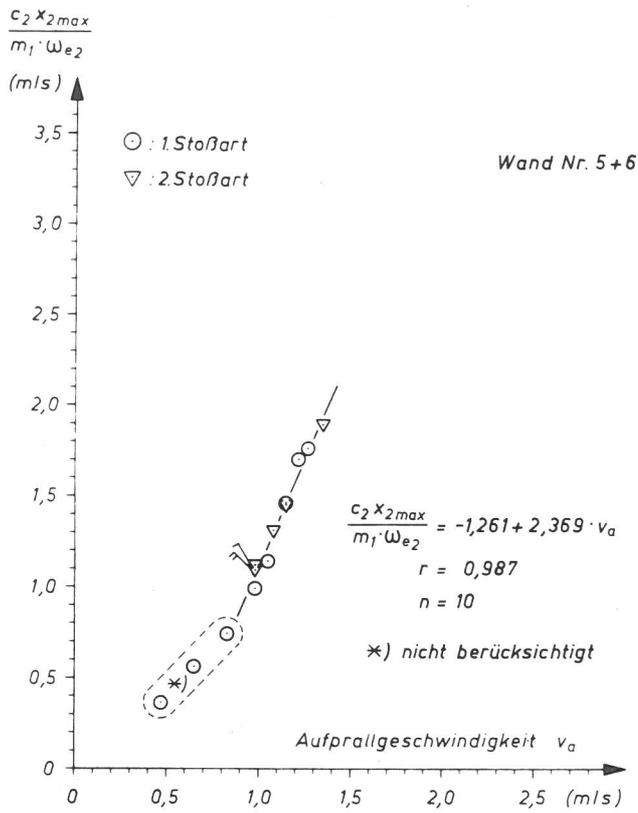


Bild 2.4/7  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

Bild 2.4/9  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

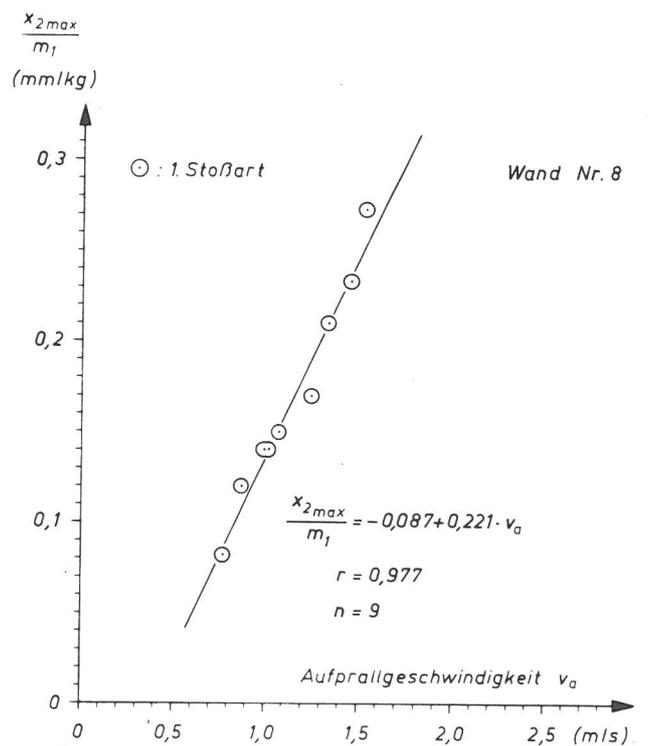
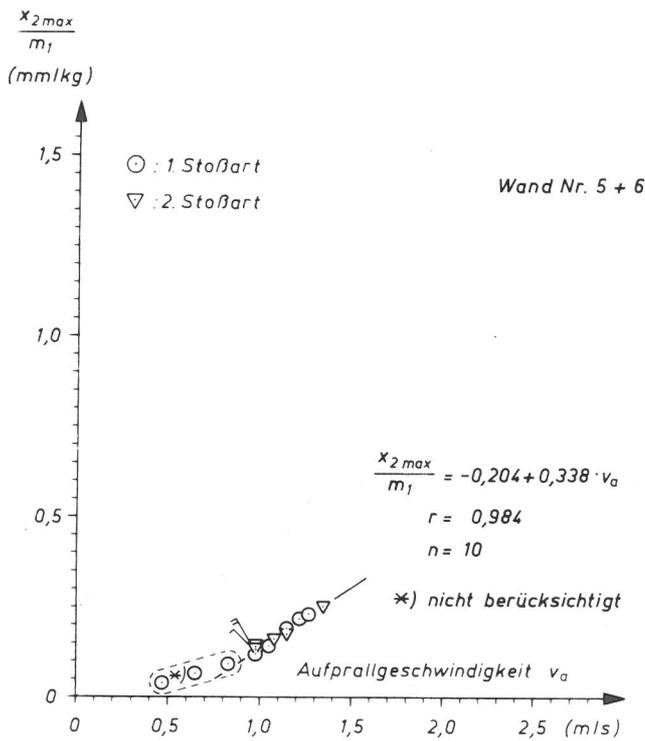


Bild 2.4/8  
Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

Bild 2.4/10  
Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

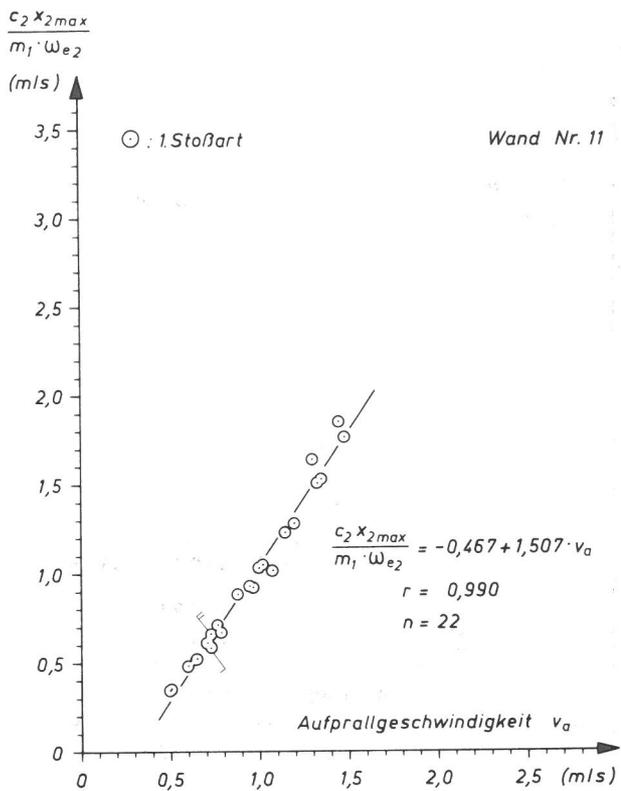


Bild 2.4/11  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

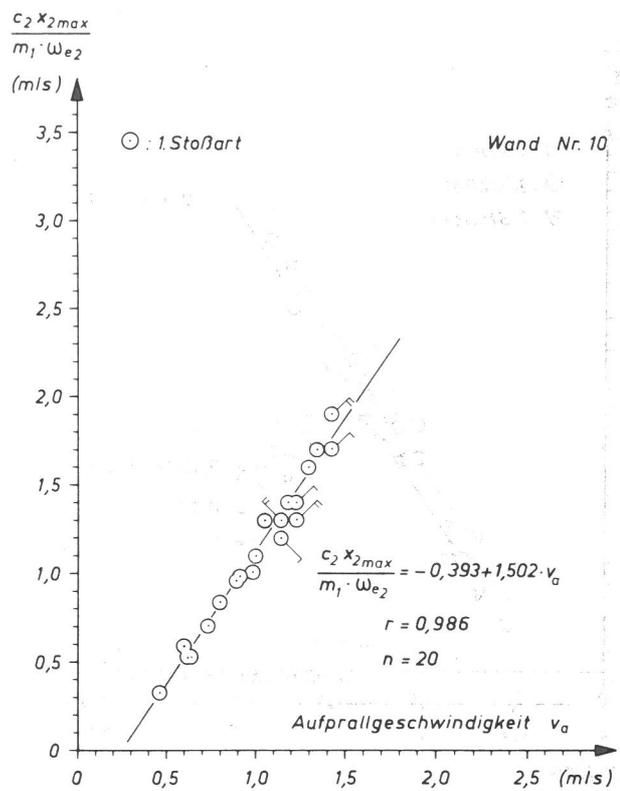


Bild 2.4/13  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}/c_2$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

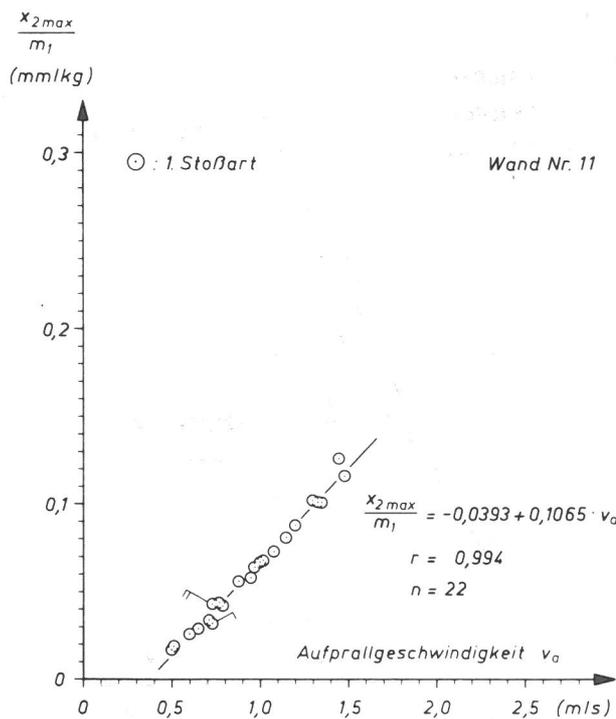


Bild 2.4/12  
Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

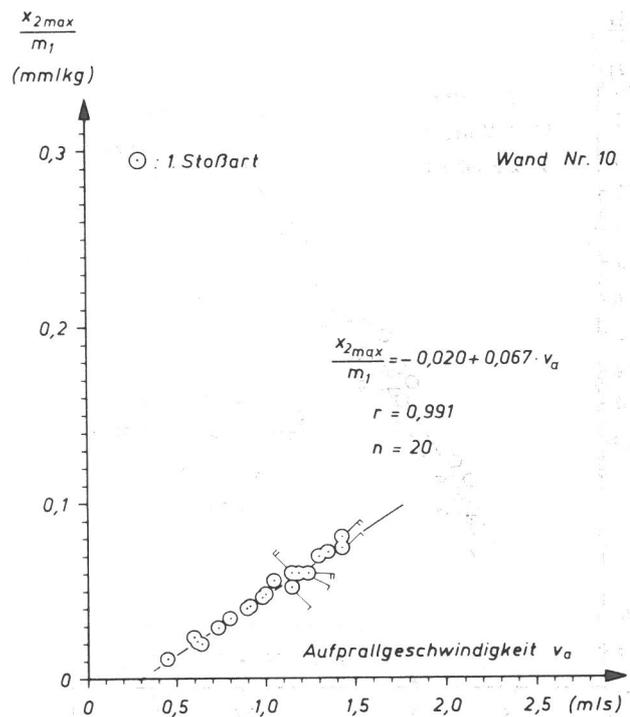


Bild 2.4/14  
Auf  $m_1$  bezogener maximaler Weg  $x_{2max}$  der Wand an der Stoßstelle

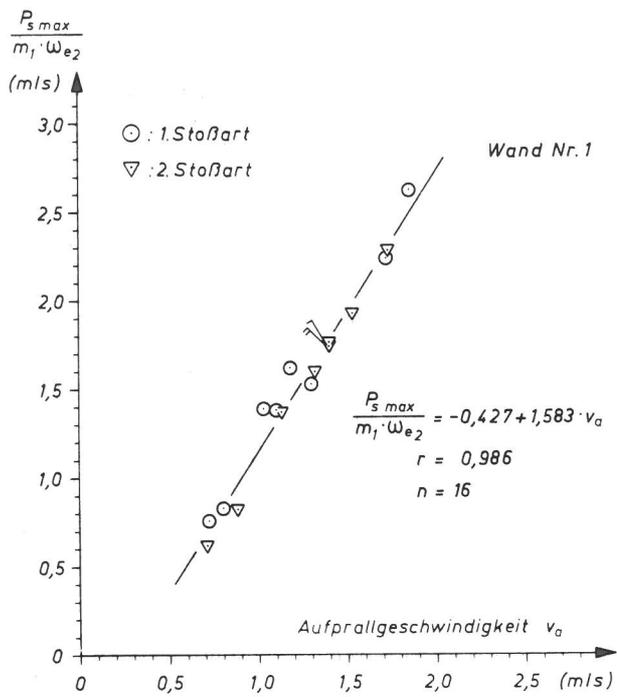


Bild 2.4/15  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_s \max$

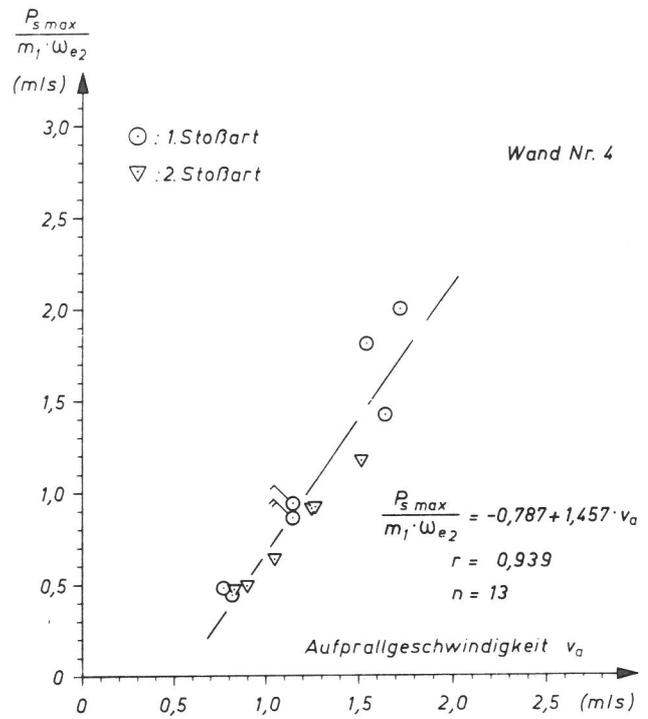


Bild 2.4/17  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_s \max$

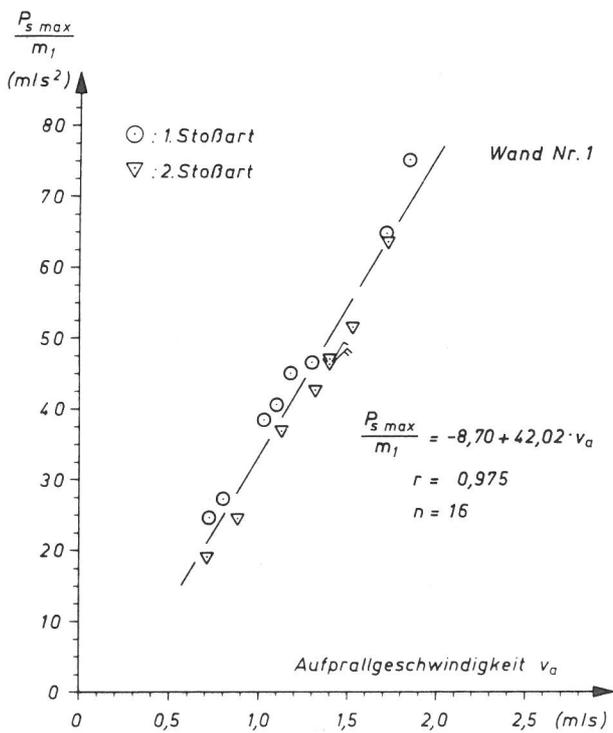


Bild 2.4/16  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_s \max$

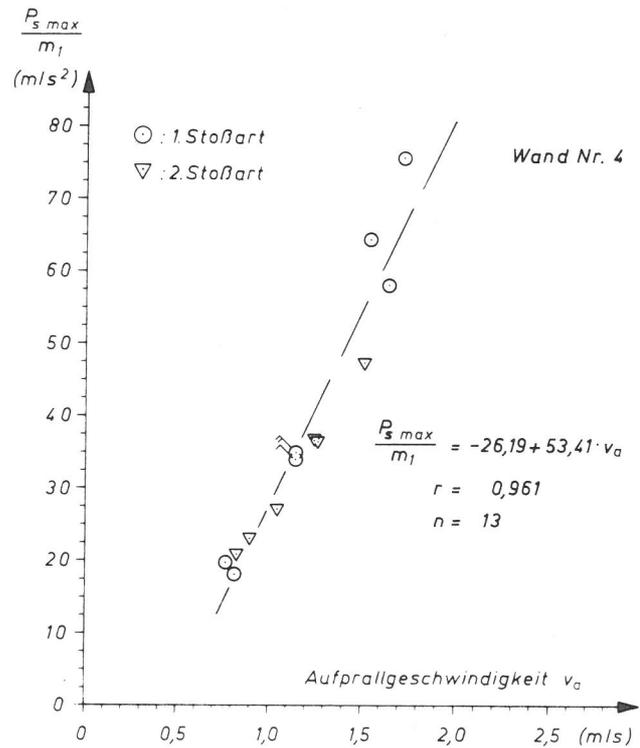


Bild 2.4/18  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_s \max$

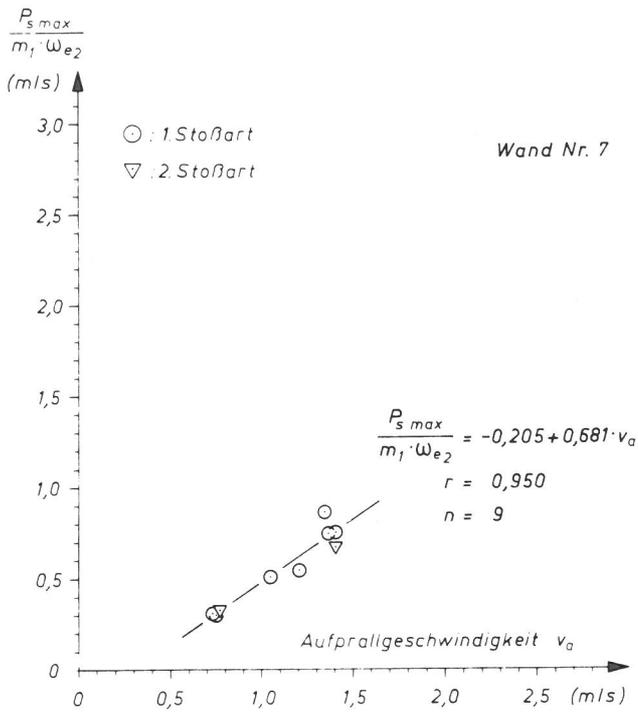


Bild 2.4/19  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

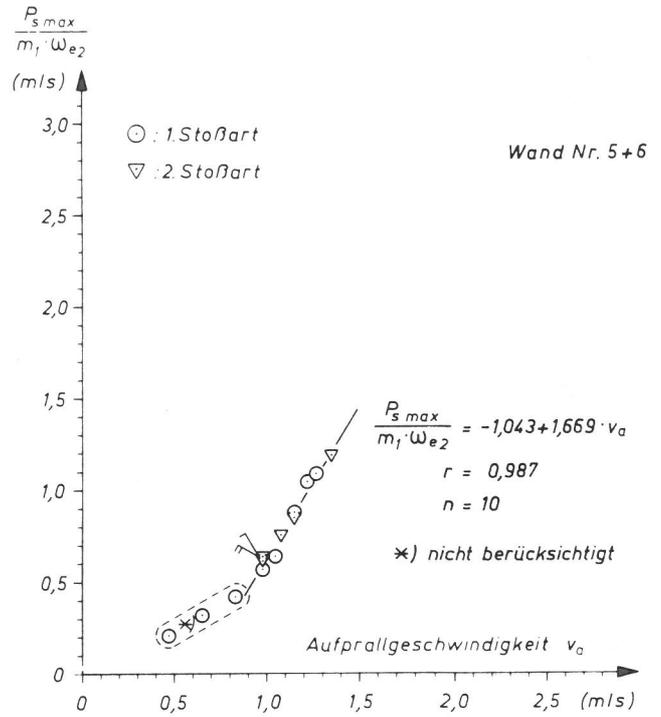


Bild 2.4/21  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

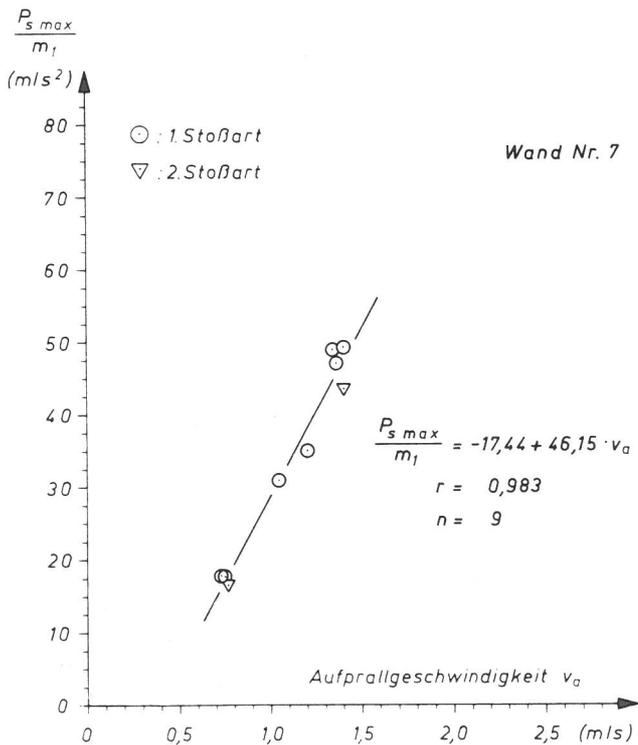


Bild 2.4/20  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

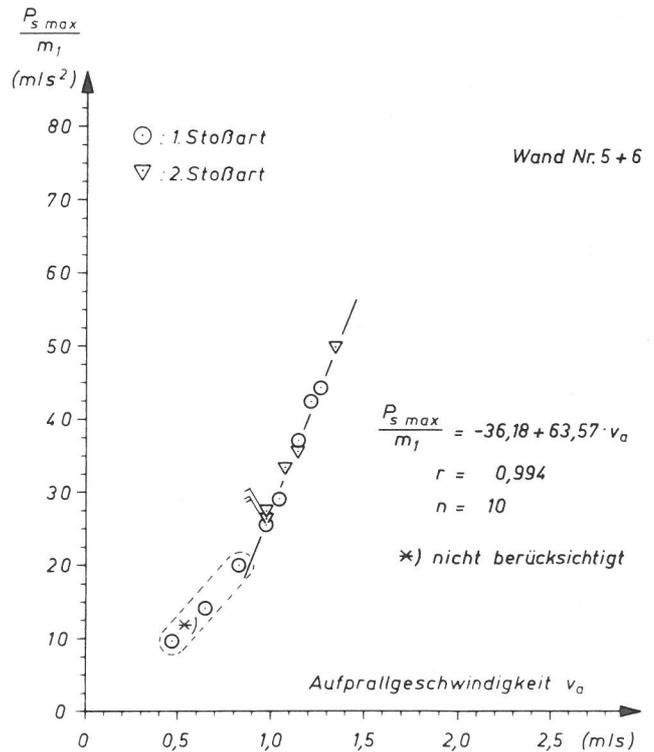


Bild 2.4/22  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

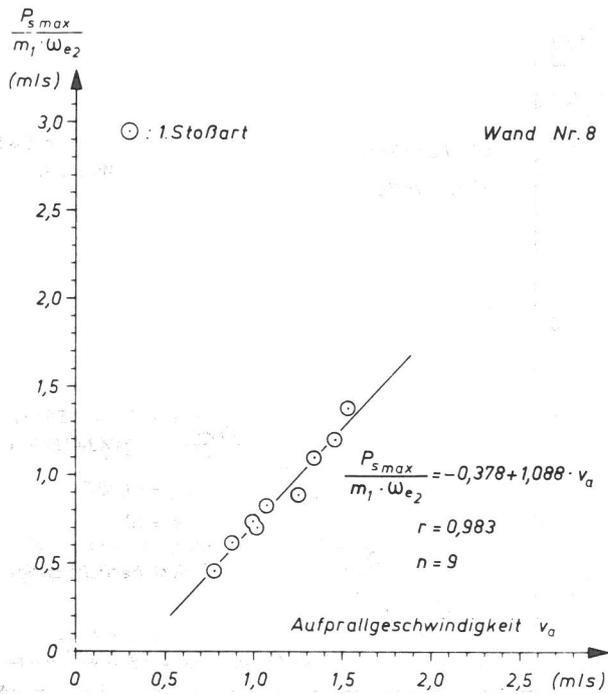


Bild 2.4/23  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

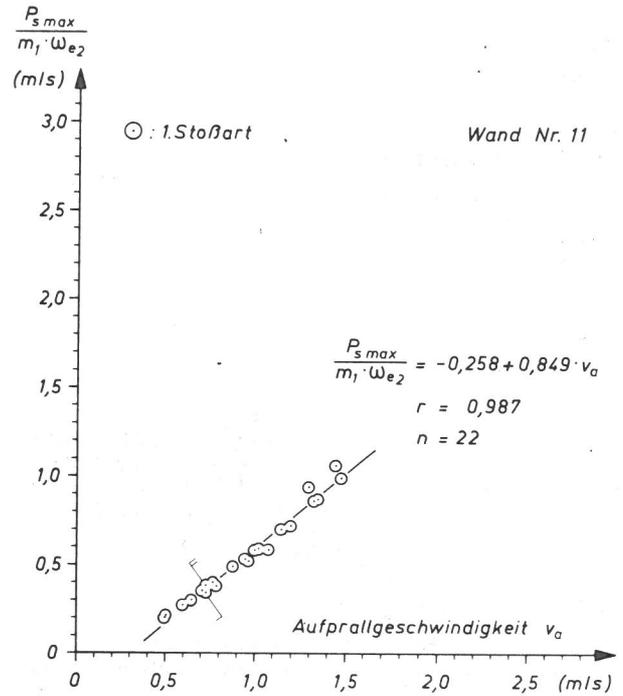


Bild 2.4/25  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

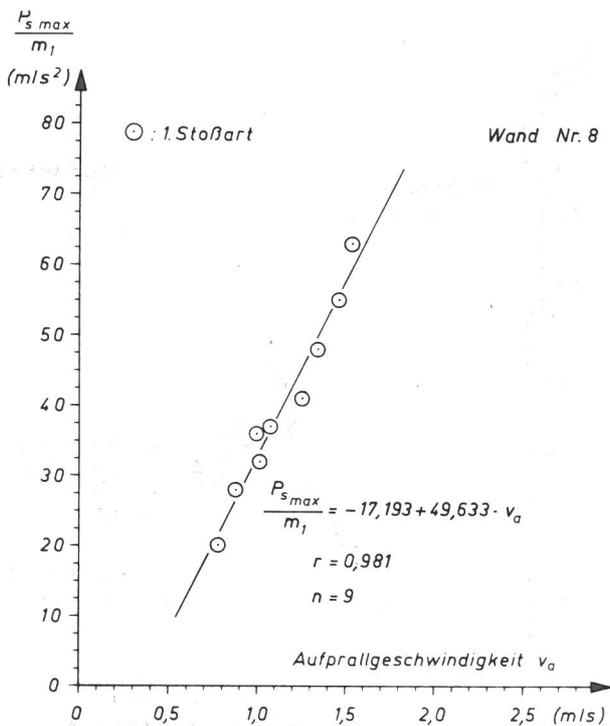


Bild 2.4/24  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

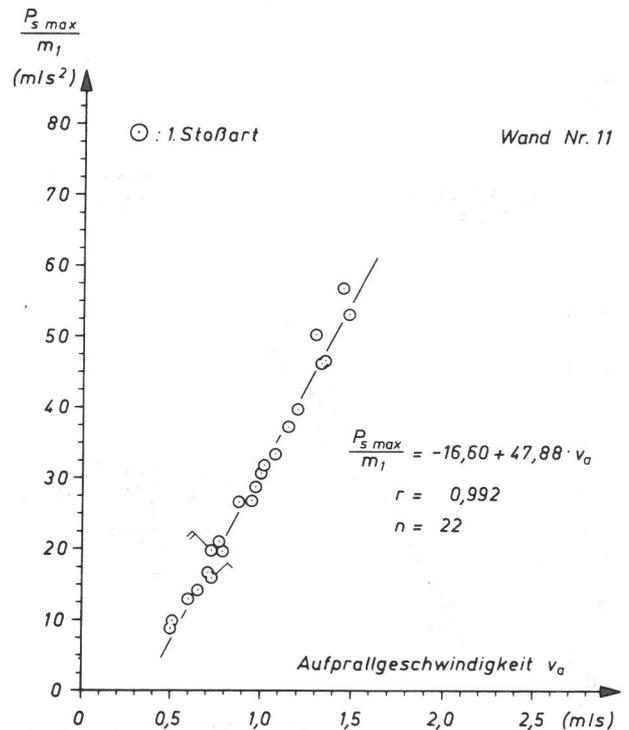


Bild 2.4/26  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s,max}$

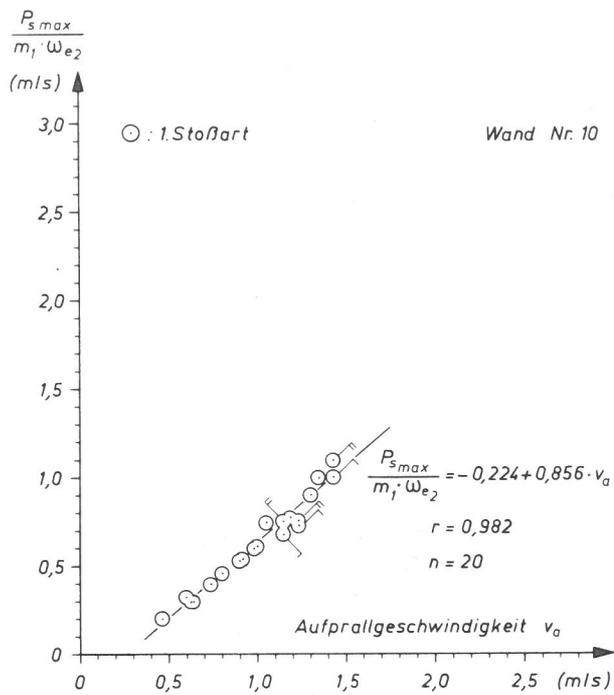


Bild 2.4/27  
Auf  $m_1 \cdot \omega_{e2}$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s\max}$

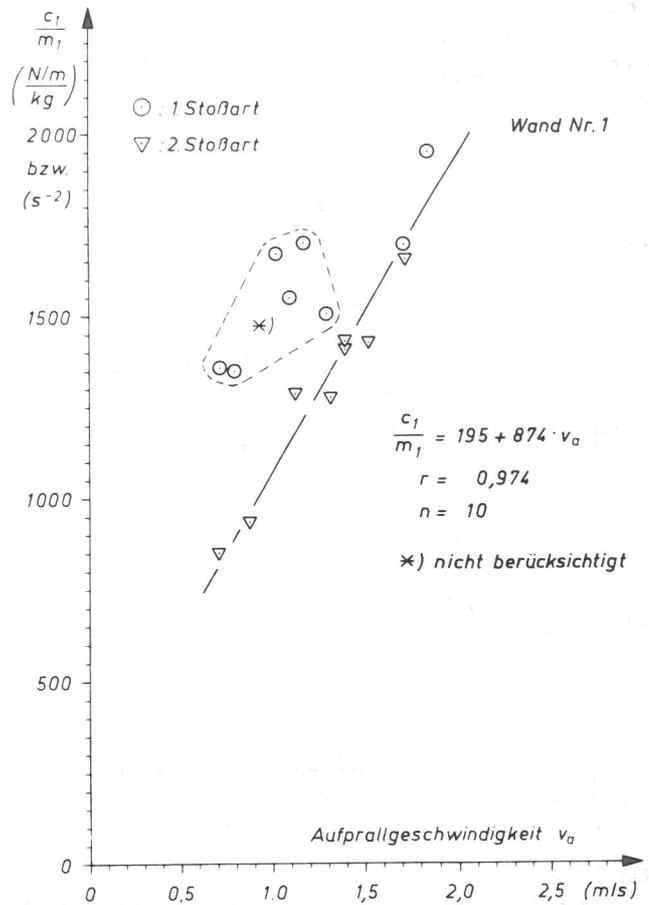


Bild 2.4/29  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

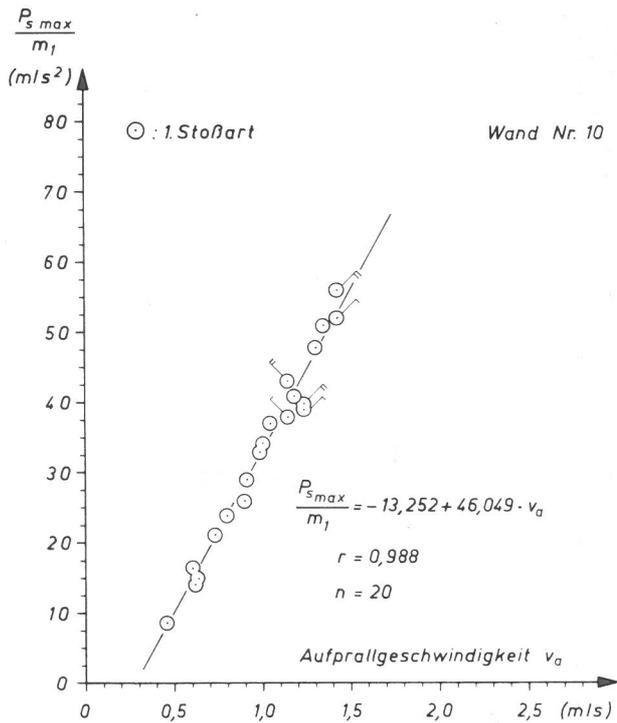


Bild 2.4/28  
Auf  $m_1$  bezogene maximale Stoßkraft  $P_{s\max}$

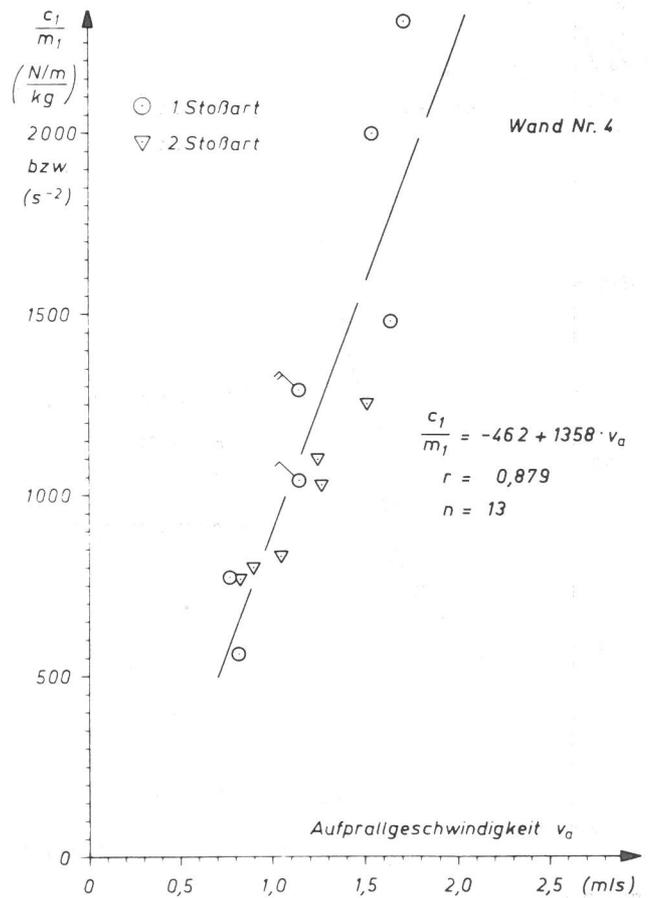


Bild 2.4/30  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

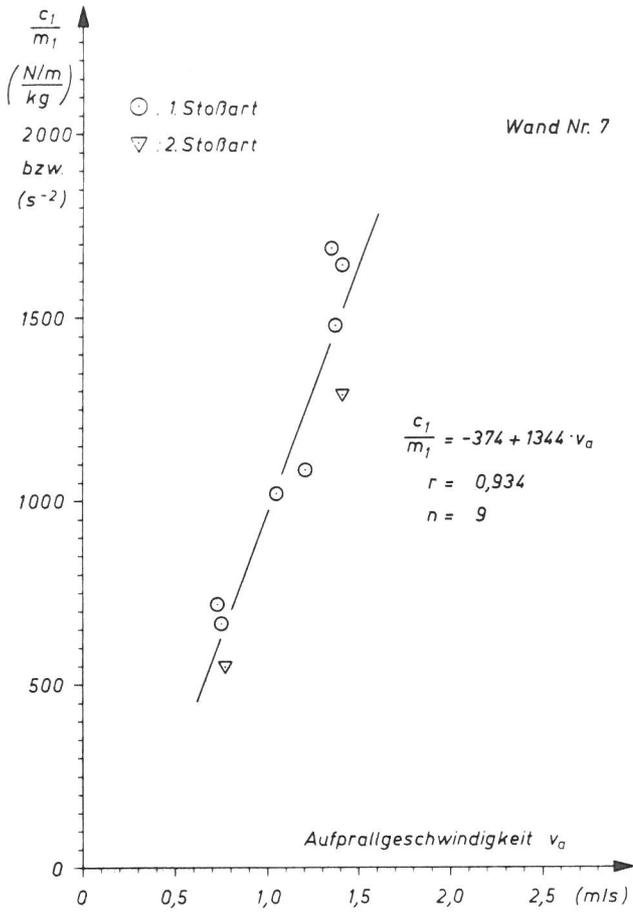


Bild 2.4/31  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

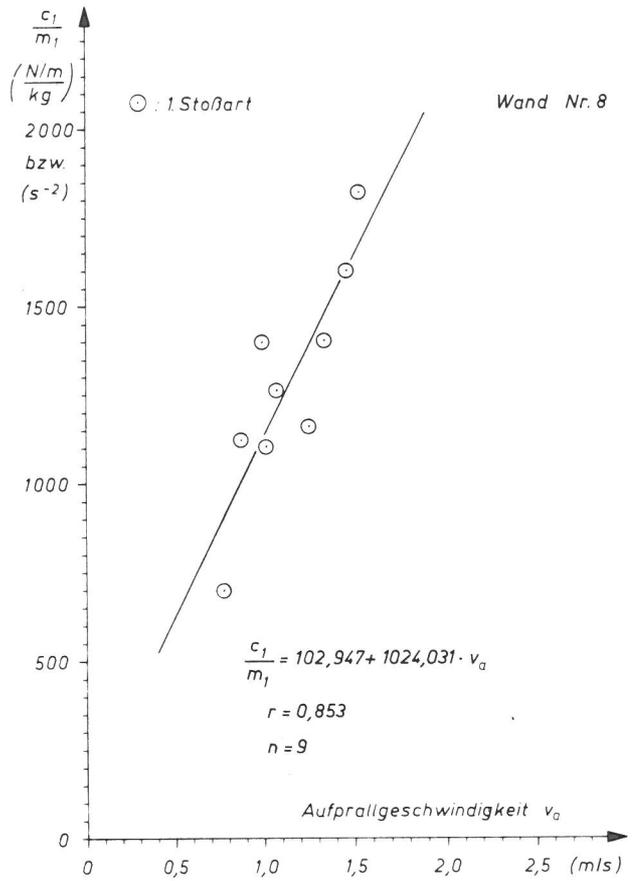


Bild 2.4/33  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

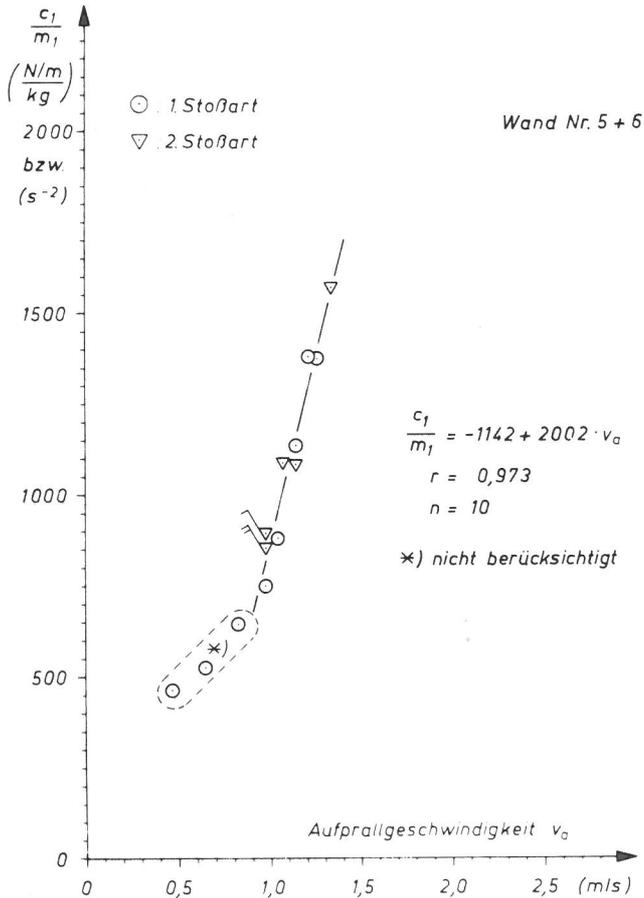


Bild 2.4/32  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

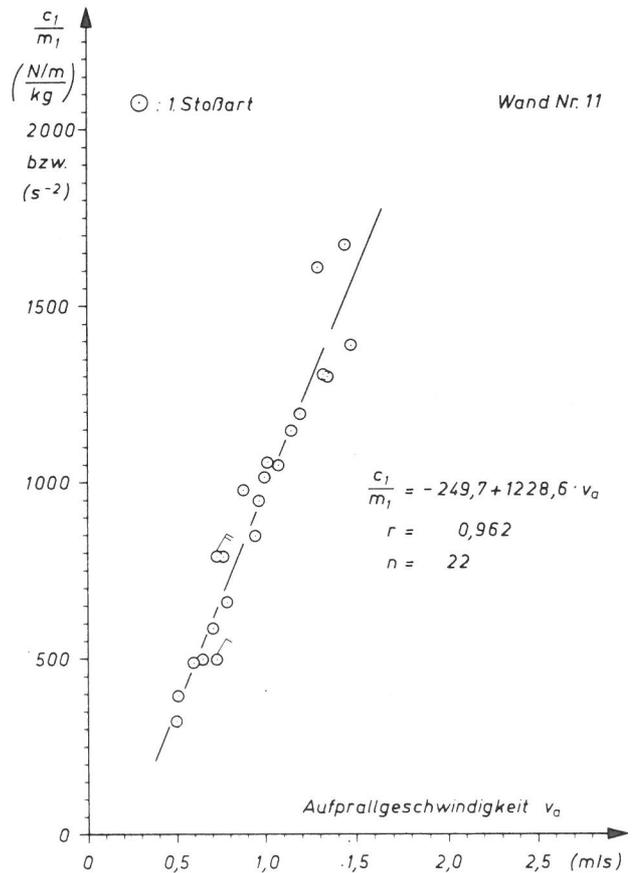


Bild 2.4/34  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

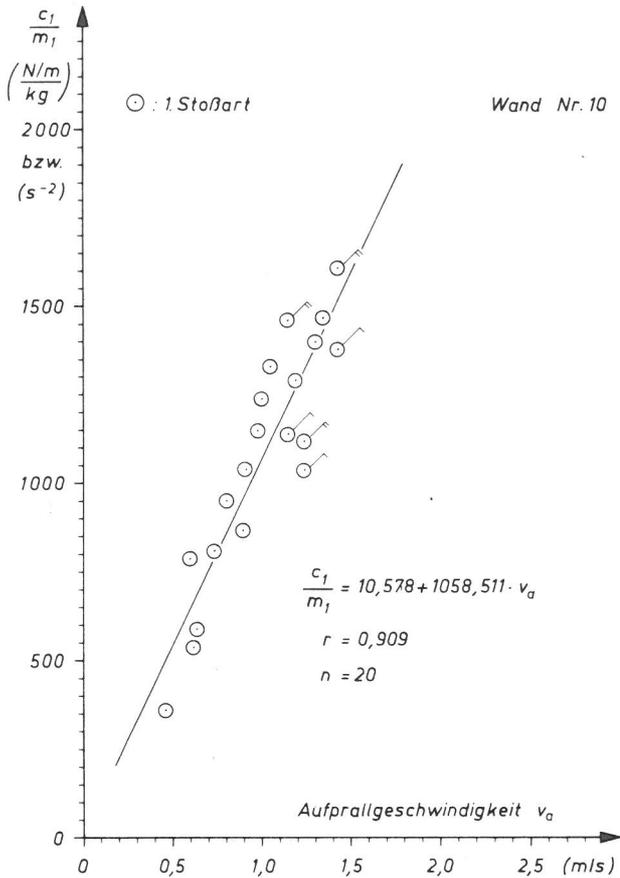


Bild 2.4/35  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators

Hierbei wurden systematische Abweichungen bei den Wänden Nr. 1 und Nr. 5 + 6 deutlich. Bei der Wand Nr. 1 können sie erklärt werden durch falsche Bestimmung der Werte  $T_{2 \max}$  und  $T_{\max}$ . Der Oszillograph war intern getriggert worden und die Triggerschwelle war zu hoch eingestellt, so daß der Anfangsteil der Kurven für  $x_2$  und  $P_s$  nicht registriert werden konnte. Offensichtlich ist dann bei der Auswertung der Schirmbilder dieser Teil nicht richtig geschätzt worden. Eine ähnliche Ursache scheint auch bei Wand Nr. 5 + 6 vorzuliegen. Diese abweichenden Werte wurden bei der Extrapolation nicht berücksichtigt.

