

**Abschlußbericht zur experimentellen  
und rechnerischen Bestimmung der  
dynamischen Belastung von  
Verglasungen durch weichen Stoß**

**T 2935**

T 2935

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5775-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. Dr.-Ing. J.-D. Wörner  
Institut für Statik  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Alexanderstr.7  
64283 Darmstadt  
Telefon (06151) 16-2537  
Telefax (06151) 16-2338  
e-mail: mailbox@statik.tu-darmstadt.

Dipl.-Ing. Jens Schneider  
Telefon (06151) 16-3037  
e-mail:  
schneider@hrz1.hrz.tu-darmstadt.de

# **Abschlußbericht zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß**

## Auftraggeber:

Projektgruppe *Absturzsicherung des SVA Glas im Bauwesen*  
am Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Kolonnenstr. 30

10829 Berlin

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 3  |
| 2     | Experimentelle Untersuchungen.....  | 6  |
| 2.1   | Pendelschlagversuche mit dem 50 kg Doppelreifen-Pendelkörper gegen einen starren Körper.....                  | 6  |
| 2.1.1 | Versuchsaufbau und Meßeinrichtungen.....  | 6  |
| 2.1.2 | Versuchsergebnisse .....  | 6  |
| 2.2   | Pendelschlagversuche gegen vierseitig gelagerte Verglasungen im Normrahmen nach E DIN EN 12600 1998-06.....   | 8  |
| 2.2.1 | Versuchsaufbau und Meßeinrichtungen.....  | 8  |
| 2.2.2 | Versuchsergebnisse .....  | 10 |
| 2.2.3 | Bestimmung der Ersatzsteifigkeit verschiedener Stoßkörper aus 2.2.2, [2].....                                 | 18 |
| 2.3   | Pendelschlagversuche gegen Balkonbrüstungen aus 6 mm emailliertem Einscheibensicherheitsglas .....            | 19 |
| 2.3.1 | Versuchsaufbau.....   | 19 |
| 2.3.2 | Versuchsergebnisse .....  | 21 |
| 2.4   | Bewertung der Versuchsergebnisse .....  | 22 |
| 3     | Finite-Element-Analyse zur rechnerischen Bestimmung der Beanspruchungen bei weichem Stoß.....                 | 23 |
| 3.1   | Allgemeines .....   | 23 |
| 3.2   | Modellierung der Scheibe, der Unterkonstruktion des Pendelkörpers und der Kontaktelemente.....                | 23 |
| 3.3   | Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen.....  | 25 |
| 3.3.1 | Stoß gegen eine starre Wand.....  | 25 |
| 3.3.2 | Versuche im Normrahmen nach E DIN EN 12600 .....  | 25 |
| 3.3.3 | Versuche gegen Balkonbrüstungen .....   | 27 |
| 3.4   | Bewertung der rechnerischen Ergebnisse.....   | 29 |
| 4     | Vereinfachtes Modell für die vierseitig gelagerte Scheibe auf Basis eines Zweimassenschwingers.....           | 30 |
| 4.1   | Allgemeines .....   | 30 |
| 4.2   | Bestimmung der Ersatzsteifigkeit des Doppelreifen-Pendelkörpers .....   | 32 |
| 4.3   | Modalanalyse des Zweimassen-Zweifeder-Modells .....   | 32 |
| 4.4   | Bestimmung der Steifigkeit der Glasscheibe über $\Delta\Delta w=0$ für eine Platte unter Teilflächenlast..... | 34 |
| 4.5   | Bestimmung der mitschwingenden Masse .....  | 35 |
| 4.6   | Vergleich der Ergebnisse und Bewertung .....  | 36 |
| 4.6.1 | Vergleichsberechnungen FE-Modell - Zweimassenschwingermodell .....  | 36 |
| 4.6.2 | Schlußfolgerungen.....  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| 4.7 Bemessung von Isolierglas .....   | 37 |
| 5 Statische Ersatzlasten .....  | 38 |
| 5.1 Allgemeine Ersatzlasttafel.....   | 38 |
| 5.2 Statische Ersatzlasten für die vierseitig gelenkig gelagerte Scheibe.....   | 43 |
| 5.3 Statische Ersatzlasten für die zweiseitig gelenkig gelagerte Scheibe.....   | 45 |
| 5.4 Bestimmung der erforderlichen Fallhöhen zur rechnerischen Bemessung<br>absturzichernder Verglasungen .....                | 45 |
| 6 Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit von gefloatetem Alkali-Kalk-Silicatglas bei<br>Stoßbeanspruchung durch weichen Stoß ..... | 46 |
| 6.1 Einleitung .....  | 46 |
| 6.2 Bestimmung der Bruchspannungen bei Stoßbelastung aus einer Lebens-<br>dauerberechnung.....                                | 47 |
| 6.3 Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit bei Stoßbelastung mit $K_I=K_{Ic}$ .....  | 50 |
| 6.4 Vergleich mit den Versuchsergebnissen .....   | 51 |
| 7 Zusammenfassung.....  | 52 |

## **Auftrag und Veranlassung**

Das Institut für Statik der TU Darmstadt wurde von der Projektgruppe *Absturzsicherung* des SVA *Glas im Bauwesen* am Deutschen Institut für Bautechnik mit der Durchführung von Pendelschlagversuchen an Normscheiben und anderen absturzsichernden Verglasungen mit dem Pendelkörper nach E DIN EN 12600 1998-06 (Doppelreifen) beauftragt. Die Versuche sollten zum Vergleich mit dem alten Pendelkörper nach DIN 52337 und zur Bestimmung von dynamischen und statischen Kennwerten zur Entwicklung eines Rechenmodelles durchgeführt werden.

## **Kurzfassung**

Vom Institut für Statik der Technischen Universität Darmstadt wurden verschiedene Experimente durchgeführt, um die Belastung und das Verhalten von Verglasungen bei weichem Stoß zu untersuchen. In der bauaufsichtlichen Zustimmungspraxis müssen derzeit Nachweise zum Anprall, z.B. bei absturzsichernden Verglasungen, in der Regel durch Versuche an Originalbauteilen geführt werden, die - häufig zu spät beachtet - mit zeitlichem Aufwand und großen Unsicherheiten bei Planern und ausführenden Firmen verbunden sind. Ziel war daher die Entwicklung eines Modells, das einen rechnerischen Nachweis des weichen Stoßes auf Verglasungen ermöglicht. Während der Experimente wurden dazu sowohl die Beschleunigung des stoßenden Körpers während des Stoßvorganges als auch die Dehnungen des Glases auf der Rückseite der beanspruchten Scheiben bestimmt. Experimentelle Vergleiche mit menschlichen Körperstößen zeigen, daß die Belastungen mit dem Doppelreifen-Pendelkörper die des menschlichen Körperstoßes für die bisher vorgeschriebenen Fallhöhen weit übertreffen. Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Rechenmodell mit Hilfe der Methode der Finiten-Elemente entwickelt, das mit den experimentellen Ergebnissen für verschiedene Lagerungsarten gut übereinstimmt und eine Berechnung an beliebigen Stellen der Scheibe zuläßt. Ein weiteres, vereinfachtes Modell auf Basis eines Zweimassen-Schwingers soll Berechnungen ohne großen numerischen Aufwand ermöglichen. Mit diesem Modell wurden statische Ersatzlasten für zweiseitig und vierseitig gelagerte Scheiben mit handelsüblichen Abmessungen bestimmt. Mit einer allgemeinen Ersatzlasttafel, für die nur die Steifigkeit der Scheibe und deren mitschwingende Masse bestimmt werden müssen, können statische Ersatzlasten für beliebige Konstruktionen ermittelt werden.

Die Versuchsergebnisse und bruchmechanische Berechnungen bestätigen zudem, daß die Festigkeit von Floatglas bei kurzer Stoßeinwirkung signifikant höher ist als die in Biegeversuchen nach den Normen ermittelte Festigkeit.

# 1 Einleitung

Glas wird inzwischen sehr häufig nicht nur als ausfachendes Element, sondern auch als konstruktives Element im Bauwesen eingesetzt. Bei der Bemessung dieser Verglasungen ist zu beachten, daß für Glas aufgrund seines Spröbruchverhaltens Belastungen maßgebend werden können, die für übliche Baustoffe in der Regel harmlos sind. Zu diesen Belastungen gehören Stoßbelastungen, beispielsweise der menschliche Körperstoß als weicher Stoß, oder harte Stöße durch herabfallende Gegenstände.

Die Auswirkungen von Stößen durch menschlichen Anprall können besonders bei absturzsichernden Verglasungen, z.B. im Fassadenbau, bei Ganzglasbrüstungen oder bei nichttragenden inneren Trennwänden aus Glas, die Lastannahmen der in entsprechenden Regelwerken angegebenen Holmlasten übertreffen. Aber auch für betretbare Überkopfverglasungen muß mit menschlichen Körperstößen bei der Reinigung der Verglasungen gerechnet werden.

Bisher existiert keine technische Regel für diese Arten von Verglasungen, und es muß für jede Konstruktion eine *Zustimmung im Einzelfall* gemäß dem Ermessen und den Vorschriften der jeweiligen Landesbaubehörden eingeholt werden. Im Rahmen der Zustimmungsv erfahren wird für absturzsichernde Verglasungen und betretbare Überkopfverglasungen üblicherweise der Nachweis des weichen Stoßes durch Bauteilversuche an Originalbauteilen gefordert. Für absturzsichernde Verglasungen werden dazu Pendelschlagversuche mit einem Doppelreifen-Pendelkörper der Masse 50 kg nach E DIN EN 12600 1998-06 durchgeführt, der mit einem Stahlseil an einer Hilfskonstruktion befestigt (Abbildung 1.1) und - je nach Konstruktionsart - aus verschiedenen Fallhöhen gegen die vertikale Verglasung „gependelt“ wird. Dabei sollen als Aufprallpunkte üblicherweise der Bereich der Scheibenmitte, des Scheibenrandes und der Scheibenecke gewählt werden. Der Doppelreifen-Pendelkörper besteht aus einer Schwingmasse aus Stahl und einem diese umgebenden Doppelreifen, der mit 4,0 bar Luftdruck befüllt wird (Abbildung 1.2).

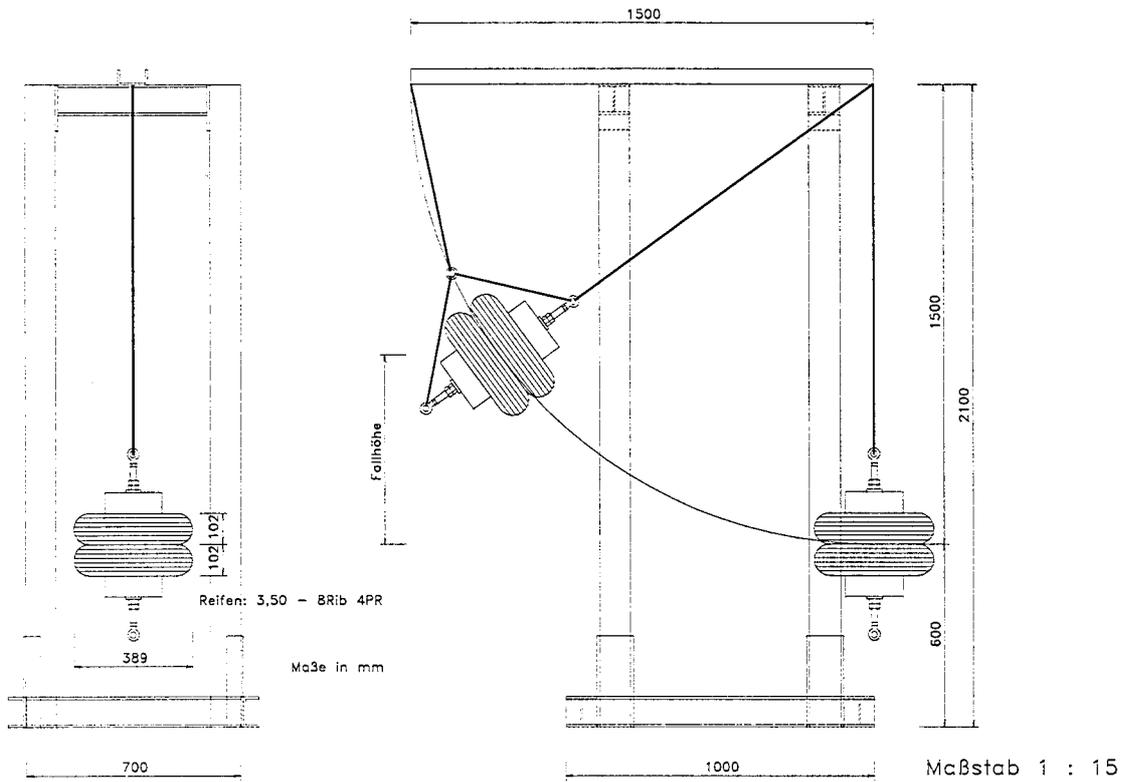


Abbildung 1.1: Konstruktion des Versuchsaufbaus des Instituts für Statik der TU Darmstadt zur Durchführung von Pendelschlagversuchen in Anlehnung an E DIN EN 12600 1998-06

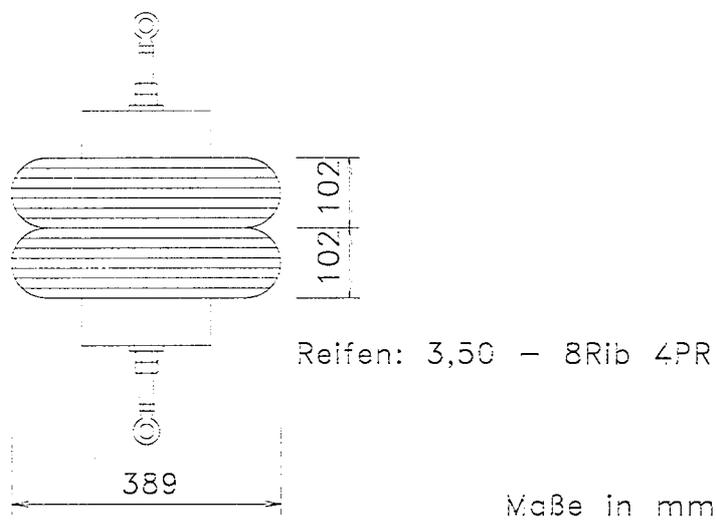


Abbildung 1.2: Doppelreifen-Pendelkörper nach E DIN EN 12600 1998-06,  $m=50$  kg

Hinweise über Anforderungen an absturzsichernde Verglasungen und betretbare Überkopfverglasungen im Rahmen der Zustimmungsverfahren bieten z.B. die Merkblätter der Landesstelle für Bautechnik des LGA Baden-Württemberg [1].