Die Darstellungen auf den Bildern 2.4/1 bis 2.4/35 zeigen, daß im untersuchten Bereich die Annahme einer linearen Abhängigkeit dieser "geglätteten" Werte von  $v_a$  vertretbar ist. Für die Extrapolation auf Geschwindigkeiten bis  $v_a = 2,6$  m/s wurden diese linearen Abhängigkeiten näherungsweise zugrundegelegt. Die auf den Bildern eingezeichneten Ausgleichsgeraden und ihre dort auch eingetragenen Formeln sollen also bis zu  $v_a = 2,6$  m/s Gültigkeit haben. Mit ihrer Hilfe sind für  $v_a = 1,0$ ; 1,5; 2,0; 2,6 m/s die zugehörigen Werte  $c_1/m_1$  sowie  $c_2$ ,  $m_2$  über

(2.4-6)

$$c_2 = \frac{(c_2 \cdot x_{2 \max} / (m_1 \cdot \omega_{e2})) (P_{s \max} / m_1)}{(x_{2 \max} / m_1) (P_{s \max} / (m_1 \cdot \omega_{e2}))} \quad (2.4-7)$$

$$m_2 = \frac{(c_2 \cdot x_{2 \max} / (m_1 \cdot \omega_{e2})) (P_{s \max} / (m_1 \cdot \omega_{e2}))}{(x_{2 \max} / m_1) (P_{s \max} / m_1)}$$

bestimmt worden.

Die auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators ist mit  $v_a$  als Parameter in Abhängigkeit von den Kennwerten  $c_2$  und  $m_2$  der gestoßenen Teile und in Abhängigkeit von deren Kombination in der Form  $T_{e2} = 2\pi \sqrt{m_2/c_2}$  auf den Bildern 2.4/36 bis 2.4/38 dargestellt.

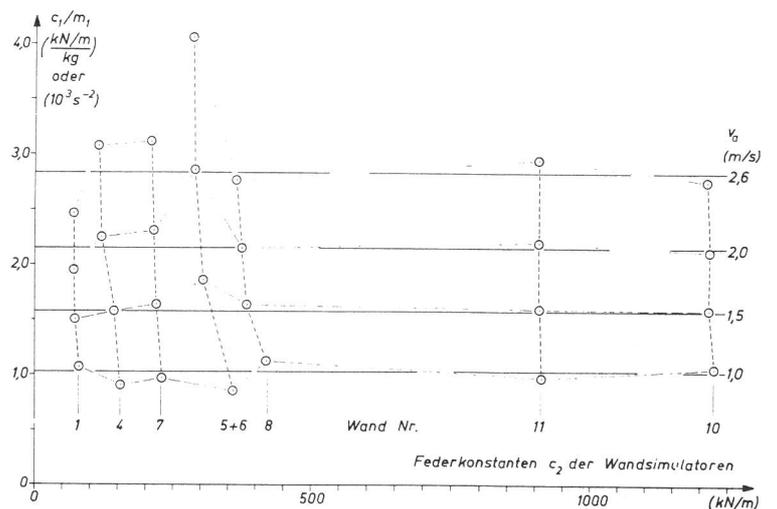


Bild 2.4/36  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten  $v_a$  und Federkonstanten  $c_2$  des gestoßenen Bauteiles

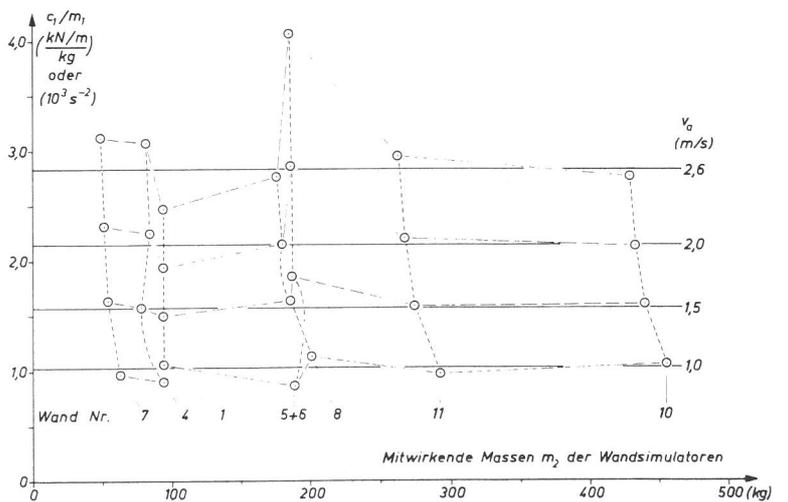


Bild 2.4/37  
Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten  $v_a$  und mitwirkenden Massen  $m_2$  der Wandsimulatoren

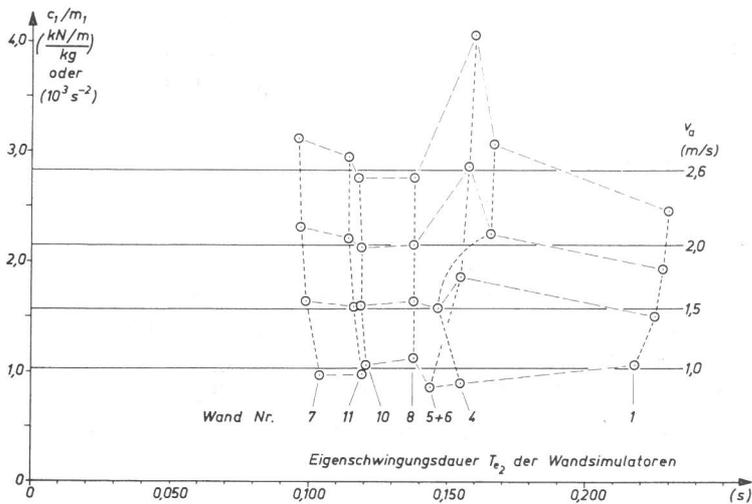


Bild 2.4/38

Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten  $v_a$  und Eigenschwingungsdauern  $T_{e2}$  der Wandsimulatoren

## 2.5 Deutung der ausgewerteten Ergebnisse

Die vorliegenden Ergebnisse lassen keine sinnvolle Abhängigkeit des Menschensimulatorkennwertes  $c_1/m_1$  von der Steifigkeit und der mitwirkenden Masse des gestoßenen Bauteils oder seiner Eigenschwingungsdauer erkennen. Bei den größeren Abweichungen von mittleren Wert für  $v_a > 1,5$  ist zu beachten, daß es sich hier um Werte handelt, die aus z. T. kurzen (insbesondere Wand 5 + 6), durch Versuchsergebnisse belegten Kurvenstücken extrapoliert werden mußten. Die Abhängigkeit der  $(c_1/m_1)$ -Werte von der Aufprallgeschwindigkeit ist dagegen eindeutig. Diese Abhängigkeit ist für alle untersuchten Wandarten zusammengefaßt in Bild 2.5/1 dargestellt.

Bei der schon erwähnten Auswertung Limberger, Struck (1972) erster Tastversuche Struck, Böhmert (1971) war mit einer Eigenschwingungsdauer des Menschensimulators von  $T_{e1} = 0,2$  s gerechnet worden, das entspricht einem Wert  $c_1/m_1$  von ca.  $1(\text{kN/m})/\text{kg}$ .

Ein Vergleich mit dem Bild 2.5/1 zeigt, daß die Annahme von  $T_{e1} = 0,2$  s nur für eine Aufprallgeschwindigkeit von  $v_a = 1$  m/s richtig ist. Für  $v_a = 2,0$  muß mit  $T_{e1} = 0,135$  s und für  $v_a = 2,6$  mit  $T_{e1} = 0,118$  s gerechnet werden.

Die neuen Untersuchungen ergaben somit:

Für Bauteile mit Steifigkeiten  $c_2$  an der Stoßstelle von ca. 50 bis 1200 kN/m, mitwirkenden Massen  $m_2$  von ca. 50 bis 450 kg und Eigenschwingungsdauern  $T_{e2}$  von ca. 0,1 bis 0,25 s ist für den Menschensimulator beim Schulterstoß eine Abhängigkeit seiner auf seine Masse  $m_1$  bezogenen Federsteifigkeit  $c_1$  von Schwingungseigenschaften des gestoßenen Bauteils nicht erkennbar. Jedoch ist der Wert  $c_1/m_1$  deutlich von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  abhängig. Diese Abhängigkeit kann im Bereich  $v_a$  von ca. 0,4 bis 2,0 m/s als linear angesetzt werden, Bild 2.5/1. Für höhere Geschwindigkeiten kann die gleiche lineare Ab-

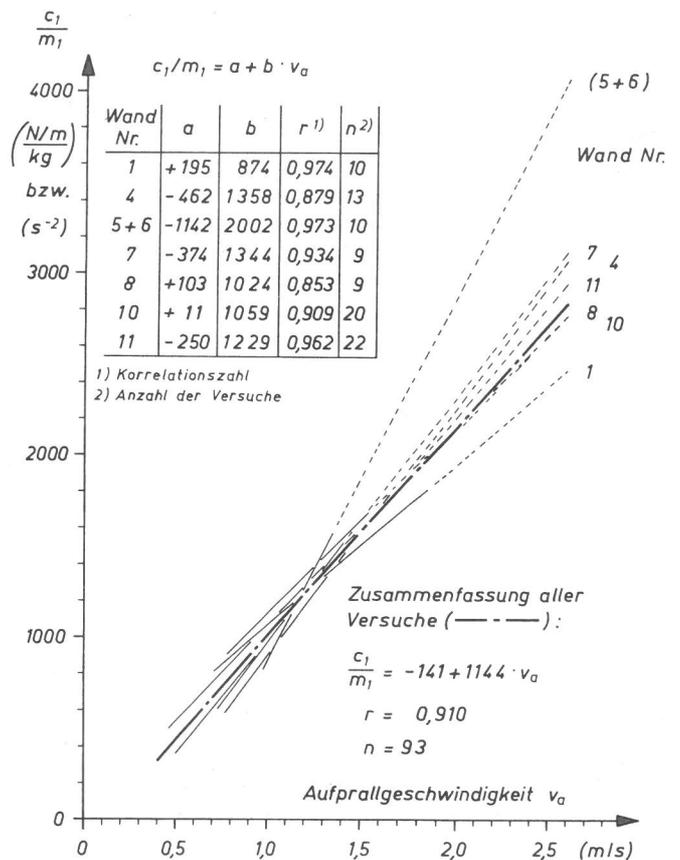


Bild 2.5/1

Federkonstante  $c_1$  des Menschensimulators bezogen auf seine wirkende Masse  $m_1$  in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit

hängigkeit nur angenommen werden, da aus versuchstechnischen Gründen (Verletzung der Versuchsperson) eine experimentelle Ermittlung nicht möglich ist.

## 3. Vorschlag für ein Prüfverfahren

### 3.1 Grundgedanken

Ein Mensch kann als Prüfkörper nicht tätig werden. Zum einen besteht Verletzungsgefahr, zum anderen ist die Reproduzierbarkeit, die für einen Vergleich mehrerer Prüfungen untereinander unbedingt erforderlich ist, nicht gewährleistet. Jeder andere Prüfkörper muß von Fall zu Fall den Eigenschaften des zu untersuchenden Probekörpers (Bauteil) entsprechend so angepaßt werden, daß er in dem Probekörper Beanspruchungen erzeugt, wie die bei realem Stoß, s. a. Abschn. 1.2. Das ist grundsätzlich möglich, stößt aber versuchstechnisch auf Schwierigkeiten und/oder ist aufwendig.

Nehme man z. B. eine möglichst kompakte Masse als Stoßkörper und schaltet zwischen diese Masse und das Bauteil eine Feder, so müßte letztere entsprechend der geforderten Aufprallgeschwindigkeit nach Bild 2.5/1 durch Einstellen oder Auswechseln anpaßbar sein. Außerdem müßte man die Masse nach dem Stoß abfangen, um einen 2. Aufprall zu verhindern, da man sonst nicht feststellen könnte, welchen Umfang eine etwaige Beschädigung nach dem 1. Stoß hat. Nehme man einen

Sandsack o. ä. als Prüfkörper, so müßten jedesmal Vorversuche stattfinden, um diejenige Kombination von Aufprallgeschwindigkeit und Sandsackmasse zu ermitteln, die die gleiche Beanspruchung wieder Mensch im Probekörper hervorrufen würde. Letztere müßte dann dazu mittels eines Masse-Feder-Masse-Feder-Modells mit einer Federkonstanten entsprechend Bild 2.5/1 und einer elastisch/plastischen Feder, angepaßt an die Federkennlinie des zu untersuchenden Probekörpers (Bauteil), nach Limberger (1975) ermittelt werden.

Die hier betrachteten Stöße kann man als langsam bezeichnen, Stoßdauer und Eigenschwingungsdauer der gestoßenen Bauteile haben die gleiche Größenordnung ( $10^{-1}$  s). Das Versagen der Gesamtkonstruktion des gestoßenen Bauteils wird sich also nicht wesentlich von dem bei statischer Belastung unterscheiden.

Es wird deshalb ein Prüfverfahren mit folgenden Grundgedanken vorgeschlagen:

Diejenige Energie, die von dem Bauteil aufgenommen werden muß, um einen Stoß durch einen menschlichen Körper abzufangen (erforderliche Energieaufnahme  $E_A$ ), wird verglichen mit derjenigen Energie, die ein Bauteil bis zu einem bestimmten Versagenszustand (Versagensenergie  $E_V$ ), im Maximalfall bis zum Bruch (Bruchenergie  $E_{Br}$ ), aufnehmen kann. Zur Ermittlung von  $E_A$  wird der menschliche Körper durch ein einfaches Masse-Feder-System mit einer Federkonstanten  $c_1$  nach Bild 2.5/1, das gestoßene Bauteil durch ein Masse-Feder-System mit elastisch/plastischer Feder simuliert. Die maximale Verformung des zweiten Systems ist dann ein Analogon für die maximale Beanspruchung der Gesamtkonstruktion des gestoßenen Bauteils. Sie kann den Diagrammen aus Limberger (1975) oder aus dem Anhang I entnommen und zur Berechnung von  $E_A$  verwendet werden. Zur Ermittlung von  $E_V$  ( $E_{Br}$ ) wird das Bauteil mit einer Einzelkraft an der Stoßstelle bis zum zu betrachtenden Versagenszustand oder Bruch belastet und die jeweils eingebrachte Energie über ein Kraft-Verformungs-Diagramm an der Stoßstelle gemessen.

Das Verhältnis  $E_V$  ( $E_{Br}$ )/ $E_A$  liefert eine quantitative Grundlage zur Beurteilung des Widerstandes der Gesamtkonstruktion des Bauteils gegenüber stoßartiger Beanspruchung.

### 3.2 Beschreibung des Prüfverfahrens

#### 3.2.1 Probekörper und Stoßstelle

Als Probekörper dienen Bauteile oder Bauteilausschnitte (bei Wänden), die stehend untersucht werden. Ihr Anschluß an "starre" Widerlager der Prüfeinrichtung muß auf dieselbe Weise gestaltet werden, wie es bei den angrenzenden Teilen auf der Baustelle vorgesehen ist. Sofern nur Bauteilausschnitte untersucht werden, muß ihre Größe von Fall zu Fall in den Prüfrichtlinien oder Normen festgelegt werden.

Hierbei ist zu beachten, daß die Versagensenergie eines Bauteilausschnittes sich nicht a priori im gleichen Verhältnis wie die erforderliche Energie-

aufnahme zum Abfangen des Stoßes mit der Größenänderung des Ausschnittes ändern muß. Jedoch kann man z. B. bei einachsig abtragenden Wandstreifen im allgemeinen annehmen, daß die Bruchenergie mit größer werdender Breite schneller als oder mindestens im gleichen Verhältnis ansteigt wie die erforderliche Energieaufnahme. Besitzt also ein Wandstreifen gegenüber einer stoßartigen Belastung eine ausreichende Grenztragfähigkeit, so kann man dieses von einem breiteren Wandstreifen erst recht annehmen. Die Breite eines Wandausschnittes als Probekörper richtet sich dann nach dem kleinsten im Einbauzustand zu erwartenden Wert. Bei zweiachsiger Lastabtragung dagegen sollte das gesamte vierseitig gelagerte Bauteil als Probekörper verwendet werden.

Rechnungen mit Verhältnissen wie sie in Wirklichkeit auftreten können, zeigen beispielhaft, daß im allgemeinen die erforderliche Energieaufnahme bei einem Schulterstoß auf die Bauteilmitte größer oder ungefähr gleich derjenigen bei Schulterstößen auf andere Stellen ist, siehe Anhang II.

Deswegen wird allgemein die Bauteilmitte als Stoßstelle bei der Beurteilung zugrundegelegt. In den Fällen jedoch, wo die Gefahr besteht, daß bei einer Belastungsanordnung näher zu den Auflagern hin ein anderes Versagens- oder Bruchverhalten zu erwarten ist, müssen auch andere Stoßstellen in Betracht gezogen werden.

#### 3.2.2 Bestimmung der Eigenschwingungsdauer

Um den Probekörper später bei der Ermittlung der erforderlichen Energieaufnahme durch ein Masse-Feder-System simulieren zu können, muß seine mitwirkende Masse  $m_2$  bekannt sein. Sie läßt sich bestimmen aus der Bedingung, daß die Eigenschwingungsdauer des Probekörpers gleich der des Masse-Feder-Systems im elastischen Bereich sein soll.

Die Eigenschwingungsdauer des Probekörpers wird zweckmäßigerweise im Ausschwingversuch ermittelt. Dazu wird der Probekörper durch einen leichten Stoß an der Stoßstelle, z. B. mit der Schulter, zum Schwingen angeregt und der Weg der Stoßstelle in Abhängigkeit von der Zeit gemessen und registriert. Dieses kann z. B. mit einem elektrischen Weggeber, an der Stoßstelle messend, und einem Oszillographen geschehen. Aus der Aufzeichnung des quasi stationären Ausschwingvorganges kann man die Eigenschwingungsdauer  $T_{e2, a}$  abgreifen.

#### 3.2.3 Ermittlung der Versagensenergie (Bruchenergie)

Zur Ermittlung der Versagensenergie oder der Bruchenergie wird der Probekörper mit einer Einzelkraft  $R$  an der Stoßstelle monoton und zügig bis zum Bruch belastet. Diese Einzelkraft muß über eine lastverteilende Fläche so eingeleitet werden, daß vor dem Versagen der Gesamtkonstruktion des Probekörpers keine örtliche Zerstörung infolge Durchdrücken auftritt.

Während der Belastung ist die Durchbiegung  $f$  an der Krafteinleitungsstelle zu messen und als Dia-

gramm entsprechend Bild 3.2.3/1 zu registrieren. Mittels dieses Diagramms sind die zur Auswertung benötigten Werte  $c_2 \cdot x_{2,0}$  und  $E_V$  bzw.  $E_{Br}$  zu bestimmen. (Wenn das Bauteil nur gegenüber einer bestimmten Versagensart beurteilt werden soll, die vor dem Bruch auftritt, so kann der Belastungsversuch nach Erreichen des Versagenszustandes abgebrochen werden.)

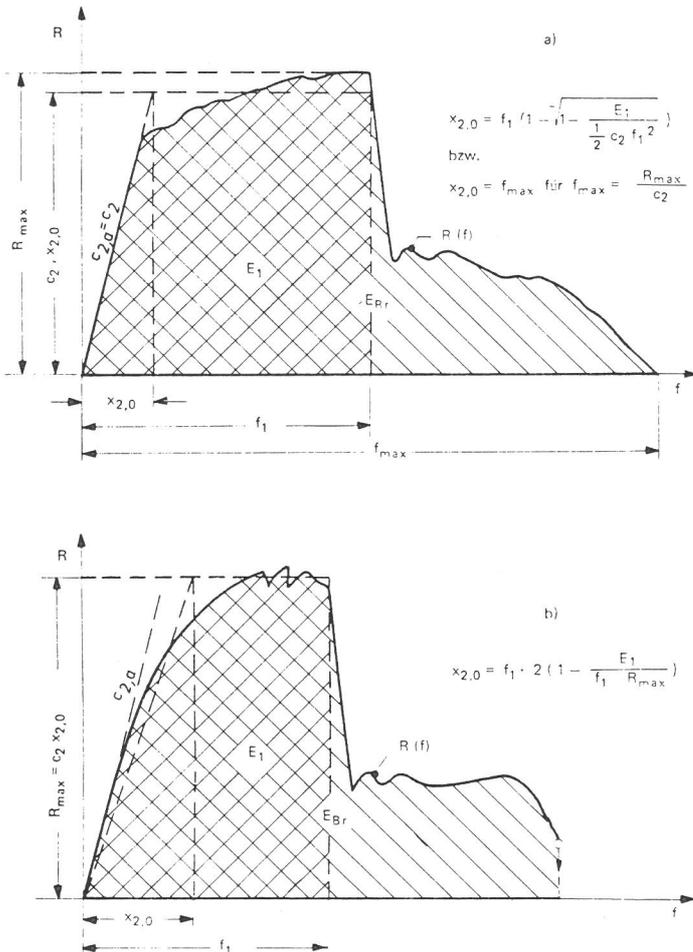


Bild 3.2.3/1  
Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Kräfteinleitungsstelle

### 3.2.4 Auswertung der Versuche

Der Betrag der Aufprallenergie  $E_A$  ist die obere Grenze für die erforderliche Energieaufnahme  $E_A$ . Erfüllen die Verhältnisse  $E_V/E_A$  oder  $E_{Br}/E_A$  die in den Richtlinien oder Normen festgelegten Mindestwerte für  $E_V/E_A$  bzw.  $E_{Br}/E_A$ , so ist die folgende detaillierte Berechnung von  $E_A$  nicht erforderlich.

Zur Ermittlung von  $E_A$  werden der gegenprallende Mensch und der gestoßene Probekörper durch ein Masse-Feder-Masse-Feder-System simuliert, s. auch Anhang I. Dabei dient die erste Masse-Feder-Kombination als Menschensimulator mit einer linearen Feder, deren auf  $m_1$  bezogene Federkonstante  $c_1$  nach Bild 2.5/1 von der Aufprallgeschwindigkeit  $v_a$  abhängt. Die zweite Masse-Feder-Kombination simuliert den als Probekörper untersuchten Bauteilausschnitt. Als Federkennlinie wird eine linear elastische/idealplastische

zugrundegelegt, s. auch Anhang III, deren Kennwerte  $c_2$  und  $x_{2,0}$  dem Versuch nach Abschn. 3.2.3 entnommen werden, Bild 3.2.3/1. Die mitwirkende Masse  $m_2$  des Probekörpers errechnet sich aus der gemessenen Eigenschwingungsdauer und der zugehörigen Federkonstanten. Im Fall einer von Anfang an gekrümmten Federkennlinie, Bild 3.2.3/1 b, gehört zu der Eigenschwingungsdauer, gemessen im Ausschwingversuch mit kleinen Wegamplituden, Abschn. 3.2.2, nicht der Wert  $c_2 = R_{max}/x_{2,0}$ , sondern der Wert  $c_{2,a}$ , der sich aus der Anfangstangente an die Federkennlinie ergibt. Also erhält man

$$m_2 = c_{2,a} / (\omega_{e2,a})^2 \quad \text{mit} \quad (3.2.4-1)$$

$$\omega_{e2,a} = 2\pi / T_{e2,a} \quad (3.2.4-2)$$

Die Kreiseigenfrequenz  $\omega_{e2}$  des Probekörpers für die gedachte Stoßbeanspruchung errechnet sich aus

$$\omega_{e2} = \sqrt{c_2/m_2} \quad (3.2.4-3)$$

mit  $c_2$  nach Bild 3.2.3/1.

Den zu  $v_a$  gehörenden Wert  $c_1/m_1$  entnimmt man Bild 2.5/1.

Die Kreiseigenfrequenz  $\omega_{e1}$  des Menschensimulators wird bestimmt mit

$$\omega_{e1} = \sqrt{c_1/m_1} \quad (3.2.4-4)$$

$m_1$  ist der in Richtlinien oder Normen festgelegte Wert für die Masse oder den Massenanteil des stoßenden menschlichen Körpers.

Jetzt können die dimensionslosen Parameter

$$M = m_1/m_2 \quad (3.2.4-5)$$

$$\Omega = \omega_{e1}/\omega_{e2} \quad (3.2.4-6)$$

$$\bar{v}_a = v_a / (x_{2,0} \cdot \omega_{e2}) \quad (3.2.4-7)$$

berechnet werden.

Aus den Diagrammen oder den Tabellen für den 2-Massen-Schwinger, Limberger (1975) oder Anhang I, wird dann der Faktor  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$  entnommen.

Die erforderliche Energieaufnahme  $E_A$  ist diejenige potentielle Energie, die infolge der stoßartigen Belastung jemals zu irgendeinem Zeitpunkt maximal von dem gestoßenen Körper aufgenommen werden muß unter der Voraussetzung unbeschränkter Verformbarkeit. Für den Probekörpersimulator ergibt sich dieser Energiebetrag bei Verformungen nur im elastischen Bereich über

$$E_A = \frac{1}{2} c_2 \cdot x_{2,max}^2 \quad (3.2.4-8)$$

mit

$$x_{2 \max} = \frac{K \cdot m_1 \cdot v_a \cdot w_{e_2}}{c_2} = K \cdot x_{2,0} \cdot M \cdot \bar{v}_a \quad (3.2.4-9)$$

zu

$$E_A = \frac{1}{2} c_2 \cdot x_{2,0}^2 \cdot (K \cdot M \cdot \bar{v}_a)^2 \quad (3.2.4-10)$$

oder  $\left. \begin{array}{l} E_A = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_a^2 \cdot M \cdot K^2 \end{array} \right\} \text{für } \bar{v}_a \leq \bar{v}_{a,e1} \quad (3.2.4-11)$

und für den Fall, daß die maximale Verformung im plastischen Bereich liegt, über

$$E_A = c_2 \cdot x_{2,0} \cdot x_{2 \max} - \frac{1}{2} c_2 \cdot x_{2,0}^2 \quad (3.2.4-12)$$

mit  $x_{2 \max}$  wie (3.2.4-9) zu

$$E_A = \frac{1}{2} c_2 \cdot x_{2,0}^2 \cdot (2 \cdot K \cdot M \cdot \bar{v}_a - 1) \quad (3.2.4-13)$$

oder

$$E_A = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_a^2 \left( 2 \frac{K}{\bar{v}_a} - \frac{1}{M \cdot \bar{v}_a^2} \right) \quad (3.2.4-14)$$

Somit errechnet sich das Verhältnis von erforderlicher Energieaufnahme  $E_A$  zur Aufprallenergie  $E_a$  zu

$$E_A/E_a = M \cdot K^2 \quad \text{für } \bar{v}_a \leq \bar{v}_{a,e1} \quad (3.2.4-15)$$

$$E_A/E_a = 2K/\bar{v}_a - 1/(M \cdot \bar{v}_a^2) \quad \text{für } \bar{v}_a > \bar{v}_{a,e1} \quad (3.2.4-16)$$

Im elastischen Bereich ist  $K$  unabhängig von  $v_a$ . Somit kann man den Grenzwert zwischen elastischen und plastischem Bereich

$$\bar{v}_{a,e1} = \frac{1}{M \cdot K_E} \quad (3.2.4-17)$$

in den Diagrammen  $K = K(\bar{v}_a)$  des Anhangs I oder von Limberger (1975) als den Punkt erkennen, bei dem die Kurven sich aus der Waagerechten entwickeln. In den Tabellen des Anhangs I ist er auf der untersten Zeile angegeben.

Die Beurteilungsgrundlage, also das Verhältnis von Versagens- oder von Bruchenergie zur erforderlichen Energieaufnahme erhält man dann durch

$$\frac{E_V \text{ bzw. } E_{Br}}{E_A} = \frac{(E_V \text{ bzw. } E_{Br})/E_a}{E_A/E_a} \quad (3.2.4-18)$$

### 3.2.5 Hinweise zur Beurteilung der Prüfergebnisse

Im Gegensatz zu Prüfungen mit gegebener statischer Belastung und damit, bei statisch bestimmten Systemen, mit vorgegebener Beanspruchung ist hier zu beachten, daß die Größe der Beanspruchung im Probekörper, nämlich  $E_A$ , auch von den immer streuenden Eigenschaften des Probekörpers selbst, nämlich von  $T_{e_2, a}$ ,  $c_{2, a}$ ,  $c_2$ ,  $x_{2,0}$ , abhängt.

Selbst wenn man, wie bisher noch meist üblich, eine nicht stochastische Anforderung zugrundelegt, also hier eine nicht streuende Aufprallenergie, muß man bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse sowohl den Grenzzustand der Probekörper, also  $E_V$  oder  $E_{Br}$ , als auch die Größe der in der Prüfung geforderten maximalen Beanspruchung, nämlich  $E_A$ , als Zufallsgrößen ansehen. Zur Vereinfachung werden sie näherungsweise hier immer wie unabhängige Zufallsgrößen behandelt.

Die statistische Auswertung kann dann wie folgt vorgenommen werden:

Als ausreichende Näherung für die statistische Verteilungsdichten der Zufallsgröße  $E_A$  und  $E_V$  oder  $E_{Br}$  wird die logarithmische Normalverteilung mit  $a = 0$  angesehen, Struck (1969). Aufgrund der zu erwartenden Schadensfolge muß in den Richtlinien oder Normen das der Beurteilung zugrundeliegende Sicherheitsniveau, die Sicherheit  $S$  (oder Versagenswahrscheinlichkeit  $1 - S$ ) und die Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  (oder die Irrtumswahrscheinlichkeit  $1 - W$ ), festgelegt werden, Struck (1971). Im wesentlichen werden dafür zwei Anwendungsbereiche einer Bauteilart in Frage kommen, nämlich

Anwendungsbereich I

Das Versagen eines Bauteils hat großen, aber nur wirtschaftlichen Schaden zur Folge. Dafür wurde vorgeschlagen, Struck (1971),  $S = 0,95$  und  $W = 0,95$

Anwendungsbereich II

Das Versagen eines Bauteils bedeutet Gefahr für Leib und Leben. Der entsprechende Vorschlag lautete  $S = 0,999$  und  $W = 0,95$ .

Ausgangswert ist der Zentralwert  $\bar{x}$  der Einzelwert  $x_p$  des Verhältnisses  $E_V/E_A$  bzw.  $E_{Br}/E_A$  aus den Einzelversuchen. ( $\bar{x}$  = Zentralwert, d.h. 50 % der Werte  $x_p$  sind kleiner oder gleich, 50 % sind größer als  $\bar{x}$ ).

Er errechnet sich bei den o. a. Annahmen zu

$$\tilde{x} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (3.2.5-1)$$

mit

$$x_\nu = (E_V \text{ oder } E_{Br})_\nu / E_{A,\nu}, \nu = 1 \dots n$$

Bild 3.2.5/1

Faktoren  $\gamma_V$  zur Berechnung des maßgebenden Verhältnisses Versagensenergie oder Bruchenergie zur erforderlichen Energieaufnahme aus den Zentralwerten der Versuchsergebnisse

Den für spätere Sicherheitsbetrachtungen maßgebenden Wert der Prüfung ( $E_V$  oder  $E_{Br}$ )/ $E_A$  erhält man durch Division des Zentralwertes  $\tilde{x}$  durch einen Faktor  $\gamma_V$ . Letzterer kann in Abhängigkeit von dem Prüfungsumfang (Anzahl der Versuche n) und der Streuung der Ergebnisse (Variationsquotienten von  $E_V$  oder  $E_{Br}$  und  $E_A$ ) der Tabelle Bild 3.2.5/1 entnommen werden.  $\gamma_V$  ist so bestimmt, daß  $\tilde{x}/\gamma_V$  dem statistischen Schätzwert für die (1 - S)-Fraktile von ( $E_V$  oder  $E_{Br}$ )/ $E_A$  bei einer Aussagewahrscheinlichkeit W entspricht, Struck (1971).

Die Variationsquotienten für  $E_V$  oder  $E_{Br}$  und  $E_A$  können dazu näherungsweise wie üblich berechnet werden, z.B. für  $E_{Br}$

Nr.	Variationsquotienten 1).		Anwendungsbereich I Sicherheit S = 0,95 Aussagewahrscheinlichkeit W = 0,95					Anwendungsbereich II Sicherheit S = 0,999 Aussagewahrscheinlichkeit W = 0,95				
	V <sub>1</sub> %	V <sub>2</sub> %	n=3	n=6	n=9	n=12	n=∞	n=3	n=6	n=9	n=12	n=∞
1	5		1,5	1,2	1,2	1,1	1,1	2,0	1,4	1,3	1,3	1,2
2	10		2,1	1,4	1,4	1,3	1,2	4,0	1,9	1,7	1,6	1,4
3	15	0	3,1	1,7	1,6	1,5	1,3	2).	2,7	2,2	2,1	1,6
4	20		4,6	2,1	1,8	1,7	1,4		3,7	2,9	2,6	1,8
5	25		6,6	2,5	2,1	2,0	1,5		5,1	3,8	3,3	2,1
6	30		2).	3,0	2,4	2,2	1,6		7,0	4,9	4,2	2,5
7	35			3,5	2,8	2,5	1,7		9,5 <sup>3</sup> ).	6,3	5,3	2,9
8	5		1,7	1,3	1,2	1,2	1,1	2,7	1,6	1,5	1,4	1,2
9	10		2,3	1,5	1,4	1,4	1,2	4,7	2,1	1,8	1,7	1,4
10	15	5	3,3	1,8	1,6	1,5	1,3	2).	2,8	2,3	2,2	1,6
11	20		4,8	2,1	1,9	1,7	1,4		3,9	3,0	2,7	1,9
12	25		6,8	2,5	2,1	2,0	1,5		5,3	3,9	3,4	2,2
13	30		2).	3,0	2,5	2,3	1,6		7,2	5,0	4,3	2,5
14	35			3,6	2,8	2,6	1,8		9,7 <sup>3</sup> ).	6,4	5,4	2,9
15	10		2,9	1,7	1,5	1,5	1,3	7,1	2,5	2,1	2,0	1,5
16	15		4,0	1,9	1,7	1,6	1,3	2).	3,3	2,6	2,4	1,7
17	20	10	5,5	2,3	2,0	1,8	1,4		4,3	3,3	3,0	2,0
18	25		2).	2,7	2,2	2,1	1,5		5,8	4,2	3,7	2,3
19	30			3,2	2,6	2,3	1,7		7,8 <sup>3</sup> ).	5,4	4,6	2,6
20	35			3,7	2,9	2,6	1,8		10,4 <sup>3</sup> ).	6,8	5,7	3,0
21	15		5,0	2,2	1,9	1,8	1,4	2).	4,0	3,1	2,8	1,9
22	20	15	6,7	2,5	2,1	2,0	1,5		5,2	3,8	3,4	2,1
23	25		2).	2,9	2,4	2,2	1,6		6,7	4,8	4,1	2,4
24	30			3,4	2,7	2,5	1,7		8,8 <sup>3</sup> ).	5,9	5,0	2,8
25	35			4,0	3,1	2,8	1,8		11,6 <sup>3</sup> ).	7,5	6,2	3,2
26	20		2).	2,8	2,3	2,2	1,6	2).	6,4	4,6	3,9	2,4
27	25			3,2	2,6	2,4	1,7		8,1	5,5	4,7	2,7
28	30			3,7	2,9	2,6	1,8		10,4 <sup>3</sup> ).	6,8	5,7	3,0
29	35			4,3	3,3	2,9	1,9		13,5 <sup>3</sup> ).	8,4	6,9	3,4
30	25		2).	3,6	2,9	2,6	1,8	2).	10,0 <sup>3</sup> ).	6,7	5,5	2,9
31	30	25		4,1	3,2	2,9	1,9		12,6 <sup>3</sup> ).	8,0	6,5	3,3
32	35			4,7	3,6	3,2	2,0		2).	9,7	7,8	3,7
33	30	30	2).	4,7	3,5	3,1	2,0	2).	2).	9,5	7,6	3,6
34	35			5,3	3,9	3,4	2,1			11,4	9,0	4,0
35	35	35	2).	5,9	4,3	3,7	2,2	2).	2).	13,5	10,5	4,4

- 1). von der Versagensenergie oder der Bruchenergie bzw. von der erforderlichen Energieaufnahme
- 2). auf jeden Fall mehr Probekörper untersuchen
- 3). möglichst mehr Probekörper untersuchen

$$V_{Br} = \frac{s_{Br}}{\bar{x}_{Br}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{\nu=1}^n (E_{Br,\nu} - \bar{E}_{Br})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{\nu=1}^n E_{Br,\nu}} \quad (3.2.5-2)$$

Bei der endgültigen Beurteilung, ob der Widerstand der Gesamtkonstruktion einer untersuchten Bauteilart ausreichend groß ist gegenüber einer stoßartigen Belastung durch einen gegenprallenden Menschen, ist der aus der Prüfung sich ergebende maßgebende Wert  $\tilde{x}/\gamma_V$  für das Verhältnis ( $E_V$  oder  $E_{Br}$ )/ $E_A$  zu reduzieren. Dieses kann z. B. mittels eines Sicherheitsfaktors  $\gamma$  geschehen. Bei der Festlegung der Größe von  $\gamma$  sind alle Einflüsse auf die Sicherheit zu beachten, über die die Prüfung, die nur auf Versuche an ausgewählten Proben im Laboratorium basiert, keine Information liefern kann, so z. B.

- inwieweit Vereinfachungen bei der Prüfung zugrundeliegen (Probekörper, Beanspruchung, Auswertung)
- ob Einzelstücke am Bauwerk eingebaut werden können, deren Eigenschaften über das bei den

Bild 3.2.6/1  
Schema für das Prüfverfahren "Widerstand der Gesamtkonstruktion gegenüber Schulterstoß"

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Versuch Nr. $\nu$	$T_{e2,a}$	$\omega_{e2,a}$	$c_{2,a}$	$m_2$	$c_2$	$\omega_{e2}$	$c_1/m_1$	$\omega_{e1}$	$x_{2,0}$	M	$\Omega$	$\bar{v}_a$
-	s	s <sup>-1</sup>	N/m	kg	N/m	s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>	s <sup>-1</sup>	m	-	-	-
1												
2												
3												
4												
5												
6												
⋮												
⋮												

Spalte	13	14	15	16	17	18	19
Versuch Nr. $\nu$	$M \approx$	$\Omega \approx$	$\bar{v}_{a,e1}$	$\kappa$	$E_A/E_a$	$E_V/E_a$	$E_V/E_A$
-	-	-	-	-	-	-	-
1							
2							
3							
4							
5							
6							
⋮							
⋮							

$m_1 =$	kg	$\bar{x}$ bzw. $\bar{x} =$	.....	.....	.....
$v_a =$	m/s	$s =$	.....	.....	.....
$E_a =$	Nm	$s/\bar{x} =$	.....	.....	.....

- Versuchen vorliegende Zufälligkeitsmaß von denen der Probekörper abweichen
- ob zeitbedingte Verschlechterungen der Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Baustoffe und Verbindungsmittel bei normalem Gebrauch zu erwarten sind oder nicht
- ob sich das Versagen des Bauteils erkennbar ankündigt oder nicht
- inwieweit das Versagen eines Bauteiles die Funktion und die Tragfähigkeit des Bauwerkes, in das es eingebaut wird, beeinflusst.

### 3.2.6 Schema für das Prüfverfahren

Eine schematische Zusammenfassung des Prüfverfahrens ist durch Bild 3.2.6/1 und die nachfolgenden Erläuterungen dazu gegeben.

#### Spalte

- 0 : In Richtlinien oder Normen muß die Mindestanzahl der gleichen Versuche je Prüfung vorgegeben sein. Mehr Versuche verringern die Informationsunsicherheit, so daß kleinerer Faktor  $\gamma_V$  anwendbar, siehe Bild 3.2.5/1
- 1 : Eigenschwingungsdauer des Probekörpers  $\nu$ , gemessen im Ausschwingversuch nach Abschn. 3.2.2
- 2 : Kreiseigenfrequenz des Probekörpers  $\nu$ , bei kleinen Amplituden, zu berechnen nach  $\omega_{e2,a} = 2\pi/T_{e2,a}$

Anwendungsbereich I oder II:

$$\gamma_V = \dots$$

$$(E_V/E_A)_{\text{Prüfung}} = \tilde{x}/\gamma_V = \dots$$

$$\text{Sicherheitsfaktor } \gamma = \dots$$

$$(E_V/E_A)_{\text{Prüfung}}/\gamma = \dots \geq 1$$

(Hinweise zu den Spalten 1 bis 19 und den o.a. Formeln in Abschn. 3.2.6)

- 3 : Anfangssteifigkeit des Probekörpers  $\nu$ , zu entnehmen dem Kraft - Durchbiegungs - Diagramm entsprechend Bild 3.2.3/1 aus dem Versuch zur Ermittlung der Versagensenergie nach Abschn. 3.2.3
- 4 : Mitwirkende Masse des Probekörpers  $\nu$ , zu berechnen nach  $m_2 = c_{2,a}/(\omega_{e_2,a})^2$
- 5 : Federkonstante des Probekörpers  $\nu$ , zu entnehmen dem Kraft - Durchbiegungs-Diagramm entsprechend Bild 3.2.3/1 aus dem Versuch zur Ermittlung der Versagensenergie nach Abschn. 3.2.3
- 6 : Kreiseigenfrequenz des Probekörpers  $\nu$ , zu berechnen nach  $\omega_{e_2} = \sqrt{c_2/m_2}$
- 7 : Auf  $m_1$  bezogene Federkonstante des Menschensimulators im  $\nu$ . Versuch, zu entnehmen aus Bild 2.5/1 in Abhängigkeit von  $v_a$
- 8 : Kreiseigenfrequenz des Menschensimulators im  $\nu$ . Versuch, zu berechnen nach  $\omega_{e_1} = \sqrt{c_1/m_1}$
- 9 : Grenze des elastischen Bereiches des Probekörpers  $\nu$ , zu entnehmen dem Kraft-Durchbiegungsdiagramm entsprechend Bild 3.2.3/1 aus dem Versuch zur Ermittlung der Versagensenergie nach Abschn. 3.2.3
- 10 : Verhältniswert der Massen des stoßenden und des gestoßenen Körpers im  $\nu$ . Versuch, zu berechnen nach  $M = m_1/m_2$
- 11 : Verhältniswert der Kreiseigenfrequenzen des stoßenden und des gestoßenen Körpers im  $\nu$ . Versuch, zu berechnen nach  $\Omega = \omega_{e_1}/\omega_{e_2}$
- 12 : Bezogene Aufprallgeschwindigkeit im  $\nu$ . Versuch, zu berechnen nach  $\bar{v}_a = v_a/(x_{2,0} \cdot \omega_{e_2})$
- 13 : gerundeter Wert von  $M$  für den  $\nu$ . Versuch
- 14 : gerundeter Wert von  $\Omega$  für den  $\nu$ . Versuch
- 15 : Grenzwert der bezogenen Aufprallgeschwindigkeit, bis zu dem der Probekörper  $\nu$  noch elastisch reagieren würde, d.h.  $K$  unabhängig von  $\bar{v}_a$ , zu entnehmen dem Diagramm oder der Tabelle für  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ , Limberger (1975) oder Anhang I
- 16 :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ , zu entnehmen den Diagrammen oder Tabellen für das Masse-Feder-Masse-Feder-System mit elastischer und elasto-plastischer Federkennlinie in Limberger (1975) oder Anhang I
- 17 : Verhältniswert der erforderlichen Energieaufnahme  $E_A$  beim Probekörper  $\nu$  zur Aufprallenergie  $E_a$ , zu berechnen nach

$$E_A/E_a = M \cdot K^2 \text{ für } \bar{v}_a \leq \bar{v}_{a,e1} \text{ oder}$$

$$E_A/E_a = 2 \cdot \frac{K}{\bar{v}_a} - \frac{1}{M \cdot \bar{v}_a^2} \text{ für } \bar{v}_a > \bar{v}_{a,e1}$$

- 18 : Verhältniswert der Versagensenergie  $E_V$  des Probekörpers  $\nu$  (oder der Bruchenergie  $E_{Br}$ ) zur Aufprallenergie  $E_a$ . Dazu ist  $E_V$  oder

$E_{Br}$  zu ermitteln aus dem Kraft-Durchbiegungs-Diagramm entsprechend Bild 3.2.3/1 aus dem Versuch nach Abschn. 3.2.3 und  $E_a$  zu berechnen nach  $E_a = m_1 v_a^2/2$

- 19 : Verhältniswert der Versagensenergie  $E_V$  (oder der Bruchenergie  $E_{Br}$ ) zur erforderlichen Energieaufnahme  $E_A$  beim Probekörper  $\nu$  (Spalte 18 : Spalte 17)

$\bar{x}$  : Mittelwert der Einzelwerte  $x$  der Spalten 17 oder 18, zu berechnen nach

$$\bar{x} = \left( \sum_{\nu=1}^n x_{\nu} \right) / n$$

$\tilde{x}$  : Zentralwert der Einzelwerte  $x_{\nu}$  der Spalte 19, zu berechnen nach

$$\tilde{x} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$$

$s$  : Standardabweichung der Einzelwerte  $x_{\nu}$  der Spalten 17 oder 18, zu berechnen nach

$$s = \sqrt{\left( \sum_{\nu=1}^n (x_{\nu} - \bar{x})^2 \right) / (n - 1)}$$

Anwendungsbereich I oder II:

Nach Richtlinien oder Normen zugelassener Anwendungsbereich mit festgesetztem Sicherheitsniveau, s. auch Kopf der Tabelle Bild 3.2.5/1

$\gamma_V$  : Faktor zur Berechnung des maßgebenden Verhältnisses  $(E_V \text{ oder } E_{Br})/E_A$ , zu entnehmen der Tabelle Bild 3.2.5/1 in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich, vom Stichprobenumfang (Probenzahl)  $n$  und den Variationsquotienten  $V_{1,2} = s/\bar{x}$  der Spalten 17 und 18 (der jeweils kleinere Wert ist  $V_1$ ).

$(E_V/E_A)$  Prüfung:

Für die Beurteilung der untersuchten Bauteilart maßgebender aus der Prüfung gewonnener Verhältniswert.

$\gamma$  : Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung aller Einflüsse auf die Sicherheit, über die die Prüfung keine Information liefern kann (s. a. Abschn. 3.2.5)

$(E_V/E_A)$  Prüfung/ $\gamma$ :

Zahlenwert zur Beurteilung des Widerstandes der Gesamtkonstruktion der untersuchten Bauteilart gegenüber einer stoßartigen Belastung durch einen gegenprallenden Menschen. Ergibt sich dieser Wert zu  $\geq 1$ , so bedeutet das: Bei einer solchen stoßartigen Belastung von einer Größe, wie sie bei der Prüfung zugrunde lag, wird der betrachtete Versagenszustand mit ausreichender Sicherheit nicht auftreten.

3.3 Orientierungsversuche zum Prüfverfahren

Der Gesamtaufwand zu der Untersuchung mußte in Grenzen gehalten werden. Deshalb konnten keine vollständigen Prüfungen im Sinne des vorstehend beschriebenen Verfahrens, also immer

mehrere Probekörper gleicher Art, sondern nur einzelne Orientierungsversuche an vorhandenen Bauteilausschnitten durchgeführt werden. Sie liefern einen Hinweis auf die Größenordnung der bei Versuchen zu solchen Prüfungen auftretenden Zahlenwerte.

### 3.3.1 Probekörper

Als Probekörper wurden die vier Wandausschnitte Nr. 1, 4, 7 und 5 + 6 benutzt, die aus den Versuchen von Abschn. 2 zur Verfügung standen und die in Abschn. 2.1.4 beschrieben sind.

### 3.3.2 Versuchseinrichtung und -durchführung

Zuerst wurde an jedem Probekörper (Wandausschnitt) im eingebauten Zustand, s. Abschn. 2.1.2, im Ausschwingversuch die Eigenschwingungsdauer  $T_{e2,a}$  bestimmt. Ein leichter Schulterstoß auf die vorgesehene Belastungsstelle (Stoßstelle) in Probekörpermitte regte den Probekörper zu Eigenschwingungen an. (Die zu den Schulterstoßversuchen benutzte Kraftmeßdose, Abschn. 2.1.2, war dazu entfernt worden). Die Wege, die die Probekörpermitte in diesem Zustand ausführte, maß ein induktiver Weggeber und registrierte über die Zeit ein Oszillograph, wie auch in Abschn. 2.1.2 beschrieben. Danach wurde dem Probekörper in seiner Mitte eine langsam monoton zunehmende Verformung eingeprägt. Dazu diente ein hydraulischer Zylinder, der auf der einen Seite mit seinem Kolben über eine Platte von 0,2 m Durchmesser gegen den Probekörper und mit seinem anderen Ende gegen eine Kraftmeßdose drückte, Bild 3.3.2/1. Zwischen Probekörper und Lasteinleitungsplatte am Kolben befand sich eine 8 mm dicke Gummilage, die vorzeitige örtliche Zerstörungen an der Lasteinleitungsstelle verhindern sollte. Die Kraft, die durch den Widerstand des Probekörpers gegen die Zwangsverformung entstand und mittels eines Lagebockes in das Aufspannfeld abgeleitet wurde, ist in Abhängigkeit von der Durchbiegung der Probekörpermitte von einem x-y-Linienschreiber kontinuierlich registriert worden.

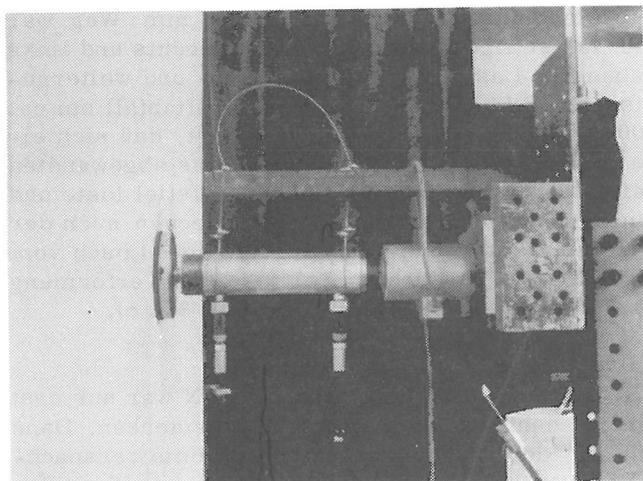


Bild 3.3.2/1  
Hydraulikzylinder mit Lasteinleitungsplatte und Kraftmeßdose zu Beginn eines Versuches zum Ermitteln der Versagens-(Bruch-)energie

### 3.3.3 Versuchsergebnisse

Die Kraft-Durchbiegungs-Diagramme aus den vorstehend beschriebenen Versuchen und der Zustand der Probekörper nach den Versuchen und z. T. auch während der Versuche nach bemerkenswerten Zustandsänderungen sind auf den Bildern 3.3.3/1 bis 3.3.3/8 zu sehen. Im einzelnen ist zum Verhalten der Probekörper unter dieser Beanspruchung noch zu sagen:

Wand Nr. 1:

Bis zum Erreichen der Maximallast war außer

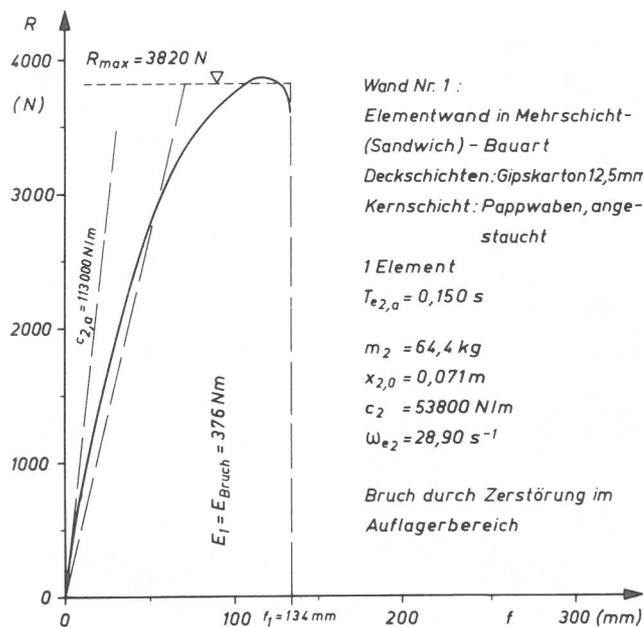


Bild 3.3.3/1

Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Krafteinleitungsstelle bei statischer Belastung

leisem Knacken, das nicht lokalisiert werden konnte, nichts zu bemerken. Nach Erreichen der Maximallast vergrößerte sich im Auflagerbereich der Abstand der beidseitigen Beplankung sichtbar, bis am oberen Auflager die lastseitige Gipskartonplatte losgelöst von der Kernschicht abbrach, Bild 3.3.3/2

Wand Nr. 4:

Auch hier bis zum Erreichen der Maximallast nur leises Knacken. Das Wandelement brach in Höhe der Lasteinteilung an und bestimmte so die Maximallast. Dabei wurde die auf Zug beanspruchte Gipskartonplatte zerrissen, Bild 3.3.3/4 a), die lastseitige Platte angebrochen. Die Kraft fiel auf ca. 1/5 ihrer maximalen Größe ab. Im Laufe der weiteren Verformung beifast konstanter Kraft begann die Holzfeder auf der einen Seite des Elementes sich aus dem Verband zu lösen, in dem sich die Nägel durchbogen und die lastseitige Gipskartonplatte an der Feder teilweise einbrach, bis bei ca. 140 mm Weg der Probekörpermitte die Feder ganz ausbrach und sich gerade stellte, Bild 3.3.3/4 d). Dabei fiel die Kraft weiter ab. Das Wandelement setzte aber weiterer Verformung immer noch einen Widerstand in der Größenordnung von 1/10 der Maximalwert entgegen. Der

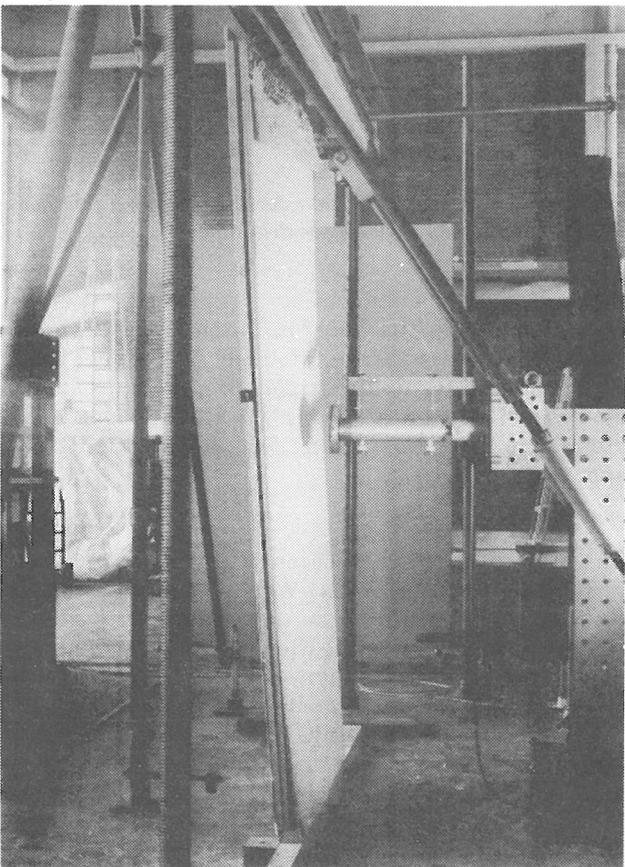
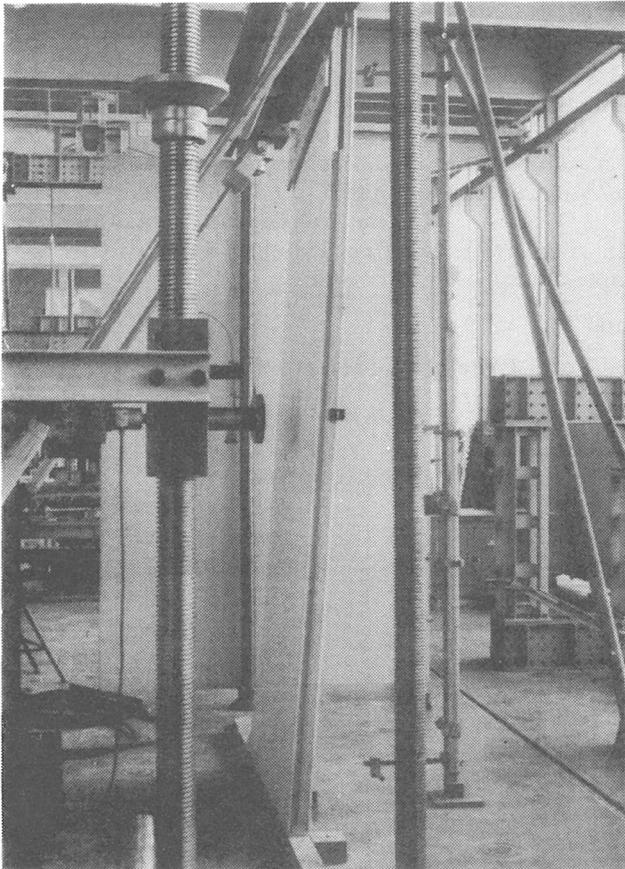


Bild 3.3.3/2  
Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element mit angestauchten Pappwaben als Kernschicht, Wand Nr. 1  
a) Zustand der Wand nach Versagen am oberen Auflager, Seite mit eingesteckter Feder aus Spanplattenstreifen  
b) wie a) jedoch von der Seite ohne Feder

Riß in Probekörpermitte erweiterte sich, wobei die Stege der Waben einrissen. Bei ca. 260 mm Weg begannen die Nägel an der oberen Befestigung sich herauszuziehen bei gleichzeitig kontinuierlichem Lastabfall.

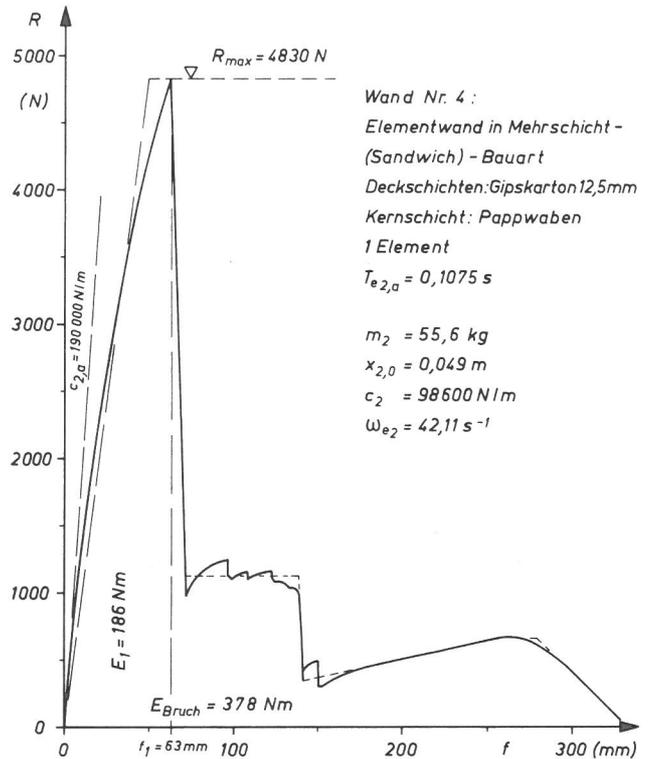


Bild 3.3.3/3  
Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung

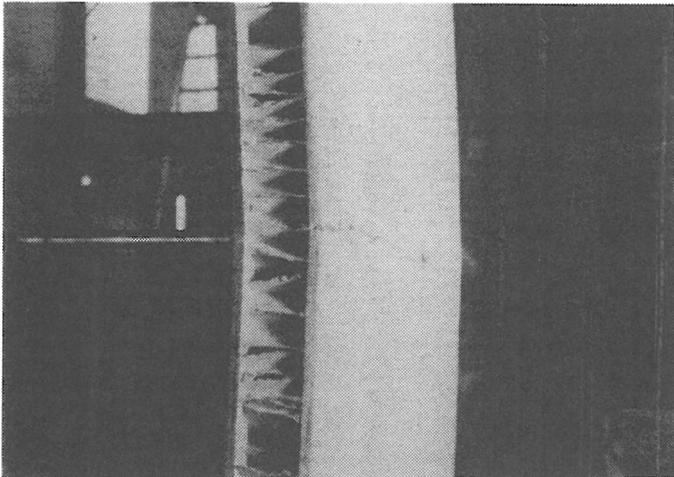
Wand Nr. 7:

Die Maximallast wurde hier offensichtlich bestimmt durch den Übergang zu größeren plastischen Verformungen im mittleren Ständer. Danach riß bei ca. 35 mm Weg der Probekörpermitte auf der zugbeanspruchten Seite die Fuge zwischen den beiden über dem mittleren Pfosten gestoßenen Gipskartonplatten auf. Bei ca. 90 mm Weg war die lastseitige Gipskartonplatte rechts und links neben der Lasteinleitungsplatte ein- und weitergerissen, Bild 3.3.3/6 a). Der Kraftabfall bei ca. 100 mm Weg wurde dadurch bedingt, daß sich eine der Gipskartonplatten auf der lastabgewandten Seite über große Längen vom Mittelstiel löste und einbrach, Bild 3.3.3/6 b). Das Brechen auch der anderen Platte und das vollständige Lösen vom Mittelstiel verursachten bei weiterer Verformung die folgenden Lastabfälle, Bild 3.3.3/6 c).

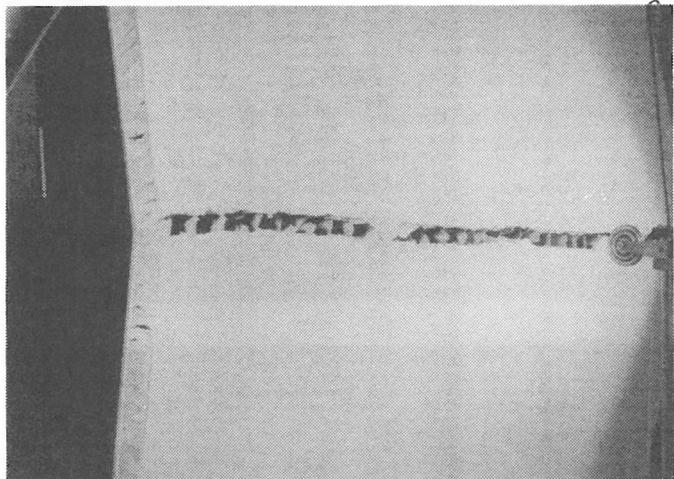
Wand Nr. 5 + 6

Bis zu einer Kraft von ca. 2500 N war nur erst leises, dann starkes Knacken zu bemerken. Dann riß auf der zugbeanspruchten Seite die verspachtelte vertikale Fuge auf, wo die beiden Wandelemente mittels der Holzfeder gestoßen waren. Dieser Spalt vergrößerte sich bis zum Erreichen der Maximallast, Bild 3.3.3/8 a). Der Probekörper

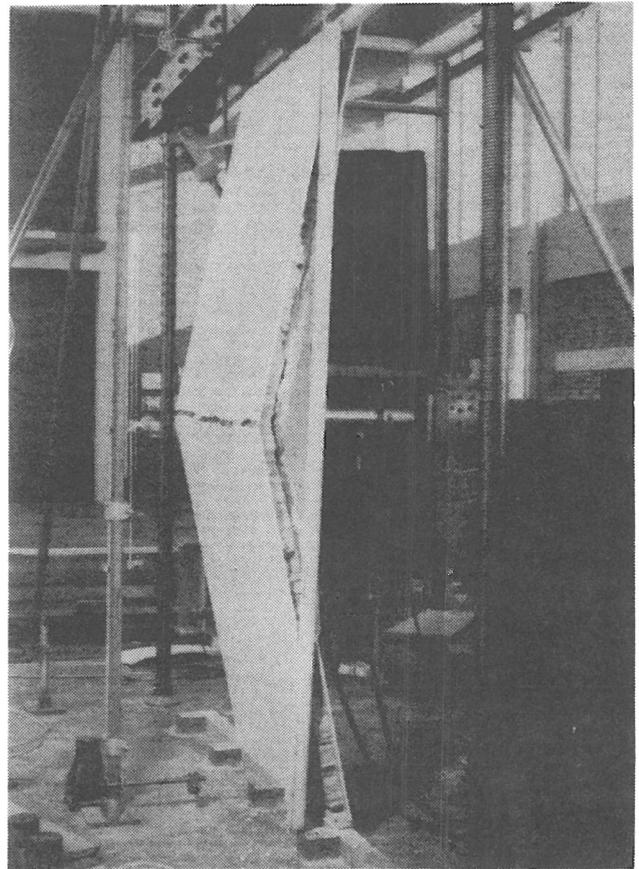
versagt durch Abbrechen der lastseitigen Gipskartonplatten am oberen Auflager, Bild 3.3.3/8 b) und c).



a)



b)



d)

Bild 3.3.3/4

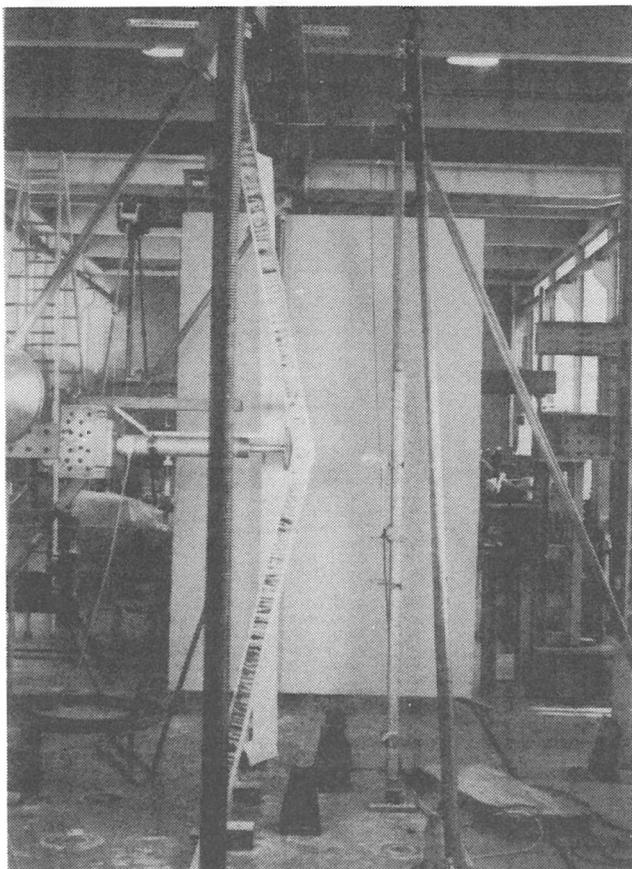
Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element, Wand Nr. 4

a) Riß in zugbeanspruchter Beplankung in Wandmitte

b) Erweiterung des Biegebruches

c) Zustand der Wand nach dem Versuch

d) wie c), jedoch von der Seite mit der Holzfeder



c)

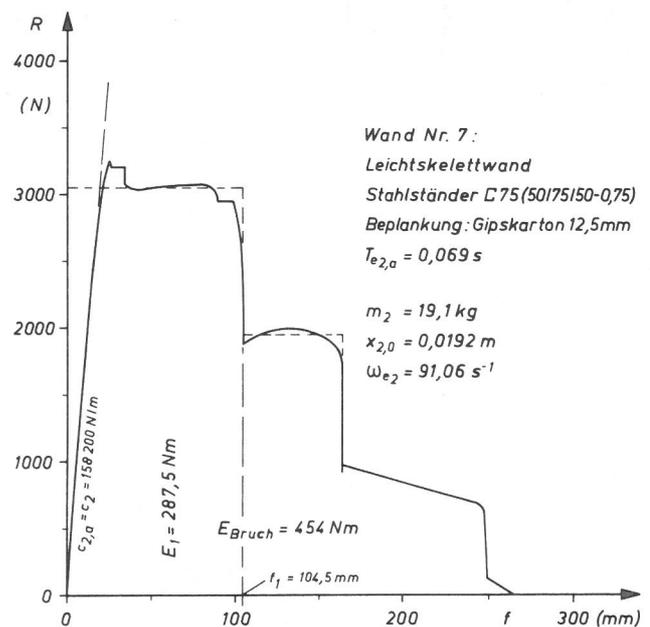
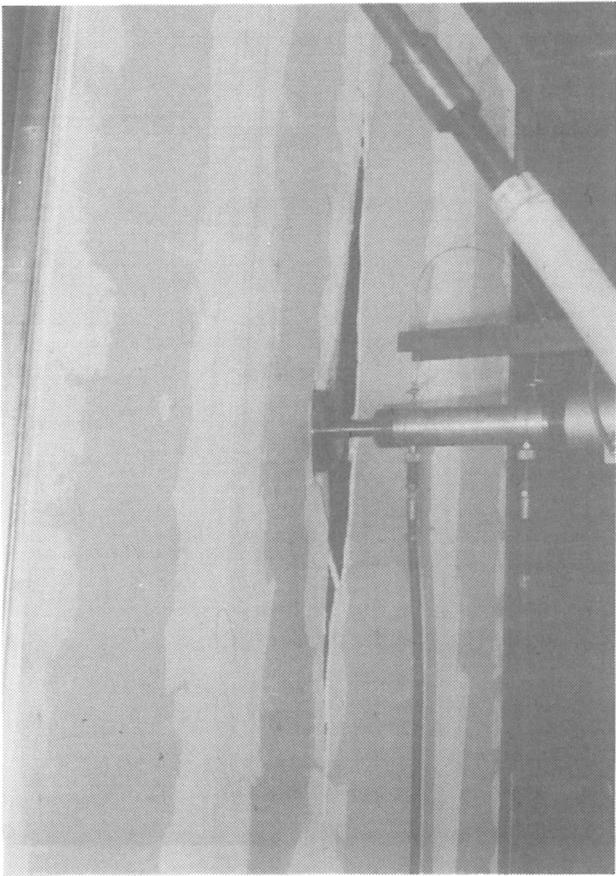
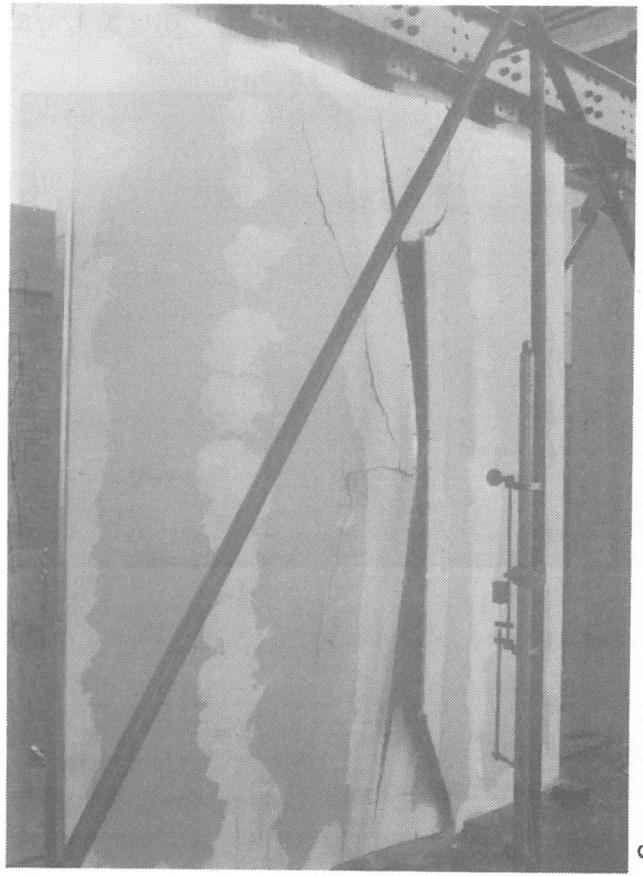


Bild 3.3.3/5

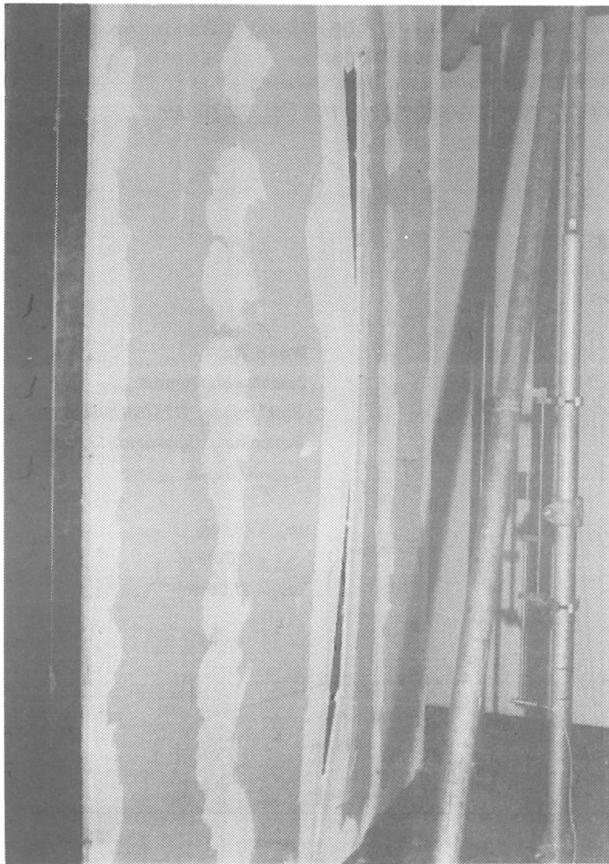
Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Krafteinleitungsstelle bei statischer Belastung



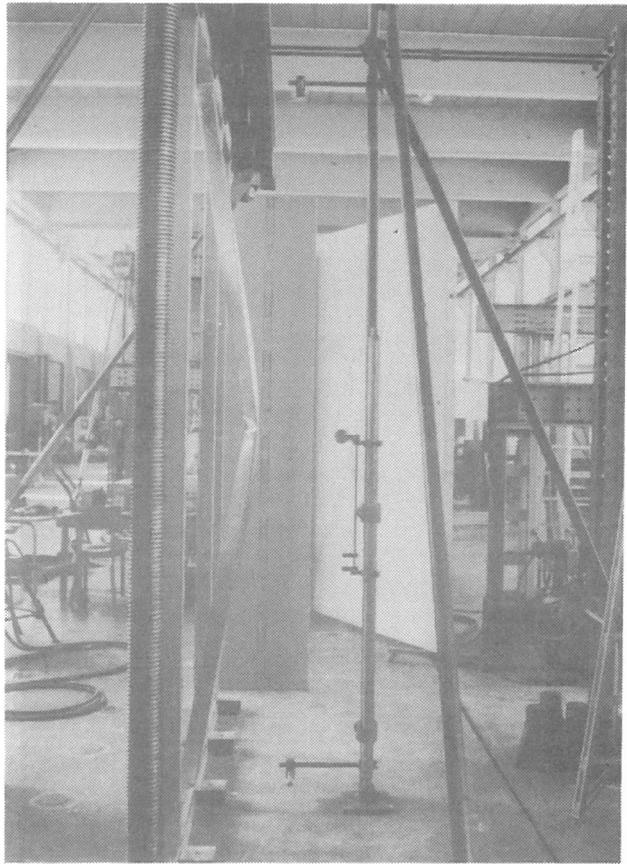
a



c



b



d

Bild 3.3.3/6

Leichtskelettwand in Ständerbauart, Wand Nr. 7.

a) Einbrechen der Beplankung an der Belastungsseite  
b) Lösen der Beplankung in der Fuge über dem Mittelstiel

c) Zustand der Wand nach Versagen durch Ablösen der Beplankung  
d) Zustand des Mittelstieles nach dem Versuch

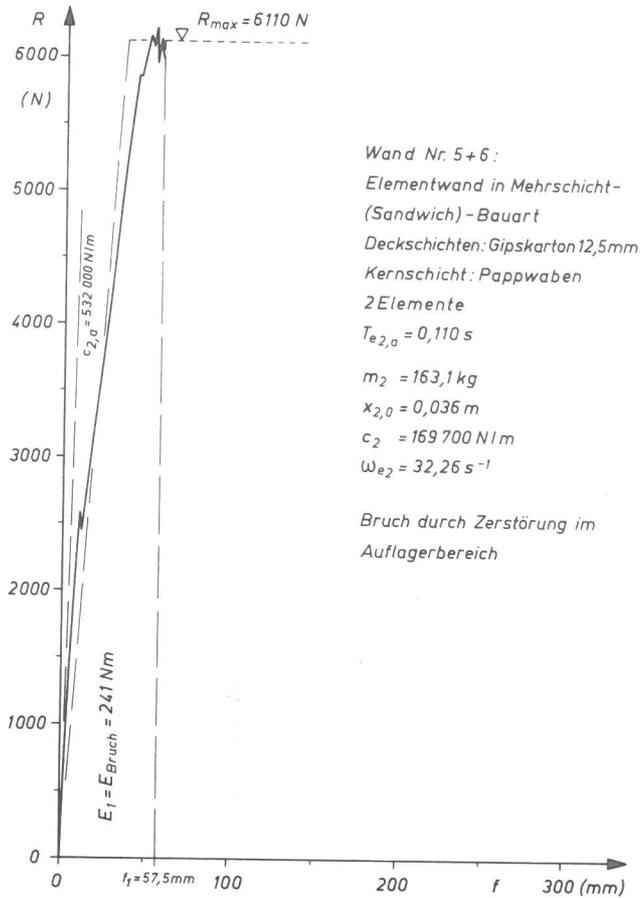


Bild 3.3.3/7  
 Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der  
 Kräfteinleitungsstelle bei statischer Belastung

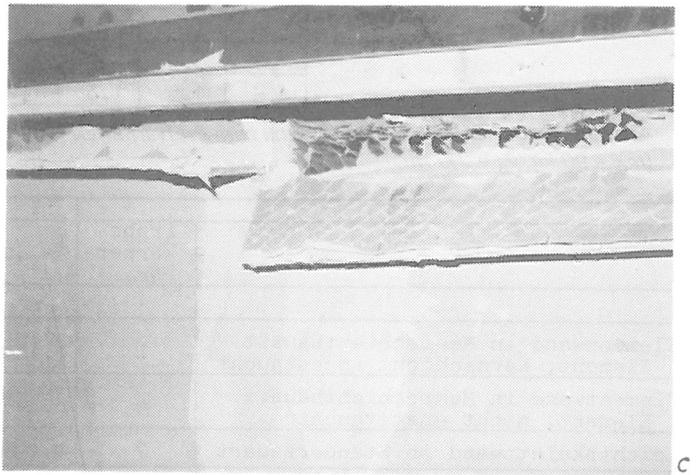
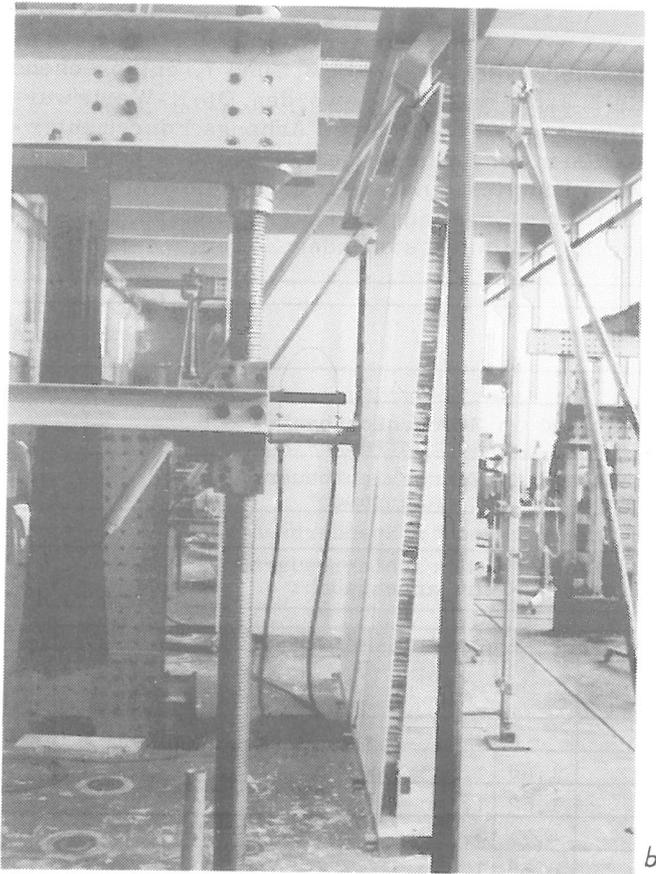
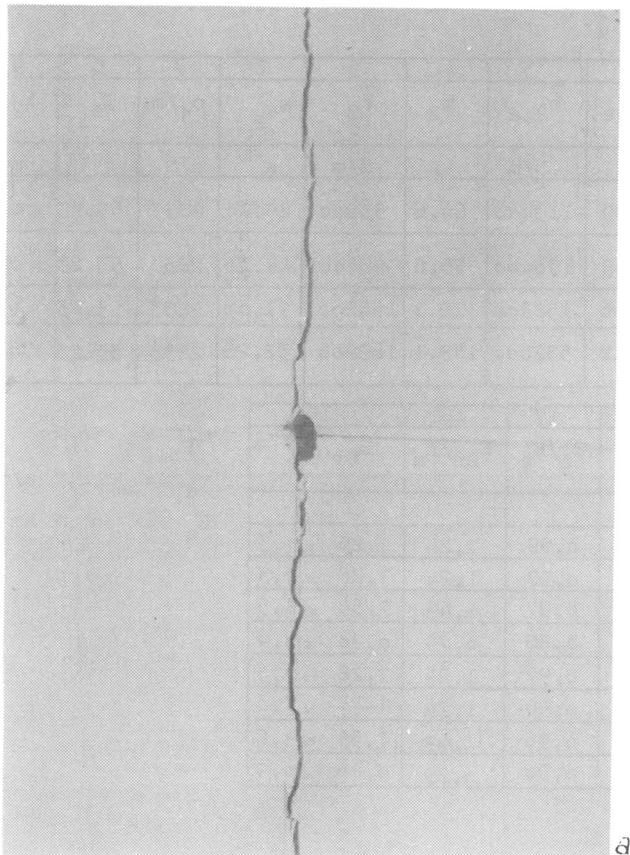


Bild 3.3.3/8  
 Elementwand in Mehrschichtbauart, 2 Elemente Wand Nr. 5+6  
 a) Aufgerissene Fuge zwischen den Wandelementen  
 b) Zustand des Wandausschnittes nach Versagen am oberen  
 Auflager c)

### 3.3.4 Auswertung der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen wurde entsprechend dem in  
 Abschn. 3.2.4 und 3.2.6 beschriebenen Verfah-  
 ren für die vier Wandausschnitte jeweils ein Ein-  
 zelwert für das Verhältnis Bruchenergie  $E_{BR}$   
 zur erforderlichen Energieaufnahme  $E_A$  ermittelt.  
 Dieser Ermittlungsgang ist tabellarisch in Anle-  
 hung an Bild 3.2.6/1 in den Bildern 3.3.4/1 und 2  
 für  $m_1 = 90 \text{ kg}$ ,  $v_a = 2,0 \text{ m/s}$  und  $2,6 \text{ m/s}$  sowie in  
 den Bildern 3.3.4/3 und 4 für  $m_1 = 50 \text{ kg}$  und die glei-  
 chen Aufprallgeschwindigkeiten zusammengestellt.

Die dazu erforderlichen Zahlenwerte für  $T_{e_2,a}$ ,  $c_{2,a}$ ,  $w_{e_2}$  und  $x_{2,0}$  sind den Kraft-Durchbiegungs-Diagrammen, Bilder 3.3.3/1, 3, 5 und 7, entsprechend Bild 3.2.3/1 entnommen worden. Die K-Werte wurden aus den Tabellen des Anhangs I durch Interpolation in der Reihenfolge  $\bar{v}_a$ ,  $\Omega$  und M berechnet. (Einen Einblick, inwieweit gerundete Werte für M und  $\Omega$  das Ergebnis verändern, liefern die entsprechenden unten stehenden Zeilen in den Bildern

3.3.4/1 bis 3.3.4/4. Dabei zeigte sich, daß die Unterteilung der Tabellen in Anhang I noch nicht ausreicht, um bei einer Rundung der Eingangswerte M und  $\Omega$  auf die nächsttabellierte Werte immer auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse zu bekommen).