Da die Tauglichkeit jeder neuen Verglasung derzeit versuchstechnisch nachgewiesen werden muß und sich die Zustimmungspraxis in den einzelnen Bundesländern teilweise erheblich unterscheidet, besteht eine Planungsunsicherheit für Planer und ausführende Firmen. Damit verbunden sind Kosten, die weniger die tatsächlichen Versuchskosten für die Bauteilversuche betreffen, sondern vielmehr Folgekosten durch Austausch von Scheiben und/ oder Verzugskosten. Aus diesem Grund wird vom Sachverständigenausschuß (SVA) *Glas im Bauwesen* des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) eine technische Regel für absturzsichernde Verglasungen erarbeitet. Bestandteil dieser Regel soll ein rechnerischer Nachweis zum weichen Stoß für absturzsichernde Verglasungen sein.

Von der FMPA Stuttgart und dem Institut für Statik der TU Darmstadt wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die folgende Ziele haben:

- die Erarbeitung eines Rechenmodells zum weichen Stoß auf Verglasungen und
- einen Vergleich zwischen Belastung durch menschlichem Körperstoß und Belastung durch Stoßkörper.

## **2 Experimentelle Untersuchungen**

### **2.1 Pendelschlagversuche mit dem 50 kg Doppelreifen-Pendelkörper gegen einen starren Körper**

#### **2.1.1 Versuchsaufbau und Meßeinrichtungen**

Um dynamische und statische Kennwerte zu erhalten, wurden zunächst Pendelschlagversuche aus verschiedenen Fallhöhen gegen eine starre Wand durchgeführt. Der Luftdruck in den Reifen wurde auf 4,0 bar eingestellt. Während der Versuche wurde die Beschleunigung des Pendelkörpers gemessen. Dazu wurden in die Mitte der oberen und der unteren Schwingmasse Beschleunigungsaufnehmer *Hottinger Baldwin Meßtechnik* mit einem Meßbereich von  $2000 \text{ m/s}^2$  installiert. Pro Versuch wurden zwei Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Vorversuche mit vier Beschleunigungsaufnehmern, bei denen zusätzlich je zwei Beschleunigungsaufnehmer um  $90^\circ$  versetzt angebracht worden waren, hatten ergeben, daß eine Querbeschleunigung des Pendelkörpers durch Verdrehen während der Versuche vernachlässigbar ist. Die Versuchsdaten wurden von einem digitalen Meßverstärker (*spider8* oder *DMC* der Fa. *Hottinger Baldwin Meßtechnik*) aufgenommen und mit der zugehörigen Software (*catman 2.1* und *Microsoft Excel*) ausgewertet. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

#### **2.1.2 Versuchsergebnisse**

Eine Auswahl der Versuchsergebnisse bei Pendelschlagversuchen gegen die starre Wand ist in Abbildung 2.1, Abbildung 2.2 und Tabelle 2.1 dargestellt. Eine Zusammenstellung aller Untersuchungen ist in den Anlagen dargestellt.

Pendelversuch gegen starre Wand, 50kg Pendelmasse

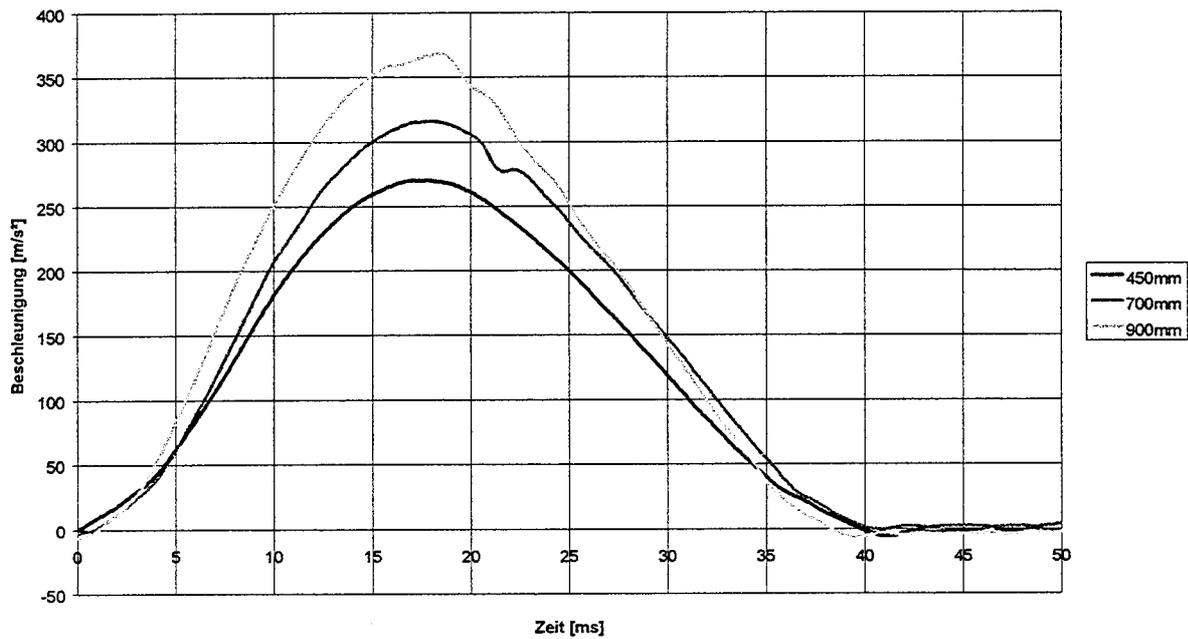


Abbildung 2.1: Pendelbeschleunigungen bei Stoß gegen eine starre Wand für die Fallhöhen 450 mm, 700 mm und 900 mm, Beschleunigungs-Zeit-Verlauf

Tabelle 2.1: Maximale Pendelbeschleunigungen bei Stoß gegen eine starre Wand für  $m=45$  kg und  $m=50$  kg

| Fallhöhe [mm] | $a_{\max}$ [m/s <sup>2</sup> ]<br>bei $m=50$ kg | $a_{\max}$ [m/s <sup>2</sup> ]<br>bei $m=45$ kg | bei $t$ [ms] | $t_{\max}$ [ms] |
|---------------|---|---|--------------|-----------------|
| 150           | -   | 142   | ca. 20       | ca. 40          |
| 200           | -   | 148   | ca. 20       | ca. 40          |
| 250           | -   | 181   | ca. 20       | ca. 40          |
| 450           | 279   | 270   | ca. 20       | ca. 40          |
| 700           | 342   | 327   | ca. 20       | ca. 40          |
| 900           | 375   | -   | ca. 20       | ca. 40          |
| 1000          | -   | 384   | ca. 20       | ca. 40          |

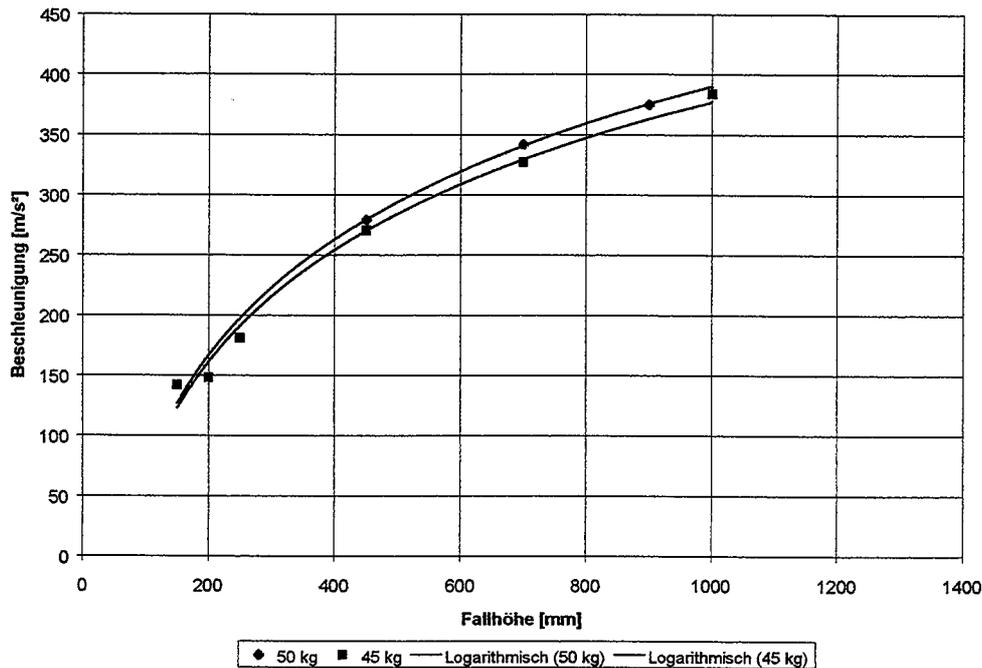


Abbildung 2.2: Maximale Beschleunigungen des Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Fallhöhe

## 2.2 Pendelschlagversuche gegen vierseitig gelagerte Verglasungen im Normrahmen nach E DIN EN 12600 1998-06

### 2.2.1 Versuchsaufbau und Meßeinrichtungen

Die Scheibengröße beträgt 876 mm x 1938 mm, die Einstandstiefe der Scheiben im Normrahmen 20 mm auf EPDM der Shore-Härte IRHD 60±5 von 10 mm Dicke. Der Aufprallpunkt lag bei den durchgeführten Versuchen in der Scheibenmitte, am Scheibenrand (horizontal 300 mm Abstand von der Glaskante, vertikal Scheibenmitte) oder an der Scheibenecke (jeweils 300 mm Abstand von den Scheibenkanten).

Es wurde jeweils die Beschleunigung des Pendelkörpers wie unter 2.1.1 beschrieben gemessen. Neben den Versuchen mit dem Doppelreifen-Pendelkörper wurde Prüfungen mit dem Bleischrotsack nach DIN 52337 (Vorgängernorm der E DIN EN 12600 1998-06) und mit menschlichem Körperstoß, Fußtritt oder Ellenbogenstoß ausgeführt.

Es wurden acht Versuchsreihen durchgeführt:

1. Versuche an 10 Scheiben VSG aus Floatglas der Nenndicke 2 x 3 mm mit 0,38 mm PVB-Folie.
2. Versuche an einer Scheibe aus ESG der Nenndicke 8 mm mit zusätzlicher Dehnungsmessung auf der schlagabgewandten Seite der Scheibe (Messung in Scheibenmitte, Meßrichtung parallel zu den Scheibenkanten).
3. 5 Versuche mit dem Bleischrotsack nach DIN 52337 an einem Versuchskörper entsprechend der Versuchsreihe 2 mit Dehnungsmessung auf der schlagabgewandten Seite der Scheibe.
4. 6 Versuche an einem Versuchskörper entsprechend der Versuchsreihe 2 mit Belastung durch menschlichen Körperstoß mit Menschen verschiedener Masse und mit Dehnungsmessung auf der schlagabgewandten Seite der Scheibe. Es wurde durch einen Schulterstoß mit einem Anlauf von 2,50 m die Scheibenmitte gestoßen.
5. 4 Versuche an Isolierglas 2 x 6 mm Floatglas mit 0,76 mm PVB-Folie (innere, schlagzugewandte Scheibe), 15 mm SZR und 8 mm Floatglas (äußere, schlagabgewandte Seite) mit Dehnungsmessung im Scheibenzwischenraum auf der VSG-Scheibe und Dehnungsmessung auf der schlagabgewandten Seite der Floatglasscheibe. Hierbei wurden verschiedene Aufprallstellen variiert.
6. 7 Versuche an einem Versuchskörper entsprechend der Versuchsreihe 5 mit Belastung durch menschlichen Körperstoß mit Menschen verschiedener Masse aus verschiedenen Anlaufstrecken bis zu 5,0 m oder durch Fußtritt.
7. 14 Versuche an Isolierglas 6 mm ESG (innere, schlagzugewandte Scheibe), 15 mm SZR und 8 mm ESG (äußere, schlagabgewandte Seite) mit Dehnungsmessung im Scheibenzwischenraum auf beiden ESG-Scheiben. Hierbei wurden verschiedene Aufprallstellen variiert.
8. 5 Versuche an einem Versuchskörper entsprechend der Versuchsreihe 5 mit Belastung durch menschlichen Körperstoß mit Menschen verschiedener Massen aus verschiedenen Anlaufstrecken oder durch Fußtritt/ Ellenbogenstoß.

Die Dehnungen wurden an den Aufprallstellen mit Dehnungsmeßstreifen gemessen, deren Meßrichtung parallel zu den Scheibenkanten war und über einen digitalen Meßverstärker mit einem PC aufgenommen und ausgewertet. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Dehnungsmeßstreifen im Scheibenzwischenraum wurden im Werk der Fa. *Kinon-Sicherheitsglas*, VEGLA Vereinigte Glaswerke, Aachen vor der Weiterverarbeitung zu Isolierglas angebracht. Die Versuche an Einfachglas wurden im Werk der *Flachglas AG*, Gelsenkirchen, durchgeführt, die Versuche an Isolierglas an der MPA Darmstadt. Das Isolierglas war luftgefüllt.

## 2.2.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind auszugsweise in Abbildung 2.3 bis Abbildung 2.17 aufgeführt. Die Anlagen beinhalten alle Versuchsergebnisse in Tabellenform und in Form von Beschleunigungs-Zeit-Verläufen bzw. Dehnungs-Zeit-Verläufen. Bei den Scheiben aus Einfachverglasung VSG aus 2 x 3 mm Floatglas kam es in unterschiedlichen Versuchen und Fallhöhen entweder zum Bruch beider Scheiben, zum Bruch der schlagabgewandten Scheibe oder zu keinem Bruch der Scheiben trotz Steigerung bis zur Fallhöhe 1200 mm.

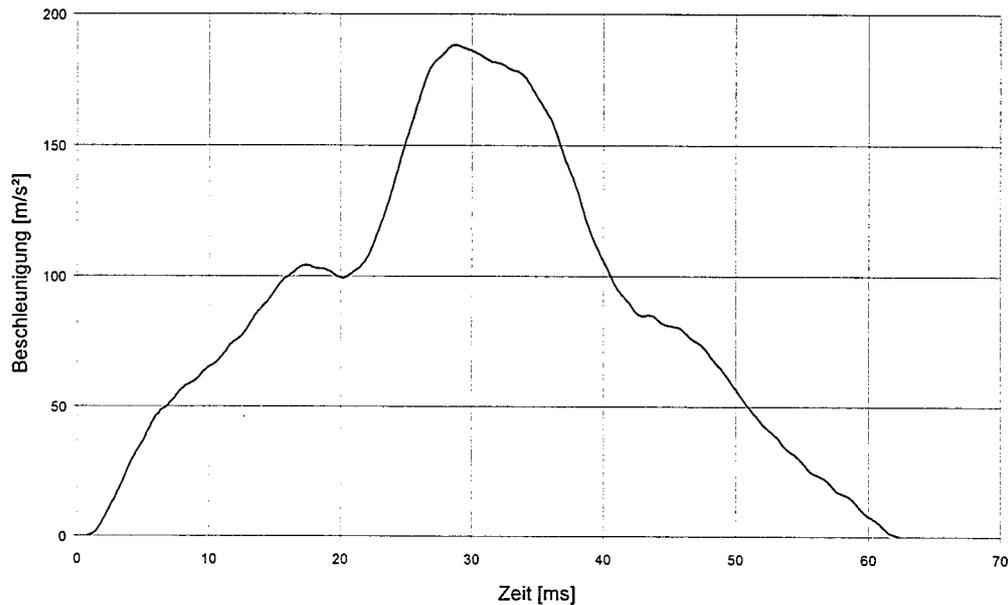


Abbildung 2.3: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf des Pendelkörpers für VSG aus 2x3 mm Floatglas bei 450 mm Fallhöhe des Pendelkörpers (Scheibe nicht zerstört)

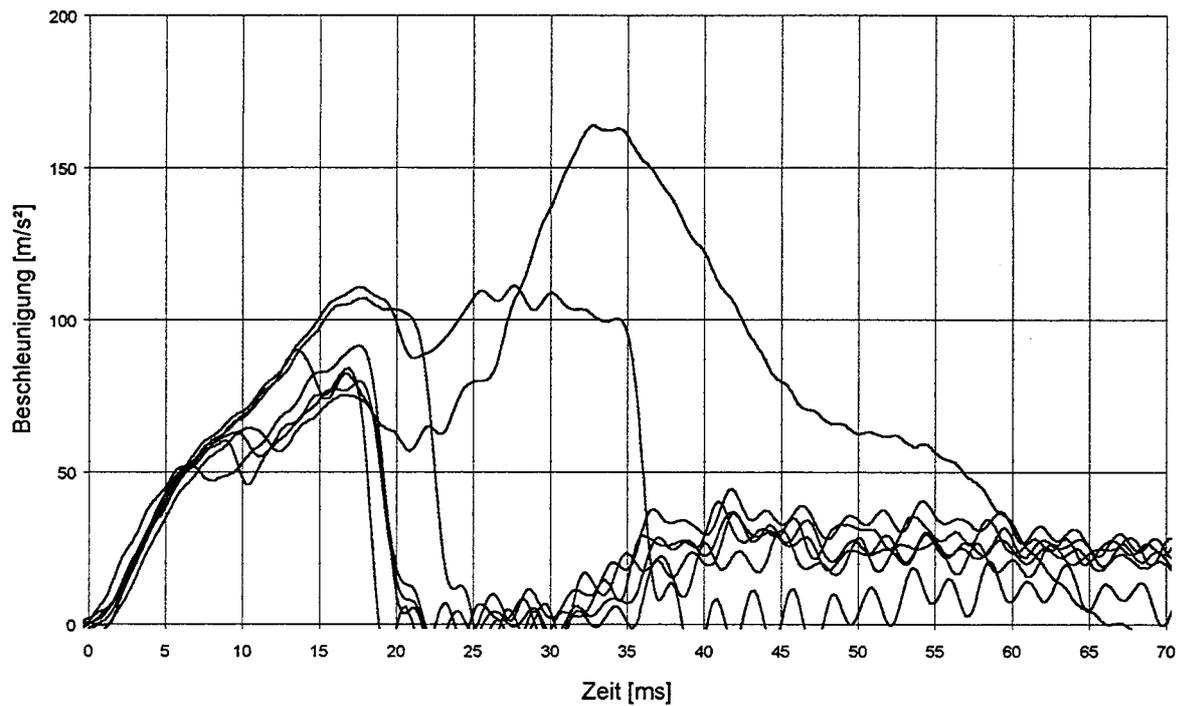


Abbildung 2.4: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf des Pendelkörpers für VSG aus 2x3 mm Floatglas bei 450 mm Fallhöhe (Scheiben zerstört)

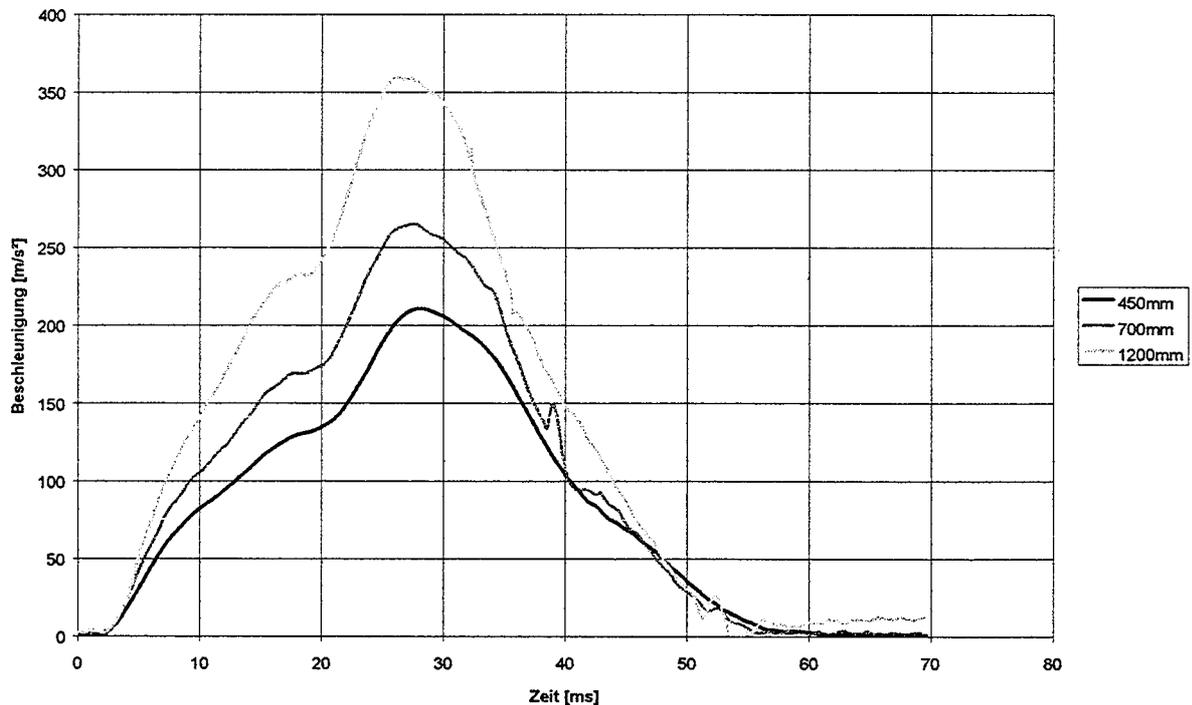


Abbildung 2.5: Beschleunigungs-Zeit-Verläufe des Pendelkörpers für ESG 8 mm und die Fallhöhen 450 mm, 700 mm und 1200 mm, jeweils gemittelt aus den Versuchen V15 bis V38

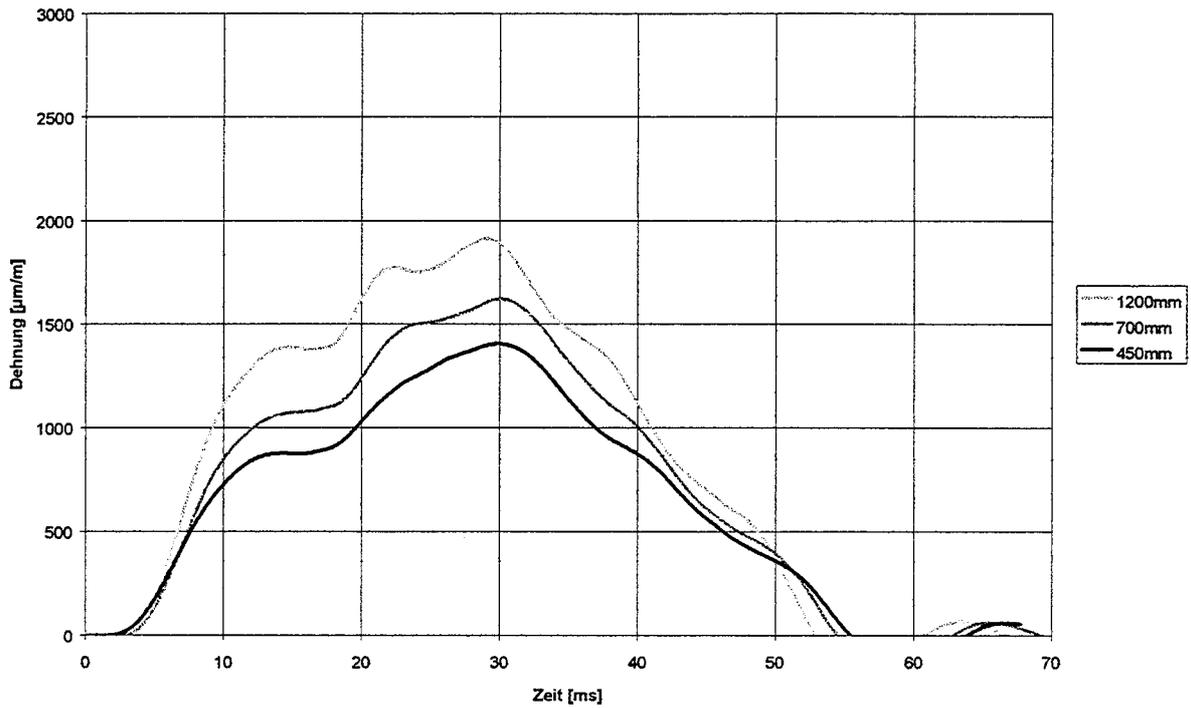


Abbildung 2.6: Dehnungs-Zeit-Verläufe für ESG 8 mm und die Fallhöhen 450 mm, 700 mm und 1200 mm, jeweils gemittelt aus Versuchen V15- V38, horizontale Dehnungen

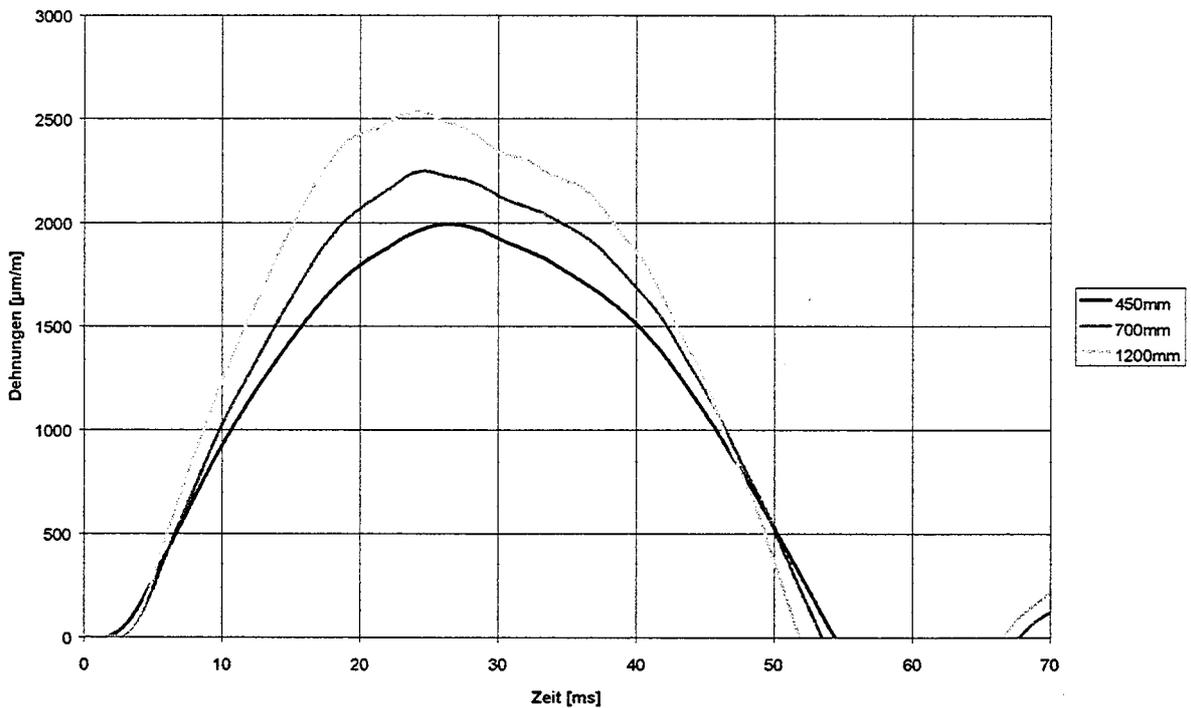


Abbildung 2.7: Dehnungs-Zeit-Verläufe für ESG 8 mm und die Fallhöhen 450 mm, 700 mm und 1200 mm, jeweils gemittelt aus Versuchen V15-V38, vertikale Dehnungen

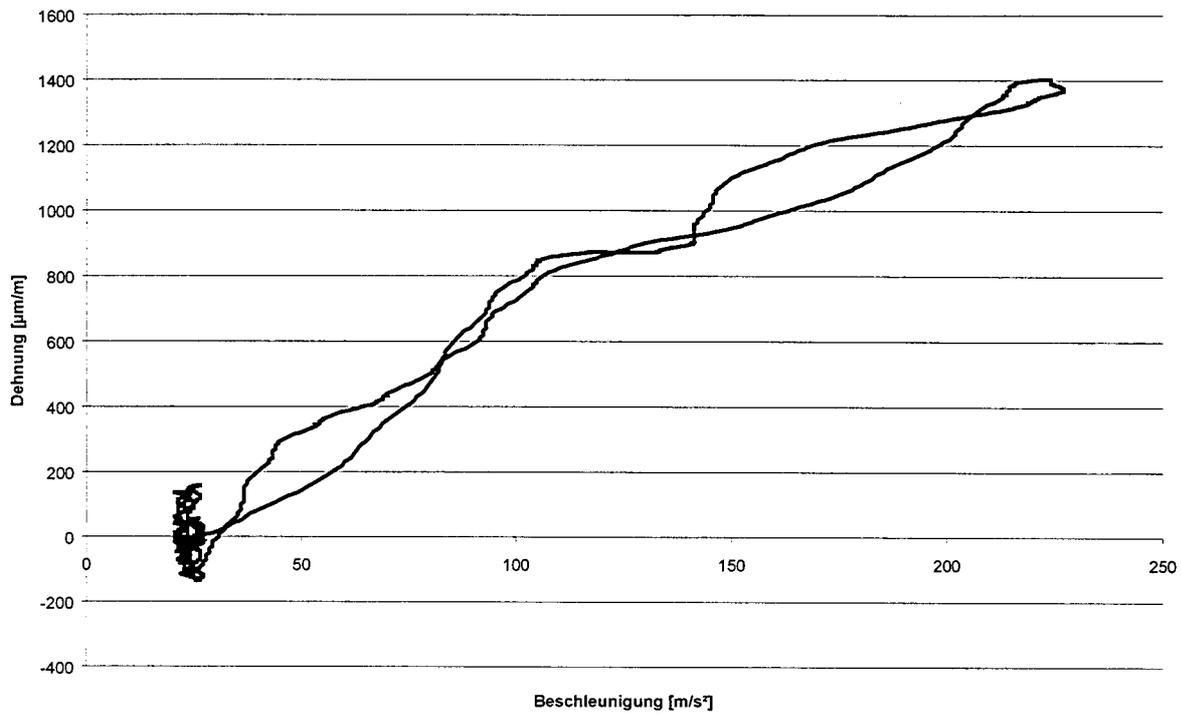


Abbildung 2.8: Dehnungs-Beschleunigungs-Verlauf, exemplarisch für V15, ESG 8 mm und 450 mm Fallhöhe (Dehnung = Scheibe, Beschleunigung = Pendelkörper)