Bemerkenswert ist ein Vergleich der Spalten 19 der Bilder 3.3.4/1 bis 4. Man erkennt, daß bei

	Probekörper-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		$T_{e_2,a}$	$w_{e_2,a}$	$c_{2,a}$	$m_2$	$c_2$	$w_{e_2}$	$c_1/m_1$	$w_{e_1}$	$x_{2,0}$
		s	s <sup>-1</sup>	N/m	kg	N/m	s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>	s <sup>-1</sup>	m
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht angestaucht	1	0,150	41,89	113000	64,4	53800	28,90	2147	46,34	0,071
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, nicht angestaucht	4	0,1075	58,45	190000	55,6	98600	42,11	2147	46,34	0,049
Leichtskelettwand in Ständerbauart	7	0,069	91,06	158200	19,1	158200	91,06	2147	46,34	0,0192
Elementwand in Mehrschichtbauart 2 Elemente, nicht angestaucht	5+6	0,110	57,12	532000	163,1	169700	32,26	2147	46,34	0,036

Probekörper-Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	M	$\Omega$	$\bar{v}_a$	$M \approx$	$\Omega \approx$	$\bar{v}_{a,el}$	K	$E_A/E_a$	$E_{Br}/E_a$	$E_{Br}/E_A$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1,40	1,603	0,975			0,86	0,851	0,99	2,09	2,11 = 2,1
4	1,62	1,100	0,969			0,80	0,798	0,99	2,10	2,12 = 2,1
7	4,71	0,509	1,144			0,56	0,603	0,89	2,52	2,83 = 2,8
5+6	0,55	1,436	1,722			1,46	1,314	0,86	1,34	1,56 = 1,6
				1,5	1,5	0,83	0,820	0,98	2,09	2,13 = 2,1
				1,5	1,0	0,82	0,829	1,00	2,10	2,10 = 2,1
				4,75	0,5	0,56	0,601	0,89	2,52	2,83 = 2,8
				0,6	1,5	1,36	1,259	0,90	1,34	1,49 = 1,5

$m_1 = 90 \text{ kg}$   
 $v_a = 2,0 \text{ m/s}$   
 $E_a = 180 \text{ N m}$

Bild 3.3.4/1  
 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren  
 ( $m_1 = 90 \text{ kg}$ ,  $v_a = 2,0 \text{ m/s}$ )

	Probekörper-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		$T_{e_2,a}$	$w_{e_2,a}$	$c_{2,a}$	$m_2$	$c_2$	$w_{e_2}$	$c_1/m_1$	$w_{e_1}$	$x_{2,0}$
		s	s <sup>-1</sup>	N/m	kg	N/m	s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>	s <sup>-1</sup>	m
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht angestaucht	1	0,150	41,89	113000	64,6	53800	28,90	2833	53,23	0,071
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, nicht angestaucht	4	0,1075	58,45	190000	55,6	98600	42,11	2833	53,23	0,049
Leichtskelettwand in Ständerbauart	7	0,069	91,06	158200	19,1	158200	91,06	2833	53,23	0,0192
Elementwand in Mehrschichtbauart 2 Elemente, nicht angestaucht	5+6	0,110	57,12	532000	163,1	169700	32,26	2833	53,23	0,036

Probekörper-Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	M	$\Omega$	$\bar{v}_a$	$M \approx$	$\Omega \approx$	$\bar{v}_{a,el}$	K	$E_A/E_a$	$E_{Br}/E_a$	$E_{Br}/E_A$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1,40	1,842	1,267			0,86	0,906	0,99	1,24	1,25 = 1,3
4	1,62	1,264	1,260			0,81	0,859	0,97	1,24	1,28 = 1,3
7	4,71	0,585	1,487			0,55	0,790	0,97	1,49	1,54 = 1,5
5+6	0,55	1,650	2,239			1,45	1,391	0,88	0,79	0,90 = 0,9
				1,5	2,0	0,83	0,877	0,97	1,24	1,28 = 1,3
				1,5	1,5	0,83	0,880	0,98	1,24	1,27 = 1,3
				4,75	0,6	0,55	0,788	0,96	1,49	1,55 = 1,6
				0,6	1,5	1,36	1,380	0,90	0,79	0,88 = 0,9

$m_1 = 90 \text{ kg}$   
 $v_a = 2,6 \text{ m/s}$   
 $E_a = 304,2 \text{ Nm}$

Bild 3.3.4/2  
 Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren  
 ( $m_1 = 90 \text{ kg}$ ,  $v_a = 2,6 \text{ m/s}$ )

Fällen wie den vorliegenden die Vergrößerung der Aufprallenergie  $E_a$  um den Faktor  $(2.6/2.0)^2 = 1,69$  überproportionale Vergrößerungen der Beanspruchungen hervorrufen kann, z.B. für Probekörper Nr. 7 die 1,87-fache Größe. Wenn man also Unsicherheiten abdecken will durch Erhöhung der Aufprallenergie bei der Prüfung über Erhöhung der Geschwindigkeit, so verlangt man je nach Bauteilart verschieden mehr Bruchenergie. Deckt man

die Unsicherheiten durch einen entsprechenden Sicherheitsfaktor zum Verhältnis  $E_V/E_A$  oder  $E_{Br}/E_A$  ab, so werden alle Bauteilarten gleich behandelt. Bei dem vorliegenden Beispiel eines Probekörpers bedeutet das: Einem Sicherheitsfaktor von 1,69 entspräche bei entsprechender Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit um das 1,3-fache eine Vergrößerung der geforderten Bruchenergie von ca. 10 % bei Wand Nr. 7

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Probekörper-Nr.	$T_{e2,a}$	$w_{e2,a}$	$c_{2,a}$	$m_2$	$c_2$	$w_{e2}$	$c_1/m_1$	$w_{e1}$	$x_{2,0}$	
	s	s <sup>-1</sup>	N/m	kg	N/m	s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>	s <sup>-1</sup>	m	
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht angestaucht	1	0,150	41,89	113000	64,6	53800	28,90	2147	46,34	0,071
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, nicht angestaucht	4	0,1075	58,45	190000	55,6	98600	42,11	2147	46,34	0,049
Leichtskelettwand in Ständerbauart	7	0,069	91,06	158200	19,1	158200	91,06	2147	46,34	0,019
Elementwand in Mehrschichtbauart 2 Elemente, nicht angestaucht	5+6	0,110	57,12	532000	163,1	169700	32,26	2147	46,34	0,036

Probekörper	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	M	$\Omega$	$\bar{v}_a$	$M \approx$	$\Omega \approx$	$\bar{v}_{a,el}$	K	$E_A/E_a$	$E_{Br}/E_a$	$E_{Br}/E_A$
1	0,78	1,603	0,975			1,16	1,114	0,97	3,76	3,88 = 3,9
4	0,90	1,100	0,969			1,08	1,032	0,96	3,78	3,94 = 3,9
7	2,62	0,509	1,144			0,74	0,663	0,87	4,54	5,23 = 5,2
5+6	0,31	1,436	1,722			2,25	1,440	0,64	2,41	3,77 = 3,8
				0,8	1,5	1,14	1,101	0,97	3,76	3,88 = 3,9
				0,9	1,0	1,08	1,028	0,95	3,78	3,98 = 4,0
				2,5	0,5	0,76	0,656	0,84	4,54	5,40 = 5,4
				0,3	1,5	2,28	1,464	0,64	2,41	3,77 = 3,8

$m_1 = 50 \text{ kg}$   
 $v_a = 2,0 \text{ m/s}$   
 $E_a = 100 \text{ Nm}$

Bild 3.3.4/3

Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren

( $m_1 = 50 \text{ kg}$ ,  $v_a = 2,0 \text{ m/s}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Probekörper-Nr.	$T_{e2,a}$	$w_{e2,a}$	$c_{2,a}$	$m_2$	$c_2$	$w_{e2}$	$c_1/m_1$	$w_{e1}$	$x_{2,0}$	
	s	s <sup>-1</sup>	N/m	kg	N/m	s <sup>-1</sup>	s <sup>-2</sup>	s <sup>-1</sup>	m	
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht angestaucht	1	0,150	41,89	113000	64,6	53800	28,90	2833	53,23	0,071
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, nicht angestaucht	4	0,1075	58,45	190000	55,6	98600	42,11	2833	53,23	0,049
Leichtskelettwand in Ständerbauart	7	0,069	91,06	158200	19,1	158200	91,06	2833	53,23	0,0192
Elementwand in Mehrschichtbauart 2 Elemente, nicht angestaucht	5+6	0,110	57,12	532000	163,1	169700	32,26	2833	53,23	0,036

Probekörper	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	M	$\Omega$	$\bar{v}_a$	$M \approx$	$\Omega \approx$	$\bar{v}_{a,el}$	K	$E_A/E_a$	$E_{Br}/E_a$	$E_{Br}/E_A$
1	0,78	1,842	1,267			1,15	1,124	0,98	2,22	2,27 = 2,3
4	0,90	1,264	1,260			1,07	1,052	0,97	2,24	2,31 = 2,3
7	2,62	0,585	1,487			0,70	0,843	0,96	2,69	2,80 = 2,8
5+6	0,31	1,650	2,239			2,22	1,469	0,67	1,42	2,12 = 2,1
				0,8	2,0	1,13	1,115	0,98	2,22	2,27 = 2,3
				0,9	1,5	1,06	1,063	0,99	2,24	2,26 = 2,3
				2,5	0,6	0,70	0,857	0,97	2,69	2,77 = 2,8
				0,3	1,5	2,28	1,464	0,64	1,42	2,23 = 2,2

$m_1 = 50 \text{ kg}$   
 $v_a = 2,6 \text{ m/s}$   
 $E_a = 169 \text{ Nm}$

Bild 3.3.4/4

Auswertung der Orientierungsversuche zum Prüfverfahren

( $m_1 = 50 \text{ kg}$ ,  $v_a = 2,6 \text{ m/s}$ )

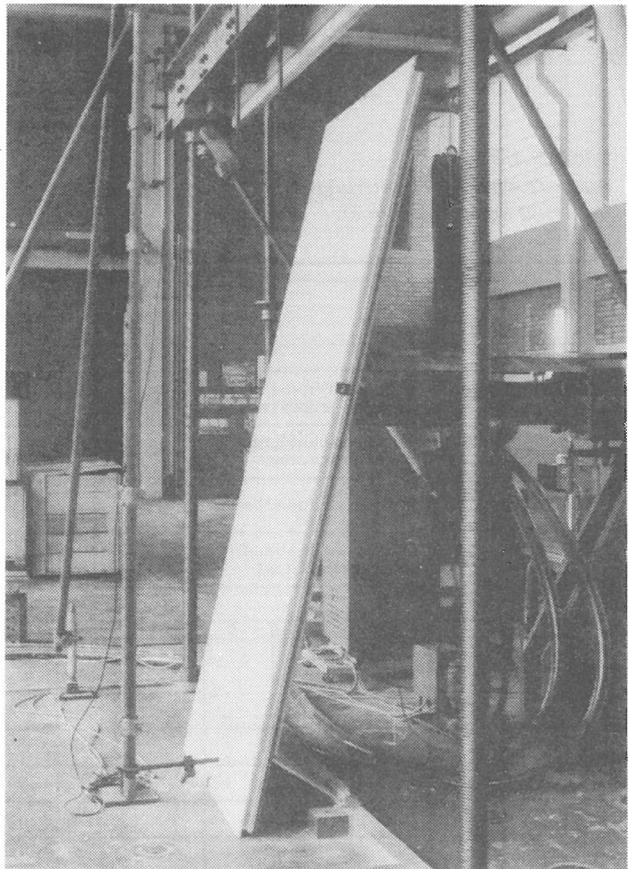
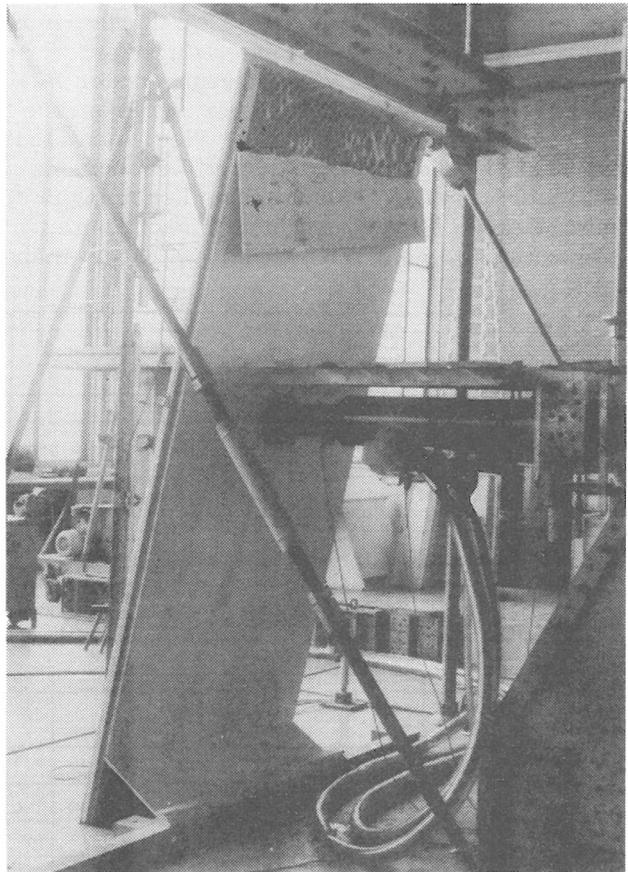
### 3.4 Kontrollversuche mit verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten

#### 3.4.1 Zweck der Versuche

Bei dem vorgeschlagenen Prüfverfahren wird diejenige Energie, die vom Bauteil zum Abfangen des Stoßes maximal aufgenommen werden muß, mit der Energie verglichen, die in ein Bauteil hineingesteckt werden kann, bis ein vereinbarter Versagenszustand oder der Bruchzustand des Bauteils erreicht ist. Dazu wird vereinfachend vorausgesetzt, daß die im statischen Versuch (langsame, monoton zügige Zwangsverformung über eine Einzelkraft an der Stoßstelle) ermittelte Versagens- oder Bruchenergie, derjenigen entspricht, die hineingesteckt werden könnte unter Durchbiegungsgeschwindigkeiten, wie sie beim Stoß auftreten. Zur Kontrolle, ob dieses wenigstens der Größenordnung nach zutrifft, wurden an 2 Wandausschnitten vom Typ Wand Nr. 1 (Mehrschichtbauart, angestauchte Pappwaben) Versuche durchgeführt mit verschiedenen, aber jeweils konstanten Durchbiegungsgeschwindigkeiten von der Größe, wie sie beim Schulterstoß auftraten.

#### 3.4.2 Versuchsbeschreibung

Als Probekörper (Wand Nr. 2 und Nr. 3) dienen je ein Wandelement in Mehrschichtbauweise mit Deckschichten aus Gipskarton und angestauchten Pappwaben als Kernschicht entsprechend dem in Abschn. 2.2.4 beschriebenen Probekörper Wand Nr. 1. Jedem der Körper wurde in seiner Mitte eine konstant zunehmende Verformung eingeprägt. Dieses geschah durch einen servohydraulisch wegeregelter Prüfzylinder, der auf der einen Seite über eine Kraftmeßdose und der in Abschn. 3.3.2 beschriebenen Lasteinleitungsplatte auf den Probekörper, auf der anderen Seite gegen einen Lagerbock drückte, Bild 3.4.2/1. Der Weg der Krafteinleitungsstelle wurde über den Weg des Prüfzylinderkolbens mittels des eingebauten induktiven Weggebers gemessen. Wärend eines Versuches konstant gehaltenen Durchbie-



a

Bild 3.4.3/1  
Elementwand in Mehrschichtbauart, 1 Element mit angestauchten Pappwaben als Kernschicht, Zustand der Wand nach Bruch im Auflagerbereich. Durchbiegungsgeschwindigkeit  $v_f$ :  
a) 0,333 m/s (Wand Nr. 2)    b) 0,667 m/s (Wand Nr. 3)

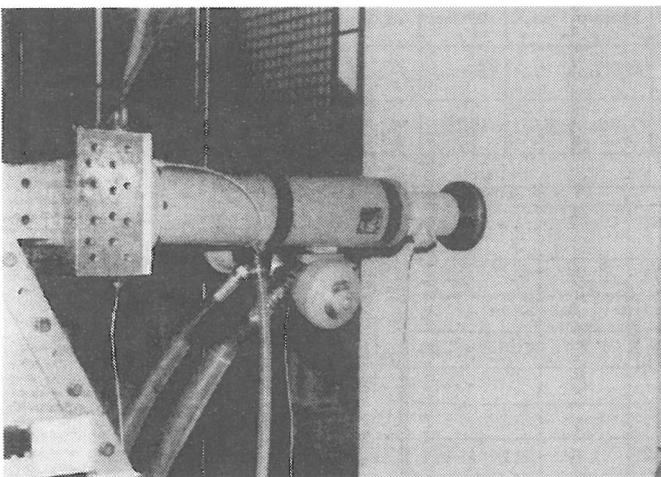
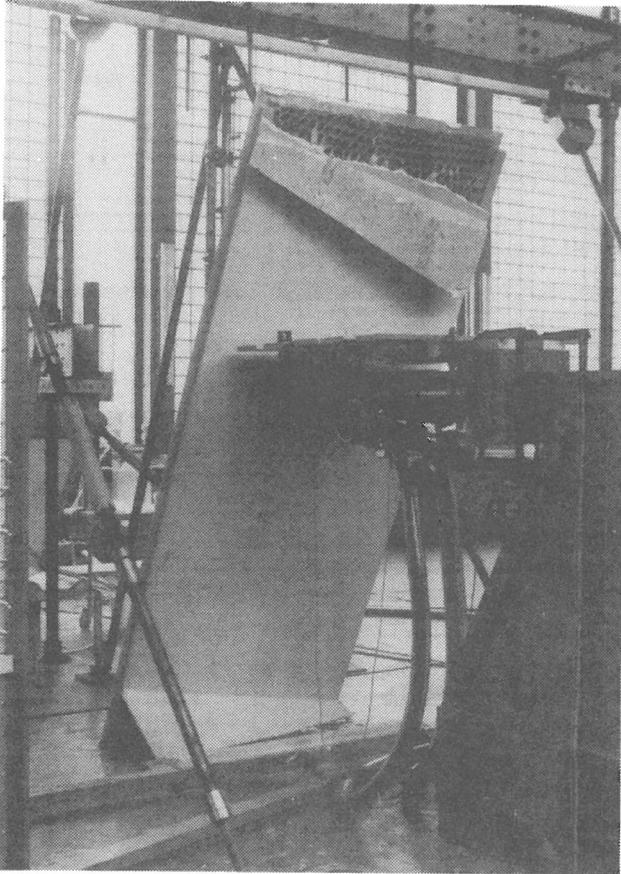


Bild 3.4.2/1  
Servohydraulisch geregelter Prüfzylinder mit Lasteinleitungsplatte, Kraftmeßdose und eingebautem Weggeber zu Beginn eines Versuches mit konstant geregelter Weggeschwindigkeit



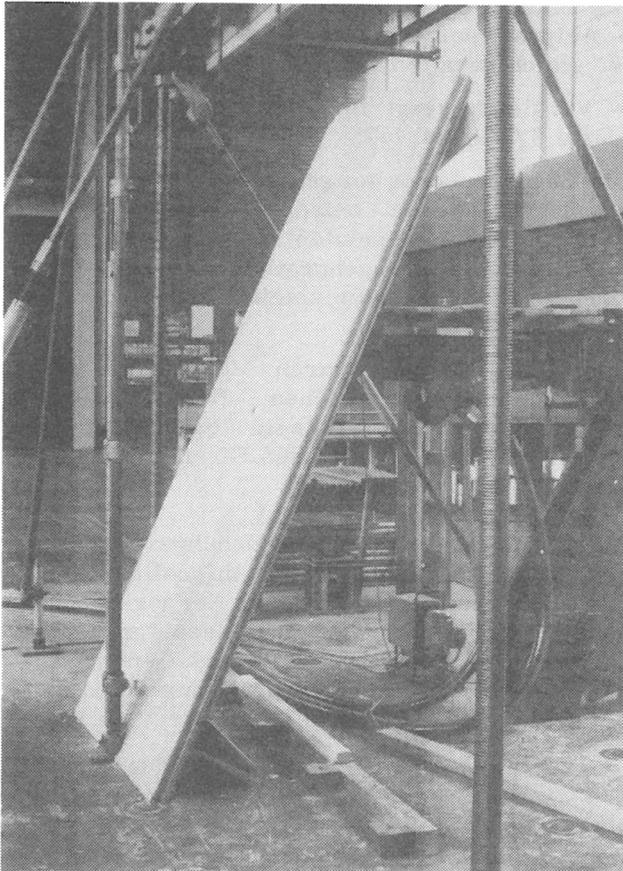
vorgesehene Weggeschwindigkeit gebracht werden mußte. Elektronenstrahl-Speicheroszillographen registrieren Wege und Kräfte.

Die maximalen Weggeschwindigkeiten der Stoßstelle, die beim Schulterstoß auf Wand Nr. 1 auftraten, deuten darauf hin, daß für eine Aufprallgeschwindigkeit von  $v_a = 2,0 \text{ m/s}$  mit einer maximalen Durchbiegungsgeschwindigkeit in der Größe von ca.  $0,5 \text{ m/s}$  bei dieser Art Probekörper zu rechnen ist. Die Anhaltswerte dazu wurden aus den Weg-Zeit-Kurven der Stoßstelle, z.B. Bild 2.2/29, entnommen. Um diesen Wert symmetrisch einzugrenzen und gleichzeitig eine gleichmäßige Abstufung, ausgehend von Null, zu bekommen, sind die Durchbiegungsgeschwindigkeiten  $v_f = 0,333 \text{ m/s}$  und  $v_f = 0,667 \text{ m/s}$  gewählt worden.

### 3.4.3 Ergebnisse

Die Energieaufnahme war bei beiden Probekörpern, Wand Nr. 2 und Nr. 3, begrenzt durch Zerstörungen im Auflagerbereich, Bilder 3.4.3/1. Die bei diesen Versuchen aufgenommenen Kraft-Durchbiegungsdiagramme zeigen die Bilder 3.4.3/2 und 3. Zusammen mit den entsprechenden Bildern 3.3.3/1 und 2 von dem Versuch mit  $v_f \approx 0 \text{ m/s}$  ergibt sich folgendes:

- Die Art des Bruches, nämlich Zerstörung im Auflagerbereich, war bei allen drei Durchbiegungsgeschwindigkeiten gleich. Daß bei den Probekörpern mit  $v_f > 0$  die Beplankung an beiden Auflagern abgebrochen wurde, ist darauf zurückzuführen, daß die Elemente auch nach Bruch in einem Auflagerbereich noch weiter verschoben worden sind.
- Die Wege bis zum Beginn größerer Zerstörungen, ca.  $60 \text{ mm}$ , und diejenigen bis zum Bruch,  $130 \text{ mm}$  bis  $150 \text{ mm}$ , waren bei allen drei Proben praktisch gleich.



b

gungsgeschwindigkeit sind in der Anzeige des Kraftgebers, außer im Anfangsbereich, keine wesentlichen Massenkräfte enthalten. Dieser Anfangsbereich ist durch die Tatsache gegeben, daß die Krafteinleitungsstelle jeweils erst auf die

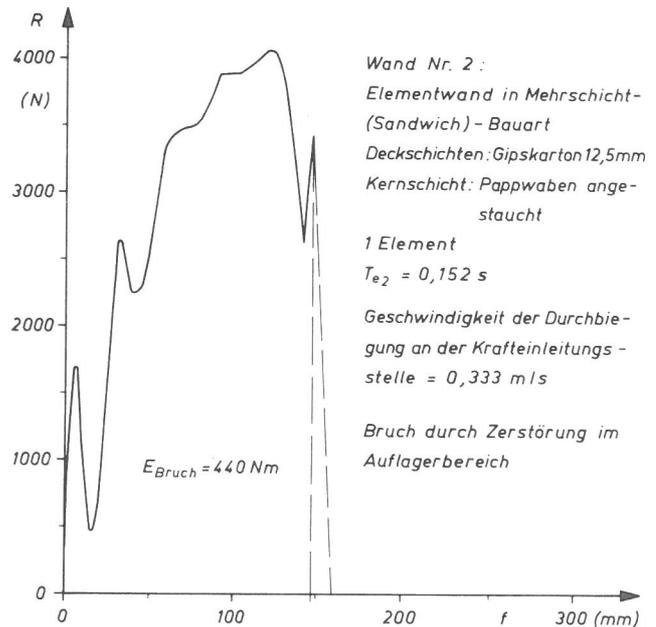


Bild 3.4.3/2

Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Krafteinleitungsstelle bei konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit

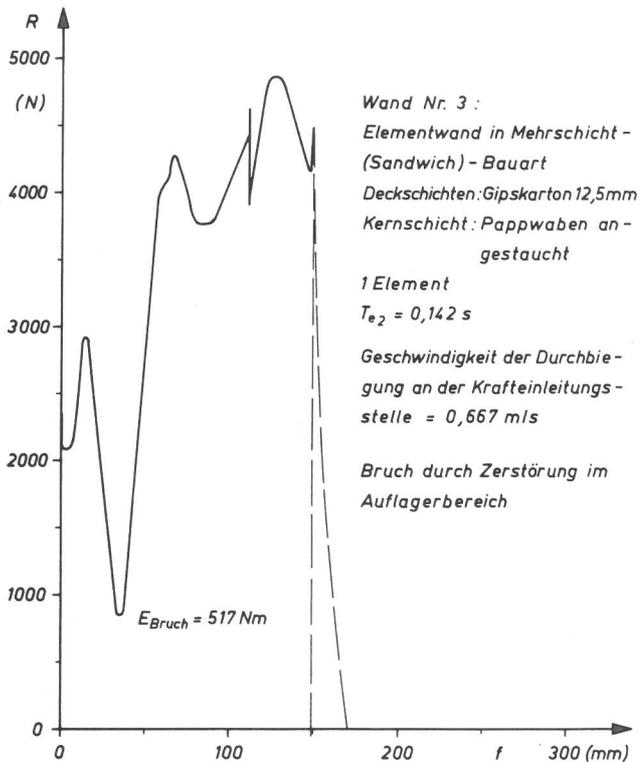


Bild 3.4.3/3  
 Einzelkraft  $R$  in Abhängigkeit von der Durchbiegung  $f$  an der Kräfteinleitungsstelle bei konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit

Die Bruchenergien zeigen eine leicht steigende Tendenz mit steigender Durchbiegungsgeschwindigkeit  $v_f$ . Ob es sich hierbei um einen systematischen Anstieg handelt oder ob es ein zufälliges Ergebnis ist, kann nicht entschieden werden, da ja nur jeweils ein Versuch je Geschwindigkeit durchgeführt werden konnte.

Die Ergebnisse dieser Versuche mit verschiedenen Durchbiegungsgeschwindigkeiten sprechen also nicht gegen die Benutzung der Annahme, daß die im statischen Versuch ermittelte Versagens- oder Bruchenergie mit derjenigen angenähert übereinstimmt, die beim Schulterstoßversuch ermittelt werden würde.

#### 4. Hinweise zum Sandsackpendel als Prüfkörper

##### 4.1 Vergleich von Sandsack-Stoßversuchen und menschlichen Schulterstößen

Systematische Stoßuntersuchungen mit einem 50-kg-Sandsack auf zwei verschiedenen reagierende Wandteile, Sonnemans (1971), lieferten folgende Ergebnisse:

Probekörper Nr. 1:

Vielschichtiges OKOUME-Sperrholz  
 Abmessungen: 1220 mm x 2440 mm x 18 mm

Steifigkeit in Plattenmitte, gemessen bei Verformungen bis 100 mm:  $c_{2,a} = 13,25 \text{ kN/m}$

Kreiseigenfrequenz, gemessen im Ausschwingversuch:

$$\omega_{e2,a} = 28,3 \text{ s}^{-1}$$

Daraus berechnete mitwirkende Masse

$$m_2 = c_{2,a} / \omega_{e2,a}^2 = 16,5 \text{ kg}$$

Probekörper Nr. 3:

Vielschichtiges OKOUME-Sperrholz wie vorstehend, aber 34 mm dick mit

$c_{2,a} = 90,7 \text{ kN/m}$ , gemessen bei Verformungen bis 13 mm

$$\omega_{e2,a} = 52 \text{ s}^{-1}; m_2 = 33,6 \text{ kg}$$

Unter einem Aufprall eines 50-kg-Sandsack-Pendels aus verschiedenen Fallhöhen verformten sich die vorstehend beschriebenen Probekörper in der in der Tabelle Bild 4.1/1 angegebenen Größe. Bei Annahme eines linear elastischen Verhaltens über den ganzen Bereich sind die Werte für die erforderliche Energieaufnahme  $E_A$  berechnet und ins Verhältnis zur Aufprallenergie  $E_a$  gesetzt worden.

Um einen Vergleich dieses Verhältnisses  $E_A/E_a$  beim Aufprall eines Sandsacks mit demjenigen, das für den Aufprall eines Menschen mit der Schulter gilt, zu bekommen, wurden die Ergebnisse des Abschnittes 2 hier angewandt, und zwar zum einen für einen Aufprall, an dem die gesamte Körpermasse von 90 kg mitwirkt, Bild 4.1/1, und zum anderen für einen Stoß, bei dem nur anteilig 50 kg Masse mitwirkend gedacht ist, Bild 4.1/2. Die Aufprallenergien sind für alle vergleichbaren Stöße gleich gehalten worden:

Der Vergleich zeigt für die betrachteten Fälle, Bilder 4.1/1 und 4.1/2:

- Die Beanspruchung im gestoßenen Körper durch das Sandsackpendel entspricht in keinem der Fälle in ihrer absoluten Größe der durch den mit der Schulter gegenprallenden menschlichen Körper, (hier in den Beispielen Unterschiede von 55 % bis 102 %).
- Das Verhältnis der durch Mensch und durch Sandsack hervorgerufenen Beanspruchungen ist im allgemeinen abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit und von den Eigenschaften des gestoßenen Körpers.
- Die Abhängigkeit des Beanspruchungsverhältnisses Mensch/Sandsack von der Aufprallgeschwindigkeit ist bei dem gestoßenen Körper mit größerer Steifigkeit und größerer Masse größer als beidem mit kleiner Steifigkeit und kleiner Masse, (hier in den Beispielen Änderungen von 19 % bis 0 %).
- Die Abhängigkeit des Beanspruchungsverhältnisses Mensch/Sandsack von den Eigenschaften des gestoßenen Körpers wird auch wesentlich beeinflusst von dem Verhältnis Sandsackmasse zu wirkender Menschenmasse (hier in den Beispielen kehrt sich sogar die Tendenz um).

Für Stöße von Sandsackpendeln auf auch plastisch reagierende Körper konnten leider keine Unterlagen gefunden werden, mit denen ein Vergleich

Probe Nr. 1	Sandsack $m_1 = 50 \text{ kg}$				Mensch $m_1 = 90 \text{ kg}$					$\frac{E_{A, \text{Mensch}}}{E_{A, \text{Sandsack}}}$
	$E_a$	$v_a$	$x_2 \text{ max}$	$E_A/E_a$	$v_a$	$c_1/m_1$	$\Omega$	$K$	$E_A/E_a$	
$c_2 \text{ (N/m)}$	Nm	m/s	m	-	m/s	$s^{-2}$	-	-	-	-
13250										
$\omega_{e_2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	49	1,40	0,061	0,50	1,04	1049	1,144	0,427	0,99	1,98
28,3	98	1,98	0,088	0,52	1,475	1546	1,389	0,426	0,99	1,90
$m_2 \text{ (kg)}$	196	2,80	0,123	0,51	2,085	2244	1,674	0,425	0,98	1,92
16,5	294	3,43	0,154	0,53	2,56	2788	1,866	0,425	0,98	1,85

Probe Nr. 3	Sandsack $m_1 = 50 \text{ kg}$				Mensch $m_1 = 90 \text{ kg}$					$\frac{E_{A, \text{Mensch}}}{E_{A, \text{Sandsack}}}$
	$E_a$	$v_a$	$x_2 \text{ max}$	$E_A/E_a$	$v_a$	$c_1/m_1$	$\Omega$	$K$	$E_A/E_a$	
$c_2 \text{ (N/m)}$	Nm	m/s	m	-	m/s	$s^{-2}$	-	-	-	-
90700										
$\omega_{e_2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	49	1,40	0,022	0,45	1,04	1049	0,623	0,558	0,83	1,84
52,0	98	1,98	0,033	0,50	1,475	1546	0,756	0,576	0,89	1,78
$m_2 \text{ (kg)}$	196	2,80	0,048	0,53	2,085	2244	0,911	0,570	0,87	1,64
33,6	294	3,43	0,060	0,55	2,56	2788	1,015	0,563	0,85	1,55

Bild 4.1/1

Vergleich der Beanspruchungen in zwei verschiedenen steifen und verschiedenen schweren Bauteilen infolge Stoß durch ein

50 kg schweres Sandpackpendel und infolge Gegenprallen eines 90 kg schweren menschlichen Körpers mit der Schulter bei gleicher Aufprallenergie

Probe Nr. 1	Sandsack $m_1 = 50 \text{ kg}$				Mensch $m_1 = 50 \text{ kg}$					$\frac{E_{A, \text{Mensch}}}{E_{A, \text{Sandsack}}}$
	$E_a$	$v_a$	$x_2 \text{ max}$	$E_A/E_a$	$v_a$	$c_1/m_1$	$\Omega$	$K$	$E_A/E_a$	
$c_2 \text{ (N/m)}$	Nm	m/s	m	-	m/s	$s^{-2}$	-	-	-	-
13250										
$\omega_{e_2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	49	1,40	0,061	0,50	1,4	1461	1,351	0,522	0,826	1,65
28,3	98	1,98	0,088	0,52	1,98	2124	1,629	0,528	0,845	1,63
$m_2 \text{ (kg)}$	196	2,80	0,123	0,51	2,6	2833	1,881	0,536	0,871	$\approx 1,71$
16,5	294	3,43	0,154	0,53	-	-	-	-	-	-

Probe Nr. 3	Sandsack $m_1 = 50 \text{ kg}$				Mensch $m_1 = 50 \text{ kg}$					$\frac{E_{A, \text{Mensch}}}{E_{A, \text{Sandsack}}}$
	$E_a$	$v_a$	$x_2 \text{ max}$	$E_A/E_a$	$v_a$	$c_1/m_1$	$\Omega$	$K$	$E_A/E_a$	
$c_2 \text{ (N/m)}$	Nm	m/s	m	-	m/s	$s^{-2}$	-	-	-	-
90700										
$\omega_{e_2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	49	1,40	0,022	0,45	1,4	1461	0,735	0,781	0,909	2,02
52,0	98	1,98	0,033	0,50	1,98	2124	0,886	0,814	0,987	1,97
$m_2 \text{ (kg)}$	196	2,80	0,048	0,53	2,6	2833	1,024	0,818	0,997	$\approx 1,88$
33,6	294	3,43	0,060	0,55	-	-	-	-	-	-

Bild 4.1/2

Vergleich der Beanspruchungen in zwei verschiedenen steifen und verschiedenen schweren Bauteilen infolge Stoß durch ein

50 kg schweres Sandpackpendel und infolge Gegenprallen eines 50 kg schweren Anteils eines menschlichen Körpers mit der Schulter bei gleicher Aufprallenergie

Mensch zu Sandsack möglich wäre. Das praktisch konstante Verhältnis  $E_A/E_a$  von ca. 50 % beim Sandsackpendel trotz des großen Steifigkeitsunterschiedes der gestoßenen Probekörper (13,25 kN/m und 90,7 kN/m), Bilder 4.1/1 und 4.1/2, deutet jedoch darauf hin, daß auch beim Stoß auf die z. T. plastisch reagierenden Wandausschnitte, Abschn. 3.3, der gleiche Verhältniswert sich einstellen würde. (Der Wert von 50 % für  $(E_A/E_a)$  Sandsack ist jedoch nicht als zutreffend für alle Verhältnisse anzusehen. Versuche an einem steifen Bauteil ( $c_2 = 245$  kN/m) mit sehr kleiner mitwirkender Masse ( $m_2 \approx 3$  bis 4 kg) ergaben Werte von ca. 25 % bis 30 %, C. S. T. B. (1972).) Unter dieser Voraussetzung bestätigt ein Vergleich mit der Stoßbeanspruchung durch menschlichen Körper, Spalte 17 der Bilder 3.3.4/1 bis 3.3.4/4, die vorstehenden Feststellungen auch für diese Art der gestoßenen Bauteile.

#### 4.2 Folgerungen für Prüfverfahren

Grundsätzlich ist aus diesen Vergleichen also zu folgern:

Mit einem Sandsackpendel als Prüfkörper kann ohne andere Hilfsmittel das Verhalten von leichten Bauteilen infolge Gegenprallen eines menschlichen Körpers weder absolut noch vergleichend richtig beurteilt werden. Je nach den Eigenschaften des gestoßenen Bauteils kann die Beanspruchung durch das Sandsackpendel zu groß oder zu klein sein im Verhältnis zu der durch den menschlichen Körper verursachten.

Eine Verwendung eines Sandsackpendels ist in diesem Zusammenhang nur gerechtfertigt, wenn jedes Mal für den jeweils zu untersuchenden Probekörper (Bauteil) die Aufprallenergie vorher so ermittelt wird, daß die Beanspruchung im gestoßenen Probekörper gleich der ist, die beim Stoß durch den menschlichen Körper (realer Stoß) zu erwarten ist, also

$$(E_A/E_a)_{\text{Sandsack}} \cdot E_a, \text{ Prüfung} = (E_A/E_a)_{\text{Mensch}} \cdot E_a, \text{ real}$$

4.2-1

Abgesehen davon, inwieweit die Werte für  $(E_A/E_a)_{\text{Sandsack}}$  als bekannt vorausgesetzt werden können, Sonnemans (1971), ergeben sich bei einem Prüfverfahren mit Sandsackpendel noch folgende Probleme:

- Ist das Ergebnis eines Versuches nur die Entscheidung, ob der Probekörper bei der Aufprallenergie zerstört (beschädigt) wurde oder nicht, so handelt es sich um eine attributive Prüfung (ja - nein Entscheidung), bei der viele gleich-

artige Versuche (> 50) erforderlich sind, um eine noch ausreichende Sicherheit der Aussage zu bekommen.

- Versucht man die Fragen der Sicherheit dadurch zu beantworten, daß man bei der Prüfung eine sehr viel größere Aufprallenergie erzeugt, als in der Wirklichkeit zu erwarten ist, und hält diesen Vergrößerungsfaktor für alle Bauteilarten konstant, so ergeben sich daraus indirekt für Bauteile mit verschiedenen Eigenschaften verschieden hohe Anforderungen, s. Beispiele in Abschn. 3.3.4.
- Man könnte auch die Aufprallenergie ermitteln, bei der Versagen oder Bruch infolge Stoß mit dem Sandsackpendel eintritt, um sie dann zahlenmäßig mit derjenigen zu vergleichen, die sich aus den Bedingungen 4.2-1 ergibt. Grundsätzlich braucht man bei solchen Verfahren mit Variablenprüfung weniger Versuche als bei attributiver Prüfung, um eine ausreichende Aussage-sicherheit zu bekommen. Jedoch erfordern Prüfungen mit stoßartiger Belastung, bei denen die Beanspruchungen im Probekörper (Bauteil) nicht sicher im elastischen Bereich bleiben, für jeden Wert der Aufprallenergie einen neuen Probekörper. Die Zustandsänderung des Probekörpers infolge des vorausgegangenen Stoßes würde nämlich sonst die Beanspruchung im Probekörper bei dem Versuch mit nächsthöherer Aufprallenergie beeinflussen.

Aus folgenden Gründen, nämlich

- der Wert  $(E_A/E_a)_{\text{Mensch}}$  muß für jeden Probekörper sowieso immer bestimmt werden;
- Versuchsdurchführungen, bei denen nur ja-nein Entscheidungen möglich sind oder Prüfverfahren, bei denen die zum Versagen oder Bruch führende Aufprallenergie im Stoßversuch ermittelt werden muß, benötigen eine große Anzahl von Probekörpern;
- es ist vertretbar abzunehmen, daß die im statischen Versuch ermittelte Versagens- oder Bruchenergie angenähert mit derjenigen übereinstimmt, die beim Schulterstoß ermittelt werden würde (s. a. Abschn. 3.4.3)

wird deshalb dem in Abschn. 3 vorgeschlagenen Prüfverfahren, bei dem die im statischen Versuch ermittelte Versagens- oder Bruchenergie mit der erforderlichen Energieaufnahme, ermittelt mittels angepaßter Simulationssysteme, verglichen wird, der Vorzug gegeben.

## Schrifttum

- C.S.T.B.: Justification pour une proposition de substitution de billes de verre au sable de Seine utilise comme remplissage de sac sphero-conique de 50 kg. Dokument der UEAtc-Arbeitsgruppe "Stöße"; Reçu avec lettre CSTB-3/1/1972
- Goldman, D.E., von Gierke, H.E.: Effects of Shock and Vibration on Man. Shock and Vibration Handbook, Vol. 3 McGraw-Hill Book Company, New York 1961
- Limberger, E.: Ein Feder-Masse-Feder-Masse-Schwinger zur Lösung von Stoßproblemen. Materialprüfung 13 (1971), S. 342-345
- Limberger, E.: Vereinfachte Ermittlung der Beanspruchung von Bauteilen infolge Massestoß unter Berücksichtigung elastisch-plastischen Tragverhaltens. Die Bautechnik 52 (1975) S. 42-48
- Limberger, E.; Struck, W.: Die stoßartige Beanspruchung von Bauteilen, Zusammenfassung einer Literaturrecherche aus der Sicht des Bauingenieurs (Stand Mai 1970) VDI-Zeitschrift 113 (1971), S. 793-798
- Limberger, E., Struck, W.: Stoßartige Beanspruchung von Bauteilen und ihre rechnerische Simulation an mechanischen Modellen. Die Bautechnik 49 (1972), S. 384-388
- Rühl, K., Emschermann, H.H., Floßmann, R. und Jänicke, G.: Untersuchungen über den Spannungsverlauf in stoßartig beanspruchten Stäben und Trägern. Materialprüfung 4 (1962), S. 234-242
- Schmidt, B: Kontaktkraft und Biegespannungen in quergestoßenen Balken. Dissertation Techn. Hochschule Darmstadt 1966.
- Sonnemans, P.: Etude expérimentale sur la résistance aux chocs des éléments de construction. Institut National du Logement Rapport d'étude No. 3 (1971)
- Struck, W.: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Versuchen an Bauteilen und Baustoffen. Bautechnik 46 (1969), S. 73-77
- Struck, W.: Zur Frage der Sicherheit bei der Beurteilung von Bauteilen nach Versuchsergebnissen. Die Bautechnik 48 (1971), S. 189-195
- Struck, W.; Böhmert, W.: Gedanken und Versuche zum Ermitteln von Prüfverfahren für die Beurteilung des Verhaltens von Wandtafeln gegenüber stoßartiger Beanspruchung. Berichte aus der Bauforschung, H. 50, S. 5-30, Berlin 1967
- Struck, W., Böhmert, W.: Verfahren zum Abschätzen der Beanspruchung in nichttragenden Wandteilen, die durch gegenprallende Menschen stoßartig belastet werden. Die Bautechnik 48 (1971), S. 62-64
- Struck, W., Limberger, E.: Näherungslösung für das Verhalten eines elastischen Systems unter einem unelastischen Stoß. Nuclear Engineering and Design 12 (1970), S. 452-456
- Struck, W., Limberger, E., Eifler, H: Probleme und Kenntnislücken bei der Beurteilung des Widerstandes von Stahlbetonteilen gegenüber stoßartiger Belastung. Preprints of the 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany 10. - 14. Sept. 1973, Vol. 4, Part J 3/4, S. 1-13



Masse-Feder-Masse-Feder-Schwinger mit elastischer bzw. elasto-  
plastischer Federkennlinie

Tabellen zur Ermittlung der maximalen Zusammendrückung der elasto-  
plastischen Feder in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Massen und  
der Eigenfrequenzen sowie von der Aufprallgeschwindigkeit und von der  
Grenze des elastischen Bereiches der elastoplastischen Feder;

Diagramme zum Überblick über diese Abhängigkeiten

von

Dipl.-Ing. Ernst Limberger  
Fachgruppe "Tragfähigkeit der Baukonstruktionen"  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),  
Berlin

Anhang I zum Bericht

"Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch  
einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen, Vorschlag für ein  
Prüfverfahren"

von Dr.-Ing. Werner Struck, Berlin

Inhalt

Tabelle 1... 25:

$K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$

für

$M = 0,2 (0,1) 1,0 (0,25) 5,0$

$\Omega = 0,1 (0,05) 0,5 (0,1) 1,0 (0,5) 2,0$

$\bar{v}_a = 0,5 (0,25) 4,0 (0,5) 6,0 (1,0) 15,0$

(Bezeichnungen siehe Bilder)

Bilder 1... 25:

Diagramme  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$

Bild 26: Interpolationsschema



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

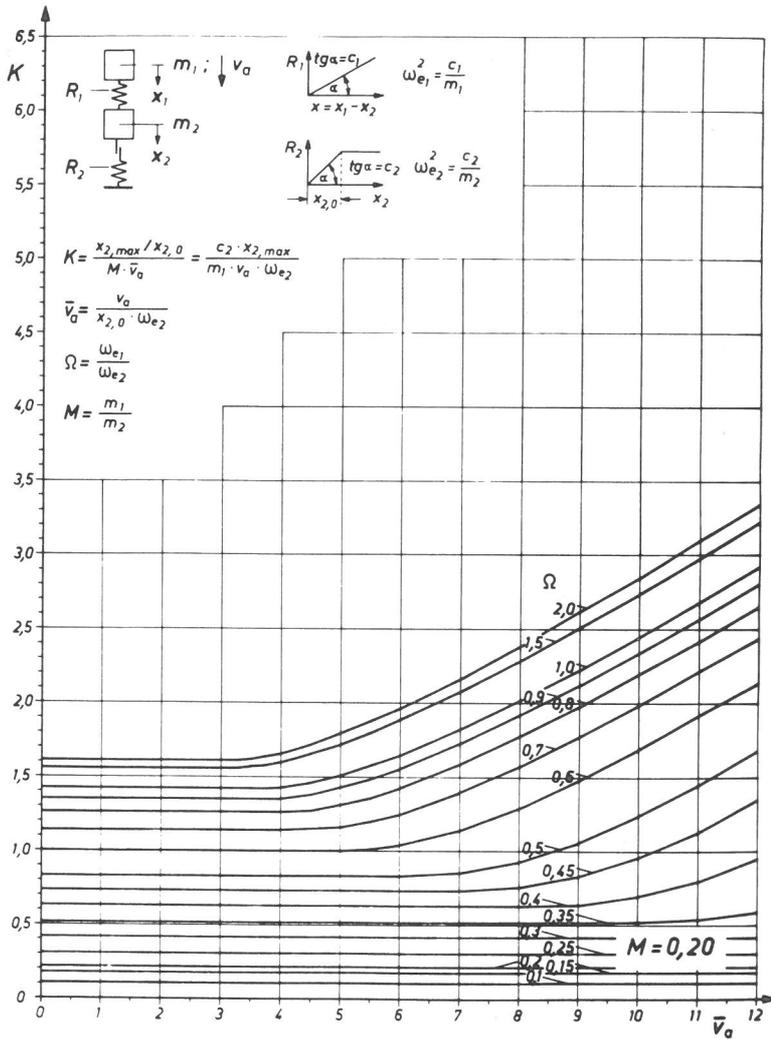
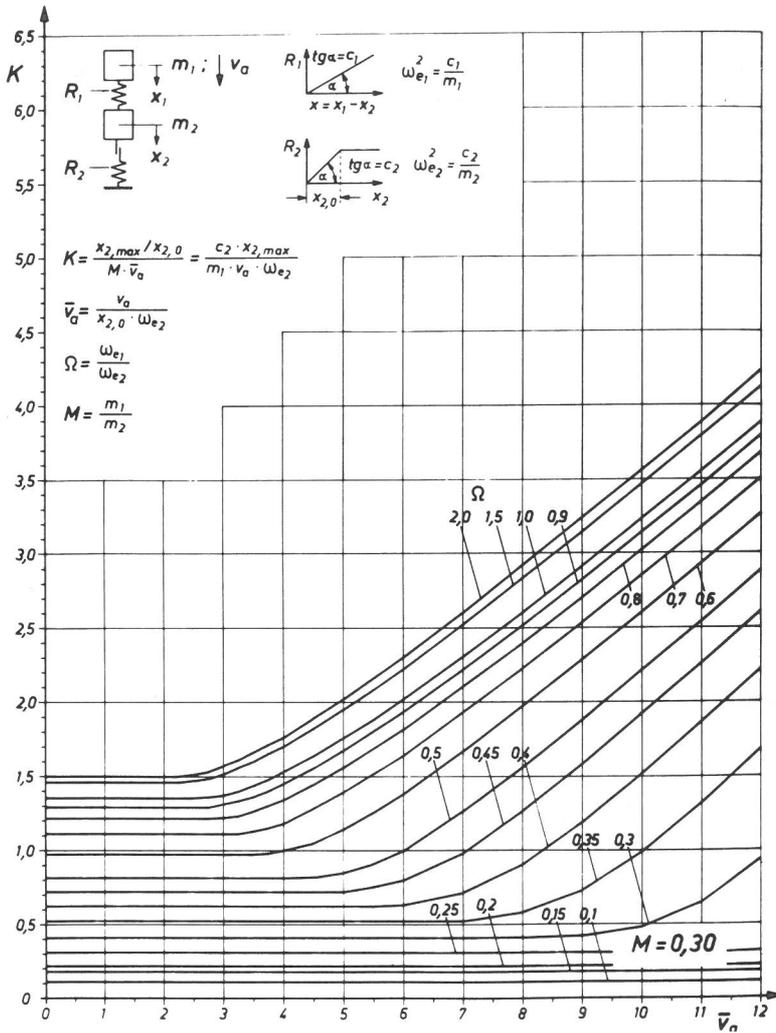


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,20$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,176	0,217	0,312	0,417	0,523	0,629	0,731	0,827	1,001	1,144	1,260	1,349	1,416	1,563	1,610
0,75																
1,00																
1,25																
1,50																
1,75																
2,00																
2,25																
2,50																
2,75																
3,00															1,563	1,610
3,25															1,564	1,612
3,50														1,416	1,570	1,622
3,75														1,260	1,349	1,418
4,00											1,144	1,260	1,354	1,428	1,603	1,662
4,50											1,145	1,274	1,381	1,462	1,655	1,722
5,00										1,001	1,162	1,309	1,427	1,514	1,723	1,796
5,50										1,009	1,198	1,362	1,488	1,579	1,800	1,880
6,00											1,198	1,362	1,488	1,579	1,800	1,880
6,00								0,731	0,827	1,035	1,251	1,429	1,559	1,654	1,887	1,972
7,00								0,731	0,850	1,135	1,397	1,590	1,727	1,827	2,078	2,173
8,00							0,629	0,756	0,925	1,290	1,578	1,777	1,918	2,022	2,287	2,390
9,00						0,523	0,644	0,828	1,057	1,482	1,778	1,980	2,124	2,232	2,508	2,618
10,00						0,525	0,695	0,956	1,237	1,693	1,992	2,196	2,343	2,453	2,739	2,854
11,00						0,544	0,796	1,133	1,450	1,915	2,215	2,421	2,570	2,682	2,976	3,097
12,00					0,417	0,594	0,953	1,347	1,680	2,144	2,445	2,653	2,804	2,918	3,219	3,344
13,00					0,422	0,695	1,154	1,581	1,916	2,380	2,682	2,891	3,043	3,159	3,466	3,594
14,00					0,443	0,854	1,385	1,824	2,158	2,621	2,923	3,133	3,287	3,404	3,716	3,848
15,00	0,110	0,176	0,217	0,312	0,496	1,058	1,631	2,072	2,404	2,865	3,168	3,379	3,534	3,652	3,969	4,105
$\bar{v}_a; e1$	45,45	28,41	23,04	16,26	12,00	9,56	7,95	6,84	6,05	5,00	4,37	3,97	3,71	3,53	3,20	3,11



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,30$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,175	0,217	0,310	0,412	0,516	0,619	0,717	0,809	0,972	1,106	1,211	1,290	1,347	1,464	1,499
0,75																
1,00																
1,25																
1,50																
1,75																
2,00															1,464	1,499
2,25																
2,50													1,290	1,347	1,471	1,509
2,75												1,211	1,293	1,355	1,490	1,533
3,00											1,106	1,217	1,307	1,374	1,520	1,566
3,25									0,972	1,111	1,234	1,332	1,403	1,558	1,608	
3,50									0,973	1,126	1,262	1,365	1,439	1,602	1,655	
3,75									0,980	1,151	1,297	1,405	1,481	1,651	1,708	
4,00								0,809	0,995	1,185	1,340	1,450	1,528	1,705	1,764	
4,50								0,717	0,816	1,052	1,275	1,441	1,554	1,634	1,821	1,887
5,00							0,619	0,722	0,849	1,140	1,386	1,555	1,670	1,752	1,948	2,018
5,50							0,619	0,746	0,911	1,252	1,511	1,680	1,797	1,880	2,083	2,158
6,00						0,516	0,630	0,796	1,002	1,382	1,643	1,813	1,930	2,015	2,224	2,302
7,00					0,412	0,522	0,710	0,982	1,255	1,669	1,926	2,095	2,214	2,301	2,519	2,603
8,00				0,412	0,575	0,901	1,260	1,561	1,971	2,224	2,393	2,513	2,601	2,827	2,916	
9,00				0,423	0,729	1,186	1,583	1,883	2,283	2,533	2,702	2,822	2,912	3,143	3,236	
10,00				0,310	0,479	0,994	1,520	1,919	2,211	2,603	2,850	3,018	3,139	3,230	3,465	3,562
11,00				0,310	0,652	1,325	1,869	2,257	2,542	2,927	3,172	3,340	3,462	3,553	3,793	3,893
12,00				0,321	0,939	1,684	2,219	2,597	2,876	3,256	3,499	3,667	3,789	3,880	4,124	4,227
13,00				0,383	1,286	2,048	2,569	2,938	3,212	3,588	3,830	3,997	4,119	4,212	4,458	4,563
14,00				0,606	1,658	2,410	2,918	3,281	3,551	3,922	4,163	4,330	4,453	4,545	4,795	4,902
15,00	0,110	0,175	0,217	0,928	2,036	2,770	3,268	3,624	3,890	4,258	4,498	4,665	4,788	4,881	5,134	5,242
$\bar{v}_a; e1$	30,30	19,05	15,36	10,75	8,09	6,46	5,38	4,65	4,12	3,43	3,01	2,75	2,58	2,47	2,28	2,22

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

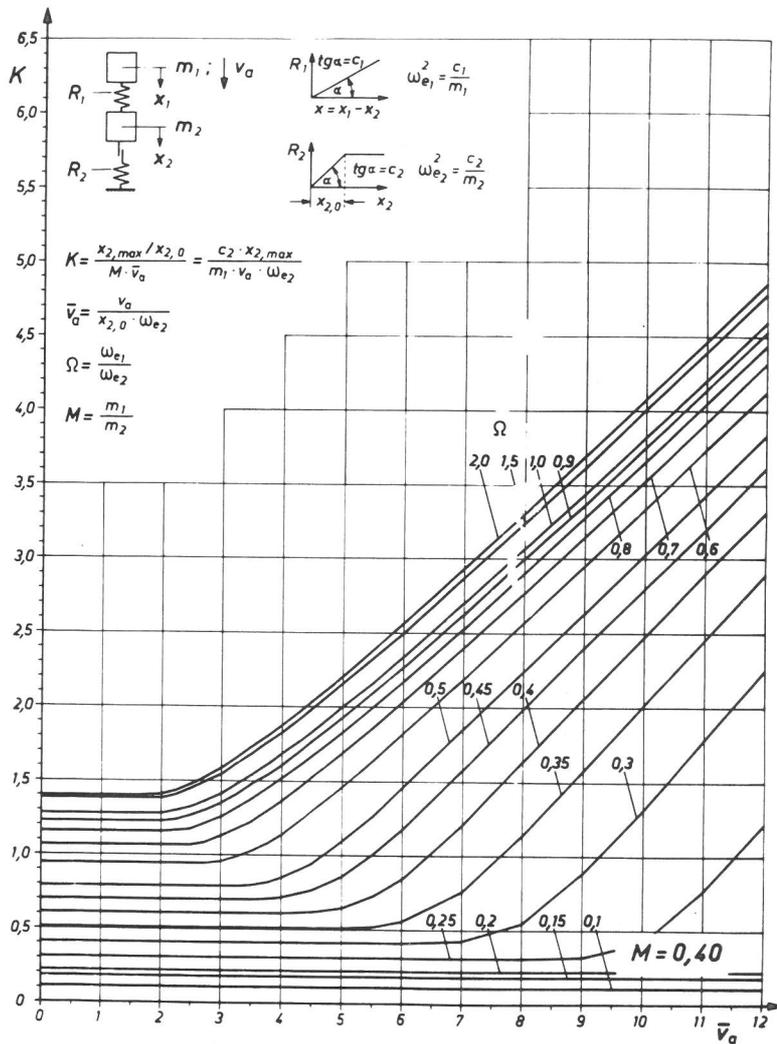
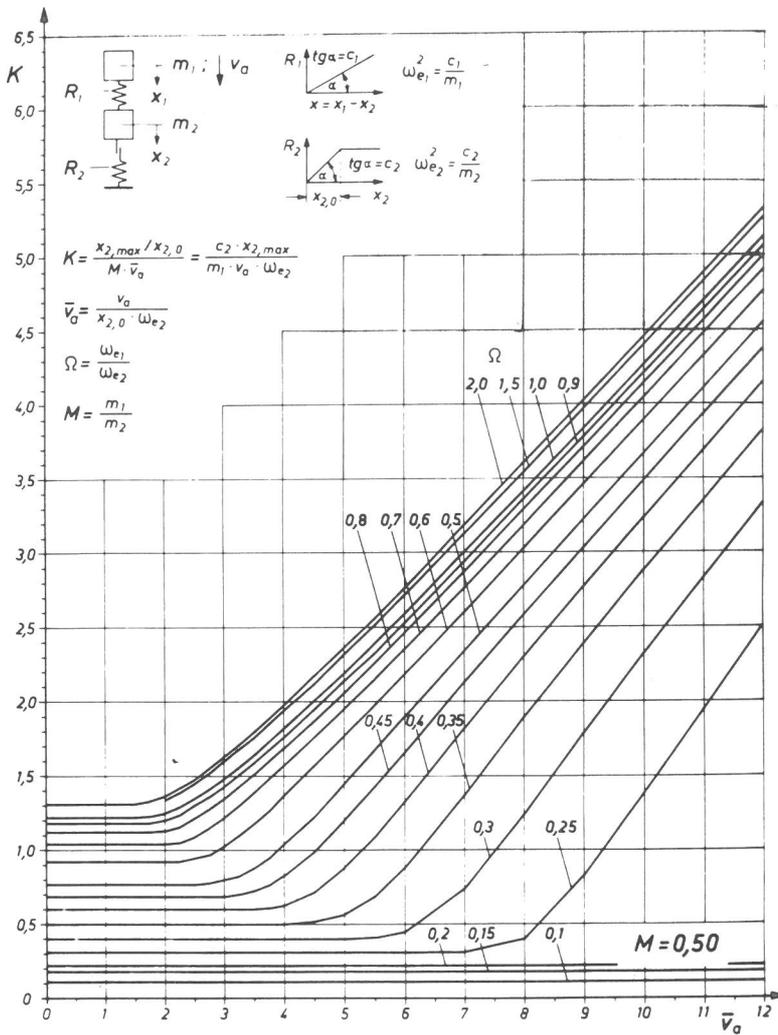


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,40$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,175	0,217	0,308	0,408	0,510	0,609	0,703	0,792	0,946	1,069	1,164	1,234	1,284	1,376	1,401
0,75																
1,00																
1,25																
1,50																
1,75														1,284	1,376	1,401
2,00												1,164	1,234	1,284	1,382	1,410
2,25											1,069	1,166	1,243	1,298	1,407	1,438
2,50										0,946	1,073	1,183	1,268	1,327	1,446	1,481
2,75										0,947	1,093	1,216	1,307	1,369	1,496	1,534
3,00									0,792	0,960	1,127	1,262	1,356	1,419	1,553	1,594
3,25									0,792	0,988	1,175	1,317	1,413	1,477	1,616	1,660
3,50							0,703	0,801	1,028	1,233	1,380	1,475	1,540	1,684	1,731	
3,75							0,706	0,821	1,081	1,299	1,447	1,543	1,608	1,756	1,805	
4,00						0,609	0,716	0,853	1,144	1,371	1,518	1,614	1,680	1,831	1,882	
4,50					0,510	0,616	0,767	0,952	1,295	1,526	1,670	1,766	1,833	1,990	2,045	
5,00					0,510	0,652	0,864	1,095	1,464	1,690	1,831	1,927	1,995	2,156	2,214	
5,50					0,522	0,729	1,006	1,267	1,640	1,860	2,000	2,095	2,163	2,328	2,389	
6,00				0,408	0,558	0,854	1,182	1,456	1,821	2,036	2,174	2,269	2,337	2,505	2,569	
7,00				0,426	0,764	1,213	1,580	1,847	2,190	2,397	2,532	2,627	2,696	2,869	2,936	
8,00			0,308	0,552	1,136	1,635	1,988	2,240	2,568	2,769	2,902	2,996	3,066	3,242	3,313	
9,00			0,316	0,884	1,575	2,062	2,395	2,634	2,951	3,147	3,279	3,373	3,443	3,622	3,695	
10,00			0,419	1,322	2,021	2,482	2,800	3,030	3,338	3,531	3,661	3,755	3,825	4,007	4,082	
11,00		0,217	0,767	1,788	2,460	2,899	3,205	3,428	3,728	3,918	4,048	4,141	4,211	4,395	4,472	
12,00		0,219	1,220	2,251	2,891	3,313	3,609	3,826	4,120	4,308	4,437	4,530	4,600	4,786	4,865	
13,00		0,236	1,704	2,703	3,318	3,726	4,013	4,225	4,514	4,700	4,828	4,921	4,992	5,180	5,260	
14,00	0,175	0,588	2,189	3,148	3,741	4,137	4,418	4,625	4,910	5,094	5,222	5,315	5,385	5,575	5,656	
15,00	0,110	1,177	1,050	2,663	3,586	4,161	4,547	4,822	5,026	5,307	5,490	5,616	5,710	5,780	5,971	6,053
$\bar{v}_a, e1$	22,73	14,29	11,52	8,14	6,13	4,90	4,10	3,56	3,16	2,64	2,34	2,15	2,02	1,95	1,82	1,78



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,50$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00	
0,50	0,110	0,175	0,217	0,305	0,404	0,503	0,599	0,690	0,774	0,920	1,035	1,121	1,183	1,225	1,296	1,314	
0,75																	
1,00																	
1,25																	
1,50													1,183	1,225	1,296	1,314	
1,75											1,035	1,121	1,184	1,228	1,306	1,327	
2,00										0,920	1,036	1,131	1,203	1,252	1,340	1,363	
2,25										0,921	1,054	1,164	1,243	1,294	1,390	1,416	
2,50									0,774	0,938	1,094	1,216	1,297	1,348	1,450	1,479	
2,75								0,690	0,778	0,974	1,152	1,280	1,361	1,413	1,519	1,551	
3,00								0,691	0,796	1,028	1,222	1,352	1,432	1,484	1,595	1,628	
3,25								0,599	0,702	0,830	1,098	1,302	1,430	1,509	1,562	1,675	1,711
3,50								0,601	0,727	0,882	1,181	1,388	1,512	1,590	1,644	1,759	1,797
3,75						0,503	0,612	0,768	0,951	1,272	1,477	1,598	1,676	1,729	1,847	1,886	
4,00						0,503	0,634	0,826	1,035	1,369	1,568	1,687	1,764	1,817	1,937	1,978	
4,50					0,404	0,518	0,724	0,990	1,233	1,568	1,756	1,872	1,948	2,001	2,124	2,167	
5,00					0,404	0,571	0,882	1,199	1,452	1,771	1,951	2,063	2,138	2,191	2,317	2,362	
5,50					0,414	0,693	1,094	1,430	1,675	1,977	2,150	2,260	2,334	2,387	2,514	2,562	
6,00				0,305	0,451	0,883	1,332	1,665	1,896	2,185	2,353	2,460	2,534	2,587	2,716	2,764	
7,00				0,308	0,743	1,372	1,825	2,127	2,337	2,605	2,765	2,870	2,942	2,995	3,126	3,177	
8,00				0,399	1,243	1,890	2,304	2,581	2,777	3,031	3,185	3,287	3,358	3,411	3,544	3,597	
9,00			0,217	0,826	1,787	2,390	2,772	3,032	3,217	3,460	3,609	3,709	3,780	3,832	3,967	4,022	
10,00			0,222	1,378	2,317	2,876	3,234	3,480	3,656	3,891	4,037	4,135	4,206	4,258	4,394	4,450	
11,00		0,175	0,458	1,947	2,828	3,352	3,691	3,926	4,096	4,324	4,467	4,564	4,634	4,687	4,824	4,881	
12,00		0,177	0,998	2,498	3,324	3,821	4,146	4,372	4,536	4,759	4,899	4,996	5,065	5,117	5,255	5,314	
13,00		0,207	1,588	3,030	3,811	4,285	4,598	4,816	4,977	5,194	5,333	5,428	5,498	5,550	5,689	5,748	
14,00		0,336	2,178	3,546	4,291	4,746	5,048	5,261	5,417	5,631	5,768	5,863	5,932	5,984	6,123	6,183	
15,00	0,110	0,569	2,750	4,051	4,765	5,204	5,497	5,705	5,858	6,068	6,204	6,298	6,367	6,419	6,559	6,620	
$\bar{v}_a; e1$	18,18	11,43	9,22	6,56	4,95	3,98	3,34	2,90	2,58	2,17	1,93	1,78	1,69	1,63	1,54	1,52	

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

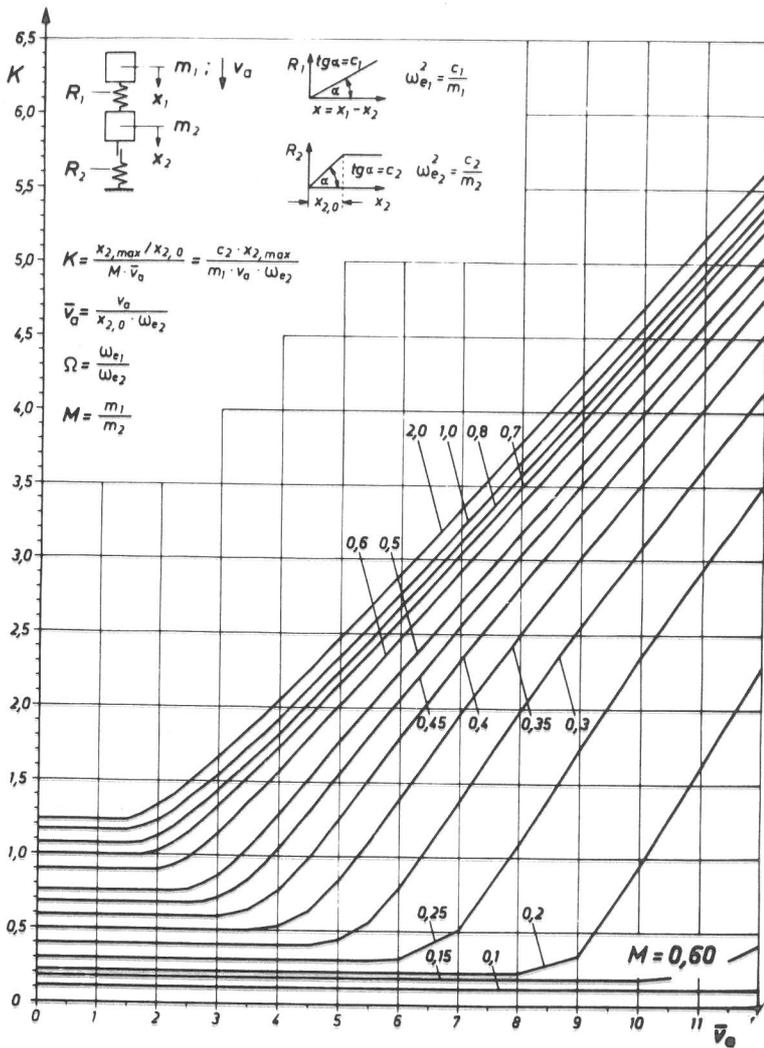
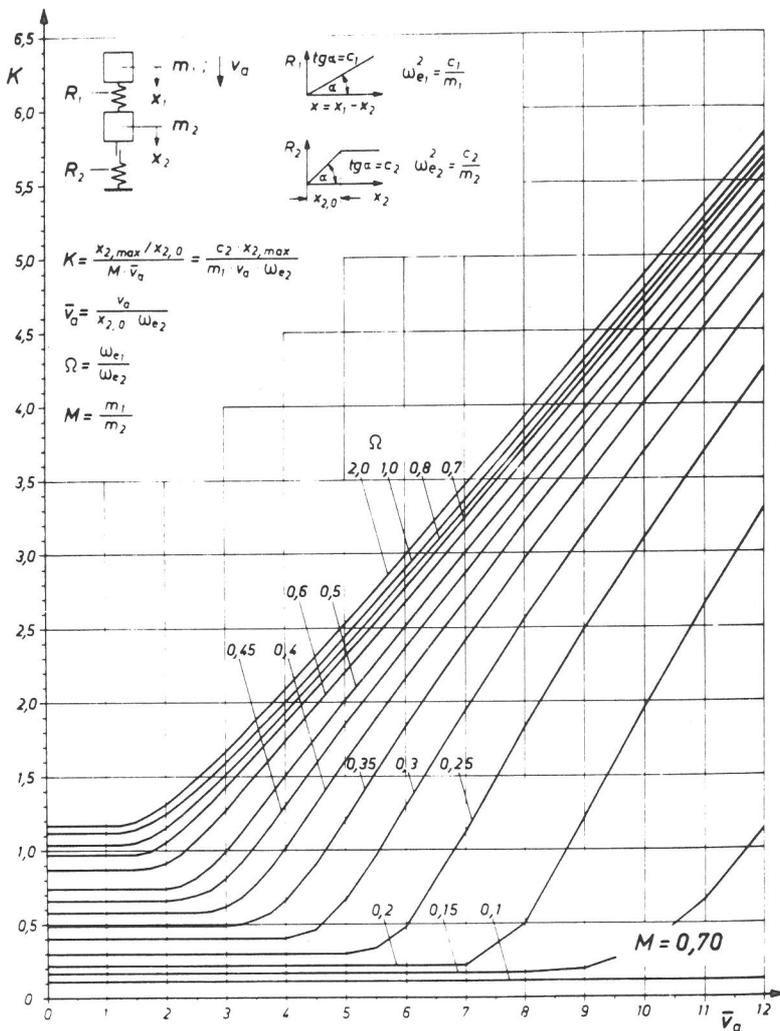


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,60$

$\bar{v}_a \cdot \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,175	0,218	0,303	0,400	0,497	0,590	0,677	0,758	0,895	1,002	1,080	1,135	1,170	1,224	1,237
0,75																
1,00																
1,25													1,135	1,170	1,224	1,237
1,50											1,002	1,080	1,135	1,172	1,230	1,244
1,75										0,895	1,004	1,092	1,156	1,196	1,263	1,280
2,00								0,758	0,900	1,030	1,132	1,201	1,243	1,316	1,335	
2,25								0,677	0,758	0,928	1,082	1,194	1,263	1,305	1,383	1,403
2,50								0,678	0,773	0,981	1,154	1,268	1,335	1,377	1,458	1,481
2,75								0,590	0,688	0,809	1,056	1,239	1,350	1,416	1,457	1,541
3,00								0,593	0,718	0,868	1,147	1,332	1,438	1,502	1,543	1,629
3,25						0,497	0,608	0,769	0,949	1,248	1,428	1,530	1,592	1,634	1,721	1,749
3,50						0,498	0,641	0,843	1,048	1,356	1,527	1,625	1,687	1,728	1,817	1,845
3,75						0,508	0,695	0,938	1,160	1,465	1,628	1,724	1,784	1,825	1,915	1,945
4,00					0,400	0,530	0,773	1,049	1,279	1,574	1,731	1,824	1,884	1,924	2,015	2,046
4,50					0,405	0,634	0,989	1,298	1,524	1,795	1,941	2,030	2,088	2,129	2,221	2,253
5,00					0,440	0,836	1,251	1,558	1,767	2,017	2,156	2,242	2,298	2,338	2,432	2,466
5,50			0,303	0,560	1,099	1,526	1,813	2,006	2,240	2,374	2,457	2,513	2,552	2,647	2,682	
6,00			0,309	0,788	1,387	1,798	2,063	2,243	2,466	2,594	2,675	2,730	2,770	2,865	2,900	
7,00			0,218	0,512	1,375	1,959	2,318	2,552	2,714	2,919	3,040	3,118	3,172	3,211	3,307	3,344
8,00			0,219	1,088	1,979	2,499	2,820	3,034	3,183	3,375	3,491	3,567	3,619	3,658	3,755	3,794
9,00	0,175	0,345	1,731	2,550	3,018	3,313	3,511	3,651	3,834	3,945	4,019	4,071	4,110	4,208	4,247	
10,00	0,176	0,949	2,350	3,094	3,525	3,799	3,986	4,119	4,294	4,402	4,475	4,526	4,564	4,663	4,703	
11,00	0,221	1,620	2,936	3,621	4,023	4,282	4,459	4,586	4,756	4,861	4,932	4,983	5,021	5,120	5,161	
12,00	0,412	2,280	3,497	4,136	4,515	4,761	4,931	5,054	5,218	5,322	5,392	5,442	5,480	5,579	5,620	
13,00	0,728	2,908	4,041	4,642	5,003	5,238	5,402	5,521	5,681	5,783	5,852	5,902	5,940	6,039	6,081	
14,00	1,179	3,508	4,573	5,143	5,487	5,714	5,872	5,988	6,145	6,245	6,314	6,364	6,401	6,501	6,543	
15,00	0,110	1,868	4,087	5,094	5,638	5,969	6,188	6,342	6,455	6,609	6,708	6,776	6,826	6,863	6,963	7,006
$\bar{v}_a; e1$	15,15	9,52	7,64	5,50	4,17	3,35	2,82	2,46	2,20	1,86	1,66	1,54	1,47	1,42	1,36	1,35

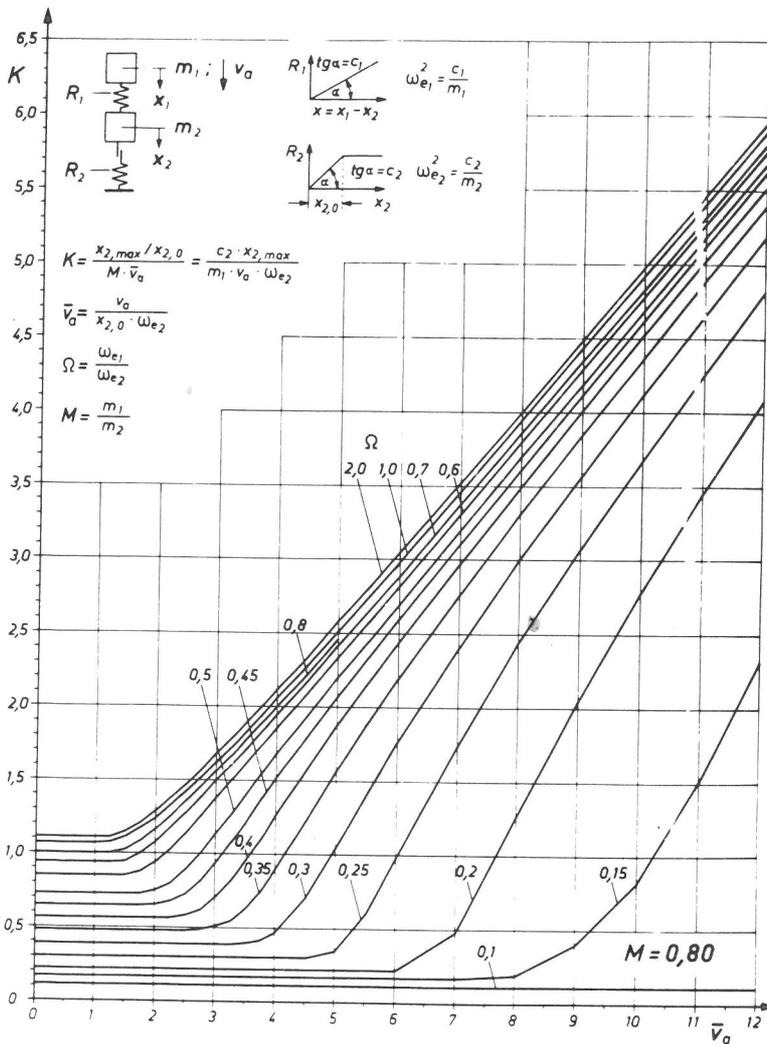


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K/M$ ;  $\Omega$ ;  $\bar{v}_a$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,70$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,174	0,218	0,301	0,396	0,490	0,581	0,665	0,742	0,872	0,971	1,042	1,090	1,119	1,160	1,168
0,75																
1,00															1,160	1,168
1,25											0,971	1,042	1,090	1,119	1,160	1,168
1,50										0,872	0,971	1,048	1,102	1,135	1,182	1,193
1,75									0,742	0,876	0,994	1,086	1,145	1,179	1,232	1,244
2,00								0,665	0,743	0,907	1,050	1,150	1,208	1,242	1,299	1,312
2,25							0,581	0,667	0,764	0,969	1,129	1,129	1,284	1,317	1,377	1,392
2,50							0,581	0,686	0,813	1,056	1,223	1,317	1,369	1,402	1,463	1,480
2,75						0,490	0,592	0,732	0,891	1,160	1,323	1,410	1,461	1,492	1,555	1,573
3,00						0,491	0,622	0,806	0,993	1,273	1,426	1,508	1,557	1,588	1,652	1,671
3,25						0,501	0,679	0,907	1,112	1,389	1,531	1,609	1,657	1,688	1,753	1,772
3,50					0,396	0,527	0,767	1,028	1,240	1,505	1,638	1,713	1,760	1,791	1,856	1,876
3,75					0,397	0,577	0,881	1,162	1,372	1,621	1,747	1,820	1,865	1,896	1,961	1,982
4,00					0,405	0,660	1,014	1,301	1,504	1,737	1,857	1,928	1,972	2,002	2,068	2,090
4,50				0,301	0,468	0,910	1,306	1,581	1,761	1,970	2,081	2,148	2,191	2,220	2,287	2,310
5,00				0,302	0,666	1,215	1,603	1,850	2,012	2,203	2,308	2,372	2,414	2,443	2,511	2,534
5,50				0,345	0,966	1,532	1,888	2,112	2,260	2,438	2,538	2,600	2,641	2,670	2,737	2,761
6,00			0,218	0,485	1,297	1,839	2,163	2,368	2,506	2,674	2,770	2,830	2,870	2,898	2,966	2,991
7,00			0,221	1,131	1,954	2,416	2,693	2,872	2,995	3,148	3,237	3,294	3,333	3,361	3,429	3,455
8,00		0,174	0,502	1,834	2,560	2,962	3,208	3,370	3,482	3,624	3,709	3,764	3,802	3,829	3,897	3,924
9,00		0,186	1,222	2,491	3,130	3,491	3,714	3,863	3,968	4,102	4,183	4,236	4,273	4,300	4,368	4,395
10,00		0,326	1,958	3,104	3,679	4,009	4,215	4,354	4,453	4,581	4,659	4,711	4,747	4,774	4,842	4,870
11,00		0,655	2,653	3,687	4,214	4,519	4,713	4,844	4,938	5,061	5,137	5,187	5,223	5,250	5,318	5,346
12,00		1,138	3,303	4,250	4,739	5,024	5,207	5,332	5,422	5,541	5,615	5,665	5,700	5,726	5,795	5,823
13,00	0,110	1,899	3,922	4,799	5,256	5,526	5,700	5,820	5,907	6,022	6,094	6,143	6,178	6,204	6,273	6,301
14,00	0,118	2,640	4,517	5,336	5,768	6,024	6,192	6,307	6,391	6,504	6,574	6,623	6,657	6,683	6,751	6,780
15,00	0,187	3,343	5,095	5,866	6,275	6,521	6,682	6,794	6,875	6,985	7,055	7,102	7,137	7,162	7,231	7,260
$\bar{v}_a; e1$	12,99	8,21	6,55	4,76	3,61	2,92	2,46	2,15	1,93	1,64	1,47	1,37	1,31	1,28	1,23	1,22

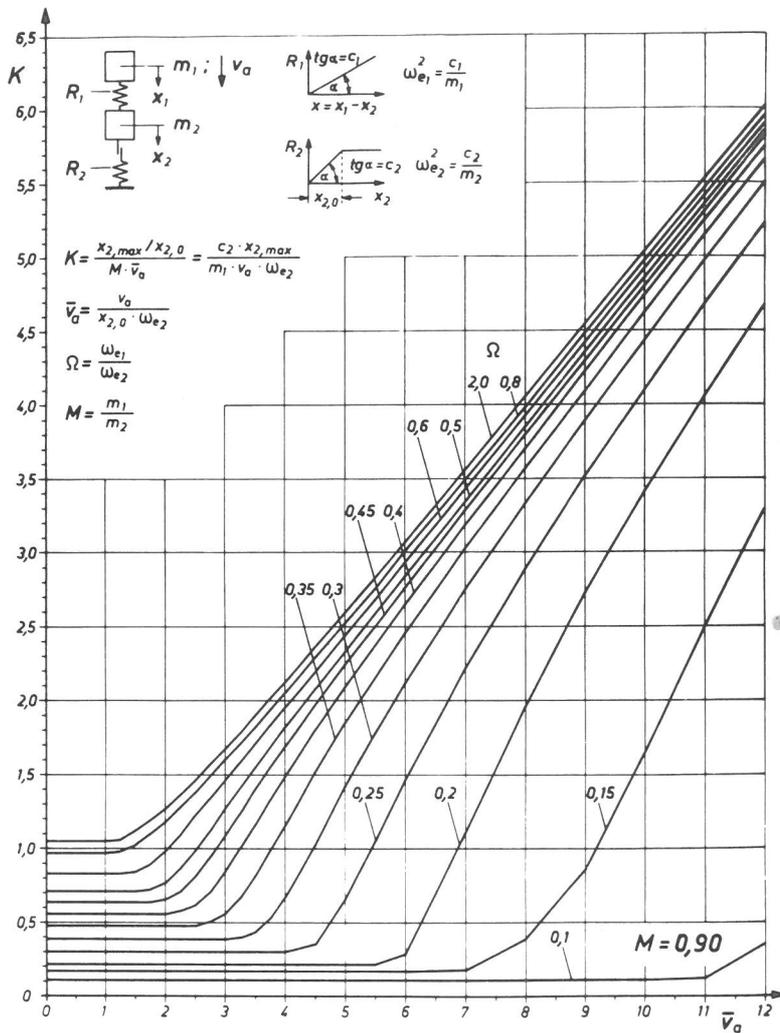


*lasse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit lastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie*

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,80$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,174	0,218	0,298	0,392	0,484	0,572	0,653	0,727	0,849	0,941	1,005	1,048	1,072	1,101	1,106
0,75																
1,00													1,048	1,072	1,101	1,106
1,25										0,849	0,941	1,005	1,048	1,072	1,101	1,106
1,50									0,727	0,850	0,952	1,030	1,080	1,108	1,144	1,151
1,75								0,653	0,727	0,875	1,002	1,090	1,140	1,166	1,206	1,214
2,00							0,572	0,655	0,747	0,937	1,082	1,169	1,215	1,241	1,282	1,291
2,25							0,572	0,677	0,800	1,028	1,178	1,259	1,301	1,326	1,369	1,379
2,50						0,484	0,588	0,732	0,888	1,139	1,283	1,355	1,395	1,419	1,462	1,474
2,75						0,487	0,630	0,821	1,003	1,259	1,390	1,456	1,494	1,517	1,562	1,573
3,00					0,392	0,506	0,708	0,940	1,135	1,381	1,498	1,560	1,596	1,620	1,664	1,677
3,25					0,392	0,550	0,820	1,078	1,273	1,501	1,609	1,668	1,703	1,725	1,770	1,783
3,50					0,399	0,631	0,959	1,225	1,413	1,620	1,721	1,777	1,811	1,833	1,879	1,892
3,75					0,420	0,752	1,112	1,375	1,549	1,740	1,835	1,889	1,922	1,944	1,989	2,003
4,00				0,298	0,469	0,900	1,270	1,522	1,682	1,860	1,950	2,002	2,034	2,055	2,101	2,115
4,50				0,302	0,707	1,232	1,585	1,803	1,941	2,100	2,182	2,231	2,262	2,283	2,328	2,343
5,00				0,351	1,045	1,569	1,882	2,073	2,196	2,340	2,418	2,464	2,494	2,514	2,560	2,575
5,50			0,218	0,614	1,406	1,888	2,166	2,337	2,449	2,582	2,655	2,699	2,728	2,748	2,794	2,809
6,00			0,219	0,977	1,758	2,190	2,440	2,596	2,700	2,824	2,894	2,936	2,964	2,984	3,030	3,046
7,00		0,174	0,478	1,736	2,404	2,762	2,973	3,108	3,199	3,311	3,375	3,415	3,442	3,461	3,506	3,522
8,00		0,192	1,266	2,435	3,000	3,308	3,494	3,614	3,696	3,800	3,859	3,897	3,923	3,942	3,987	4,003
9,00		0,398	2,054	3,073	3,566	3,840	4,007	4,117	4,193	4,289	4,346	4,382	4,407	4,426	4,470	4,487
10,00		0,815	2,778	3,674	4,115	4,363	4,516	4,617	4,689	4,779	4,834	4,869	4,893	4,911	4,955	4,973
11,00	0,110	1,513	3,448	4,251	4,651	4,879	5,021	5,117	5,184	5,270	5,323	5,357	5,381	5,398	5,442	5,460
12,00	0,112	2,325	4,081	4,811	5,180	5,391	5,525	5,615	5,679	5,762	5,812	5,846	5,869	5,886	5,930	5,948
13,00	0,159	3,088	4,688	5,359	5,702	5,900	6,027	6,112	6,173	6,254	6,303	6,335	6,358	6,375	6,419	6,436
14,00	0,640	3,804	5,275	5,898	6,219	6,407	6,527	6,609	6,668	6,746	6,793	6,825	6,848	6,865	6,908	6,926
15,00	1,282	4,484	5,846	6,430	6,733	6,912	7,027	7,106	7,162	7,238	7,284	7,316	7,338	7,355	7,398	7,416
$\bar{v}_a; e1$	11,36	7,18	5,73	4,19	3,19	2,58	2,19	1,91	1,72	1,47	1,33	1,24	1,19	1,17	1,14	1,13

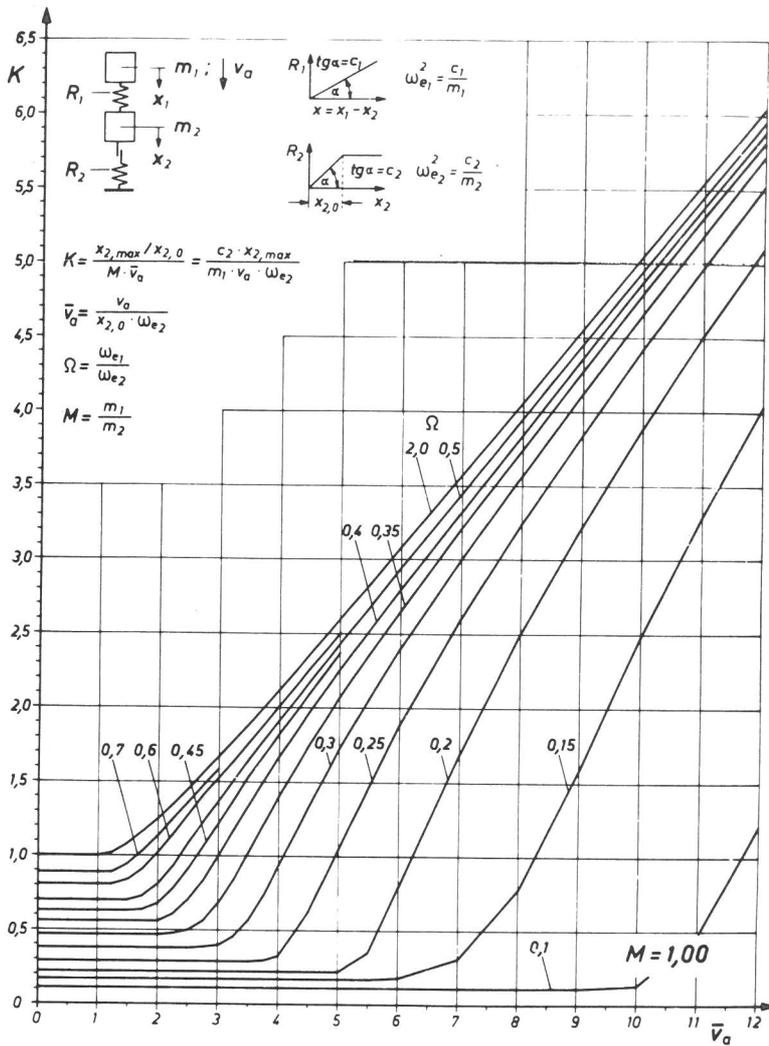


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 0,90$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,174	0,218	0,296	0,388	0,478	0,563	0,641	0,712	0,828	0,913	0,971	1,008	1,028	1,047	1,050
0,75											0,913	0,971	1,008	1,028	1,047	1,050
1,00										0,828	0,913	0,976	1,017	1,039	1,061	1,065
1,25													1,017	1,039	1,061	1,065
1,50								0,641	0,712	0,837	0,945	1,021	1,064	1,085	1,111	1,115
1,75							0,563	0,642	0,722	0,889	1,017	1,095	1,135	1,154	1,181	1,186
2,00							0,563	0,660	0,771	0,978	1,113	1,184	1,218	1,237	1,265	1,270
2,25					0,478	0,578	0,714	0,860	1,091	1,220	1,280	1,311	1,329	1,358	1,364	
2,50					0,482	0,625	0,810	0,981	1,215	1,328	1,382	1,412	1,428	1,457	1,463	
2,75				0,388	0,506	0,714	0,939	1,120	1,340	1,439	1,488	1,515	1,531	1,560	1,567	
3,00				0,390	0,564	0,842	1,088	1,266	1,463	1,551	1,596	1,622	1,638	1,667	1,674	
3,25				0,402	0,670	0,997	1,244	1,410	1,585	1,665	1,708	1,732	1,748	1,777	1,784	
3,50				0,440	0,817	1,162	1,399	1,548	1,706	1,780	1,821	1,844	1,860	1,889	1,896	
3,75				0,296	0,528	0,986	1,330	1,549	1,683	1,827	1,897	1,935	1,958	1,973	2,002	2,010
4,00				0,299	0,671	1,164	1,494	1,693	1,816	1,949	2,015	2,051	2,074	2,088	2,117	2,125
4,50				0,357	1,032	1,519	1,804	1,971	2,076	2,193	2,252	2,286	2,308	2,321	2,350	2,358
5,00			0,218	0,664	1,415	1,852	2,094	2,239	2,332	2,438	2,492	2,524	2,544	2,558	2,586	2,594
5,50			0,222	1,064	1,781	2,161	2,374	2,503	2,586	2,683	2,734	2,764	2,784	2,797	2,824	2,833
6,00		0,174	0,292	1,470	2,121	2,456	2,646	2,763	2,839	2,929	2,977	3,006	3,025	3,037	3,065	3,073
7,00		0,184	1,112	2,224	2,746	3,020	3,178	3,278	3,344	3,423	3,466	3,493	3,510	3,522	3,549	3,558
8,00		0,392	1,955	2,893	3,329	3,562	3,700	3,787	3,846	3,918	3,958	3,983	3,999	4,011	4,037	4,046
9,00		0,857	2,715	3,512	3,890	4,093	4,216	4,294	4,348	4,414	4,451	4,475	4,490	4,501	4,527	4,536
10,00	0,110	1,653	3,406	4,101	4,434	4,617	4,728	4,799	4,849	4,910	4,946	4,968	4,983	4,994	5,019	5,028
11,00	0,122	2,503	4,052	4,669	4,969	5,135	5,237	5,303	5,349	5,407	5,441	5,462	5,477	5,487	5,512	5,521
12,00	0,350	3,285	4,667	5,223	5,496	5,650	5,744	5,806	5,850	5,904	5,937	5,957	5,971	5,982	6,006	6,015
13,00	1,005	4,012	5,260	5,768	6,019	6,162	6,250	6,309	6,350	6,402	6,433	6,453	6,466	6,476	6,500	6,510
14,00	1,736	4,697	5,837	6,304	6,538	6,672	6,755	6,811	6,850	6,900	6,930	6,949	6,962	6,972	6,996	7,005
15,00	2,475	5,352	6,401	6,835	7,054	7,180	7,259	7,312	7,349	7,398	7,426	7,445	7,458	7,468	7,491	7,500
$\bar{v}_a; e1$	10,10	6,39	5,10	3,75	2,86	2,32	1,97	1,73	1,56	1,34	1,22	1,14	1,10	1,08	1,06	1,06