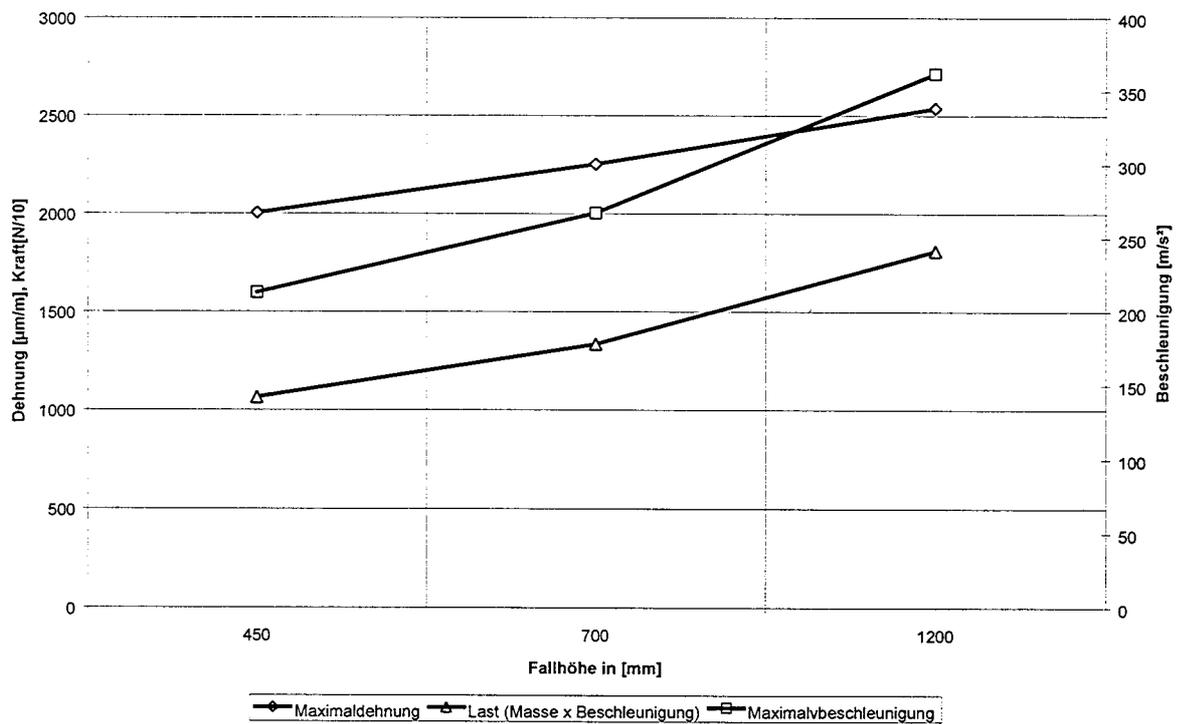


Abbildung 2.9: Maximaldehnung der Scheibe, Maximalbeschleunigung des Pendelkörpers und errechnete Maximallast ( $F=m \cdot a_{max}$ ) für verschiedene Fallhöhen

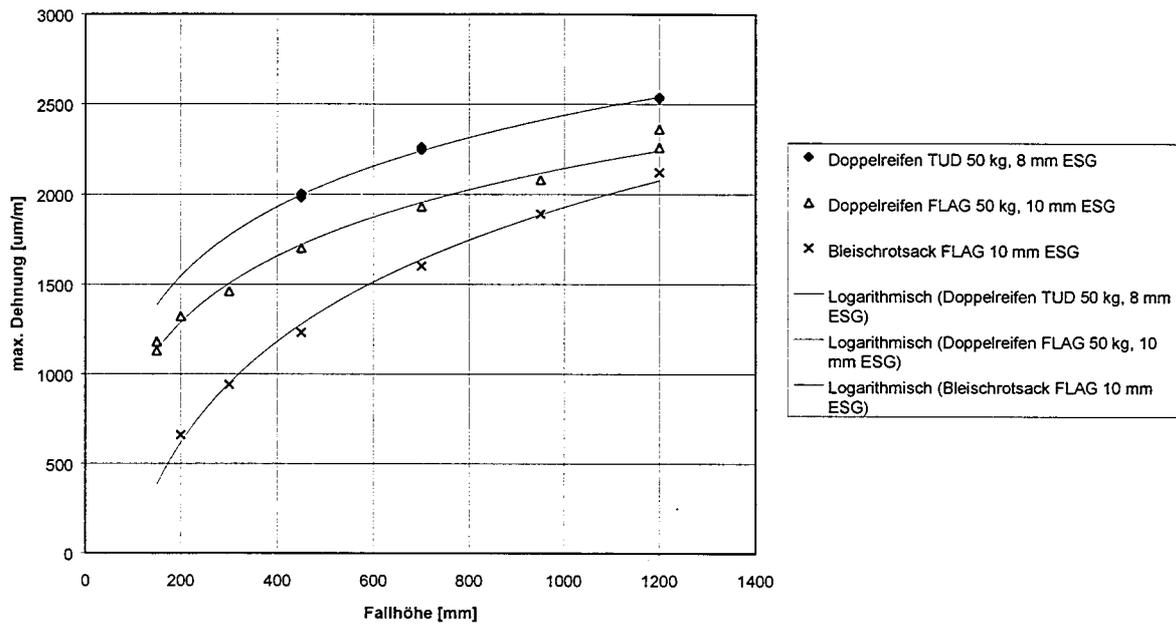


Abbildung 2.10: Vergleich zwischen maximalen Dehnungen, Doppelreifen-Versuchskörper nach E DIN EN 12600 und Bleischrotsack nach DIN 52337 [4]

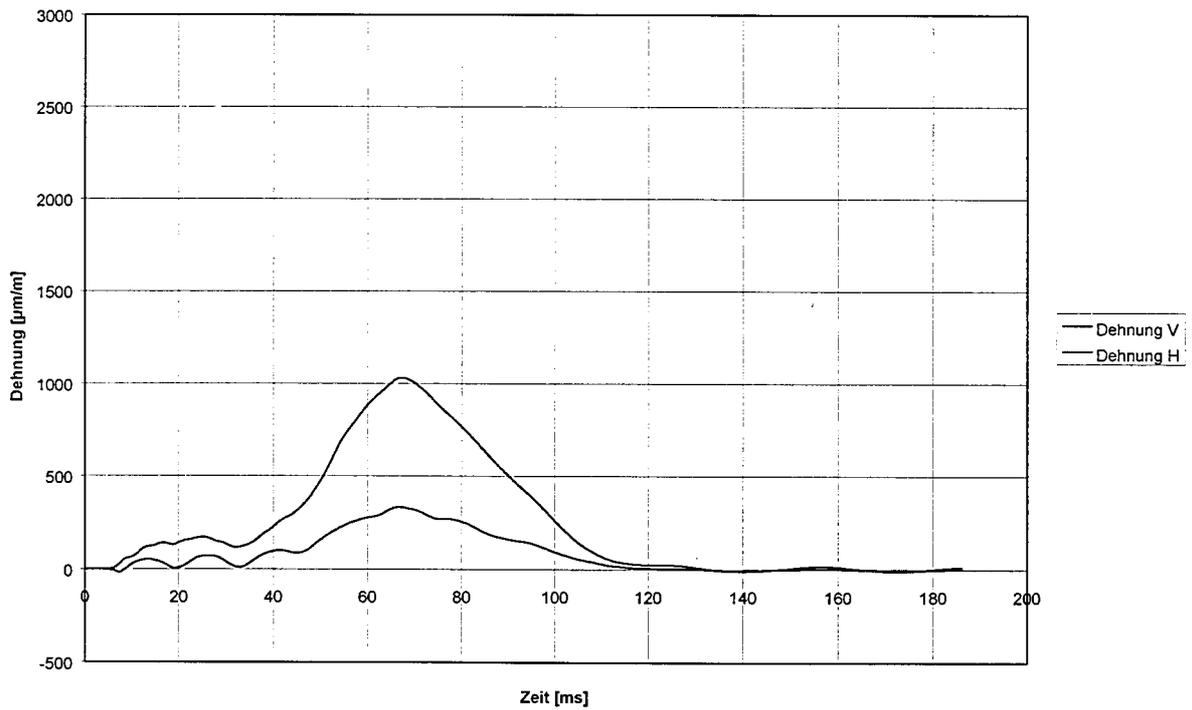


Abbildung 2.11: Dehnungs-Zeit-Verlauf bei menschlichem Körperstoß gegen ESG 8 mm, Masse 90 kg, Anlaufstrecke ca. 2,50 m (Scheibenmitte)

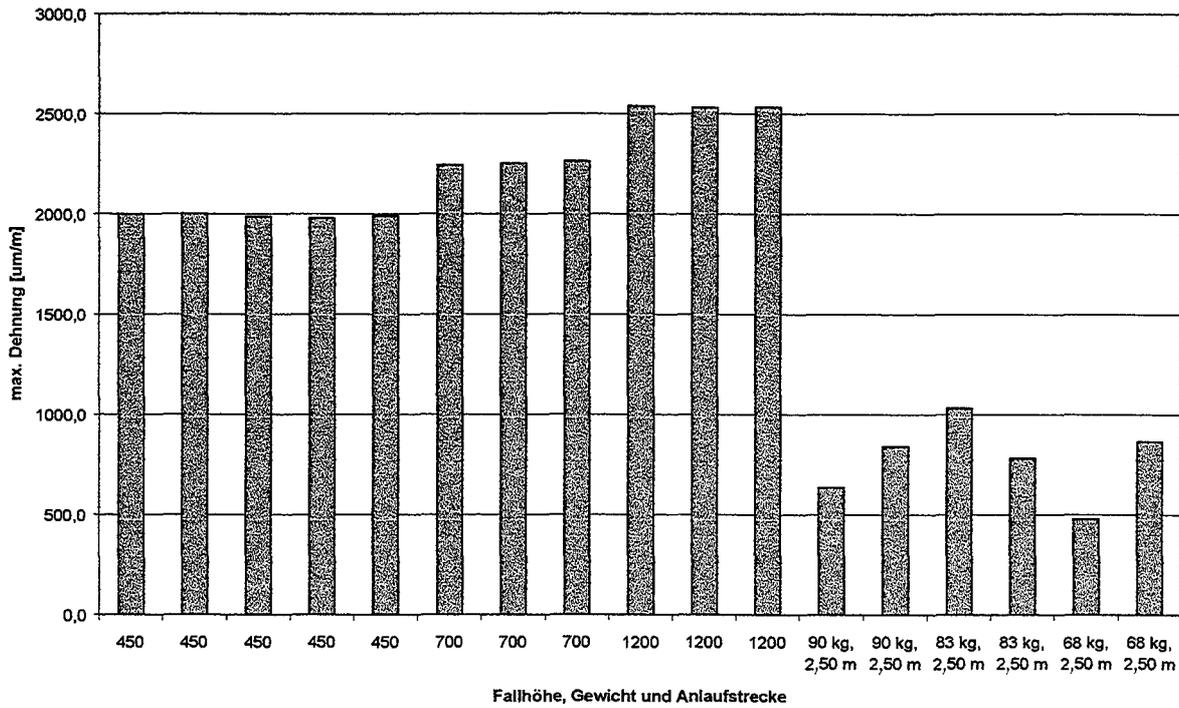


Abbildung 2.12: Vergleich zwischen Maximaldehnungen bei verschiedenen Fallhöhen und Maximaldehnungen bei menschlichen Körperstößen am Normrahmen mit ESG 8 mm

V1 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen)  
 Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 200 mm, keine Scheibe zerstört

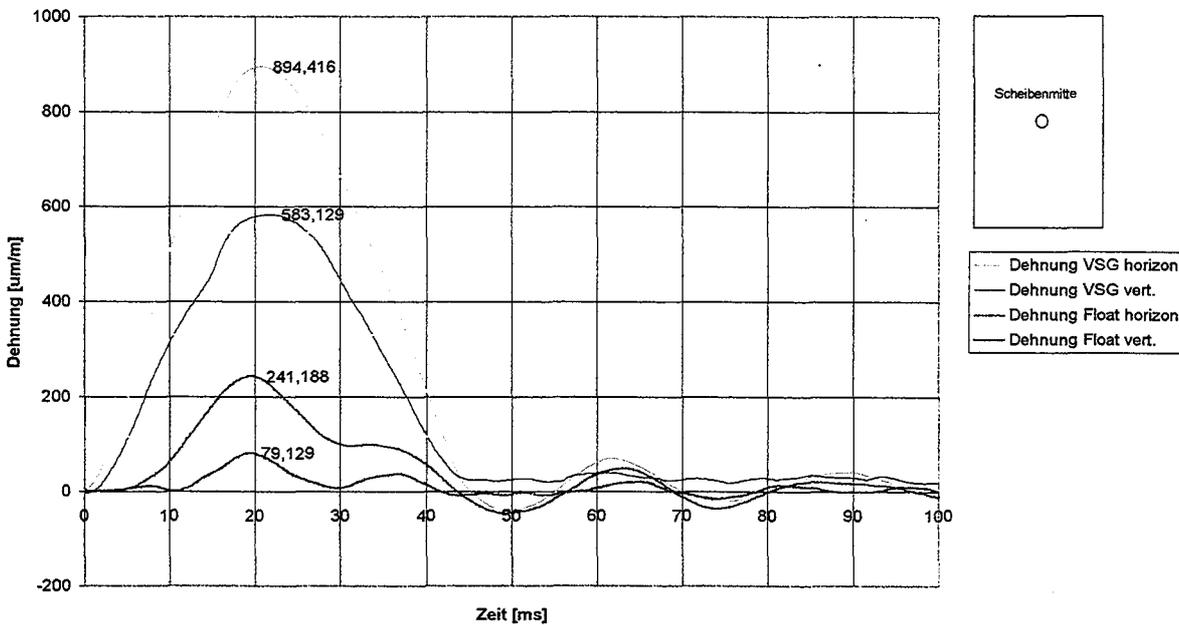


Abbildung 2.13: Gemessene Dehnungen an Isolierglas VSG 2 x 6 mm Floatglas (innere Sch.), 8 mm Floatglas (äußere Sch.) bei Stoß mit 200 mm Fallhöhe (Scheibenmitte)

V25 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 700 mm

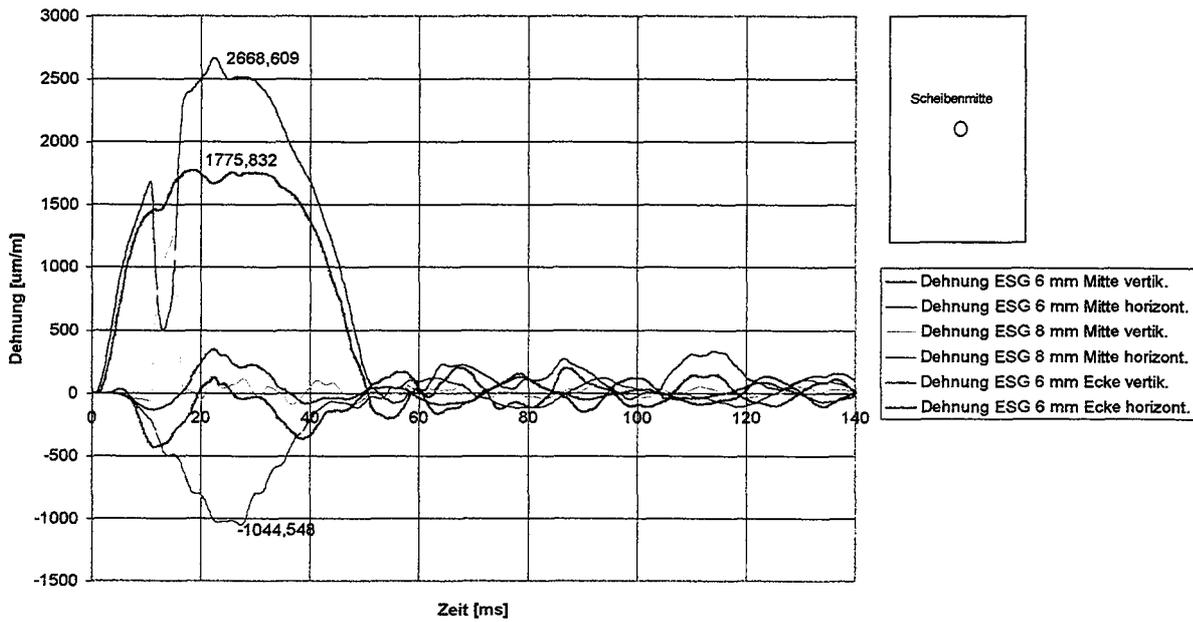


Abbildung 2.14: Gemessene Dehnungen an Isolierglas 6 mm ESG (innere Scheibe), 8 mm ESG (äußere Sch.) bei Stoß mit Pendelkörper aus 700 mm Fallhöhe (Scheibenmitte)

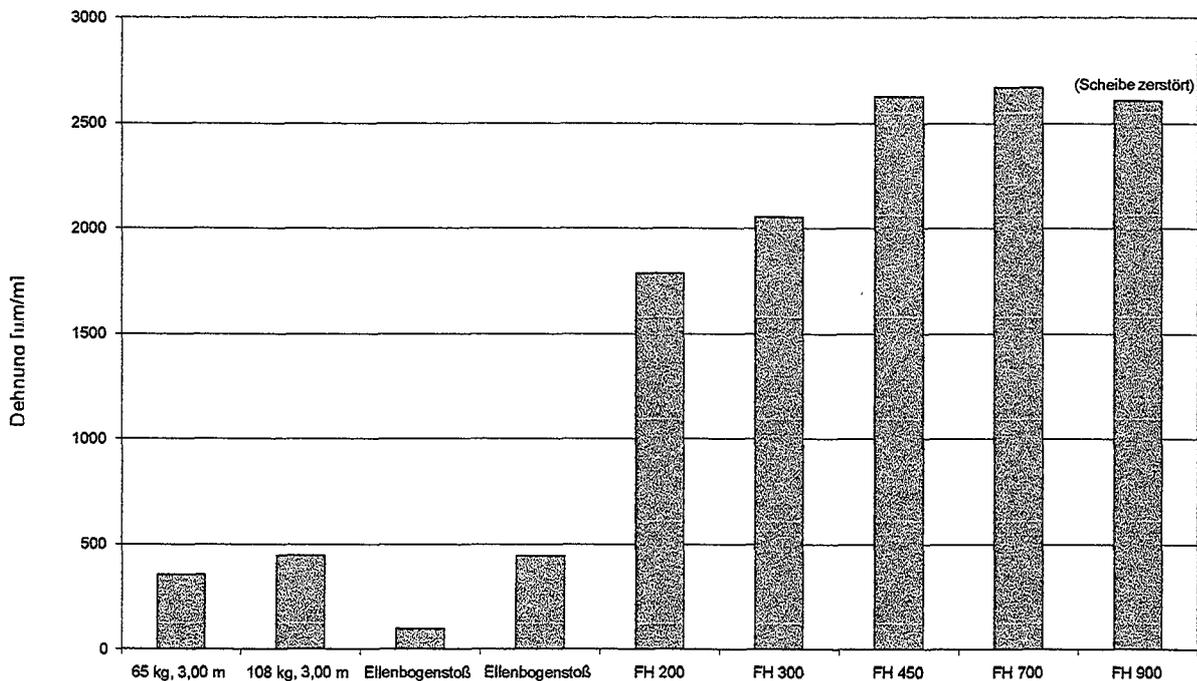


Abbildung 2.15: Vergleich zwischen Maximaldehnungen bei verschiedenen Fallhöhen und Maximaldehnungen bei menschlichen Körperstößen an Isolierglas 6 mm ESG/ 8 mm ESG (Scheibenmitte), Messung der Dehnung auf 6 mm ESG

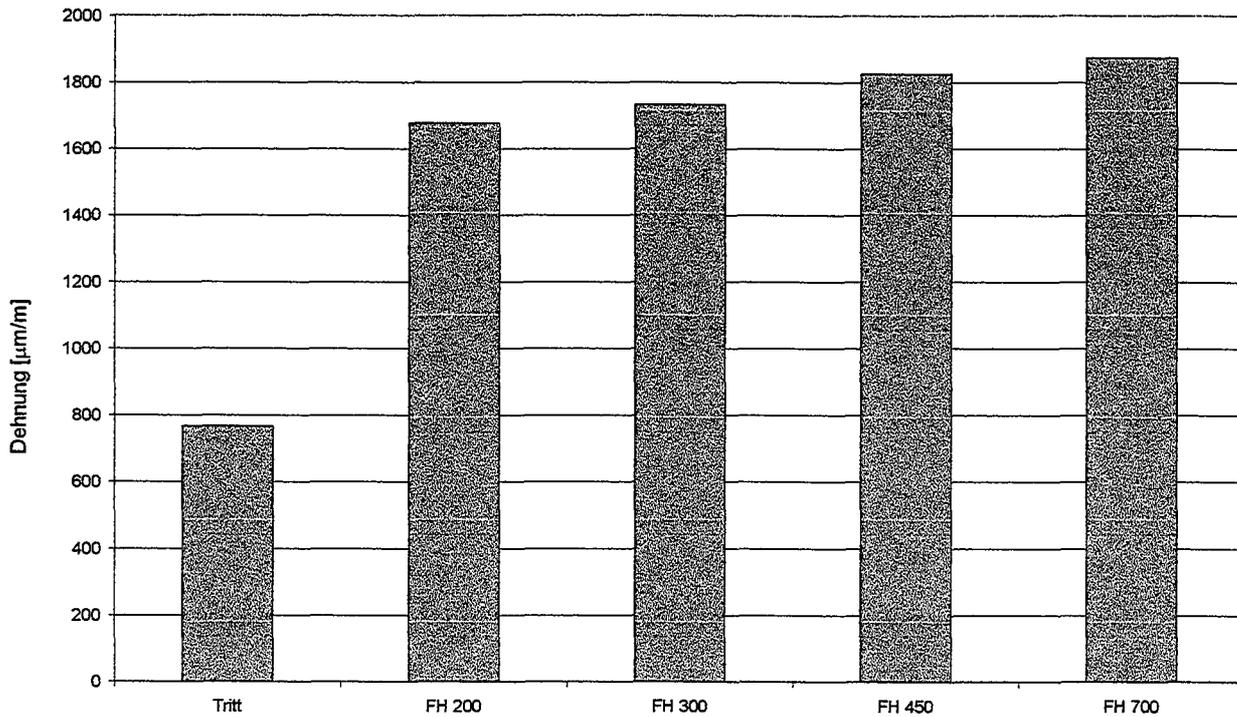


Abbildung 2.16: Vergleich zwischen Maximaldehnungen bei verschiedenen Fallhöhen und Maximaldehnungen bei menschlichen Körperstößen an Isolierglas 6 mm ESG/ 8 mm ESG (Scheibenecke), Messung der Dehnung auf 6 mm ESG

V11 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, menschlicher Stoß 108 kg mit 3 m Anlauf

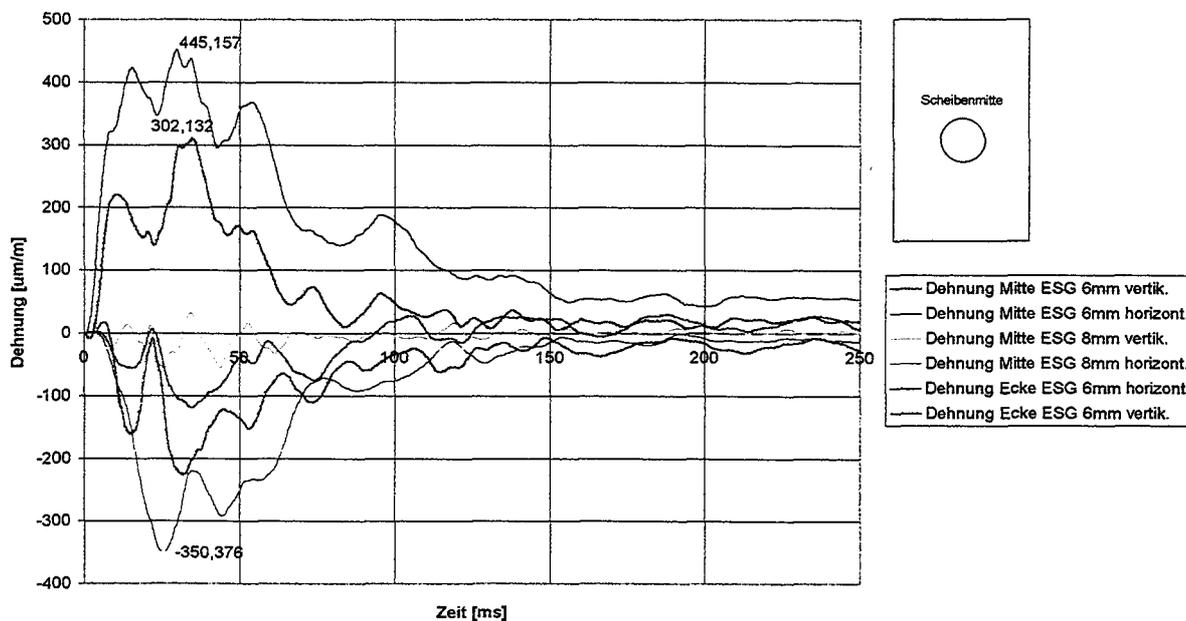


Abbildung 2.17: Dehnungs-Zeit-Verlauf bei menschlichem Körperstoß gegen Isolierglas 6 mm ESG (innere Sch.), 8 mm ESG (äußere Sch.), Masse 108 kg, Anlaufstrecke ca. 3,0 m

### 2.2.3 Bestimmung der Ersatzsteifigkeit verschiedener Stoßkörper aus 2.2.2, [2]

Mit dem in Kapitel 4. dargestellten Modell des Systems Stoßkörper - Scheibe als Zweimassenschwinger wurden die Ersatzsteifigkeiten der verschiedenen Stoßkörper iterativ über die erzeugte Grundschiwingung zurückgerechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Zu beachten ist, daß die Ersatzsteifigkeit derselben Versuchspersonen von Versuch zu Versuch zunahm (siehe auch Abbildung 2.12), da offensichtlich die Angst vor Verletzung nach bereits durchgeführten Versuchen abnahm. Die Annahme, daß die während des Körperstoßes wirkende Stoßkörpermasse der Masse der Versuchspersonen entspricht, ist eine vereinfachte Näherung. In [19] wird für die wirksame Stoßkörpermasse 60% der Gesamtkörpermasse angegeben.

Tabelle 2.2: Ersatzsteifigkeiten verschiedener Stoßkörper bei Ansatz eines Zweimassenschwinger-Modells

| Stoßkörper/ Versuchsperson            | Masse [kg] | Ersatzsteifigkeit für $m_{\text{wirksam}} = 100\% m_{\text{Körper}}$ | Ersatzsteifigkeit für $m_{\text{wirksam}} = 60\% m_{\text{Körper}}$ |
|---------------------------------------|------------|--|---|
| Doppelreifen-Pendelkörper 4,0 bar     | 50         | 395700   |   |
| Doppelreifen-Pendelkörper 3,5 bar [2] | 50         | 308000   |   |
| Glaskugelsack [2]                     | 50         | ca. 160000   |   |
| Bleischrotsack                        | 45         | ca. 550000   |   |
| Dummy [2]                             | 105        | ca. 500000   |   |
| Person 1                              | 90         | ca. 289000   | ca. 121000  |
| Person 2                              | 85         | ca. 484000   | ca. 168000  |
| Person 3                              | 68         | ca. 700000   | ca. 204000  |
| Person 4 [2]                          | 76         | ca. 350000   | ca. 114000  |
| Person 5 [2]                          | 77         | ca. 440000   | ca. 127000  |
| Person 6 [2]                          | 89         | ca. 95000  | ca. 47000   |
| Person 7 [2]                          | 82         | ca. 200000   | ca. 82000   |

## 2.3 Pendelschlagversuche gegen Balkonbrüstungen aus 6 mm emailliertem Einscheibensicherheitsglas

### 2.3.1 Versuchsaufbau

Obwohl die Versuche im Normrahmen nach E DIN EN 12600 eine Aussagekraft bezüglich der Vergleichbarkeit einzelner Glasprodukte und Stoßkörper bieten, ist aus einer Vielzahl von durchgeführten Pendelschlagversuchen an Originalbauteilen bekannt, daß die Steifigkeit der Unterkonstruktion einen entscheidenden Einfluß auf das Versuchsergebnis haben kann, da die Stoßenergie sowohl durch die Verformung des Stoßkörpers als auch die des gestoßenen Körpers und seiner Unterkonstruktion abgebaut wird.