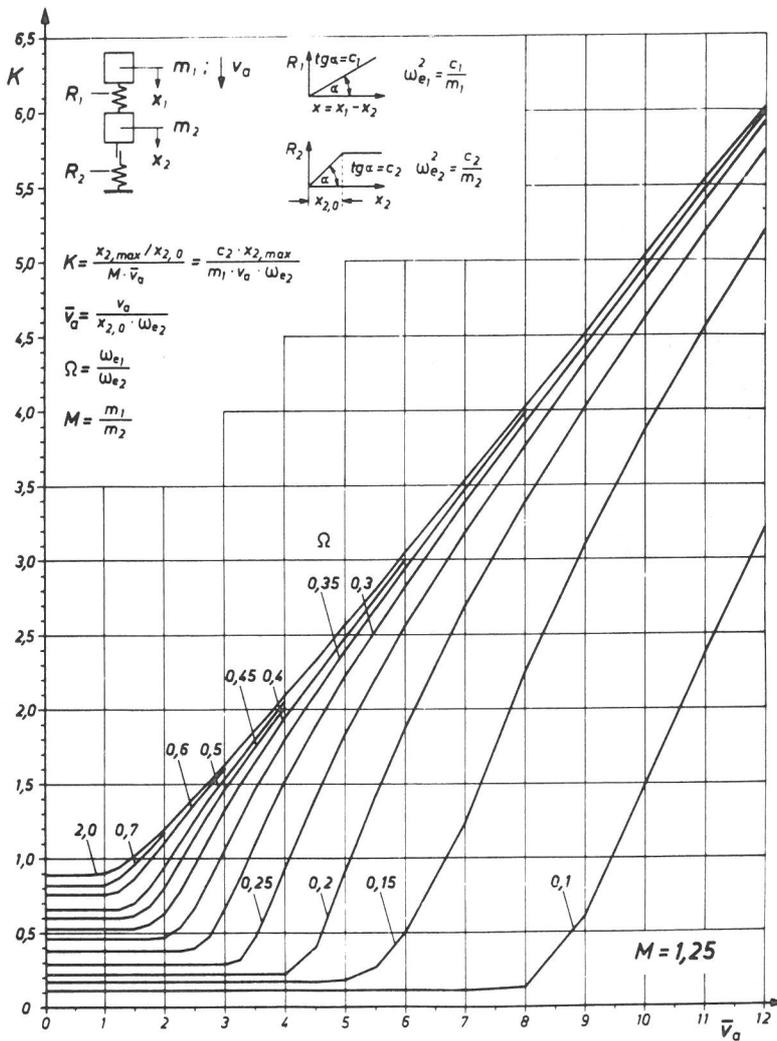


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 1,00$

$\bar{v}_a / \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,110	0,174	0,218	0,294	0,384	0,472	0,555	0,630	0,697	0,807	0,886	0,938	0,970	0,986	0,998	1,000
0,75																
1,00											0,886	0,938	0,970	0,986	0,998	1,000
1,25									0,697	0,807	0,893	0,955	0,992	1,008	1,023	1,024
1,50								0,630	0,699	0,836	0,946	1,015	1,050	1,065	1,081	1,083
1,75							0,555	0,638	0,733	0,912	1,034	1,100	1,128	1,141	1,158	1,160
2,00						0,472	0,564	0,683	0,813	1,022	1,140	1,193	1,218	1,230	1,247	1,249
2,25						0,475	0,606	0,775	0,932	1,147	1,249	1,294	1,315	1,327	1,344	1,346
2,50					0,384	0,499	0,696	0,907	1,075	1,275	1,360	1,398	1,418	1,429	1,446	1,449
2,75					0,386	0,563	0,832	1,062	1,225	1,400	1,472	1,507	1,526	1,536	1,553	1,556
3,00					0,403	0,682	0,996	1,223	1,372	1,523	1,587	1,619	1,636	1,646	1,662	1,665
3,25					0,455	0,845	1,169	1,383	1,514	1,645	1,703	1,732	1,748	1,758	1,774	1,777
3,50				0,294	0,574	1,027	1,342	1,535	1,650	1,767	1,820	1,848	1,863	1,872	1,888	1,891
3,75				0,302	0,745	1,215	1,510	1,681	1,783	1,889	1,938	1,964	1,979	1,988	2,004	2,007
4,00				0,329	0,939	1,400	1,669	1,822	1,914	2,011	2,057	2,082	2,096	2,105	2,120	2,124
4,50																
5,00			0,218	0,631	1,340	1,748	1,968	2,095	2,172	2,257	2,298	2,320	2,333	2,342	2,356	2,359
5,50			0,224	1,054	1,722	2,066	2,252	2,360	2,428	2,503	2,540	2,561	2,573	2,581	2,595	2,598
6,00		0,174	0,352	1,481	2,072	2,366	2,527	2,622	2,683	2,750	2,784	2,804	2,815	2,822	2,836	2,839
6,50		0,175	0,787	1,882	2,397	2,654	2,796	2,882	2,936	2,998	3,030	3,047	3,058	3,065	3,078	3,081
7,00		0,312	1,692	2,598	3,002	3,208	3,324	3,396	3,442	3,494	3,522	3,538	3,548	3,554	3,566	3,570
7,50		0,779	2,504	3,240	3,572	3,745	3,844	3,906	3,946	3,992	4,017	4,031	4,040	4,046	4,058	4,060
8,00																
9,00	0,110	1,591	3,223	3,840	4,124	4,273	4,359	4,413	4,489	4,491	4,513	4,526	4,534	4,540	4,551	4,554
10,00	0,127	2,482	3,883	4,416	4,663	4,794	4,871	4,919	4,952	4,990	5,010	5,022	5,030	5,035	5,045	5,048
11,00	0,471	3,287	4,507	4,974	5,193	5,311	5,381	5,425	5,454	5,489	5,508	5,519	5,526	5,531	5,541	5,543
12,00	1,210	4,026	5,104	5,521	5,718	5,825	5,889	5,929	5,956	5,988	6,006	6,017	6,023	6,028	6,037	6,040
13,00	1,998	4,719	5,683	6,060	6,239	6,337	6,396	6,433	6,458	6,488	6,505	6,515	6,521	6,525	6,534	6,536
14,00	2,774	5,376	6,249	6,592	6,757	6,847	6,901	6,936	6,960	6,988	7,003	7,013	7,019	7,023	7,031	7,034
15,00	3,514	6,007	6,804	7,120	7,272	7,356	7,407	7,439	7,461	7,488	7,502	7,511	7,517	7,521	7,529	7,531
$\bar{v}_a; e1$	9,09	5,75	4,59	3,40	2,60	2,12	1,80	1,59	1,43	1,24	1,13	1,07	1,03	1,01	1,00	1,00

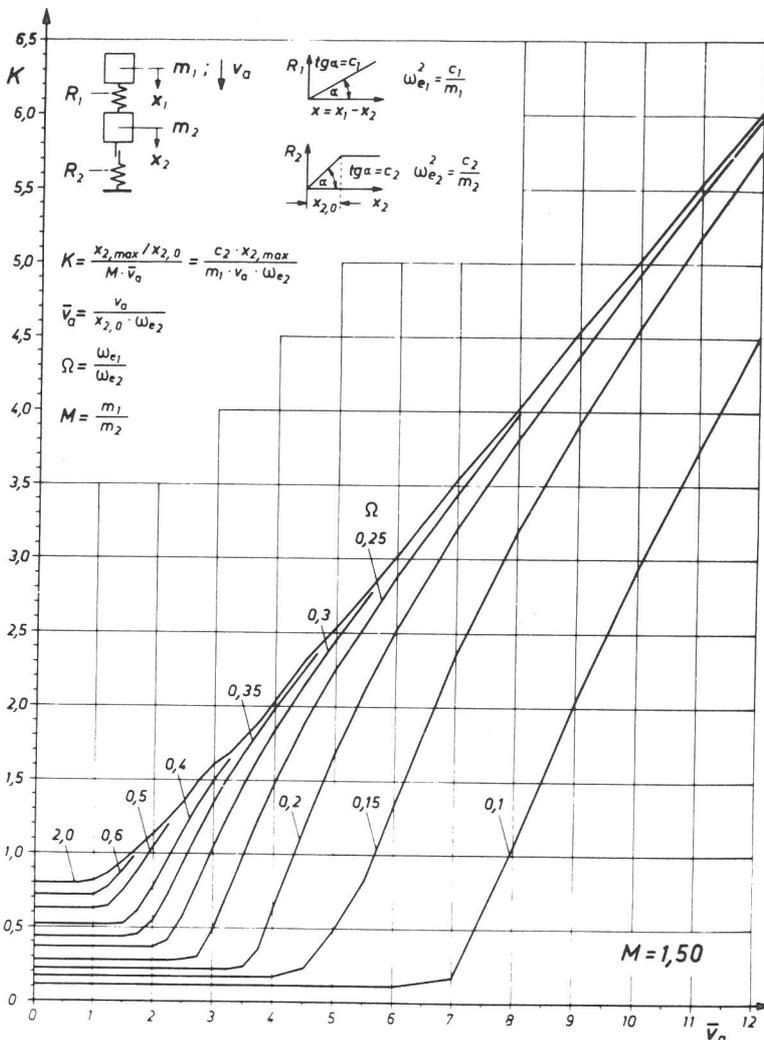


asse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 1,25$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50																
0,75																
1,00																
1,25																
1,50																
1,75																
2,00																
2,25																
2,50																
2,75																
3,00																
3,25																
3,50																
3,75																
4,00																
4,50																
5,00																
5,50																
6,00																
7,00	0,109	1,245	2,686	3,180	3,378	3,469	3,513	3,536	3,548	3,556	3,557	3,555	3,558	3,558	3,536	3,530
8,00	0,126	2,237	3,381	3,764	3,918	3,987	4,021	4,038	4,046	4,050	4,050	4,045	4,041	4,040	4,024	4,016
9,00	0,607	3,096	4,016	4,322	4,445	4,500	4,526	4,538	4,543	4,544	4,541	4,536	4,542	4,528	4,544	4,509
10,00	1,489	3,855	4,614	4,865	4,965	5,009	5,028	5,037	5,040	5,038	5,036	5,028	5,024	5,026	5,037	5,040
11,00	2,371	4,550	5,187	5,398	5,480	5,515	5,530	5,535	5,536	5,533	5,534	5,537	5,535	5,537	5,516	5,538
12,00	3,198	5,201	5,745	5,923	5,991	6,019	6,030	6,033	6,033	6,030	6,028	6,014	6,025	6,018	6,003	6,019
13,00	3,960	5,820	6,291	6,443	6,500	6,522	6,530	6,531	6,529	6,527	6,531	6,531	6,501	6,497	6,528	6,506
14,00	4,701	6,417	6,828	6,959	7,006	7,024	7,028	7,028	7,025	7,017	7,021	7,010	7,023	7,018	7,029	7,026
15,00	5,468	6,997	7,358	7,471	7,511	7,524	7,527	7,525	7,521	7,517	7,509	7,510	7,522	7,525	7,518	7,525
$\bar{v}_a; e1$	7,34	4,62	3,67	2,77	2,13	1,75	1,50	1,33	1,21	1,05	0,97	0,93	0,90	0,89	0,90	0,90

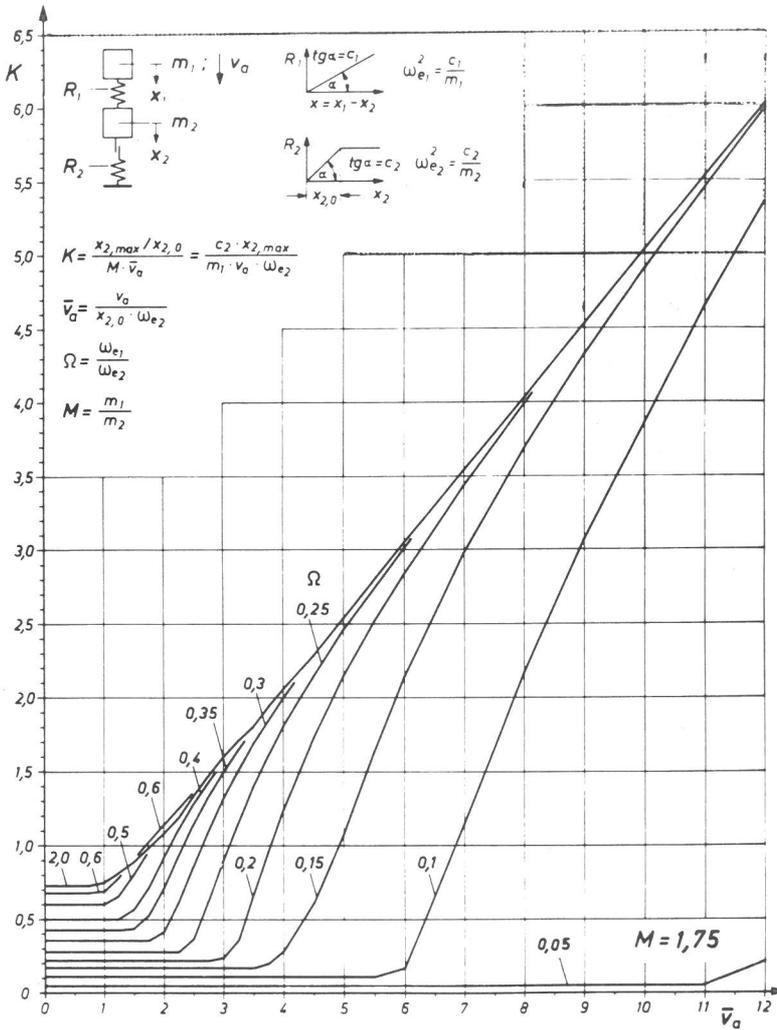


elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie  
 Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 1,50$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,172	0,218	0,283	0,366	0,444	0,515	0,578	0,632	0,715	0,768	0,799	0,813	0,815	0,807	0,804
0,75								0,578	0,632	0,718	0,781	0,817	0,831	0,831	0,821	0,818
1,00							0,515	0,583	0,654	0,777	0,852	0,885	0,891	0,888	0,877	0,872
1,25								0,533	0,642	0,746	0,890	0,955	0,972	0,971	0,967	0,954
1,50					0,444	0,533	0,642	0,746	0,890	0,955	0,972	0,971	0,967	0,954	0,949	
1,75				0,366	0,465	0,618	0,773	0,891	1,020	1,061	1,065	1,062	1,059	1,044	1,038	
2,00				0,373	0,553	0,778	0,944	1,050	1,146	1,166	1,166	1,162	1,158	1,142	1,136	
2,25			0,283	0,423	0,730	0,970	1,118	1,202	1,263	1,273	1,271	1,267	1,262	1,246	1,238	
2,50			0,286	0,585	0,942	1,160	1,280	1,340	1,378	1,383	1,380	1,375	1,370	1,352	1,354	
2,75			0,313	0,812	1,152	1,336	1,427	1,468	1,494	1,496	1,491	1,490	1,490	1,493	1,496	
3,00		0,218	0,494	1,046	1,348	1,496	1,563	1,593	1,610	1,613	1,612	1,612	1,612	1,611	1,606	
3,25		0,221	0,747	1,270	1,527	1,642	1,693	1,716	1,728	1,726	1,718	1,712	1,705	1,686	1,677	
3,50		0,235	1,004	1,477	1,690	1,781	1,821	1,838	1,846	1,847	1,836	1,826	1,820	1,800	1,790	
3,75	0,172	0,360	1,251	1,667	1,841	1,915	1,947	1,960	1,965	1,959	1,965	1,955	1,942	1,915	1,905	
4,00	0,173	0,638	1,482	1,841	1,986	2,046	2,072	2,081	2,082	2,074	2,081	2,085	2,080	2,051	2,041	
4,50	0,230	1,191	1,895	2,158	2,262	2,304	2,320	2,324	2,328	2,326	2,301	2,292	2,309	2,327	2,323	
5,00	0,475	1,691	2,252	2,450	2,527	2,556	2,566	2,567	2,562	2,559	2,562	2,536	2,521	2,551	2,534	
5,50	0,828	2,130	2,574	2,729	2,786	2,806	2,811	2,811	2,798	2,785	2,808	2,809	2,795	2,768	2,782	
6,00	0,109	1,336	2,518	2,876	2,998	3,041	3,054	3,056	3,054	3,041	3,048	3,012	3,044	3,057	3,033	3,024
7,00	0,170	2,348	3,200	3,444	3,522	3,545	3,547	3,548	3,548	3,549	3,528	3,546	3,521	3,507	3,527	3,541
8,00	1,059	3,184	3,811	3,983	4,032	4,042	4,040	4,037	4,039	4,012	4,022	3,999	4,032	4,044	4,018	4,024
9,00	2,033	3,908	4,384	4,506	4,535	4,537	4,531	4,527	4,537	4,520	4,531	4,527	4,504	4,518	4,532	4,540
10,00	2,929	4,564	4,933	5,019	5,033	5,031	5,019	5,022	5,027	5,031	4,989	5,006	5,034	5,030	5,022	5,022
11,00	3,733	5,178	5,466	5,526	5,528	5,530	5,529	5,499	5,471	5,466	5,532	5,505	5,521	5,518	5,532	5,524
12,00	4,513	5,763	5,989	6,027	6,027	6,026	6,026	5,992	6,016	6,024	6,021	6,024	6,025	6,013	6,013	6,020
13,00	5,275	6,327	6,504	6,525	6,524	6,503	6,521	6,519	6,524	6,515	6,513	6,514	6,505	6,512	6,518	6,518
14,00	5,986	6,876	7,013	7,021	7,019	7,009	7,005	7,017	6,959	6,990	7,011	7,023	7,008	7,014	7,012	7,024
15,00	6,657	7,414	7,519	7,514	7,514	7,504	7,453	7,444	7,510	7,523	7,492	7,506	7,517	7,524	7,517	7,506
$\bar{v}_a, e1$	6,12	3,88	3,06	2,36	1,82	1,50	1,29	1,15	1,05	0,93	0,87	0,83	0,82	0,82	0,83	0,83



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 1,75$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,172	0,218	0,278	0,357	0,431	0,497	0,554	0,603	0,675	0,719	0,742	0,749	0,746	0,735	0,732
0,75									0,603	0,675	0,719	0,742	0,749	0,746	0,735	0,732
1,00							0,497	0,554	0,605	0,692	0,749	0,774	0,779	0,773	0,759	0,754
1,25						0,431	0,502	0,584	0,664	0,781	0,836	0,850	0,844	0,837	0,820	0,814
1,50					0,357	0,443	0,568	0,697	0,797	0,906	0,938	0,935	0,926	0,919	0,900	0,893
1,75					0,363	0,527	0,724	0,866	0,955	1,030	1,037	1,028	1,019	1,011	0,991	0,983
2,00				0,278	0,424	0,714	0,920	1,041	1,106	1,143	1,138	1,128	1,118	1,110	1,088	1,080
2,25				0,285	0,620	0,934	1,110	1,201	1,240	1,252	1,243	1,231	1,221	1,213	1,190	1,191
2,50			0,218	0,374	0,865	1,143	1,282	1,341	1,361	1,362	1,350	1,338	1,328	1,326	1,328	1,330
2,75			0,220	0,630	1,102	1,333	1,433	1,469	1,478	1,473	1,466	1,465	1,465	1,465	1,466	1,467
3,00			0,236	0,903	1,319	1,501	1,570	1,592	1,595	1,595	1,596	1,595	1,595	1,596	1,597	1,598
3,25		0,172	0,365	1,160	1,514	1,652	1,699	1,712	1,714	1,714	1,715	1,713	1,714	1,714	1,715	1,714
3,50		0,174	0,666	1,397	1,689	1,792	1,825	1,833	1,831	1,820	1,817	1,814	1,814	1,813	1,808	1,801
3,75		0,196	0,961	1,612	1,848	1,926	1,949	1,952	1,952	1,926	1,908	1,893	1,892	1,899	1,949	1,941
4,00		0,283	1,238	1,807	1,997	2,056	2,071	2,072	2,072	2,058	2,030	2,018	2,015	2,019	2,053	2,062
4,50		0,614	1,732	2,150	2,276	2,310	2,314	2,315	2,302	2,315	2,303	2,291	2,282	2,279	2,284	2,291
5,00	0,109	1,066	2,152	2,456	2,540	2,557	2,556	2,558	2,535	2,551	2,560	2,556	2,552	2,547	2,539	2,539
5,50	0,112	1,635	2,516	2,741	2,796	2,804	2,801	2,799	2,792	2,750	2,785	2,797	2,802	2,804	2,802	2,800
6,00	0,168	2,140	2,845	3,013	3,047	3,048	3,047	3,034	3,047	2,999	3,000	3,000	3,013	3,024	3,045	3,053
7,00	1,148	2,983	3,441	3,533	3,541	3,532	3,538	3,500	3,525	3,539	3,519	3,512	3,517	3,529	3,520	3,536
8,00	2,169	3,687	3,992	4,036	4,035	4,028	4,016	4,025	3,965	4,017	4,034	4,036	4,034	4,031	4,027	4,029
9,00	3,068	4,315	4,517	4,531	4,527	4,515	4,460	4,529	4,522	4,489	4,529	4,503	4,513	4,521	4,531	4,534
10,00	3,865	4,898	5,026	5,025	5,003	4,983	4,955	4,982	5,026	5,020	5,004	5,020	5,022	5,006	5,029	5,026
11,00	4,648	5,451	5,526	5,511	5,479	5,442	5,520	5,473	5,520	5,515	5,528	5,524	5,521	5,519	5,518	5,518
12,00	5,362	5,986	6,023	6,001	5,968	5,980	6,006	6,020	5,993	6,023	6,004	6,018	6,028	6,017	6,023	6,022
13,00	6,024	6,506	6,514	6,475	6,474	6,508	6,482	6,522	6,521	6,503	6,512	6,511	6,508	6,514	6,527	6,528
14,00	6,648	7,016	7,002	6,953	6,984	7,001	6,992	7,019	7,015	7,022	7,015	7,014	7,014	7,013	7,013	7,013
15,00	7,243	7,519	7,485	7,432	7,478	7,486	7,519	7,496	7,510	7,510	7,528	7,514	7,520	7,518	7,513	7,508
$\bar{v}_a; e1$	5,24	3,32	2,62	2,06	1,60	1,33	1,15	1,03	0,95	0,85	0,79	0,77	0,76	0,77	0,78	0,78

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

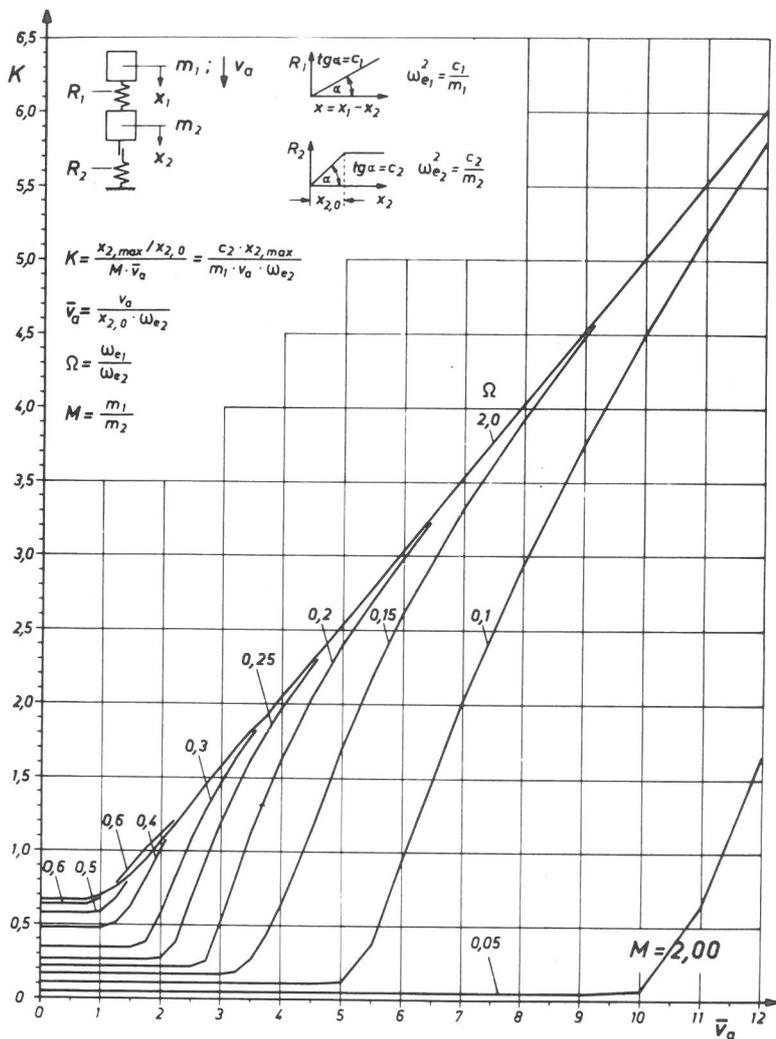
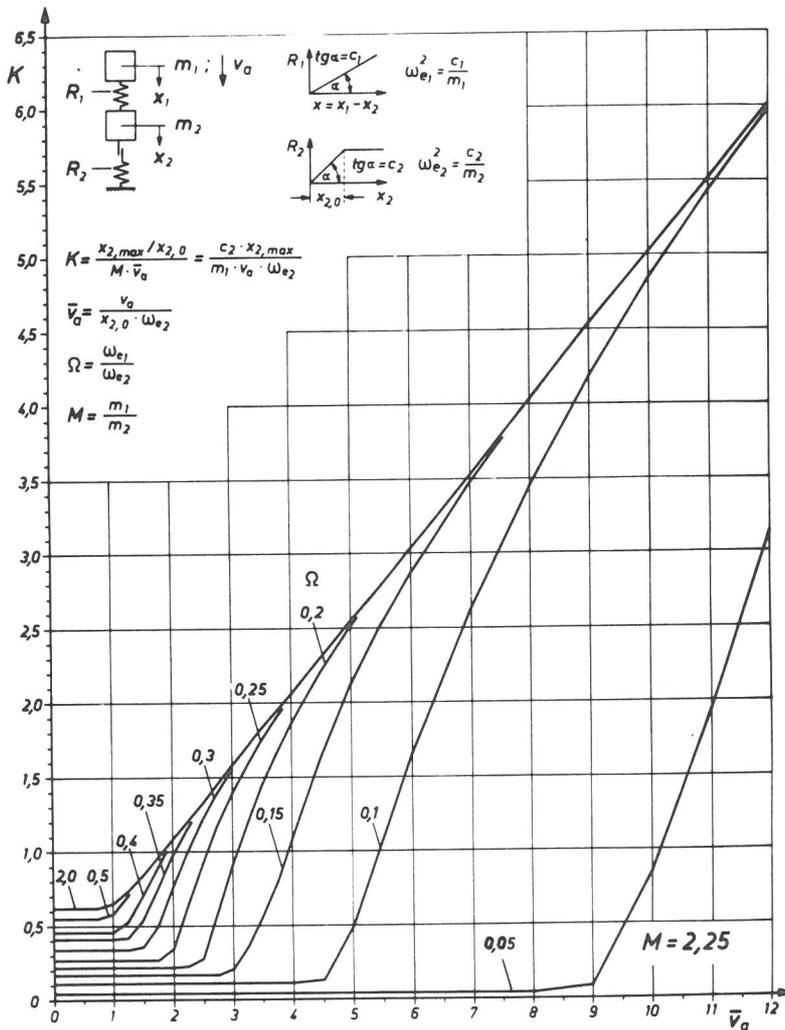


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 2,00$

$\bar{v}_a / \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109															
0,75																
1,00							0,419	0,480	0,532	0,576	0,638	0,674	0,691	0,693	0,687	0,675
1,25					0,349	0,420	0,507	0,602	0,684	0,780	0,813	0,812	0,798	0,789	0,769	0,763
1,50					0,350	0,471	0,631	0,755	0,834	0,904	0,909	0,893	0,881	0,872	0,850	0,842
1,75				0,273	0,394	0,642	0,824	0,930	0,987	1,016	1,001	0,985	0,973	0,964	0,940	0,942
2,00				0,279	0,588	0,865	1,016	1,091	1,120	1,117	1,099	1,083	1,071	1,061	1,061	1,066
2,25			0,218	0,394	0,840	1,075	1,186	1,229	1,236	1,220	1,201	1,184	1,181	1,183	1,190	1,194
2,50			0,225	0,675	1,077	1,261	1,333	1,350	1,346	1,326	1,316	1,316	1,317	1,318	1,321	1,324
2,75		0,171	0,258	0,952	1,289	1,423	1,462	1,465	1,457	1,451	1,451	1,451	1,451	1,451	1,453	1,455
3,00		0,172	0,529	1,204	1,474	1,564	1,583	1,579	1,580	1,580	1,580	1,580	1,581	1,581	1,582	1,583
3,25		0,188	0,841	1,430	1,638	1,695	1,701	1,702	1,703	1,703	1,704	1,704	1,704	1,705	1,706	1,707
3,50		0,274	1,130	1,630	1,784	1,820	1,821	1,819	1,817	1,817	1,818	1,819	1,819	1,820	1,821	1,821
3,75		0,438	1,394	1,809	1,922	1,942	1,940	1,927	1,922	1,920	1,921	1,922	1,923	1,923	1,923	1,921
4,00		0,640	1,633	1,972	2,053	2,063	2,061	2,043	2,024	2,012	2,013	2,020	2,026	2,030	2,042	2,050
4,50	0,109	1,148	2,047	2,265	2,305	2,306	2,305	2,299	2,282	2,254	2,250	2,287	2,301	2,303	2,300	2,297
5,00	0,124	1,711	2,395	2,536	2,550	2,546	2,544	2,549	2,543	2,526	2,518	2,522	2,529	2,536	2,542	2,542
5,50	0,379	2,195	2,706	2,793	2,793	2,789	2,772	2,790	2,795	2,790	2,784	2,781	2,781	2,782	2,787	2,789
6,00	0,938	2,613	2,993	3,042	3,040	3,034	2,991	3,018	3,032	3,041	3,041	3,039	3,038	3,037	3,037	3,038
7,00	2,018	3,319	3,527	3,534	3,514	3,526	3,494	3,446	3,489	3,498	3,515	3,525	3,532	3,537	3,530	3,536
8,00	2,939	3,930	4,031	4,018	3,994	4,002	4,026	4,010	3,995	4,029	4,014	4,022	4,031	4,032	4,031	4,032
9,00	3,746	4,488	4,526	4,499	4,490	4,437	4,517	4,526	4,524	4,518	4,519	4,521	4,521	4,520	4,513	4,517
10,00	4,499	5,015	5,010	4,975	4,991	4,943	5,009	5,011	5,015	5,025	5,021	5,021	5,020	5,020	5,018	5,008
11,00	5,175	5,523	5,488	5,460	5,475	5,506	5,496	5,525	5,503	5,513	5,526	5,526	5,512	5,515	5,511	5,517
12,00	5,797	6,017	5,957	5,951	5,961	6,020	6,012	6,006	6,016	6,014	6,012	6,018	6,021	6,024	6,029	6,026
13,00	6,383	6,501	6,427	6,438	6,458	6,518	6,519	6,516	6,514	6,518	6,510	6,509	6,516	6,516	6,518	6,520
14,00	6,941	6,979	6,897	6,928	6,991	7,022	7,011	7,021	7,008	7,015	7,013	7,012	7,002	7,008	7,005	7,005
15,00	7,479	7,464	7,380	7,436	7,514	7,497	7,517	7,517	7,519	7,516	7,510	7,517	7,507	7,513	7,510	7,513
$\bar{v}_a; e1$	4,59	2,92	2,29	1,83	1,43	1,19	1,04	0,94	0,87	0,78	0,74	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 2,25$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,171	0,218	0,269	0,341	0,407	0,464	0,512	0,551	0,605	0,634	0,645	0,643	0,636	0,623	0,620
0,75							0,464	0,512	0,551	0,605	0,636	0,648	0,646	0,638	0,624	0,620
1,00						0,407	0,465	0,525	0,582	0,661	0,694	0,699	0,688	0,677	0,660	0,654
1,25					0,341	0,420	0,528	0,629	0,702	0,773	0,786	0,771	0,755	0,745	0,724	0,730
1,50				0,269	0,357	0,536	0,698	0,799	0,854	0,888	0,872	0,852	0,838	0,828	0,831	0,840
1,75				0,271	0,503	0,754	0,894	0,964	0,992	0,986	0,961	0,942	0,928	0,931	0,949	0,956
2,00			0,218	0,354	0,759	0,970	1,068	1,105	1,108	1,081	1,056	1,048	1,053	1,058	1,070	1,076
2,25			0,227	0,644	1,000	1,157	1,215	1,222	1,210	1,180	1,177	1,181	1,184	1,187	1,195	1,199
2,50		0,171	0,279	0,925	1,210	1,316	1,339	1,330	1,314	1,310	1,311	1,313	1,314	1,316	1,321	1,324
2,75		0,173	0,596	1,175	1,391	1,452	1,453	1,441	1,442	1,442	1,442	1,443	1,444	1,445	1,448	1,450
3,00		0,214	0,909	1,392	1,547	1,574	1,569	1,570	1,570	1,570	1,570	1,571	1,571	1,572	1,573	1,575
3,25		0,357	1,191	1,583	1,684	1,692	1,693	1,693	1,693	1,694	1,694	1,694	1,694	1,695	1,696	1,697
3,50		0,562	1,442	1,750	1,812	1,814	1,812	1,811	1,811	1,811	1,812	1,812	1,813	1,813	1,818	1,819
3,75		0,791	1,665	1,900	1,935	1,929	1,923	1,922	1,921	1,922	1,923	1,924	1,925	1,925	1,932	1,937
4,00	0,109	1,072	1,865	2,039	2,056	2,049	2,033	2,026	2,026	2,026	2,028	2,032	2,036	2,038	2,046	2,049
4,50	0,132	1,641	2,209	2,298	2,297	2,287	2,250	2,234	2,228	2,242	2,267	2,278	2,286	2,291	2,299	2,301
5,00	0,489	2,118	2,506	2,544	2,536	2,535	2,512	2,485	2,476	2,534	2,541	2,533	2,536	2,545	2,531	2,536
5,50	1,084	2,519	2,779	2,790	2,771	2,781	2,776	2,765	2,758	2,768	2,783	2,781	2,772	2,762	2,773	2,777
6,00	1,649	2,869	3,036	3,029	3,001	3,021	3,032	3,030	3,025	3,023	3,026	3,029	3,029	3,036	3,028	3,031
7,00	2,628	3,477	3,531	3,504	3,449	3,475	3,516	3,522	3,524	3,530	3,528	3,526	3,525	3,525	3,521	3,518
8,00	3,446	4,019	4,007	3,970	3,966	3,975	4,007	4,001	4,001	4,024	4,031	4,031	4,024	4,018	4,023	4,028
9,00	4,185	4,524	4,478	4,423	4,501	4,487	4,521	4,520	4,501	4,512	4,522	4,526	4,528	4,530	4,534	4,536
10,00	4,836	5,016	4,938	4,858	5,010	5,016	5,011	5,014	5,014	5,018	5,015	5,017	5,020	5,021	5,021	5,021
11,00	5,428	5,490	5,393	5,406	5,511	5,517	5,515	5,515	5,513	5,512	5,516	5,503	5,512	5,505	5,515	5,512
12,00	5,982	5,956	5,846	5,972	6,024	6,009	6,020	6,014	6,005	6,011	6,004	6,006	6,004	6,004	6,006	6,011
13,00	6,509	6,421	6,350	6,504	6,510	6,520	6,514	6,521	6,523	6,507	6,512	6,516	6,519	6,517	6,514	6,508
14,00	7,016	6,879	6,908	7,014	7,007	7,011	7,011	7,021	7,023	7,023	7,025	7,023	7,021	7,024	7,018	7,021
15,00	7,509	7,334	7,455	7,518	7,511	7,507	7,507	7,508	7,491	7,510	7,518	7,516	7,517	7,518	7,519	7,524
$\bar{v}_a; e1$	4,08	2,60	2,04	1,65	1,30	1,09	0,96	0,87	0,81	0,73	0,70	0,69	0,69	0,70	0,71	0,72

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

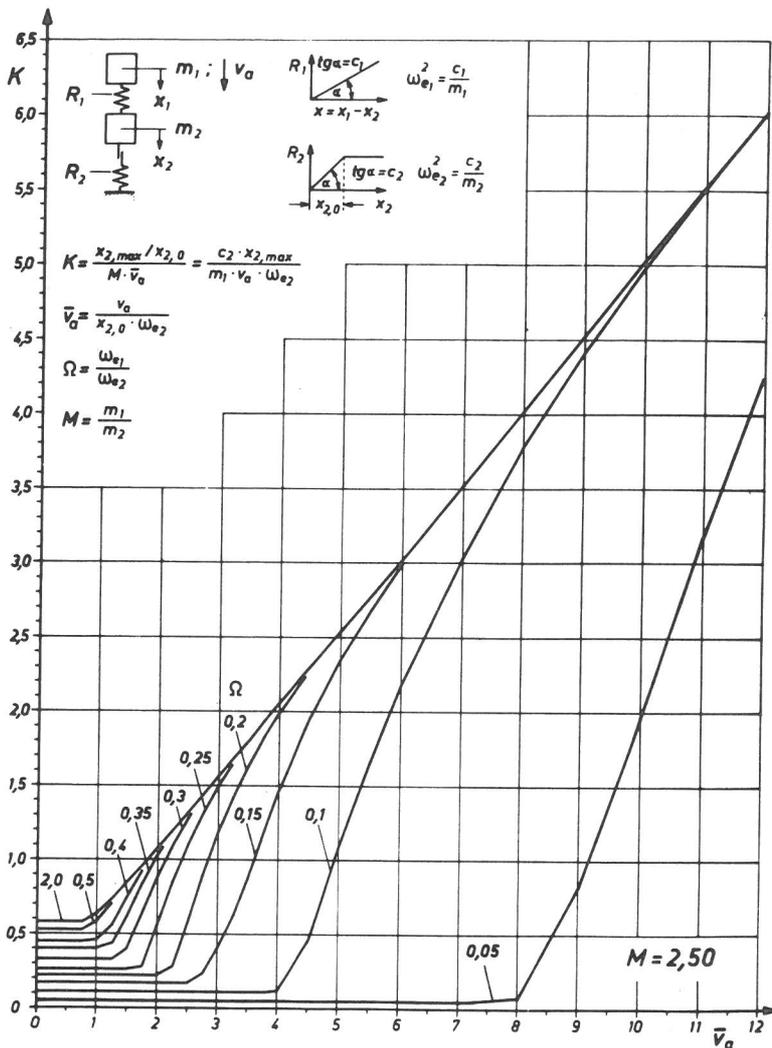
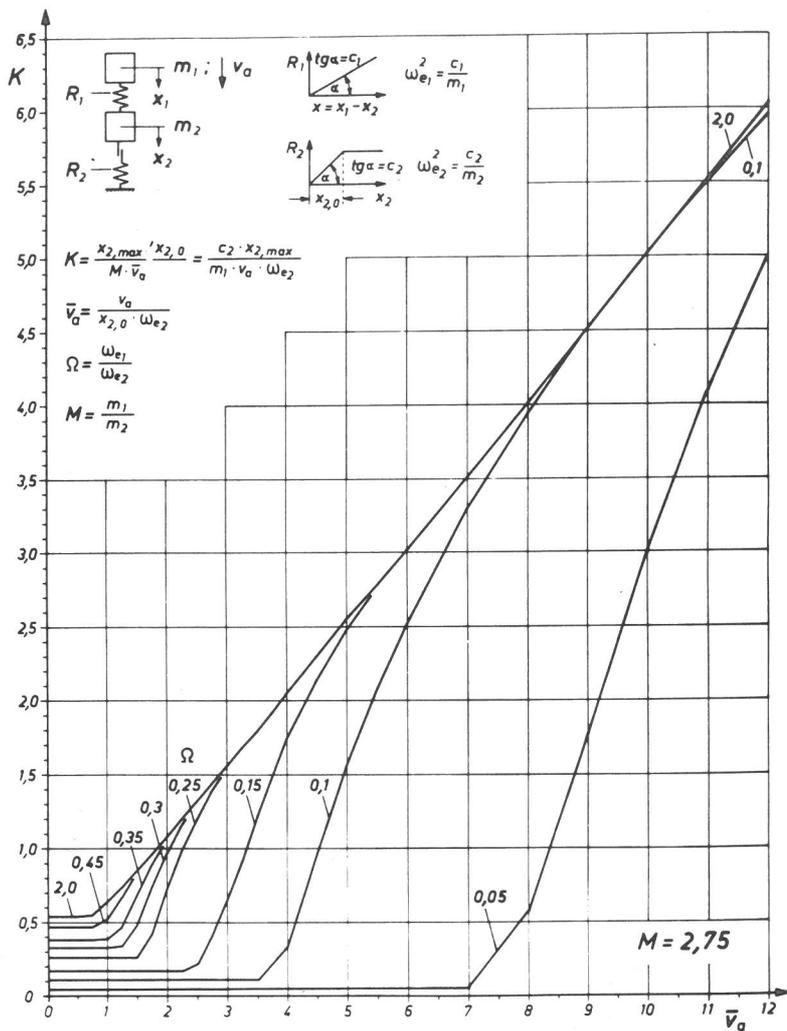