Um die tatsächliche Beanspruchung der Scheiben bei Einbau in eine Originalkonstruktion experimentell bestimmen zu können und gleichzeitig den häufigsten Anwendungsfall der rein ausfachenden Verglasungen zu berücksichtigen, wurde eine ausfachende Balkonbrüstung aus emailliertem Einscheiben-Sicherheitsglas der Nenndicke 6 mm untersucht. Die Abmessungen betragen 1695 mm x 1050 mm. Die Scheibe war mit Dichtungsbändern aus EPDM und einer Einstandstiefe von ca. 20 mm in einen Aluminiumrahmen geringer Steifigkeit eingefast und zweiseitig in der Schwerachse der Aluminiumpfosten mit Blechschrauben befestigt. Die Flächenträgheitsmomente der Pfosten um die untersuchte Biegeachse betragen  $31,49 \text{ cm}^4$ .

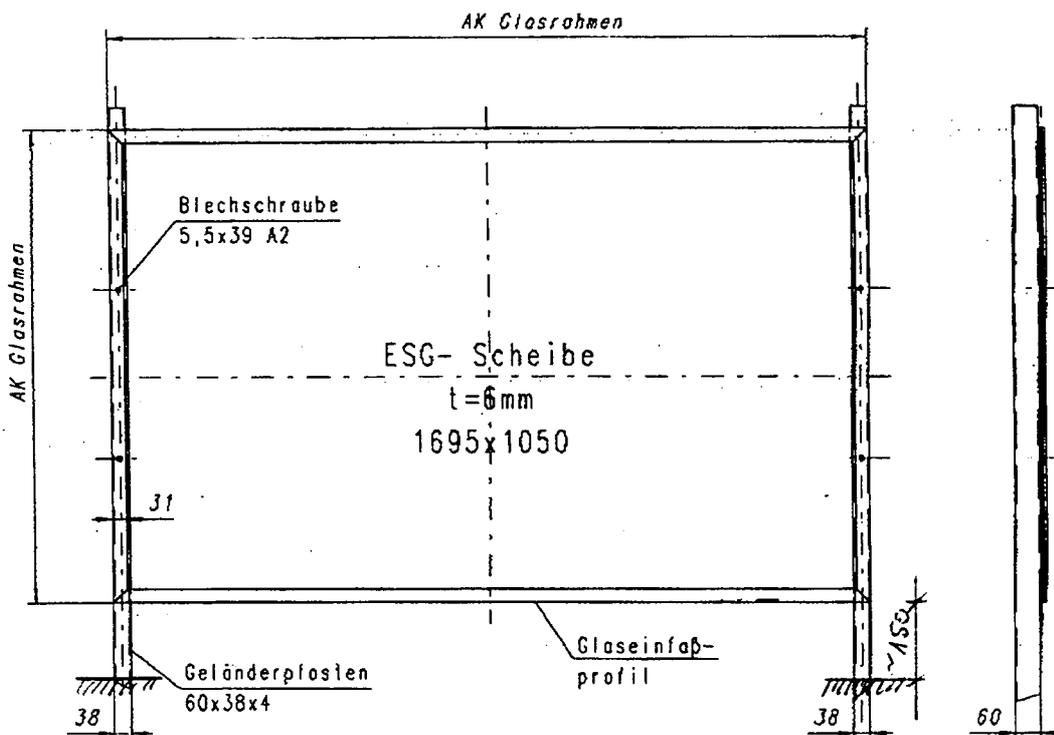


Abbildung 2.18: Untersuchte Balkonbrüstungsverglasung

Die Pfosten wurden mit Schraubzwingen an einer steifen Unterkonstruktion befestigt, so daß sich zwischen Unterkante der Scheibe und Einspannstelle ein Abstand von ca. 150 mm ergab. Die Emaillierung des ESG war auf der schlagzugewandten Seite. Es wurden verschiedene Fallhöhen mit unterschiedlichen Aufprallstellen („Scheibenmitte“ und „untere Scheibenecke“, Abstand jeweils 250 mm von den Scheibenkanten) untersucht. In Tabelle 2.3 sind die durchgeführten Versuche dargestellt. Es wurden die Beschleunigungen des Pendelkörpers gemessen.

Tabelle 2.3: Durchgeführte Versuche an Balkonbrüstungen 1695 mm x 1050 mm x 6 mm

| Scheibe | Versuch | Aufprallstelle | Fallhöhe [mm] |
|---------|---------|----------------|---------------|
| 1       | 1       | Mitte          | 450           |
| 1       | 2       | Mitte          | 700           |
| 2       | 3       | Mitte          | 450           |
| 2       | 4       | Mitte          | 700           |
| 2       | 5       | Ecke           | 450           |
| 3       | 6       | Mitte          | 450           |
| 3       | 7       | Mitte          | 700           |
| 3       | 8       | Ecke           | 450           |
| 3       | 9       | Ecke           | 700           |

### 2.3.2 Versuchsergebnisse

In Abbildung 2.19 und Abbildung 2.20 sind die gemessenen Beschleunigungen des Pendelkörpers dargestellt.

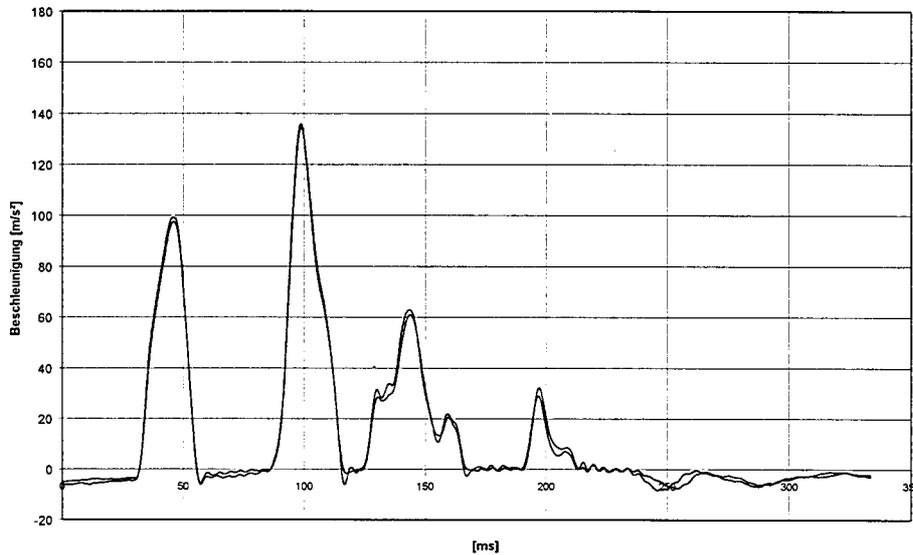


Abbildung 2.19: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf für die Fallhöhe 450 mm und Stoß in die Scheibenmitte

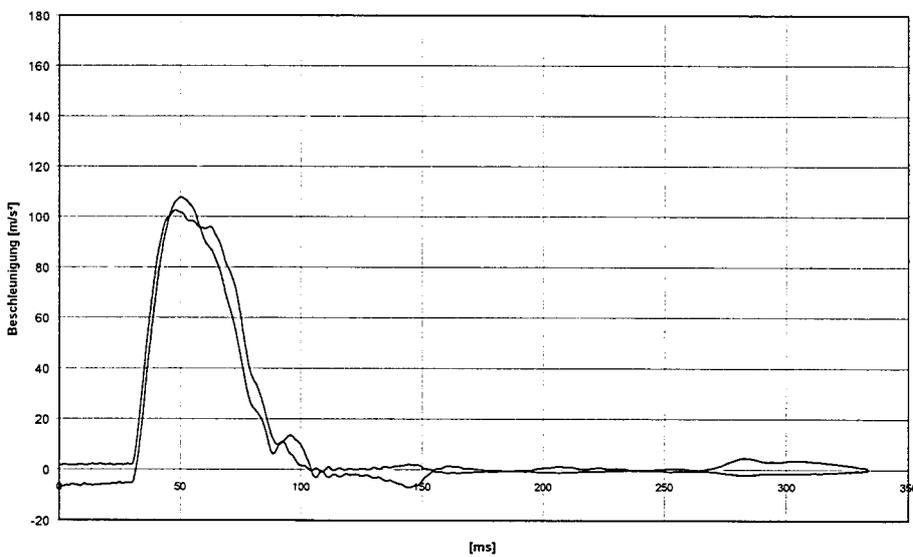


Abbildung 2.20: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf für die Fallhöhe 450 mm und Stoß in die Scheibenecke

Wie aus den Versuchsergebnissen zu erkennen ist, kommt es beim Stoß in die Mitte zu einem zweimaligen Nachschlagen, wobei der zweite Stoß eine höhere Beanspruchung hervorruft.

## 2.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die aus den Versuchen gewonnen Beschleunigungs- und Dehnungs-Zeitverläufe streuen trotz der nicht sehr exakten Höhenjustierbarkeit des Doppelreifen-Pendelkörpers nur geringfügig. Daher lassen sich aus ihnen Kenntnisse für einen Rechenansatz gewinnen:

- die Größe und der Verlauf der Pendelbeschleunigung wird nicht nur von der Fallhöhe beeinflusst, sondern auch erheblich von den Masse- und Steifigkeitsverhältnissen der Scheibe und der Unterkonstruktion,
- beim Vergleich der Einwirkungsdauer für verschiedenen Fallhöhen auf gleichartige Konstruktionen ist eine nahezu konstante Einwirkungsdauer festzustellen,
- der Zusammenhang zwischen der Belastung aus Masse  $\times$  Beschleunigung des Pendelkörpers und der Beanspruchung des Glases ist nichtlinear (Abbildung 2.8).

Aus diesen Gründen ist es nicht möglich, den Pendelschlagversuch mit einfachen Mitteln durch statische Ersatzlasten aus Impulsüberlegungen zu simulieren, denn bei einer - für die Glasbeanspruchung wichtigen - wirklichkeitsnahen Berechnung müssen sowohl die Steifigkeiten als auch die Massen des gestoßenen und des stoßenden Körpers berücksichtigt werden. Es handelt sich bei den vorliegenden Systemen mit den hier untersuchten Massen-/ Steifigkeitsverhältnissen um Zweimassenschwinger, die nicht entkoppelt betrachtet werden können [3].

Folgende Folgerungen lassen sich aus den Versuchen mit anderen Stoßkörpern und dem menschlichen Körperstoß ziehen:

- die Beanspruchung durch den Pendelkörper nach E DIN EN 12600 mit einer Masse von 50 kg ist bei allen durchgeführten Versuchen höher als die Beanspruchung durch den Bleischrotsack mit  $m=45$  kg. Der Bleischrotsack hat bei den vorliegenden Versuchen eine höhere Ersatzsteifigkeit als der Doppelreifen-Pendelkörper,
- der Glaskugelsack hat eine wesentlich geringere Ersatzsteifigkeit als der Doppelreifen-Pendelkörper und eine wesentlich größere Aufprallfläche. Die durch ihn hervorgerufenen Beanspruchungen sind wesentlich geringer als die des Doppelreifen-Pendelkörpers,
- die Beanspruchung der Scheiben durch menschlichen Körperstoß, Ellenbogenstoß oder Fußtritt war für alle durchgeführten Untersuchungen wesentlich geringer als die durch den Doppelreifen-Pendelkörper hervorgerufenen Belastungen. Die Ersatzsteifigkeit des menschlichen Körpers schwankt stark, offensichtlich in Abhängigkeit von der Körperanspannung und dem Anprallpunkt des Körpers (Schulter, Arm,...). Bei Ansatz von 60% wirksamer Stoßkörpermasse des menschlichen Körpers [19] ist dessen Ersatzsteifigkeit um mindestens 30% geringer als die des Doppelreifens bei 4 bar Luftdruck,

- während die Ergebnisse zur Ersatzsteifigkeit des Doppelreifen-Pendelkörpers recht genau aus verschiedenen Versuchen reproduziert wurden, streut die Ersatzsteifigkeit des Bleischrotsacks und der Versuchspersonen stark und diese sind als Größe für die Belastung der Scheiben allein nicht aussagekräftig,
- neben der Masse und der Ersatzsteifigkeit der Versuchspersonen sind auch die Geschwindigkeit und die Aufprallfläche entscheidend, mit denen die Personen auf die Scheiben treffen. Nach [5a] kommt es ab einer Aufprallgeschwindigkeit > 2 m/s bereits zu ernsthaften Verletzungen der Person. In [19] dagegen werden Geschwindigkeiten bis 5 m/s angenommen. Die Versuchserfahrungen der vorliegenden Versuche bestätigen, daß bereits bei Anrennen aus der untersuchten Anlaufstrecke von ca. 2,50 m leichte Schulterverletzungen auftraten.

### 3 Finite-Element-Analyse zur rechnerischen Bestimmung der Beanspruchungen bei weichem Stoß

#### 3.1 Allgemeines

Mit dem Finite-Element-Programm ANSYS®5.5 wurden die oben durchgeführten Versuche rechnerisch simuliert. Es wurde versucht, ein Modell zu entwickeln, daß den gesamten Stoßvorgang auf beliebige Konstruktionen und Lagerungsarten abbildet. In dem von ANSYS bereit gestellten Analyseverfahren läßt sich das Schwingungsgleichungssystem

$$\underline{M} \cdot \ddot{\vec{x}} + \underline{C} \cdot \dot{\vec{x}} + \underline{K} \cdot \vec{x} = \vec{P} \quad (3.1)$$

als Anfangswerteproblem auffassen und über ein Zeitschrittverfahren lösen. ANSYS bietet folgende Integrationsverfahren:

- standardmäßig ein implizites Analyseverfahren (NEWMARK-Verfahren),
- ein explizites Analyseverfahren (LS-DYNA).

Obwohl sich das explizite Verfahren für das vorliegende Problem anbieten würde, stand in dem verwendeten Programmpaket nur das implizite Verfahren zur Verfügung.