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 2,50$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,170	0,218	0,264	0,333	0,396	0,449	0,492	0,527	0,574	0,598	0,604	0,600	0,591	0,579	0,576
0,75					0,333	0,396	0,449	0,492	0,527	0,577	0,603	0,610	0,604	0,595	0,581	0,578
1,00					0,333	0,396	0,457	0,522	0,579	0,647	0,668	0,663	0,647	0,637	0,625	0,638
1,25					0,334	0,435	0,561	0,655	0,713	0,758	0,754	0,731	0,715	0,705	0,731	0,740
1,50				0,264	0,396	0,615	0,752	0,824	0,857	0,862	0,833	0,811	0,810	0,820	0,842	0,849
1,75			0,218	0,285	0,636	0,838	0,934	0,972	0,979	0,949	0,920	0,926	0,935	0,942	0,958	0,963
2,00			0,224	0,556	0,887	1,032	1,086	1,094	1,078	1,040	1,048	1,055	1,061	1,065	1,077	1,081
2,25		0,170	0,275	0,846	1,101	1,194	1,212	1,196	1,174	1,174	1,179	1,184	1,187	1,190	1,198	1,201
2,50		0,173	0,583	1,097	1,282	1,329	1,319	1,304	1,304	1,306	1,309	1,312	1,314	1,316	1,321	1,323
2,75		0,231	0,899	1,313	1,435	1,445	1,434	1,435	1,435	1,436	1,437	1,439	1,440	1,441	1,444	1,445
3,00		0,405	1,177	1,498	1,566	1,561	1,562	1,562	1,562	1,562	1,563	1,564	1,564	1,564	1,566	1,567
3,25		0,633	1,419	1,657	1,686	1,686	1,685	1,685	1,685	1,685	1,685	1,686	1,686	1,686	1,687	1,688
3,50	0,109	0,882	1,632	1,798	1,807	1,805	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,805	1,811	1,805
3,75	0,109	1,189	1,820	1,927	1,925	1,919	1,918	1,918	1,918	1,918	1,918	1,918	1,922	1,926	1,934	1,936
4,00	0,122	1,471	1,986	2,050	2,043	2,029	2,028	2,029	2,027	2,029	2,035	2,040	2,043	2,046	2,055	2,058
4,50	0,465	1,955	2,278	2,293	2,272	2,247	2,236	2,241	2,247	2,264	2,278	2,284	2,288	2,290	2,296	2,298
5,00	1,084	2,353	2,539	2,532	2,503	2,461	2,440	2,483	2,499	2,518	2,535	2,541	2,543	2,543	2,544	2,544
5,50	1,658	2,690	2,786	2,766	2,750	2,727	2,726	2,773	2,785	2,769	2,775	2,792	2,783	2,776	2,775	2,777
6,00	2,170	2,990	3,030	2,994	3,001	3,005	3,001	3,013	3,027	3,017	3,012	3,016	3,022	3,028	3,021	3,015
7,00	3,028	3,527	3,496	3,438	3,496	3,524	3,523	3,522	3,521	3,519	3,518	3,508	3,507	3,511	3,518	3,519
8,00	3,775	4,022	3,951	3,878	3,986	4,011	4,020	4,023	4,018	4,016	4,019	4,020	4,020	4,019	4,018	4,017
9,00	4,414	4,497	4,404	4,438	4,515	4,502	4,503	4,520	4,525	4,521	4,514	4,524	4,518	4,518	4,522	4,523
10,00	4,985	4,949	4,857	4,992	5,018	5,017	5,004	5,012	5,020	5,026	5,027	5,028	5,029	5,028	5,030	5,026
11,00	5,514	5,401	5,377	5,512	5,508	5,513	5,514	5,519	5,519	5,520	5,522	5,523	5,523	5,523	5,524	5,525
12,00	6,015	5,847	5,934	6,012	6,010	6,008	6,008	6,008	5,990	6,003	6,012	6,014	6,009	6,009	6,013	6,013
13,00	6,495	6,308	6,460	6,514	6,505	6,507	6,498	6,496	6,490	6,498	6,509	6,503	6,501	6,496	6,499	6,506
14,00	6,967	6,821	6,986	7,018	7,008	6,998	6,987	7,011	7,007	6,998	7,007	7,010	7,007	7,006	7,008	7,002
15,00	7,431	7,367	7,504	7,514	7,508	7,518	7,511	7,503	7,516	7,513	7,514	7,515	7,514	7,513	7,513	7,508

$\bar{v}_a; e1$  3,67 2,35 1,83 1,52 1,20 1,01 0,89 0,81 0,76 0,70 0,67 0,66 0,67 0,68 0,69 0,69

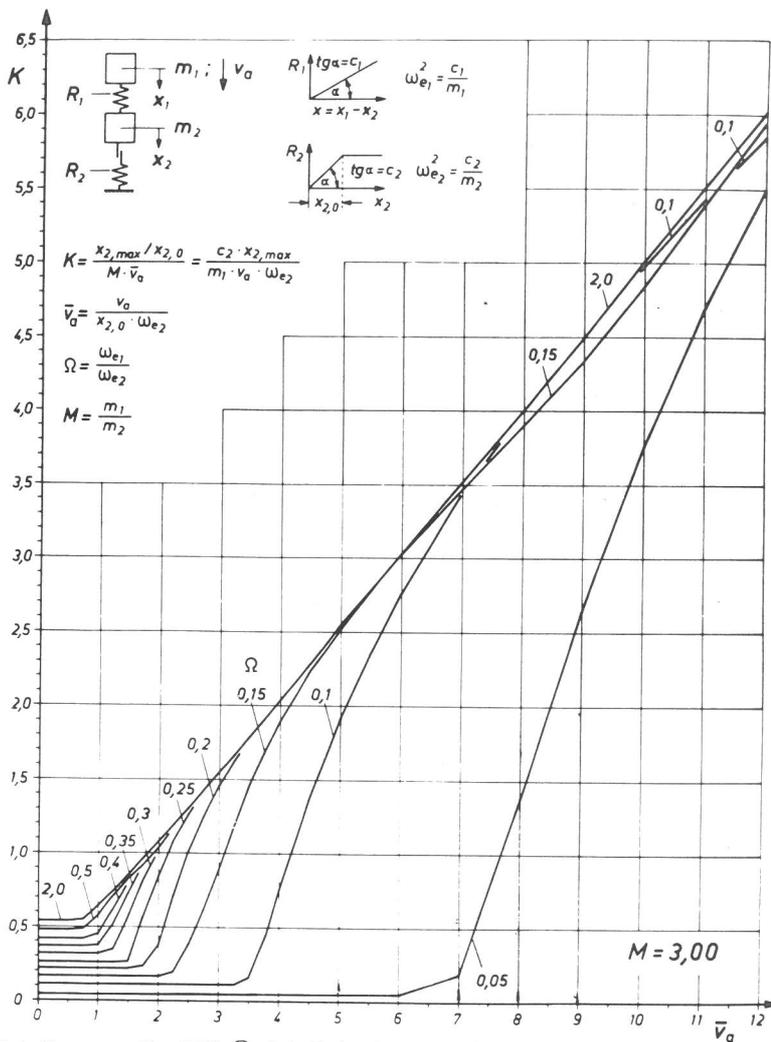


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 2,75$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,169	0,218	0,260	0,326	0,385	0,434	0,474	0,506	0,546	0,564	0,567	0,560	0,552	0,541	0,544
0,75						0,385	0,434	0,474	0,507	0,553	0,574	0,576	0,566	0,557	0,544	0,552
1,00					0,326	0,386	0,456	0,524	0,577	0,631	0,641	0,629	0,611	0,601	0,632	0,642
1,25				0,260	0,335	0,468	0,596	0,674	0,716	0,738	0,721	0,694	0,699	0,712	0,736	0,743
1,50			0,218	0,262	0,483	0,684	0,787	0,833	0,848	0,831	0,795	0,808	0,821	0,830	0,846	0,851
1,75			0,219	0,423	0,744	0,891	0,950	0,964	0,955	0,912	0,923	0,935	0,943	0,949	0,961	0,964
2,00		0,169	0,259	0,726	1,157	1,062	1,082	1,069	1,042	1,043	1,053	1,060	1,066	1,070	1,078	1,080
2,25		0,171	0,510	0,987	1,157	1,201	1,189	1,167	1,169	1,175	1,181	1,186	1,189	1,192	1,197	1,199
2,50		0,225	0,834	1,205	1,312	1,315	1,299	1,299	1,301	1,305	1,308	1,311	1,313	1,314	1,317	1,318
2,75		0,411	1,112	1,389	1,441	1,428	1,428	1,429	1,430	1,432	1,433	1,434	1,435	1,436	1,438	1,439
3,00		0,652	1,351	1,545	1,554	1,555	1,555	1,555	1,555	1,556	1,556	1,557	1,557	1,557	1,557	1,558
3,25	0,109	0,917	1,558	1,680	1,679	1,678	1,678	1,678	1,678	1,678	1,677	1,677	1,677	1,678	1,678	1,676
3,50	0,111	1,221	1,737	1,801	1,799	1,797	1,798	1,797	1,797	1,796	1,795	1,796	1,800	1,802	1,802	1,793
3,75	0,145	1,492	1,895	1,923	1,915	1,912	1,914	1,913	1,912	1,910	1,916	1,920	1,923	1,925	1,928	1,920
4,00	0,327	1,732	2,036	2,042	2,025	2,023	2,027	2,026	2,025	2,034	2,039	2,043	2,046	2,048	2,053	2,052
4,50	0,970	2,141	2,291	2,275	2,243	2,235	2,246	2,254	2,262	2,279	2,286	2,290	2,292	2,294	2,299	2,301
5,00	1,560	2,475	2,535	2,496	2,452	2,438	2,471	2,476	2,496	2,524	2,534	2,538	2,540	2,541	2,544	2,546
5,50	2,076	2,765	2,770	2,723	2,686	2,735	2,762	2,757	2,752	2,789	2,787	2,786	2,786	2,788	2,783	2,782
6,00	2,525	3,029	2,998	2,966	2,969	3,012	3,032	3,020	2,998	3,031	3,031	3,023	3,017	3,018	3,022	3,023
7,00	3,300	3,519	3,438	3,472	3,514	3,514	3,518	3,518	3,518	3,518	3,517	3,516	3,516	3,516	3,515	3,514
8,00	3,946	3,979	3,874	3,982	4,014	4,015	4,014	4,014	4,013	4,010	4,004	4,007	4,014	4,012	4,011	4,012
9,00	4,507	4,424	4,386	4,500	4,507	4,516	4,508	4,500	4,504	4,511	4,512	4,512	4,512	4,512	4,511	4,511
10,00	5,018	4,859	4,952	5,022	5,000	5,014	5,021	5,014	5,009	5,015	5,015	5,015	5,015	5,015	5,015	5,016
11,00	5,503	5,410	5,492	5,520	5,509	5,517	5,522	5,522	5,523	5,525	5,525	5,525	5,526	5,525	5,515	5,519
12,00	5,965	5,832	6,007	6,009	5,998	6,016	6,019	6,020	6,020	6,018	6,018	6,020	6,022	6,023	6,029	6,033
13,00	6,414	6,392	6,509	6,504	6,496	6,484	6,489	6,504	6,513	6,514	6,511	6,512	6,514	6,515	6,518	6,519
14,00	6,850	6,944	7,007	6,987	6,984	6,976	6,995	7,001	7,001	7,006	7,008	7,009	7,010	7,011	7,011	7,013
15,00	7,282	7,477	7,505	7,465	7,497	7,491	7,486	7,490	7,489	7,501	7,499	7,504	7,499	7,493	7,496	7,495
$\bar{v}_a; e1$	3,34	2,15	1,67	1,40	1,12	0,94	0,84	0,77	0,72	0,67	0,64	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67

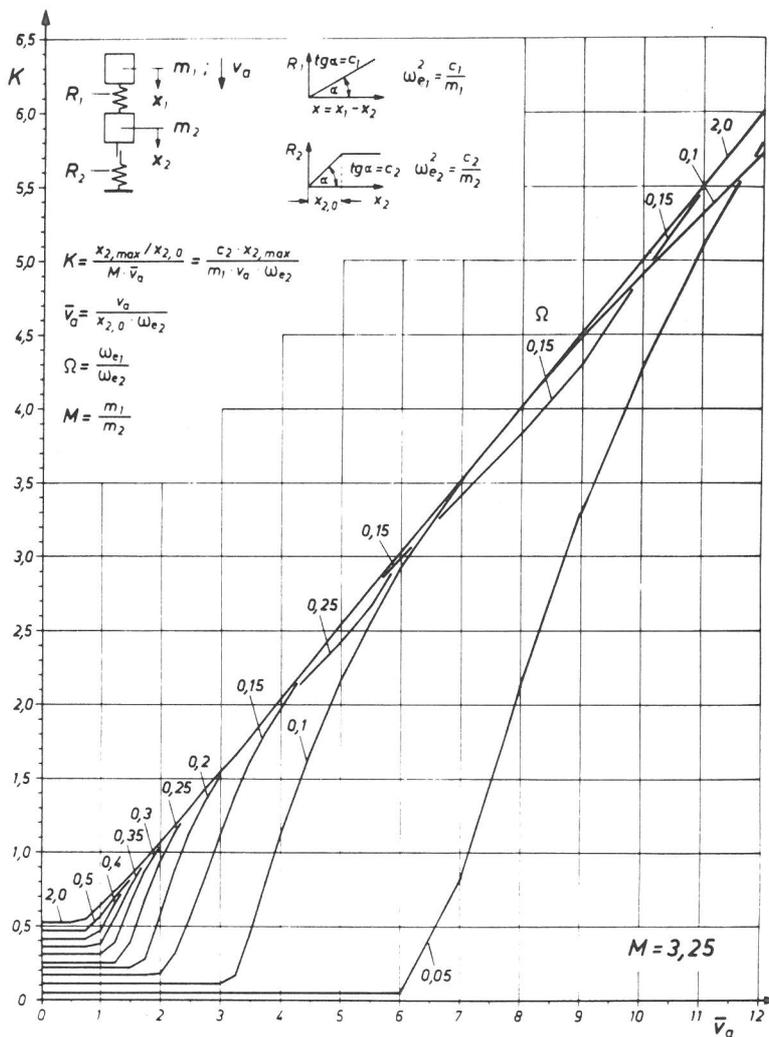


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 3,00$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,109	0,169	0,217	0,255	0,319	0,374	0,420	0,457	0,485	0,520	0,534	0,534	0,525	0,518	0,525	0,540
0,75						0,374	0,420	0,458	0,489	0,532	0,547	0,544	0,532	0,524	0,540	0,553
1,00					0,319	0,383	0,460	0,528	0,575	0,614	0,614	0,596	0,590	0,606	0,634	0,641
1,25				0,255	0,348	0,513	0,625	0,685	0,711	0,714	0,688	0,692	0,709	0,719	0,737	0,741
1,50			0,217	0,272	0,574	0,734	0,805	0,830	0,830	0,797	0,800	0,818	0,828	0,834	0,846	0,849
1,75		0,169	0,237	0,570	0,820	0,920	0,950	0,945	0,923	0,918	0,930	0,941	0,947	0,952	0,959	0,960
2,00		0,169	0,385	0,849	1,020	1,068	1,064	1,036	1,037	1,047	1,057	1,064	1,068	1,070	1,074	1,075
2,25		0,200	0,725	1,078	1,181	1,188	1,163	1,163	1,168	1,176	1,182	1,186	1,188	1,189	1,191	1,192
2,50		0,377	1,012	1,266	1,313	1,296	1,293	1,295	1,298	1,303	1,306	1,308	1,309	1,309	1,310	1,309
2,75		0,625	1,253	1,423	1,424	1,421	1,422	1,424	1,426	1,428	1,429	1,429	1,429	1,429	1,431	1,432
3,00	0,109	0,894	1,458	1,555	1,548	1,546	1,548	1,550	1,550	1,550	1,549	1,549	1,548	1,549	1,553	1,546
3,25	0,112	1,194	1,633	1,673	1,670	1,668	1,671	1,671	1,671	1,670	1,668	1,669	1,672	1,674	1,673	1,662
3,50	0,162	1,458	1,785	1,796	1,787	1,788	1,792	1,790	1,789	1,786	1,791	1,794	1,796	1,798	1,795	1,786
3,75	0,423	1,690	1,918	1,912	1,901	1,905	1,909	1,906	1,904	1,911	1,916	1,919	1,920	1,921	1,918	1,910
4,00	0,758	1,894	2,042	2,023	2,012	2,020	2,024	2,023	2,029	2,036	2,040	2,043	2,044	2,045	2,044	2,038
4,50	1,377	2,239	2,283	2,244	2,225	2,244	2,253	2,264	2,275	2,284	2,288	2,291	2,292	2,293	2,295	2,294
5,00	1,910	2,525	2,507	2,454	2,432	2,472	2,482	2,504	2,518	2,532	2,536	2,538	2,539	2,540	2,544	2,546
5,50	2,365	2,781	2,725	2,674	2,710	2,742	2,729	2,754	2,772	2,783	2,785	2,785	2,785	2,785	2,789	2,790
6,00	2,764	3,025	2,945	2,941	3,007	3,019	2,994	3,006	3,033	3,031	3,027	3,025	3,026	3,027	3,031	3,033
7,00	3,448	3,474	3,406	3,497	3,516	3,520	3,517	3,516	3,517	3,521	3,517	3,516	3,517	3,517	3,520	3,516
8,00	4,013	3,904	3,921	4,013	4,011	4,010	4,004	4,000	4,003	4,007	4,010	4,011	4,011	4,010	4,005	4,004
9,00	4,515	4,332	4,467	4,508	4,504	4,501	4,507	4,507	4,505	4,503	4,503	4,496	4,506	4,503	5,502	4,501
10,00	4,985	4,834	5,008	4,995	5,002	4,986	4,992	5,001	5,006	5,007	5,006	5,006	5,006	5,006	5,006	5,006
11,00	5,429	5,393	5,523	5,492	5,513	5,510	5,501	5,499	5,507	5,506	5,509	5,511	5,511	5,510	5,509	5,510
12,00	5,861	5,946	6,017	5,997	6,020	6,019	6,021	6,022	6,022	6,023	6,022	6,016	6,015	6,012	6,014	6,016
13,00	6,281	6,483	6,507	6,472	6,513	6,520	6,520	6,519	6,518	6,522	6,525	6,527	6,529	6,530	6,528	6,527
14,00	6,695	7,006	6,994	6,983	6,998	6,999	7,015	7,016	7,014	7,016	7,019	7,022	7,023	7,023	7,024	7,025
15,00	7,168	7,516	7,470	7,470	7,493	7,500	7,497	7,506	7,510	7,512	7,514	7,515	7,516	7,516	7,513	7,511
$\bar{v}_a; e1$	3,06	1,97	1,54	1,31	1,04	0,89	0,79	0,73	0,69	0,64	0,62	0,62	0,63	0,64	0,63	0,62

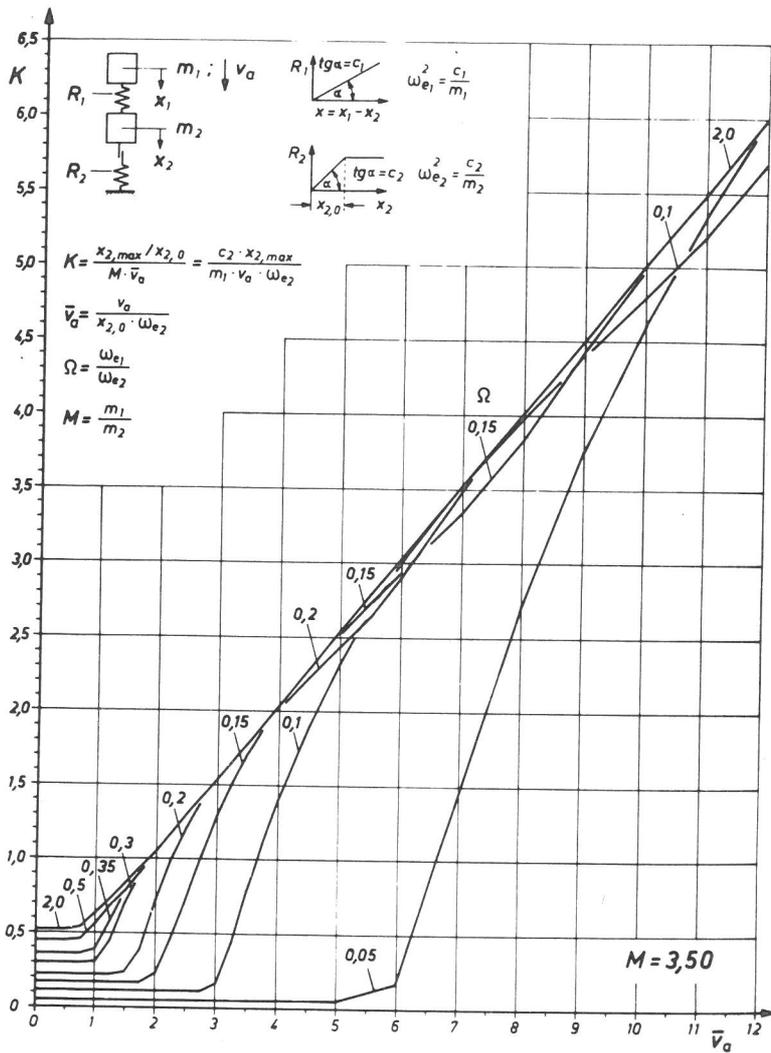


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 3,25$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,168	0,217	0,251	0,312	0,364	0,407	0,441	0,466	0,496	0,506	0,503	0,493	0,487	0,521	0,532
0,75					0,312	0,364	0,407	0,444	0,474	0,512	0,522	0,516	0,502	0,505	0,540	0,549
1,00				0,251	0,312	0,385	0,469	0,533	0,571	0,596	0,588	0,588	0,599	0,612	0,632	0,637
1,25			0,217	0,251	0,386	0,556	0,646	0,687	0,701	0,688	0,686	0,701	0,715	0,723	0,734	0,736
1,50			0,219	0,378	0,647	0,765	0,810	0,818	0,807	0,792	0,809	0,824	0,831	0,835	0,841	0,842
1,75		0,168	0,280	0,684	0,869	0,930	0,937	0,918	0,906	0,920	0,936	0,944	0,948	0,950	0,952	0,952
2,00		0,177	0,578	0,932	1,044	1,059	1,036	1,028	1,039	1,051	1,060	1,064	1,066	1,066	1,066	1,066
2,25		0,311	0,882	1,131	1,183	1,162	1,157	1,161	1,168	1,177	1,182	1,183	1,184	1,184	1,182	1,181
2,50		0,559	1,132	1,294	1,296	1,286	1,287	1,293	1,297	1,301	1,302	1,302	1,302	1,301	1,298	1,302
2,75	0,108	0,826	1,340	1,428	1,415	1,412	1,417	1,421	1,422	1,423	1,422	1,421	1,420	1,419	1,425	1,427
3,00	0,112	1,125	1,515	1,546	1,536	1,537	1,543	1,544	1,544	1,542	1,540	1,541	1,544	1,545	1,548	1,548
3,25	0,168	1,386	1,665	1,666	1,656	1,661	1,666	1,665	1,663	1,660	1,664	1,667	1,668	1,669	1,669	1,664
3,50	0,458	1,612	1,794	1,781	1,773	1,782	1,785	1,782	1,780	1,786	1,789	1,791	1,792	1,792	1,789	1,784
3,75	0,799	1,810	1,915	1,893	1,890	1,902	1,901	1,901	1,905	1,911	1,914	1,915	1,915	1,915	1,910	1,910
4,00	1,119	1,984	2,034	2,001	2,004	2,018	2,018	2,026	2,031	2,036	2,038	2,039	2,039	2,038	2,035	2,036
4,50	1,684	2,278	2,261	2,212	2,231	2,247	2,264	2,273	2,280	2,284	2,286	2,287	2,287	2,286	2,288	2,289
5,00	2,156	2,531	2,473	2,416	2,464	2,481	2,505	2,520	2,528	2,533	2,534	2,535	2,535	2,535	2,541	2,544
5,50	2,558	2,770	2,682	2,662	2,730	2,720	2,752	2,771	2,778	2,782	2,782	2,781	2,784	2,786	2,790	2,790
6,00	2,918	2,993	2,915	2,975	3,007	2,975	3,012	3,028	3,030	3,029	3,028	3,030	3,032	3,033	3,035	3,033
7,00	3,511	3,418	3,454	3,519	3,520	3,505	3,515	3,525	3,523	3,522	3,522	3,523	3,523	3,523	3,523	3,523
8,00	4,017	3,832	3,993	4,011	4,009	4,008	4,011	4,011	4,012	4,013	4,011	4,010	4,008	4,008	4,008	4,008
9,00	4,478	4,300	4,504	4,504	4,507	4,499	4,491	4,492	4,500	4,506	4,508	4,508	4,508	4,506	4,506	4,508
10,00	4,908	4,906	5,000	4,983	4,979	4,998	5,001	5,000	5,000	4,997	4,996	4,998	4,994	4,996	4,998	4,998
11,00	5,323	5,478	5,489	5,485	5,476	5,507	5,506	5,503	5,503	5,502	5,500	5,499	5,498	5,498	5,499	5,500
12,00	5,727	6,003	5,979	6,006	6,002	5,992	5,999	6,005	6,010	6,007	6,007	6,004	6,005	6,005	6,008	6,007
13,00	6,154	6,508	6,468	6,514	6,514	6,516	6,520	6,521	6,522	6,517	6,515	6,513	6,512	6,512	6,514	6,514
14,00	6,761	7,001	6,962	7,007	7,014	7,019	7,020	7,021	7,024	7,026	7,026	7,026	7,025	7,025	7,020	7,019
15,00	7,352	7,482	7,453	7,508	7,504	7,518	7,516	7,518	7,520	7,524	7,526	7,528	7,529	7,530	7,530	7,531
$\bar{v}_a; e_1$	2,85	1,83	1,42	1,23	0,99	0,84	0,76	0,70	0,66	0,62	0,61	0,61	0,62	0,63	0,59	0,58

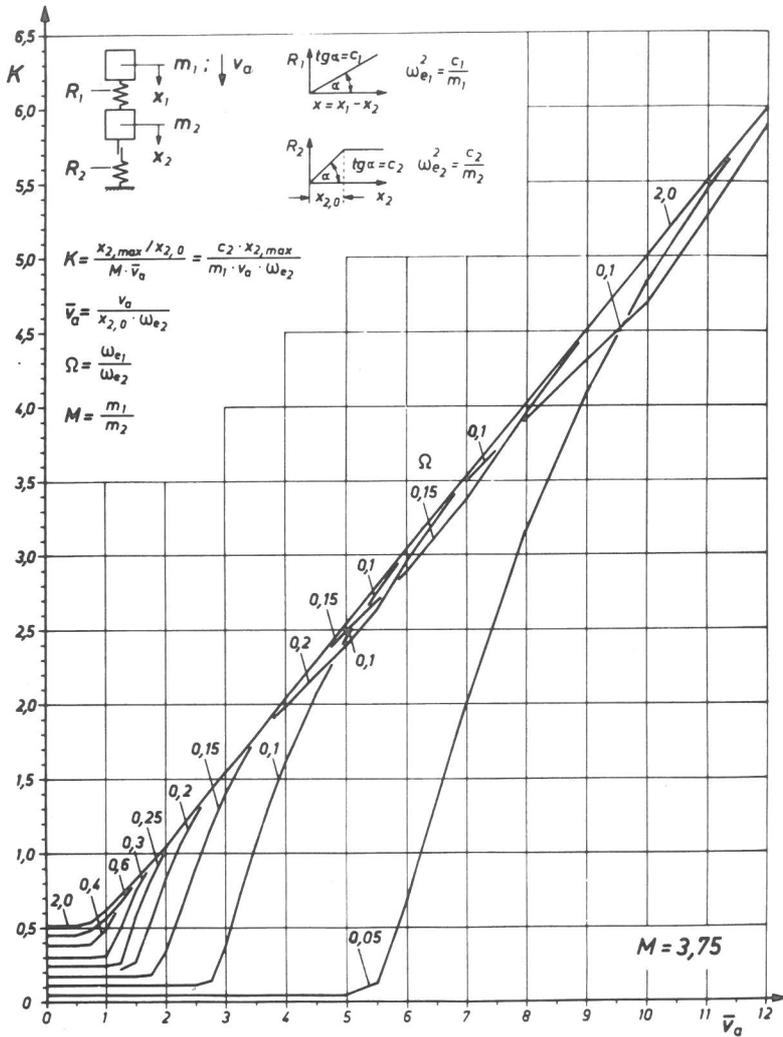


Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1 : Linear elastisch; Feder 2 : Linear elastisch/idealplastisch

$M = 3,50$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,167	0,216	0,247	0,305	0,355	0,395	0,426	0,448	0,474	0,481	0,476	0,465	0,479	0,513	0,521
0,75					0,305	0,355	0,396	0,432	0,461	0,493	0,498	0,489	0,494	0,510	0,537	0,544
1,00				0,247	0,308	0,392	0,479	0,535	0,564	0,577	0,564	0,599	0,604	0,614	0,627	0,630
1,25			0,216	0,250	0,446	0,591	0,657	0,683	0,686	0,662	0,699	0,708	0,717	0,722	0,727	0,727
1,50		0,167	0,235	0,488	0,700	0,782	0,805	0,800	0,780	0,803	0,816	0,826	0,830	0,832	0,833	0,832
1,75		0,168	0,392	0,767	0,897	0,928	0,917	0,898	0,910	0,927	0,939	0,943	0,944	0,945	0,943	0,941
2,00		0,230	0,724	0,985	1,049	1,040	1,027	1,027	1,039	1,054	1,059	1,060	1,060	1,059	1,055	1,053
2,25		0,461	0,992	1,158	1,170	1,156	1,153	1,162	1,170	1,176	1,178	1,177	1,176	1,174	1,169	1,169
2,50	0,108	0,729	1,209	1,298	1,286	1,283	1,285	1,293	1,296	1,297	1,296	1,294	1,292	1,290	1,295	1,298
2,75	0,110	1,022	1,388	1,415	1,403	1,406	1,415	1,418	1,418	1,416	1,413	1,412	1,415	1,416	1,421	1,422
3,00	0,160	1,286	1,539	1,536	1,524	1,533	1,540	1,539	1,537	1,533	1,536	1,539	1,540	1,541	1,544	1,544
3,25	0,438	1,512	1,667	1,649	1,645	1,658	1,660	1,657	1,654	1,659	1,662	1,663	1,664	1,664	1,644	1,662
3,50	0,786	1,707	1,787	1,761	1,766	1,779	1,777	1,776	1,780	1,784	1,786	1,787	1,787	1,786	1,783	1,784
3,75	1,108	1,876	1,902	1,872	1,886	1,898	1,897	1,902	1,906	1,908	1,909	1,909	1,909	1,908	1,908	1,910
4,00	1,400	2,026	2,012	1,982	2,005	2,013	2,022	2,028	2,030	2,032	2,033	2,032	2,031	2,030	2,034	2,036
4,50	1,905	2,282	2,226	2,201	2,240	2,257	2,269	2,277	2,279	2,280	2,280	2,278	2,280	2,282	2,286	2,289
5,00	2,322	2,517	2,430	2,432	2,477	2,498	2,517	2,526	2,528	2,528	2,527	2,530	2,533	2,534	2,539	2,541
5,50	2,686	2,731	2,641	2,710	2,722	2,746	2,769	2,776	2,778	2,776	2,779	2,782	2,784	2,785	2,789	2,792
6,00	2,995	2,935	2,898	2,996	2,973	3,003	3,024	3,027	3,026	3,027	3,030	3,031	3,032	3,033	3,034	3,034
7,00	3,520	3,340	3,487	3,519	3,498	3,517	3,526	3,523	3,524	3,525	3,531	3,524	3,524	3,523	3,525	3,526
8,00	3,982	3,832	4,010	4,011	4,009	4,017	4,016	4,017	4,016	4,014	4,013	4,013	4,014	4,014	4,016	4,016
9,00	4,404	4,421	4,504	4,498	4,471	4,489	4,503	4,508	4,508	4,504	4,505	4,506	4,506	4,506	4,506	4,500
10,00	4,804	4,980	4,984	4,978	5,000	4,997	4,997	4,997	5,008	5,003	5,002	5,004	5,006	5,006	5,008	5,010
11,00	5,200	5,509	5,456	5,463	5,496	5,497	5,497	5,496	5,495	5,495	5,493	5,491	5,492	5,492	5,493	5,492
12,00	5,697	6,013	5,963	5,986	6,004	6,003	5,999	6,002	5,996	5,996	5,997	5,997	5,997	5,998	5,999	5,999
13,00	6,285	6,504	6,488	6,499	6,494	6,507	6,510	6,507	6,503	6,502	6,503	6,504	6,504	6,504	6,503	6,503
14,00	6,886	6,985	7,000	7,006	7,014	7,020	7,020	7,020	7,018	7,013	7,010	7,009	7,010	7,010	7,011	7,010
15,00	7,454	7,473	7,503	7,505	7,519	7,520	7,524	7,524	7,523	7,523	7,522	7,520	7,519	7,518	7,515	7,515
$\bar{v}_a; e1$	2,65	1,71	1,32	1,16	0,94	0,80	0,72	0,67	0,64	0,60	0,59	0,60	0,61	0,60	0,56	0,55



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 3,75$

$\bar{v}_a / \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,167	0,216	0,243	0,299	0,346	0,383	0,411	0,431	0,453	0,457	0,450	0,461	0,478	0,504	0,510
0,75					0,299	0,346	0,386	0,422	0,450	0,476	0,477	0,491	0,499	0,513	0,532	0,536
1,00			0,216	0,243	0,307	0,406	0,490	0,535	0,556	0,558	0,575	0,592	0,607	0,613	0,620	0,620
1,25			0,216	0,261	0,502	0,615	0,662	0,674	0,668	0,670	0,695	0,711	0,716	0,718	0,718	0,717
1,50		0,167	0,271	0,574	0,735	0,788	0,794	0,778	0,773	0,801	0,820	0,825	0,826	0,826	0,822	0,820
1,75		0,176	0,535	0,824	0,909	0,916	0,892	0,900	0,907	0,931	0,938	0,939	0,938	0,936	0,930	0,928
2,00		0,340	0,830	1,015	1,042	1,021	1,025	1,031	1,044	1,054	1,054	1,053	1,051	1,048	1,041	1,040
2,25	0,108	0,609	1,064	1,166	1,152	1,150	1,153	1,165	1,171	1,173	1,171	1,168	1,164	1,162	1,165	1,168
2,50	0,108	0,891	1,253	1,287	1,276	1,278	1,286	1,292	1,293	1,290	1,286	1,284	1,286	1,288	1,292	1,294
2,75	0,142	1,164	1,409	1,407	1,392	1,404	1,413	1,413	1,412	1,406	1,409	1,411	1,412	1,414	1,416	1,418
3,00	0,372	1,394	1,539	1,518	1,517	1,532	1,534	1,532	1,528	1,532	1,534	1,536	1,537	1,537	1,539	1,539
3,25	0,728	1,590	1,660	1,631	1,642	1,655	1,652	1,650	1,654	1,657	1,658	1,659	1,659	1,659	1,658	1,658
3,50	1,054	1,758	1,771	1,744	1,766	1,774	1,772	1,776	1,779	1,781	1,781	1,781	1,780	1,780	1,782	1,784
3,75	1,348	1,905	1,878	1,859	1,888	1,892	1,898	1,902	1,903	1,904	1,903	1,902	1,902	1,903	1,907	1,909
4,00	1,611	2,033	1,982	1,976	2,007	2,015	2,023	2,026	2,027	2,027	2,025	2,026	2,028	2,029	2,033	2,036
4,50	2,060	2,271	2,188	2,214	2,244	2,260	2,272	2,275	2,275	2,272	2,275	2,278	2,280	2,281	2,285	2,287
5,00	2,435	2,487	2,387	2,463	2,486	2,509	2,522	2,524	2,522	2,523	2,527	2,530	2,532	2,533	2,537	2,539
5,50	2,751	2,688	2,632	2,723	2,731	2,764	2,773	2,773	2,771	2,776	2,779	2,781	2,782	2,784	2,788	2,790
6,00	3,021	2,884	2,952	2,983	2,987	3,020	3,024	3,022	3,024	3,027	3,028	3,030	3,030	3,031	3,034	3,037
7,00	3,497	3,374	3,521	3,493	3,516	3,525	3,524	3,524	3,523	3,522	3,522	3,524	3,525	3,526	3,530	3,532
8,00	3,920	3,946	4,019	3,999	4,020	4,020	4,019	4,016	4,015	4,021	4,018	4,019	4,019	4,020	4,021	4,022
9,00	4,312	4,488	4,502	4,472	4,501	4,510	4,508	4,507	4,507	4,508	4,510	4,510	4,510	4,510	4,510	4,510
10,00	4,693	4,996	4,973	4,982	4,987	4,991	5,005	5,004	5,002	5,004	5,005	5,006	5,006	5,005	5,002	4,999
11,00	5,269	5,485	5,446	5,491	5,504	5,495	5,494	5,499	5,497	5,500	5,506	5,501	5,502	5,501	5,504	5,506
12,00	5,883	5,958	5,958	6,003	5,995	5,995	5,994	5,989	5,990	5,990	5,991	5,990	5,990	5,989	5,989	5,990
13,00	6,454	6,432	6,489	6,496	6,500	6,493	6,491	6,492	6,492	6,495	6,496	6,495	6,495	6,495	6,496	6,497
14,00	6,989	6,910	7,000	6,997	7,011	7,009	7,003	7,001	7,000	7,001	7,000	6,998	6,999	7,000	7,000	6,998
15,00	7,499	7,432	7,502	7,512	7,520	7,519	7,516	7,512	7,509	7,507	7,506	7,507	7,507	7,508	7,508	7,507
$\bar{v}_a; e1$	2,47	1,60	1,23	1,10	0,89	0,77	0,70	0,65	0,62	0,59	0,58	0,59	0,58	0,56	0,53	0,52

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

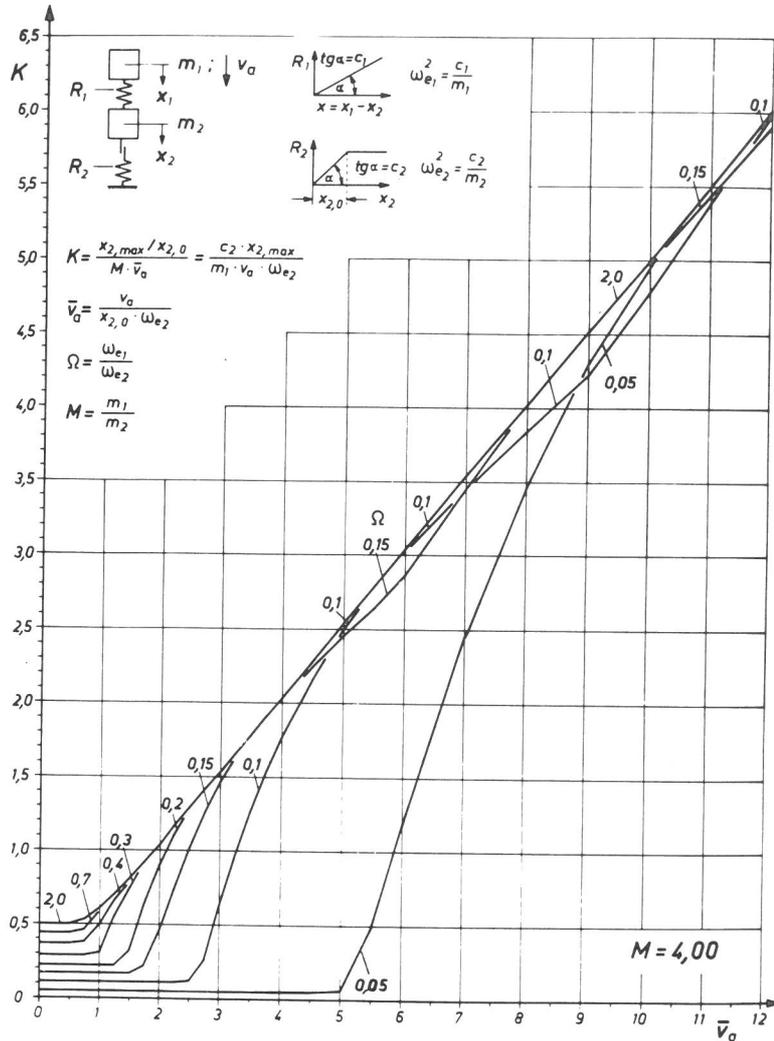
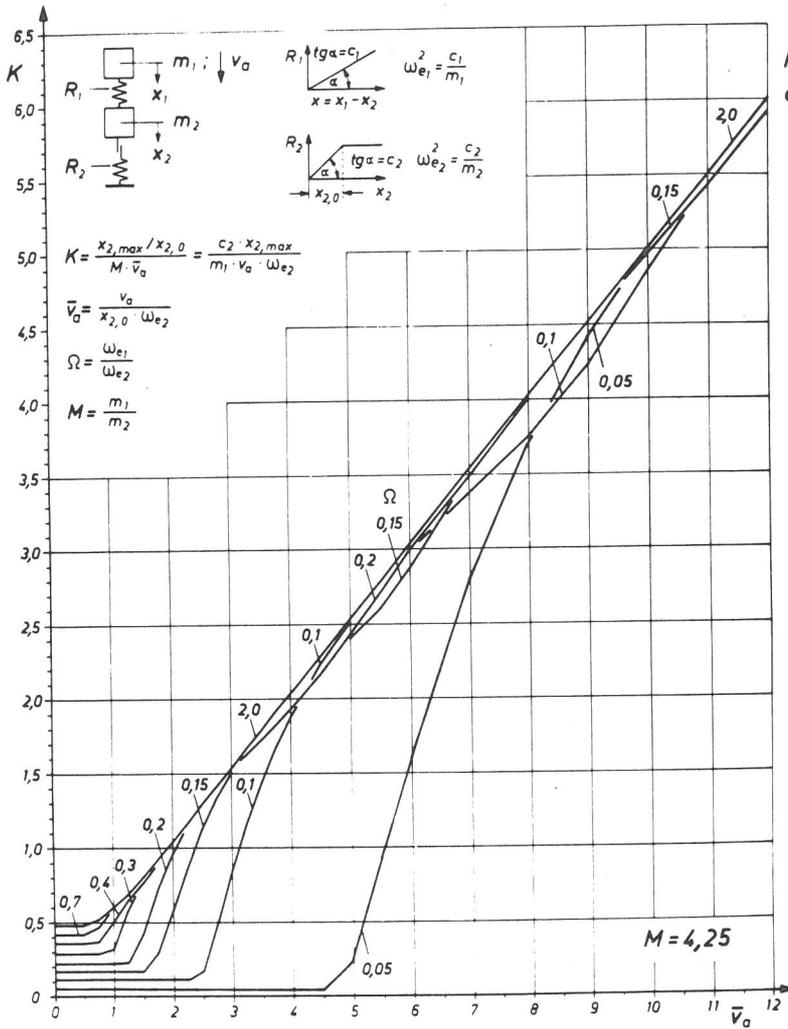


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 4,00$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,166	0,216	0,243	0,293	0,337	0,372	0,398	0,416	0,434	0,435	0,434	0,460	0,474	0,494	0,497
0,75					0,293	0,337	0,378	0,414	0,439	0,460	0,465	0,499	0,502	0,512	0,525	0,528
1,00			0,216	0,243	0,311	0,424	0,498	0,533	0,546	0,542	0,586	0,597	0,606	0,609	0,611	0,610
1,25			0,220	0,341	0,546	0,631	0,660	0,661	0,649	0,682	0,686	0,710	0,711	0,711	0,707	0,705
1,50		0,166	0,323	0,639	0,756	0,786	0,778	0,762	0,781	0,795	0,806	0,820	0,818	0,817	0,810	0,807
1,75		0,219	0,644	0,860	0,910	0,899	0,889	0,906	0,903	0,932	0,921	0,931	0,928	0,925	0,916	0,916
2,00		0,464	0,905	1,028	1,027	1,016	1,029	1,025	1,047	1,038	1,035	1,043	1,039	1,035	1,039	1,042
2,25	0,108	0,740	1,110	1,160	1,145	1,134	1,146	1,155	1,157	1,154	1,149	1,156	1,158	1,160	1,165	1,167
2,50	0,118	1,023	1,275	1,276	1,268	1,275	1,276	1,278	1,276	1,270	1,268	1,283	1,285	1,286	1,289	1,291
2,75	0,264	1,262	1,410	1,393	1,396	1,395	1,400	1,397	1,393	1,392	1,396	1,409	1,410	1,410	1,412	1,414
3,00	0,630	1,463	1,531	1,506	1,507	1,521	1,518	1,513	1,515	1,519	1,521	1,532	1,532	1,533	1,533	1,534
3,25	0,966	1,633	1,644	1,612	1,634	1,641	1,635	1,639	1,642	1,644	1,646	1,654	1,654	1,653	1,655	1,658
3,50	1,264	1,779	1,745	1,731	1,759	1,757	1,762	1,765	1,767	1,768	1,768	1,774	1,775	1,776	1,781	1,783
3,75	1,529	1,906	1,848	1,852	1,880	1,882	1,888	1,890	1,891	1,891	1,891	1,899	1,901	1,902	1,906	1,909
4,00	1,764	2,024	1,950	1,976	1,999	2,007	2,013	2,015	2,015	2,014	2,018	2,025	2,026	2,028	2,032	2,034
4,50	2,164	2,244	2,156	2,225	2,247	2,257	2,264	2,264	2,263	2,268	2,273	2,277	2,278	2,280	2,283	2,285
5,00	2,497	2,446	2,389	2,472	2,498	2,511	2,515	2,513	2,515	2,523	2,528	2,528	2,530	2,531	2,534	2,535
5,50	2,772	2,640	2,693	2,721	2,758	2,767	2,766	2,766	2,770	2,777	2,782	2,779	2,780	2,781	2,784	2,786
6,00	3,017	2,861	2,986	2,973	3,023	3,021	3,018	3,022	3,024	3,029	3,032	3,027	3,028	3,029	3,035	3,038
7,00	3,450	3,452	3,518	3,506	3,528	3,527	3,526	3,524	3,523	3,527	3,531	3,526	3,527	3,529	3,533	3,535
8,00	3,840	4,008	4,005	4,021	4,027	4,024	4,021	4,021	4,040	4,024	4,027	4,022	4,023	4,023	4,025	4,025
9,00	4,215	4,501	4,475	4,505	4,512	4,511	4,508	4,509	4,515	4,514	4,514	4,514	4,514	4,514	4,513	4,514
10,00	4,777	4,978	4,961	4,974	4,990	4,998	4,995	4,997	5,002	5,001	5,000	5,002	5,003	5,004	5,006	5,003
11,00	5,391	5,444	5,451	5,491	5,475	5,495	5,493	5,493	5,494	5,496	5,497	5,504	5,504	5,504	5,505	5,504
12,00	5,976	5,905	5,981	5,974	5,971	5,986	5,989	5,994	5,981	5,982	5,983	5,997	5,998	5,999	6,002	6,010
13,00	6,521	6,411	6,499	6,480	6,469	6,470	6,473	6,467	6,468	6,468	6,466	6,487	6,488	6,488	6,488	6,488
14,00	7,029	6,967	6,995	6,992	6,976	6,969	6,989	6,982	6,983	6,975	6,975	6,992	6,992	6,993	6,994	6,996
15,00	7,516	7,503	7,498	7,519	7,508	7,496	7,492	7,491	7,498	7,487	7,488	7,498	7,497	7,497	7,496	7,496
$\bar{v}_a; c_1$	2,31	1,51	1,16	1,03	0,85	0,74	0,67	0,63	0,60	0,58	0,57	0,58	0,54	0,53	0,51	0,50



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 4,25$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,166	0,215	0,243	0,287	0,329	0,361	0,385	0,401	0,416	0,416	0,436	0,457	0,468	0,482	0,484
0,75				0,243	0,287	0,330	0,372	0,406	0,428	0,444	0,473	0,504	0,503	0,510	0,517	0,518
1,00			0,215	0,244	0,323	0,444	0,504	0,529	0,534	0,551	0,595	0,598	0,602	0,603	0,601	0,599
1,25		0,166	0,234	0,416	0,579	0,639	0,653	0,646	0,642	0,694	0,688	0,705	0,704	0,702	0,695	0,692
1,50		0,168	0,421	0,686	0,767	0,777	0,759	0,766	0,793	0,798	0,802	0,812	0,809	0,806	0,796	0,796
1,75		0,303	0,725	0,882	0,903	0,881	0,891	0,916	0,909	0,917	0,914	0,921	0,916	0,912	0,915	0,918
2,00	0,108	0,581	0,955	1,029	1,012	1,014	1,015	1,029	1,034	1,031	1,025	1,030	1,032	1,034	1,039	1,042
2,25	0,109	0,861	1,136	1,145	1,137	1,134	1,149	1,174	1,152	1,145	1,138	1,157	1,158	1,160	1,163	1,165
2,50	0,170	1,117	1,280	1,266	1,250	1,278	1,274	1,272	1,268	1,263	1,266	1,282	1,283	1,284	1,286	1,288
2,75	0,497	1,327	1,401	1,380	1,394	1,395	1,393	1,387	1,387	1,390	1,392	1,406	1,406	1,406	1,408	1,408
3,00	0,847	1,502	1,518	1,495	1,509	1,516	1,508	1,511	1,513	1,515	1,517	1,528	1,527	1,527	1,528	1,531
3,25	1,155	1,651	1,618	1,606	1,635	1,631	1,634	1,637	1,638	1,639	1,639	1,648	1,647	1,649	1,654	1,656
3,50	1,425	1,778	1,719	1,732	1,756	1,756	1,760	1,761	1,762	1,761	1,761	1,772	1,774	1,775	1,779	1,782
3,75	1,662	1,898	1,822	1,858	1,876	1,881	1,884	1,885	1,884	1,884	1,888	1,898	1,899	1,901	1,905	1,907
4,00	1,873	2,004	1,928	1,984	2,001	2,006	2,009	2,008	2,007	2,011	2,016	2,024	2,025	2,026	2,030	2,032
4,50	2,231	2,208	2,160	2,228	2,243	2,256	2,257	2,254	2,259	2,266	2,270	2,275	2,276	2,277	2,280	2,281
5,00	2,522	2,400	2,433	2,476	2,496	2,508	2,505	2,511	2,515	2,521	2,524	2,525	2,526	2,527	2,529	2,530
5,50	2,768	2,603	2,714	2,727	2,756	2,760	2,760	2,764	2,768	2,774	2,778	2,775	2,776	2,777	2,781	2,784
6,00	2,991	2,874	2,982	2,991	3,015	3,012	3,016	3,018	3,021	3,025	3,029	3,025	3,027	3,029	3,035	3,037
7,00	3,384	3,495	3,490	3,530	3,523	3,521	3,519	3,520	3,522	3,528	3,533	3,527	3,529	3,530	3,535	3,537
8,00	3,751	4,033	3,998	4,028	4,024	4,022	4,033	4,022	4,024	4,028	4,030	4,023	4,024	4,024	4,025	4,027
9,00	4,233	4,514	4,484	4,517	4,514	4,513	4,516	4,516	4,521	4,520	4,520	4,516	4,515	4,516	4,518	4,519
10,00	4,856	4,973	4,966	4,995	4,999	4,999	5,005	5,012	5,008	5,005	5,004	5,010	5,008	5,008	5,009	5,009
11,00	5,451	5,425	5,494	5,475	5,497	5,494	5,496	5,498	5,498	5,498	5,503	5,504	5,503	5,503	5,498	5,498
12,00	5,998	5,918	5,974	5,976	5,991	5,991	5,990	5,988	5,990	5,993	5,997	6,005	6,006	6,006	6,008	6,008
13,00	6,509	6,453	6,479	6,462	6,456	6,492	6,490	6,483	6,495	6,490	6,492	6,494	6,494	6,502	6,508	6,512
14,00	6,995	6,985	6,981	6,958	6,961	6,973	6,979	6,967	6,965	6,965	6,966	6,987	6,987	6,987	6,985	6,986
15,00	7,469	7,500	7,490	7,480	7,466	7,475	7,480	7,479	7,479	7,473	7,473	7,490	7,490	7,491	7,492	7,493
$\bar{v}_a; e_1$	2,18	1,42	1,09	0,97	0,82	0,71	0,65	0,61	0,59	0,57	0,57	0,54	0,51	0,50	0,49	0,49

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

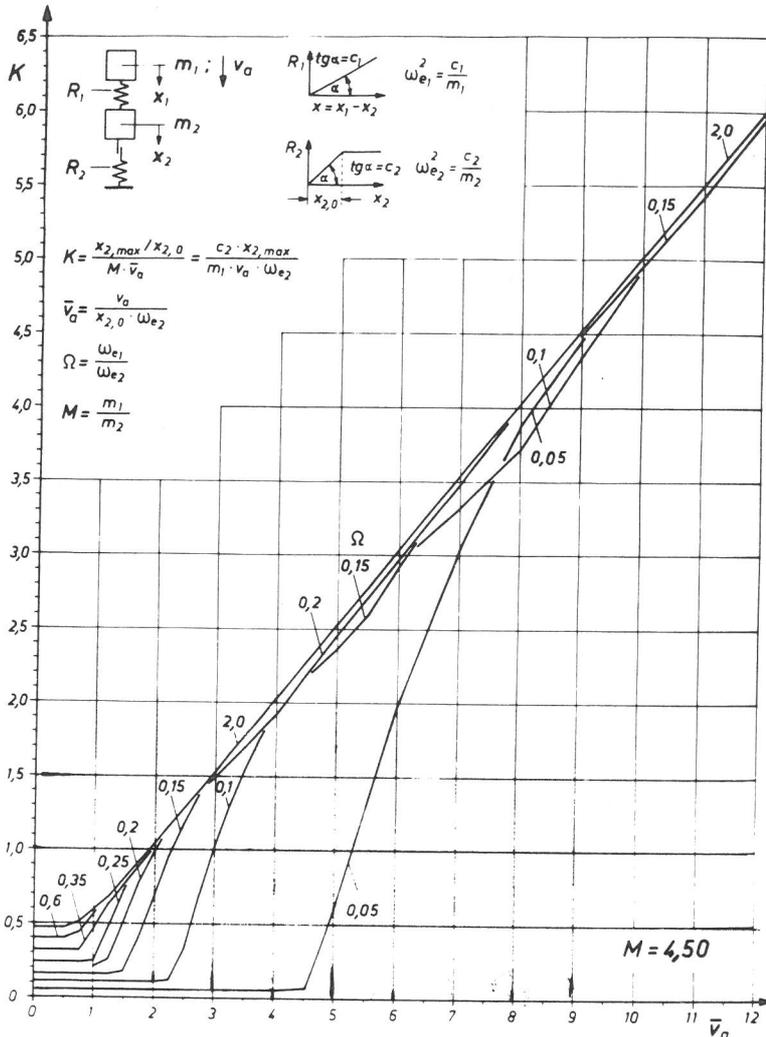


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 4,50$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,165	0,214	0,244	0,281	0,321	0,351	0,373	0,387	0,399	0,406	0,436	0,453	0,461	0,471	0,471
0,75				0,244	0,281	0,324	0,366	0,398	0,418	0,438	0,480	0,508	0,501	0,505	0,508	0,508
1,00			0,214	0,250	0,358	0,462	0,507	0,522	0,522	0,563	0,601	0,596	0,597	0,596	0,590	0,587
1,25		0,165	0,264	0,476	0,601	0,641	0,644	0,630	0,651	0,703	0,686	0,698	0,707	0,692	0,682	0,679
1,50		0,181	0,512	0,718	0,769	0,764	0,751	0,775	0,804	0,797	0,795	0,802	0,797	0,793	0,795	0,798
1,75		0,400	0,783	0,891	0,890	0,878	0,898	0,925	0,911	0,911	0,904	0,908	0,908	0,910	0,916	0,919
2,00	0,108	0,683	0,987	1,022	1,006	1,018	1,020	1,030	1,030	1,022	1,012	1,031	1,033	1,035	1,038	1,040
2,25	0,123	0,955	1,146	1,137	1,134	1,138	1,150	1,167	1,144	1,135	1,138	1,156	1,157	1,158	1,160	1,162
2,50	0,330	1,181	1,273	1,254	1,250	1,269	1,270	1,264	1,259	1,262	1,264	1,280	1,280	1,281	1,282	1,282
2,75	0,698	1,366	1,391	1,359	1,394	1,392	1,384	1,383	1,385	1,387	1,388	1,402	1,402	1,402	1,402	1,403
3,00	1,021	1,520	1,499	1,490	1,510	1,507	1,507	1,509	1,510	1,510	1,511	1,522	1,521	1,522	1,527	1,530
3,25	1,301	1,651	1,594	1,609	1,632	1,629	1,632	1,633	1,633	1,633	1,632	1,645	1,646	1,648	1,652	1,655
3,50	1,544	1,770	1,697	1,738	1,752	1,754	1,756	1,756	1,755	1,754	1,758	1,771	1,772	1,774	1,778	1,780
3,75	1,758	1,876	1,806	1,863	1,877	1,878	1,879	1,878	1,876	1,882	1,886	1,896	1,898	1,899	1,903	1,905
4,00	1,946	1,975	1,924	1,985	1,998	2,002	2,002	1,999	2,003	2,009	2,013	2,022	2,023	2,024	2,027	2,029
4,50	2,264	2,167	2,186	2,232	2,243	2,251	2,247	2,253	2,257	2,263	2,267	2,272	2,273	2,274	2,276	2,276
5,00	2,520	2,356	2,455	2,480	2,498	2,500	2,502	2,507	2,511	2,516	2,521	2,521	2,522	2,522	2,526	2,529
5,50	2,746	2,588	2,714	2,743	2,756	2,753	2,758	2,762	2,765	2,769	2,772	2,771	2,773	2,775	2,780	2,782
6,00	2,949	2,922	2,966	3,012	3,020	3,009	3,012	3,014	3,016	3,021	3,027	3,024	3,026	3,028	3,033	3,035
7,00	3,315	3,514	3,482	3,520	3,517	3,514	3,514	3,518	3,522	3,529	3,534	3,527	3,529	3,530	3,534	3,537
8,00	3,712	4,024	4,012	4,024	4,019	4,033	4,018	4,026	4,025	4,029	4,032	4,023	4,023	4,024	4,029	4,032
9,00	4,352	4,490	4,528	4,516	4,519	4,514	4,523	4,522	4,523	4,523	4,523	4,518	4,520	4,520	4,522	4,524
10,00	4,938	4,949	4,994	4,998	4,997	5,007	5,018	5,014	5,012	5,012	5,013	5,013	5,013	5,013	5,013	5,013
11,00	5,474	5,417	5,480	5,497	5,495	5,501	5,502	5,502	5,500	5,500	5,500	5,504	5,503	5,502	5,502	5,501
12,00	5,976	5,952	5,989	6,004	5,994	5,991	5,991	5,994	5,997	6,000	6,000	6,004	6,004	6,003	6,001	6,000
13,00	6,452	6,485	6,464	6,470	6,483	6,483	6,486	6,486	6,488	6,491	6,493	6,501	6,502	6,503	6,507	6,510
14,00	6,911	6,994	6,957	6,951	6,954	6,962	6,961	6,994	6,996	6,997	6,970	7,002	7,005	6,991	7,001	7,001
15,00	7,372	7,489	7,450	7,466	7,466	7,482	7,472	7,464	7,464	7,464	7,464	7,486	7,486	7,486	7,487	7,486
$\bar{v}_a : e1$	2,06	1,35	1,04	0,91	0,79	0,69	0,63	0,60	0,57	0,56	0,55	0,51	0,49	0,48	0,47	0,47

Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

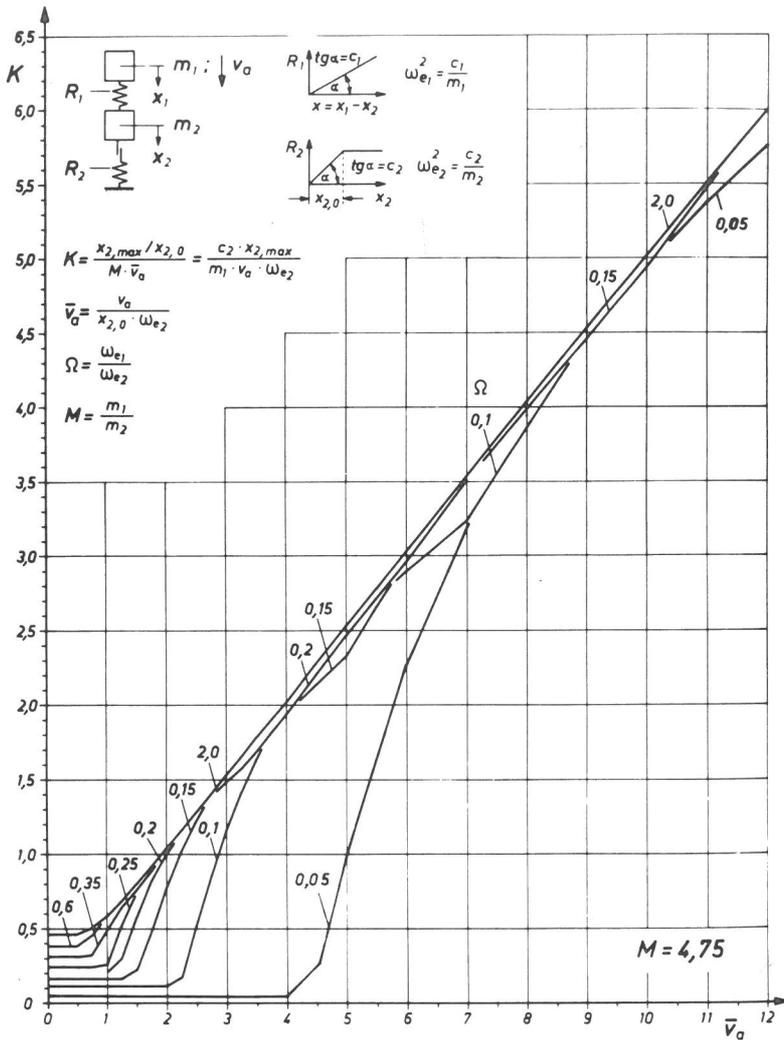
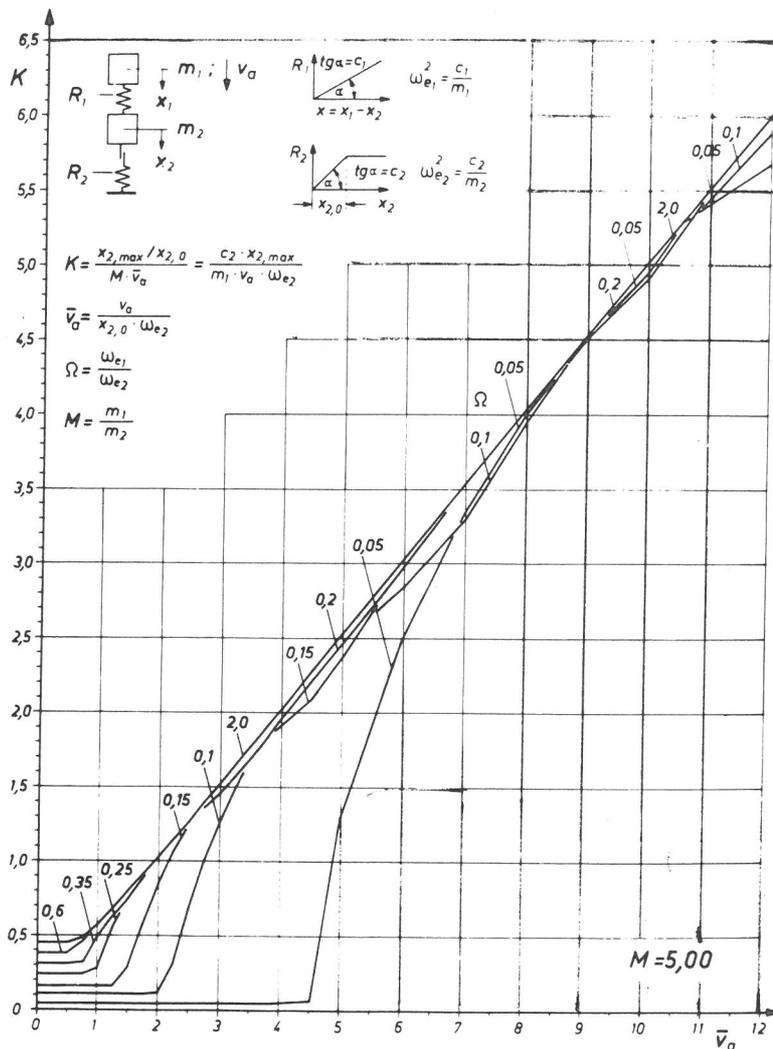


Tabelle :  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1: Linear elastisch; Feder 2: Linear elastisch/idealplastisch

$M = 4,75$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,164	0,214	0,244	0,275	0,313	0,341	0,361	0,374	0,383	0,408	0,434	0,448	0,454	0,460	0,460
0,75			0,214	0,244	0,275	0,319	0,361	0,392	0,408	0,446	0,487	0,490	0,498	0,500	0,499	0,498
1,00			0,214	0,258	0,394	0,476	0,507	0,514	0,515	0,575	0,602	0,591	0,589	0,586	0,579	0,575
1,25		0,164	0,303	0,522	0,616	0,639	0,632	0,630	0,665	0,706	0,681	0,690	0,696	0,680	0,676	0,680
1,50		0,223	0,583	0,738	0,766	0,749	0,754	0,788	0,812	0,793	0,786	0,802	0,786	0,789	0,796	0,798
1,75	0,108	0,494	0,824	0,892	0,873	0,879	0,909	0,905	0,909	0,902	0,892	0,907	0,910	0,911	0,916	0,917
2,00	0,108	0,773	1,005	1,008	1,001	1,026	1,024	1,027	1,023	1,010	1,011	1,031	1,033	1,034	1,036	1,037
2,25	0,174	1,023	1,145	1,128	1,138	1,142	1,147	1,154	1,134	1,135	1,136	1,154	1,155	1,155	1,156	1,157
2,50	0,519	1,223	1,264	1,246	1,255	1,268	1,285	1,256	1,258	1,260	1,260	1,276	1,276	1,276	1,276	1,276
2,75	0,863	1,386	1,376	1,356	1,386	1,384	1,380	1,382	1,383	1,383	1,383	1,396	1,396	1,396	1,399	1,402
3,00	1,158	1,522	1,480	1,486	1,508	1,502	1,505	1,506	1,505	1,505	1,504	1,517	1,519	1,520	1,525	1,528
3,25	1,412	1,643	1,574	1,616	1,626	1,628	1,628	1,628	1,627	1,625	1,629	1,644	1,645	1,646	1,650	1,653
3,50	1,631	1,752	1,685	1,742	1,751	1,751	1,751	1,749	1,747	1,752	1,756	1,796	1,771	1,772	1,775	1,778
3,75	1,823	1,847	1,808	1,862	1,870	1,874	1,872	1,870	1,874	1,879	1,883	1,894	1,896	1,897	1,900	1,902
4,00	1,991	1,941	1,939	1,986	1,992	1,997	1,993	1,997	2,001	2,006	2,010	2,019	2,020	2,021	2,024	2,025
4,50	2,271	2,126	2,204	2,232	2,241	2,243	2,246	2,251	2,254	2,259	2,262	2,268	2,269	2,269	2,273	2,276
5,00	2,504	2,320	2,458	2,487	2,494	2,497	2,500	2,505	2,508	2,512	2,514	2,517	2,519	2,521	2,526	2,528
5,50	2,710	2,647	2,708	2,740	2,746	2,749	2,756	2,759	2,762	2,763	2,768	2,770	2,772	2,774	2,778	2,780
6,00	2,896	2,958	2,960	3,003	3,001	3,004	3,007	3,009	3,012	3,019	3,025	3,023	3,025	3,026	3,030	3,032
7,00	3,245	3,503	3,507	3,513	3,508	3,508	3,511	3,517	3,521	3,528	3,534	3,526	3,527	3,528	3,534	3,537
8,00	3,862	3,990	4,023	4,016	4,019	4,014	4,017	4,022	4,025	4,029	4,032	4,024	4,026	4,028	4,033	4,036
9,00	4,460	4,446	4,521	4,509	4,520	4,519	4,528	4,524	4,524	4,525	4,529	4,521	4,522	4,523	4,525	4,526
10,00	4,986	4,934	5,000	4,994	5,003	5,020	5,025	5,016	5,017	5,019	5,020	5,016	5,016	5,016	5,016	5,018
11,00	5,472	5,479	5,488	5,493	5,500	5,514	5,514	5,507	5,508	5,508	5,506	5,506	5,507	5,507	5,508	5,508
12,00	5,933	5,990	5,990	5,996	5,993	5,998	5,999	6,001	6,005	6,000	5,998	6,002	6,002	6,002	6,000	5,999
13,00	6,378	6,473	6,472	6,492	6,488	6,489	6,491	6,495	6,497	6,500	6,502	6,506	6,507	6,507	6,507	6,506
14,00	6,846	6,979	6,943	6,964	6,971	6,982	6,986	6,983	6,983	6,985	6,988	6,999	7,000	7,001	7,003	7,004
15,00	7,404	7,467	7,452	7,454	7,466	7,458	7,459	7,461	7,462	7,462	7,464	7,486	7,486	7,487	7,488	7,497
$\bar{v}_{a,e1}$	1,95	1,28	0,98	0,86	0,77	0,67	0,62	0,58	0,56	0,55	0,52	0,48	0,47	0,46	0,46	0,46



Masse - Feder - Masse - Feder - Schwinger mit elastischer bzw. elastoplastischer Federkennlinie

Tabelle  $K = K(M; \Omega; \bar{v}_a)$ ; Feder 1 : Linear elastisch; Feder 2 : Linear elastisch/idealplastisch

$M = 5,00$

$\bar{v}_a \backslash \Omega$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,50	2,00
0,50	0,108	0,164	0,213	0,244	0,270	0,306	0,332	0,350	0,361	0,376	0,408	0,430	0,440	0,445	0,447	0,446
0,75			0,213	0,244	0,270	0,315	0,357	0,385	0,401	0,455	0,491	0,489	0,492	0,493	0,489	0,487
1,00			0,216	0,276	0,423	0,486	0,506	0,505	0,526	0,583	0,600	0,584	0,580	0,577	0,567	0,566
1,25		0,164	0,347	0,557	0,624	0,633	0,618	0,641	0,678	0,705	0,674	0,679	0,682	0,669	0,678	0,680
1,50		0,290	0,636	0,750	0,758	0,739	0,764	0,799	0,815	0,786	0,775	0,797	0,788	0,790	0,795	0,797
1,75	0,108	0,579	0,851	0,887	0,868	0,885	0,919	0,906	0,904	0,891	0,916	0,908	0,910	0,911	0,913	0,914
2,00	0,116	0,848	1,012	1,000	1,002	1,035	1,025	1,022	1,014	1,008	1,010	1,030	1,031	1,031	1,032	1,032
2,25	0,307	1,070	1,137	1,119	1,146	1,144	1,141	1,144	1,131	1,133	1,134	1,152	1,151	1,151	1,151	1,151
2,50	0,678	1,247	1,253	1,246	1,259	1,263	1,274	1,255	1,256	1,256	1,256	1,272	1,271	1,271	1,271	1,274
2,75	0,996	1,392	1,360	1,360	1,385	1,376	1,379	1,379	1,379	1,378	1,377	1,390	1,392	1,393	1,398	1,400
3,00	1,264	1,516	1,465	1,493	1,501	1,501	1,502	1,501	1,500	1,498	1,499	1,516	1,518	1,519	1,523	1,525
3,25	1,494	1,628	1,566	1,620	1,622	1,625	1,623	1,621	1,619	1,623	1,627	1,642	1,644	1,645	1,648	1,650
3,50	1,692	1,726	1,690	1,740	1,745	1,747	1,744	1,742	1,745	1,750	1,754	1,767	1,768	1,769	1,772	1,774
3,75	1,863	1,815	1,823	1,864	1,867	1,868	1,864	1,869	1,872	1,876	1,880	1,892	1,893	1,894	1,896	1,897
4,00	2,012	1,906	1,956	1,986	1,989	1,990	1,991	1,995	1,999	2,003	2,006	2,016	2,017	2,017	2,020	2,023
4,50	2,264	2,088	2,210	2,224	2,237	2,241	2,244	2,249	2,251	2,255	2,257	2,263	2,265	2,267	2,272	2,275
5,00	2,475	2,369	2,458	2,480	2,486	2,493	2,498	2,502	2,503	2,506	2,510	2,516	2,518	2,520	2,524	2,527
5,50	2,664	2,684	2,708	2,741	2,743	2,746	2,751	2,753	2,754	2,762	2,767	2,769	2,771	2,772	2,776	2,777
6,00	2,838	2,969	2,977	2,997	2,995	3,000	3,002	3,004	3,010	3,017	3,022	3,021	3,022	3,023	3,026	3,030
7,00	3,289	3,478	3,522	3,504	3,500	3,505	3,509	3,515	3,519	3,526	3,530	3,523	3,526	3,527	3,533	3,537
8,00	3,954	3,956	4,017	4,004	4,003	4,014	4,018	4,021	4,024	4,028	4,034	4,026	4,028	4,030	4,035	4,038
9,00	4,515	4,473	4,511	4,498	4,508	4,524	4,523	4,522	4,530	4,529	4,532	4,523	4,524	4,525	4,528	4,531
10,00	5,005	4,988	4,912	4,991	5,016	5,027	5,018	5,021	5,022	5,028	5,024	5,016	5,018	5,018	5,021	5,022
11,00	5,454	5,493	5,489	5,490	5,515	5,519	5,512	5,514	5,514	5,512	5,513	5,511	5,512	5,512	5,512	5,513
12,00	5,889	6,000	6,000	5,994	6,003	6,005	6,006	6,005	6,004	6,002	6,002	6,005	6,004	6,004	6,003	6,002
13,00	6,354	6,486	6,499	6,496	6,489	6,495	6,498	6,499	6,501	6,503	6,502	6,502	6,505	6,504	6,503	6,500
14,00	6,900	6,952	6,975	6,979	6,988	6,992	6,992	6,994	6,994	7,000	7,004	7,007	7,008	7,008	7,010	7,011
15,00	7,452	7,441	7,472	7,462	7,462	7,476	7,475	7,476	7,483	7,480	7,482	7,495	7,495	7,496	7,498	7,499
$\bar{v}_{a;el}$	1,85	1,22	0,94	0,82	0,74	0,65	0,60	0,57	0,55	0,53	0,49	0,47	0,45	0,45	0,45	0,45

Gegeben :  $M ; \Omega ; \bar{v}_a$

Gesucht :  $K$

Benachbarte Werte :  $M_1 \leq M < M_2$

$\Omega_1 \leq \Omega < \Omega_2$

$\bar{v}_{a1} \leq \bar{v}_a < \bar{v}_{a2}$

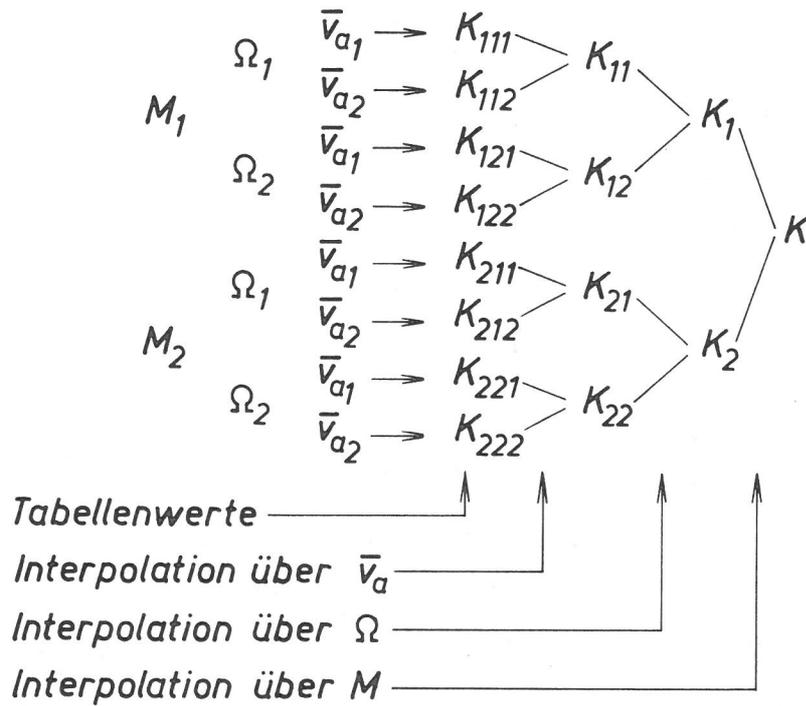


Bild 26 : Interpolationsschema für  $K$

Einfluß der Stoßstellenlage auf die Größe der erforderlichen Energieaufnahme  $E_A$

Es soll abgeschätzt werden, wie bei einem Stoß durch Aufprall eines menschlichen Körpers die Lage der Stoßstelle den Energiebetrag beeinflusst, der von dem gestoßenen Bauteil zum Abfangen des Stoßes aufgenommen werden muß.

Dazu wird angenommen:

- . Die tragende Gesamtkonstruktion des gestoßenen Bauteils verformt sich an jeder beliebigen Stoßstelle  $s$  linear elastisch mit der Steifigkeit  $c_{2s}$  bis zum Wert  $x_{2,0s}$  und von da ab idealplastisch. Die Kraft  $c_{2s} \cdot x_{2,0s}$ , ab der die plastische Verformung beginnt, ist nur abhängig von einer Material- und Querschnittsgröße  $M_F$ , die über die gesamte Bauteillänge denselben Wert habe (z. B. Fließmoment des Querschnitts).
- . Das Bauteil trägt wie ein Balken auf zwei Stützen.
- . Der Stoß ist so "langsam", daß die Durchbiegungsform der statischen Biegelinie zur jeweiligen Lastanordnung entspricht.
- . Die mitwirkende Masse  $m_2$  des Bauteils kann ausreichend genau durch Anwendung des Energiesatzes bestimmt werden.

Ist  $m_2$  ges die gesamte Masse des gestoßenen Bauteils, so ergibt sich dann

$$m_2 = \kappa_{a,b} \cdot m_2 \text{ ges}$$

mit  $\kappa$  nach Struck, Limberger (1970) Gl. 14

$$\begin{aligned} \kappa_{a,b} &= \frac{1}{l} \int_0^l (y/y_s)^2 dx \\ &= \frac{a}{l} \left[ \frac{2}{105} \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \frac{2}{15} \left(\frac{a}{b}\right) + \frac{1}{3} \right] + \\ &\quad \frac{b}{l} \left[ \frac{2}{105} \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \frac{2}{15} \left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{3} \right] \end{aligned}$$

wobei

$l$  = Stützweite

$a, b$  = Abstände der Stoßstelle von den beiden Auflagern

Zwei Stoßstellenlagen werden als Beispiel verglichen, nämlich:

$s = I$  : Stoßstelle bei  $l/2$  also  $a = \frac{1}{2} l$   $b = \frac{1}{2} l$   $a/b = 1$

$s = II$  : Stoßstelle bei  $l/4$  also  $a = \frac{1}{4} l$   $b = \frac{3}{4} l$   $a/b = \frac{1}{3}$

Es wird davon ausgegangen, daß die Werte für  $s = I$  bekannt sind. Für  $s = II$  erhält man sie dann über

$$\frac{c_{2 \text{ II}}}{c_{2 \text{ I}}} = \frac{3 E I l}{a^2 b^2} / \frac{48 E I}{l^3} = \frac{1}{16} \left(\frac{l}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2 = 1,78$$

$$\kappa_{\text{II}} / \kappa_{\text{I}} = 0,774 / 0,486 = 1,592$$

$$\frac{\omega_{e_2 \text{ II}}}{\omega_{e_2 \text{ I}}} = \sqrt{\frac{c_{2 \text{ II}} / c_{2 \text{ I}}}{\kappa_{\text{II}} / \kappa_{\text{I}}}} = 1,057$$

$$\frac{x_{2,0 \text{ II}}}{x_{2,0 \text{ I}}} = \frac{M_F \cdot l^2}{16 E I} / \frac{M_F \cdot l^2}{12 E I} = 0,75$$

$$\frac{\bar{v}_a \text{ II}}{\bar{v}_a \text{ I}} = \frac{v_a}{\omega_{e_2 \text{ II}} \cdot x_{2,0 \text{ II}}} / \frac{v_a}{\omega_{e_2 \text{ I}} \cdot x_{2,0 \text{ I}}} = \left( \frac{\omega_{e_2 \text{ II}}}{\omega_{e_2 \text{ I}}} \cdot \frac{x_{2,0 \text{ II}}}{x_{2,0 \text{ I}}} \right)^{-1} = 1,26$$

Für  $v_a = 2 \text{ m/s}$  und ein Bauteil ähnlich Wand Nr.7 ergibt sich nach Bild 2.5/1

$$c_1 / m_1 = 2147 \text{ s}^{-2}$$

$$\omega_{e_1} = \sqrt{2147} = 46,34 \text{ s}^{-1}$$

und mit

$$c_{2 \text{ I}} = 158,2 \text{ kN/m}; \omega_{e_2 \text{ I}} = 91,06 \text{ s}^{-1}, \bar{v}_a \text{ I} = 1,144$$

für  $s = \text{II}$ :

$$c_{2 \text{ II}} = 1,78 \cdot c_{2 \text{ I}} = 281,5 \text{ kN/m}$$

$$\omega_{e_2 \text{ II}} = 1,057 \cdot \omega_{e_2 \text{ I}} = 96,2 \text{ s}^{-1}$$

$$m_{2 \text{ II}} = c_{2 \text{ II}} / \omega_{e_2 \text{ II}}^2 = 30,4 \text{ kg}$$

$$M_{\text{II}} = 90 / 30,4 = 2,96 \text{ oder } 50 / 30,4 = 1,64$$

$$\Omega_{\text{II}} = \omega_{e_1} / \omega_{e_2 \text{ II}} = 0,482$$

$$\bar{v}_a \text{ II} = 1,26 \cdot \bar{v}_a \text{ I} = 1,44$$

Diese Werte liefern nach Anhang I den Wert

$$K = 0,800 \text{ oder } 0,712$$

Damit errechnet sich das Verhältnis von erforderlicher Energieaufnahme  $E_A$  zur Aufprallenergie  $E_a = \frac{1}{2} m_1 v_a^2$

zu

$$\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_{II} = 2 \cdot \frac{K}{\bar{v}_a} - \frac{1}{M \bar{v}_a^2} = 0,95 \text{ oder } 0,69$$

Dies ist ungefähr gleich oder weniger als  $\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_I = 0,89 \text{ oder } 0,87$   
(siehe Bild 3.3.4/1 oder 3.3.4/3)

Für  $\bar{v}_a = 2 \text{ m/s}$  und ein Bauteil ähnlich Wand Nr.4 ergibt eine analoge Rechnung, ausgehend von

$$c_1/m_1 = 2147 \text{ s}^{-2}; \omega_{e_1} = 46,34 \text{ s}^{-1}$$

$$c_{2,a I} = 190 \text{ kN/m}; \omega_{e_{2,a I}} = 58,45 \text{ s}^{-1}$$

$$c_{2 I} = 98,6 \text{ kN/m}; \omega_{e_{2 I}} = 42,11 \text{ s}^{-1}; \bar{v}_{a I} = 0,969$$

über

$$c_{2,a II} = 338 \text{ kN/m}; \omega_{e_{2,a II}} = 61,75 \text{ s}^{-1}; m_{2 II} = 88,6 \text{ kg}$$

$$c_{2 II} = 175,6 \text{ kN/m}; \omega_{e_{2 II}} = 43,4 \text{ s}^{-1}$$

$$M_{II} = \frac{90}{88,6} = 1,016; \Omega_{II} = 1,068; \bar{v}_{a II} = 1,22; K = \frac{1,003}{1,198}$$

$$\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_{II} = 0,98 \text{ oder } 0,81 < \left(\frac{E_A}{E_a}\right)_I = 0,99 \text{ oder } 0,96$$

Ein entsprechendes Ergebnis erhält man für ein Bauteil ähnlich Wand Nr.1 bei  $v_a = 2 \text{ m/s}$  und  $m_1 = 90 \text{ kg}$  oder  $50 \text{ kg}$  auf gleichem Wege:

$$\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_{II} = 0,99 \text{ oder } 0,83 \leq \left(\frac{E_A}{E_a}\right)_I = 0,99 \text{ oder } 0,97$$

Die gleiche Rechnung für  $v_a = 2,6 \text{ m/s}$  und  $m_1 = 90 \text{ kg}$  oder  $50 \text{ kg}$  liefert für ein Bauteil ähnlich Wand Nr.7

$$\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_{II} = 0,95 \text{ oder } 0,94 < \left(\frac{E_A}{E_a}\right)_I = 0,97 \text{ oder } 0,96$$

(siehe Bilder 3.3.4/2 oder 3.3.4/4)

und für ein Bauteil ähnlich Wand Nr.4

$$\left(\frac{E_A}{E_a}\right)_{II} = 0,99 \text{ oder } 0,87 \approx \left(\frac{E_A}{E_a}\right)_I = 0,97 \text{ oder } 0,97$$

sowie für ein Bauteil ähnlich Wand Nr.1

$$\left( \frac{E_A}{E_a} \right)_{II} = 0,99 \text{ oder } 0,85 < \left( \frac{E_A}{E_a} \right)_I = 0,99 \text{ oder } 0,98$$

Im allgemeinen wird also die erforderliche Energieaufnahme  $E_A$  bei einem Stoß in Mitte der Bauteilstützweite größer oder ungefähr gleich der bei einem Stoß auf einen anderen Punkt der Bauteilstützweite sein.

Einfluß der Vereinfachung der Federkennlinie des gestoßenen Bauteils durch Annahme einer linear elastischen/ideal plastischen Form auf den Wert der erforderlichen Energieaufnahme

Beim vorgeschlagenen Prüfverfahren, Abschn. 3, wird der Wert der erforderlichen Energieaufnahme  $E_A$  berechnet unter Zugrundelegung einer vereinfachten, linear elastischen/ideal plastischen Form der Federkennlinie des gestoßenen Bauteils, Abschn. 3.2.4. Um einen Eindruck zu bekommen, welche Abweichungen dabei auftreten können gegenüber einer Berechnung mit der gemessenen Kraft-Weg-Kurve an der Stoßstelle, wurde für die vier bei den Orientierungsversuchen (Abschn. 3.3) untersuchten Wandausschnitte auch vergleichsweise mit den gemessenen Kurven  $R = R(f)$ , Abschn. 3.3.3, Bilder 3.3.3/1, 3, 5, und 7, gerechnet. Die Rechnungen sind in einem elektronischen Rechner mittels eines Programms von E. Limberger für Masse-Feder-Masse-Feder-Systeme mit beliebiger Federkennlinie durchgeführt worden. Die Ergebnisse und der Vergleich mit den Werten aus der Näherungsrechnung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Rechnung lieferte die Werte  $x_{2\max}$ , bis zu denen sich die Stoßstellen an den Bauteilausschnitten verschieben würden. Durch Integration der Kurven  $R = R(f)$  bis zu diesen Werten ergab sich  $E_A$ .

Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung. Auch in dem für die Näherung besonders ungünstigen Fall, bei dem die maximale Verformung weit in den Bereich mit großem Lastabfall hineinreicht, Wand Nr. 4  $v_a = 2,6$  m/s, s. Bild 3.3.3/3, tritt nur eine Differenz von - 3 % zwischen der Rechnung mit genäherter und der mit gemessener Kennlinie auf. Die etwas größeren, auf der sicheren Seite liegenden Abweichungen von 5 % und 7 % bei Wand Nr. 5 + 6 sind darauf zurückzuführen, daß zum Abfangen dieser Stöße nur kleine Werte  $x_{2\max}$  erforderlich werden, während für den Ausgleich der gekrümmten Kraftverformungslinie durch eine Gerade ein weit größerer Bereich herangezogen wurde (Bild 3.3.3/7). Will man genauere Werte erzielen muß man in solchen Fällen in einem 2. Schritt ein besser angepaßtes  $c_2$  zugrundelegen.

	Probekörper-Nr.	Federkennlinie nach Bild	$m_1$	$v_a$	$x_{2\max}$	$E_A/E_a$	$(E_A/E_a)$ Näherung Bild 3.3.4/1 bis 3.3.4/4	$(E_A/E_a)$ Näherung $(E_A/E_a)$
	—	—	kg	m/s	m	—	—	—
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht angestaucht	1	3.3.3/1	90	2,0	0,081	0,99	0,99	1,00
				2,6	0,114	0,99	0,99	1,00
			50	2,0	0,056	0,96	0,97	1,01
				2,6	0,077	0,97	0,98	1,01
Elementwand in Mehrschichtbauart 1 Element, Kernschicht nicht angestaucht	4	3.3.3/3	90	2,0	0,062	0,98	0,99	1,01
				2,6	0,182	1,0	0,97	0,97
			50	2,0	0,043	0,95	0,96	1,01
				2,6	0,059	0,97	0,97	1,00
Leichtskelettwand in Ständerbauart	7	3.3.3/5	90	2,0	0,063	0,90	0,89	0,99
				2,6	0,110	0,98	0,97	0,99
			50	2,0	0,039	0,87	0,87	1,00
				2,6	0,064	0,96	0,96	1,00
Elementwand in Mehrschichtbauart 2 Elemente, Kernschicht nicht angestaucht	5+6	3.3.3/7	90	2,0	0,044	0,85	0,86	1,01
				2,6	1)	0,87	0,88	1,01
			50	2,0	0,025	0,60	0,64	1,07
				2,6	0,036	0,64	0,67	1,05

1)  $x_{2\max} > 0,058$ , Restgeschwindigkeit von  $m_2 = 0,558$  m/s

Tabelle zum Anhang III: Erforderliche Energieaufnahme  $E_A$  ermittelt mit den an den Stoßstellen der Probekörper gemessenen Federkennlinien und Vergleich zur Näherungsrechnung mit linear elastischen/ideal plastischen Federkennlinien