#### 3.2 Modellierung der Scheibe, der Unterkonstruktion des Pendelkörpers und der Kontaktelemente

Die Glasscheiben wurden zur Nachrechnung der Versuche mit SHELL63-Elementen generiert. Für die Versuche im Normrahmen wurde eine allseitig gelagerte Platte idealisiert, die in ihrer Ebene statisch bestimmt gelagert war. Für die Versuche mit den

Balkonbrüstungen wurden die Pfosten aus BEAM4 –Elementen aufgebaut. Als Bereich der Anprallfläche wurden ca. 20 x 20 cm<sup>2</sup> gewählt. Dieser Bereich wurde mit Kontaktelementen TARGE170 belegt, während der Pendelkörper mit CONTA173-Elementen überzogen wurde. Der Pendelkörper wurde als 1/6 eines Zylinders modelliert und aus linearelastischen Volumenelementen aufgebaut (SOLID45). Die Ersatzmaterialeigenschaften (E-Modul, Querkontraktionszahl) für den Doppelreifen wurden anhand von Vergleichsrechnungen und aus den Versuchsergebnissen des Anpralles gegen die starre Wand abgeschätzt.

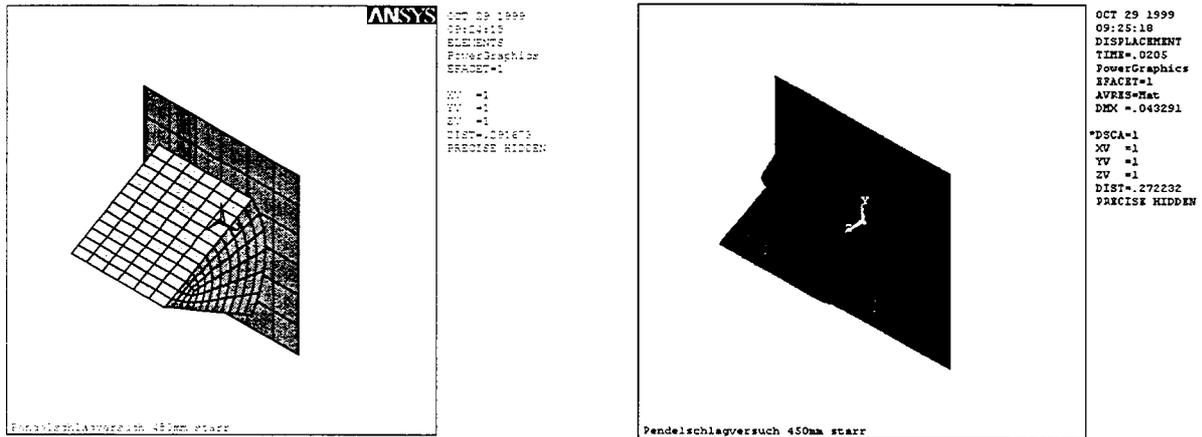


Abbildung 3.1: Modell des Doppelreifen-Pendelkörpers vor dem Stoßvorgang und bei maximaler Verformung

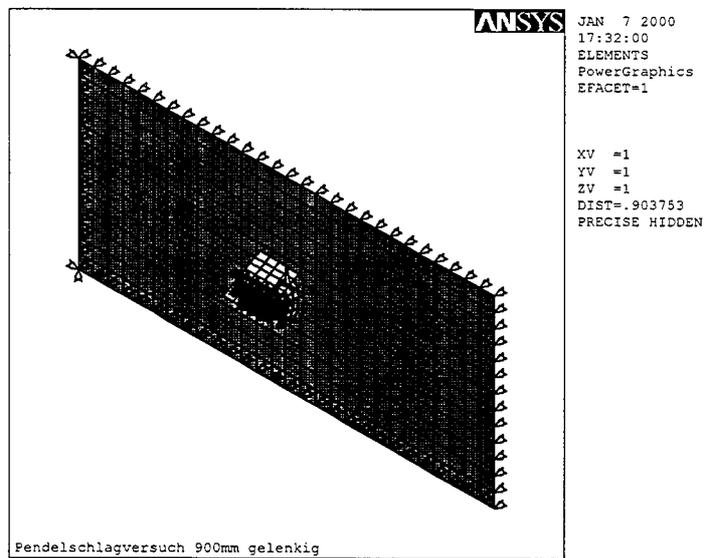


Abbildung 3.2: Modell des Normversuchs nach E DIN EN 12600

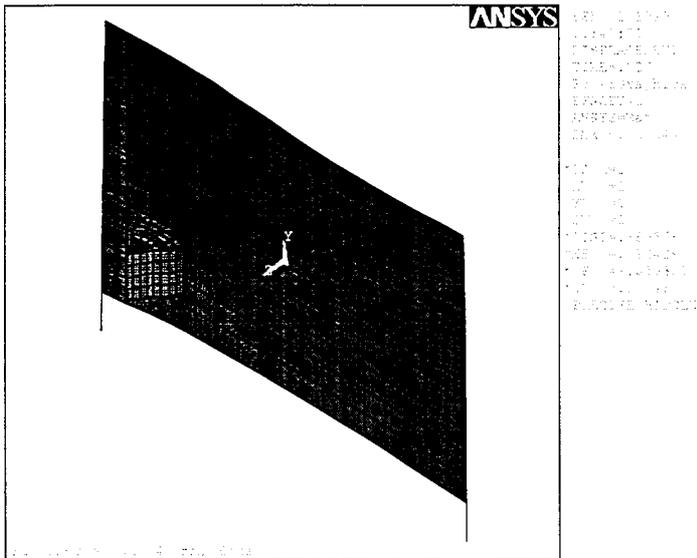


Abbildung 3.3: Modell der Balkonbrüstungen bei Stoß in die Ecke

### 3.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen

#### 3.3.1 Stoß gegen eine starre Wand

In Abbildung 3.4 ist ein Vergleich der Pendelbeschleunigungen gegen eine starre Wand mit der rechnerischen Simulation aufgetragen.

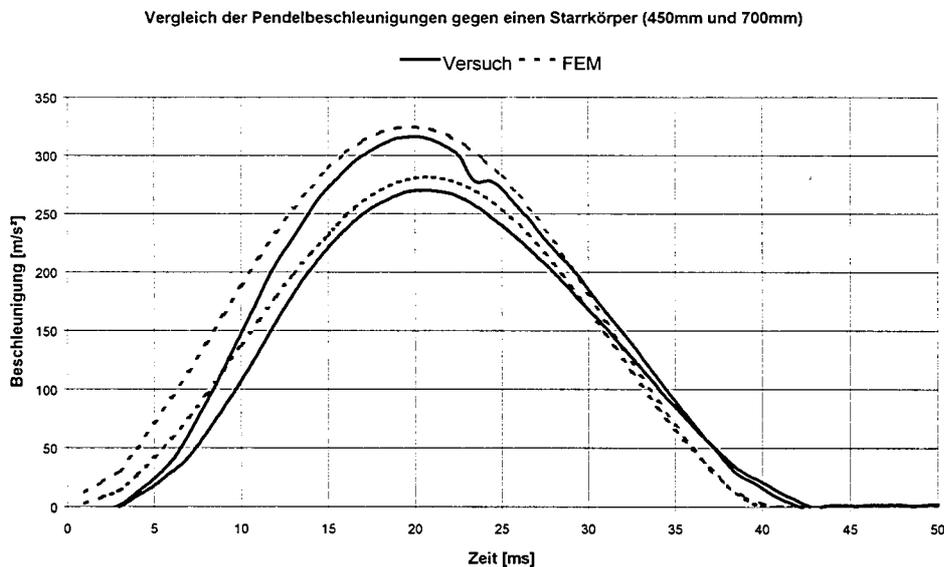


Abbildung 3.4: Pendelbeschleunigungen bei Stoß gegen einen starren Körper Versuch -FEM

#### 3.3.2 Versuche im Normrahmen nach E DIN EN 12600

In Abbildung 3.5 bis Abbildung 3.7 sind rechnerische Ergebnisse den Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Vergleich der Pendelbeschleunigungen Versuch-Berechnung, 450mm, 2x3mm VSG aus Float

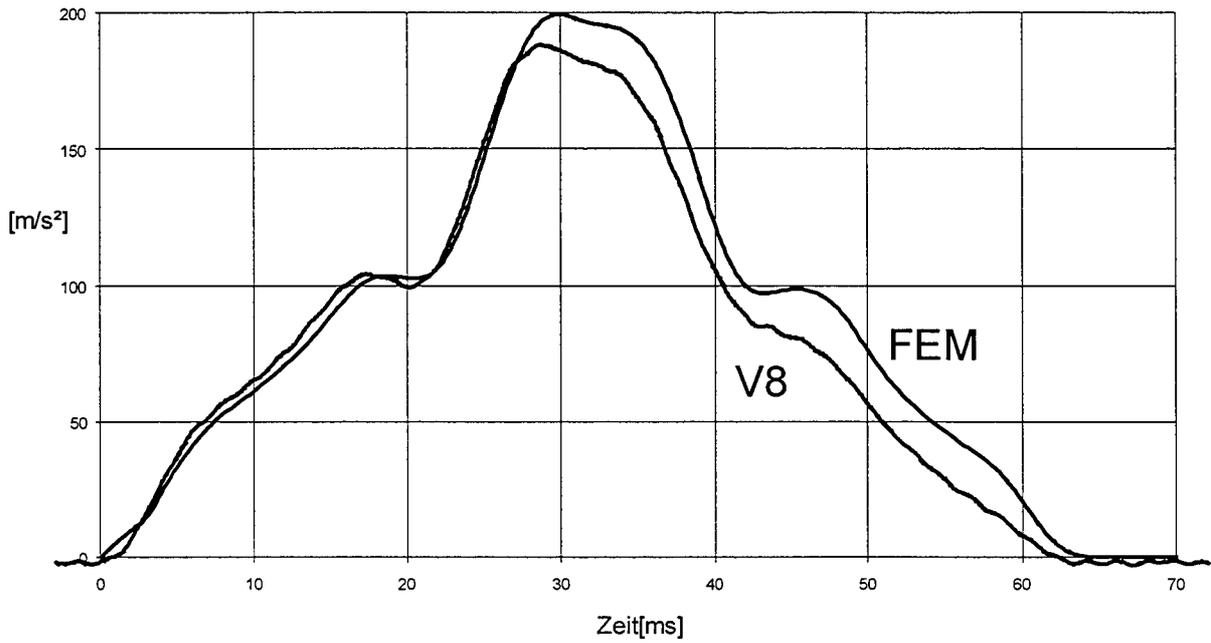


Abbildung 3.5: Pendelbeschleunigungen bei VSG aus 2 x 3 mm Floatglas, Versuch - FEM

Pendelbeschleunigung, 700mm, Vergleich FEM Versuch (ESG 8mm)

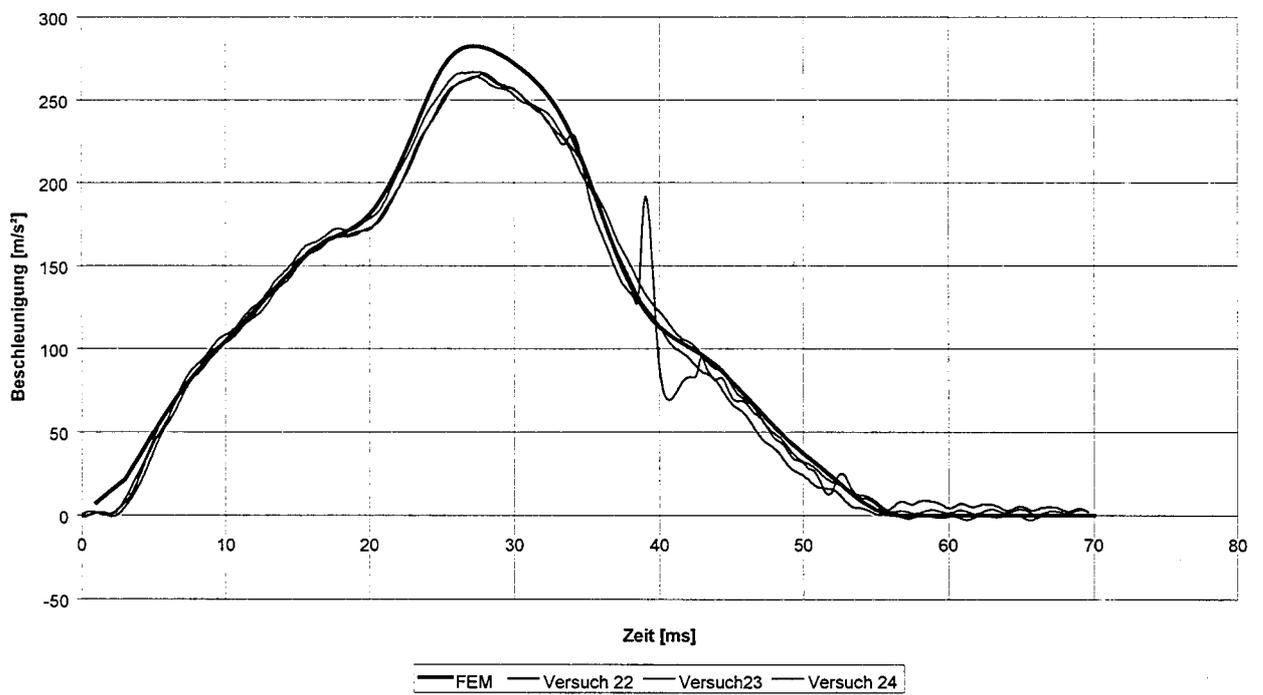


Abbildung 3.6: Pendelbeschleunigungen bei ESG 8 mm, Versuch - FEM

Vergleich der Plattendehnungen Versuch15-Berechnung, 450mm

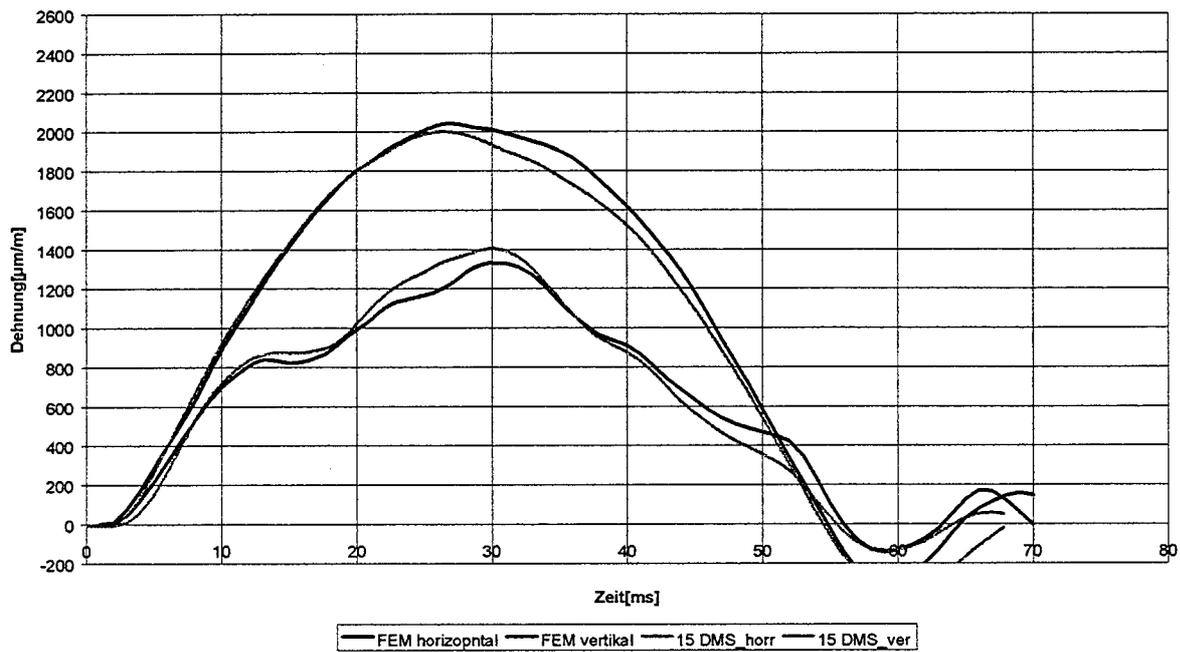


Abbildung 3.7: Dehnungen bei ESG 8 mm, Versuch – FEM, Fallhöhe 450 mm

### 3.3.3 Versuche gegen Balkonbrüstungen

In Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9 sind die rechnerischen Beschleunigungen den Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Vergleich der Pendelbeschleunigungen: 6mm ESG, 1695x1050, 450mm, Balkonbrüstung, Fallhöhe 700 mm

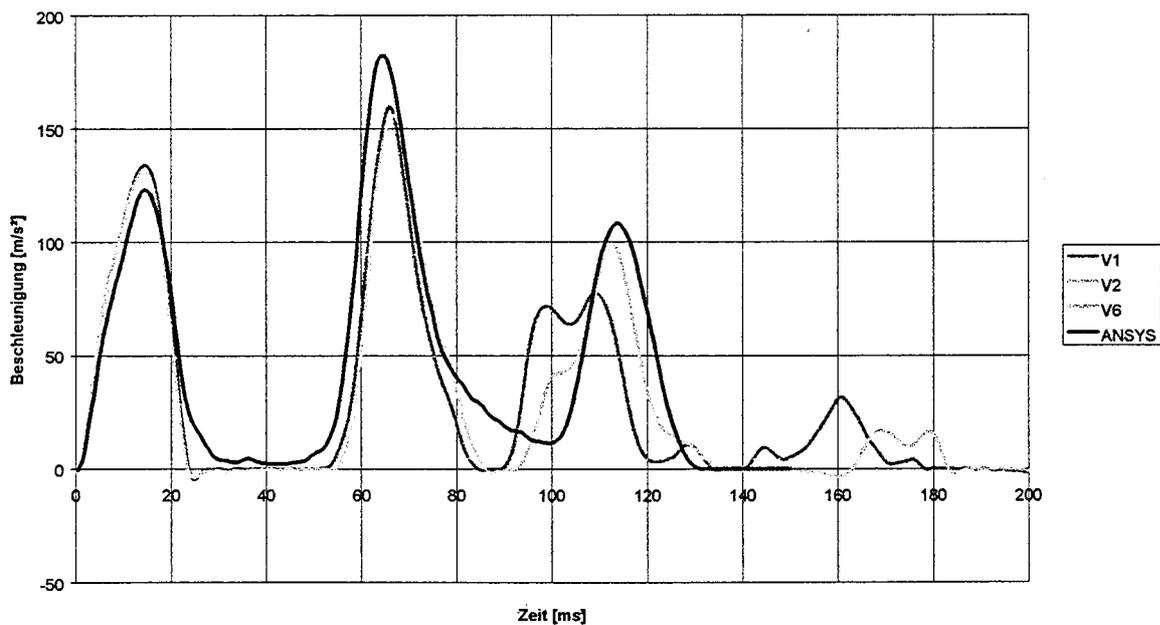


Abbildung 3.8: Pendelbeschleunigungen Balkonbrüstung, Scheibenmitte, Fallhöhe 700 mm

Vergleich der Pendelbeschleunigungen Versuch-Berechnung, 450mm, Ecke

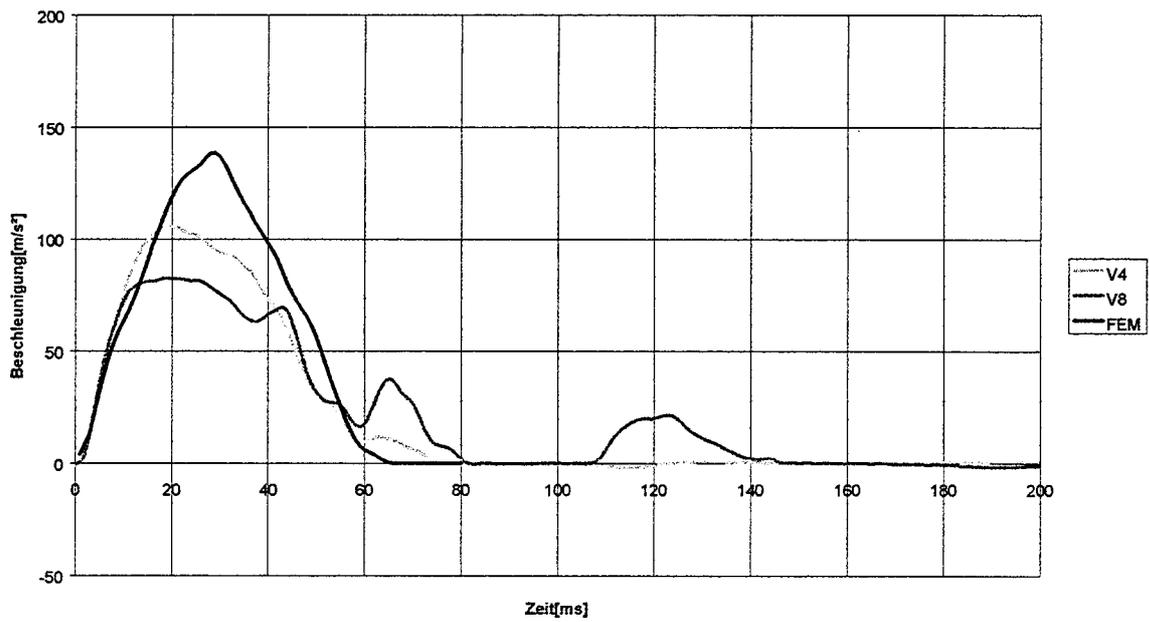


Abbildung 3.9: Pendelbeschleunigungen Balkonbrüstung, Scheibenecke , Fallhöhe 450 mm

### 3.4 Bewertung der rechnerischen Ergebnisse

Mit dem gewählten FE-Modell lassen sich die Versuchsergebnisse mit guter Übereinstimmung abbilden. Nicht nur die Extremwerte zeigen dabei gute Übereinstimmung, sondern auch der Kurvenverlauf der rechnerischen Simulation zeigt die gleichen Charakteristiken. In Tabelle 3.1 sind die gemessenen und berechneten Extremwerte für die Versuche im Normrahmen gegenübergestellt.

Tabelle 3.1: Vergleich der gemessenen Extremwerte Rechnung – Versuch für Normversuche und Stoß gegen eine Stahlwand

|              |               | Versuchsergebnisse                 |                       | Berechnungsergebnisse              |                       |
|--------------|---------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Versuch Nr.: | Fallhöhe [mm] | Maximalbeschl. [m/s <sup>2</sup> ] | Maximaldehnung [µm/m] | Maximalbeschl. [m/s <sup>2</sup> ] | Maximaldehnung [µm/m] |
| 15           | 450           | 209,5                              | 1999,919              | 213,2                              | 2042,24               |
| 16           | "             | 213,0                              | 2002,599              | 213,2                              | 2042,24               |
| 17           | "             | 210,9                              | 1985,787              | 213,2                              | 2042,24               |
| 18           | "             | 209,9                              | 1979,208              | 213,2                              | 2042,24               |
| 19           | "             | 212,2                              | 1988,711              | 213,2                              | 2042,24               |
| 42           | "             | 279,0                              | starre Wand           | 281,0                              | -                     |
| 21           | 700           | /                                  | 2251,614              | 282,6                              | 2448,56               |
| 22           | "             | 265,2                              | 2245,036              | 282,6                              | 2448,56               |
| 23           | "             | 264,1                              | 2245,036              | 282,6                              | 2448,56               |
| 24           | "             | 266,9                              | 2250,64               | 282,6                              | 2448,56               |
| 43           | "             | 342,0                              | starre Wand           | 324,0                              | -                     |

Mit dem FE-Modell wurden weitere Berechnungen für verschiedene Aufprallpunkte durchgeführt. Diese zeigten, daß für den Versuch im Normrahmen immer der Aufprallpunkt „Scheibenecke“ maßgebend gegenüber dem Aufprallpunkt „Scheibenmitte“ ist. Bei Berechnungen für punktgelagerte Scheiben mit einem stark vereinfachten Modell wurden

realistische Größenordnungen ermittelt, die allerdings aufgrund des hohen numerischen Aufwandes noch für weitere Scheiben verifiziert werden müssen.

## 4 Vereinfachtes Modell für die vierseitig gelagerte Scheibe auf Basis eines Zweimassenschwingers

### 4.1 Allgemeines

Im Rahmen der FE-Analyse wurde gezeigt, daß die Beanspruchung der Scheibe und der Belastungsverlauf stark von den Masse-/ Steifigkeitsverhältnissen von Pendelkörper und Scheibe/ Unterkonstruktion abhängt. Daher ist es nicht möglich, statische Ersatzlasten über eine Impulsbetrachtung zu erzeugen, wie es in [5a, 5b] für die Simulation des Körperstoßes auf leichte Trennwände erreicht wurde.

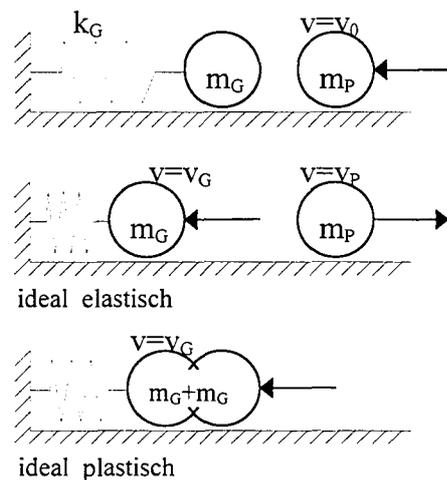


Abbildung 4.1: Masse-Feder-Modell bei Impulsübertragung mit ideal elastischem und ideal plastischem Stoß

Es kann bisher keine abgesicherte Aussage über die maßgebende Anprallstelle getroffen werden. Für eine Handrechnung könnte als Belastungsverlauf eine Sinushalbwellen gewählt werden und ein dynamischer Übertragungsfaktor aus bestehenden Diagrammen, z.B. aus [6]. Hierbei sind jedoch als unbekannte Eingangsgrößen Amplitude der Belastung, Belastungsdauer und Eigenfrequenz der Scheibe vorzugeben. Da aber weder die Amplitude noch die Belastungsdauer für beliebige Konstruktionen bekannt sind, müssen diese abgeschätzt werden. Es gelingt mit den bisherigen Ergebnissen jedoch nicht, einen allgemeingültigen Verlauf zu finden, der für beliebige Konstruktionen auf der sicheren Seite liegt. Der Übertragungsfaktor ist vom Verhältnis der Belastungsdauer zur Scheibeneigenfrequenz abhängig und könnte im Extremfall zu 1,6 [6] festgelegt werden. Da jedoch auch die Maximallast auf der sicheren Seite abgeschätzt werden muß, ist keine realistische und wirtschaftliche Bemessung möglich. Zudem ist es mit diesem Modell nicht

möglich, die maßgebende Belastungsstelle zu überprüfen, da die Schwingungsanregung z.B. in Tabellenwerken i.d.R. nicht für beliebige Stellen von Platten angegeben ist.

Ein Zweimassen-Zweifeder-Modell mit der Berücksichtigung aller Massen und Steifigkeiten (Abbildung 4.1) mit Grenzfallbetrachtungen für sehr steife Scheiben ( $k_p \ll k_G$ ), und sehr weiche Scheiben ( $k_p \gg k_G$ , hier evtl. über die Impulsbetrachtung mit vollplastischem Stoß) bietet die Möglichkeit einer etwas realistischeren Idealisierung.

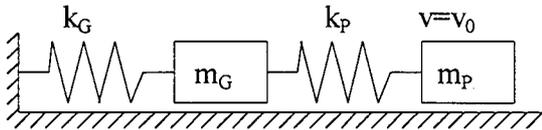


Abbildung 4.2: Masse-Feder-Masse-Feder Modell für den Pendelschlagversuch

Die Glasscheibe ihrerseits ist als Einmassenschwinger abbildbar. Hier besteht jedoch das Problem, daß man zwar die Eigenfrequenzen von Rechteckplatten bestimmen kann, diese jedoch nur für die freien Schwingungen der Platte interessant sind. Zusätzlich benötigt man die Steifigkeit und Masse für beliebige Anprallpunkte der Scheibe, um Stöße im Eckbereich darstellen zu können. Daher werden für deren Bestimmung folgende Annahmen getroffen:

- die Steifigkeit der Glasscheibe (=Platte im statischen Sinne) wird aus der Durchbiegung der Platte unter Teilbelastung (Größe 20 x 20 cm<sup>2</sup>- Anprallfläche des Pendels) mit einem linearen Reihenansatz ermittelt,
- der Doppelreifen läßt sich als lineare Feder idealisieren,
- die sich unter dem Stoß einstellende Verformung ist affin zur statischen,
- die mitschwingende Masse errechnet sich im Sinne einer generalisierten Masse für eine Eigenform, wobei die Scheibe als eigenes System mit gleichmäßig verteilter Masse aufgefaßt wird, deren erste Eigenform mit der oben bestimmten statischen Verformung übereinstimmt.

## 4.2 Bestimmung der Ersatzsteifigkeit des Doppelreifen-Pendelkörpers

Faßt man den Pendel als Einmassenschwinger auf, so kann man durch die Variation der Ersatzsteifigkeit ähnliche Beschleunigungsverläufe erhalten, wie bei den Versuchen gegen die starre Wand. Das Pendel wird näherungsweise als eine Masse mit linearelastischer Kontaktfeder modelliert. Der Verlauf der Beschleunigung kann als eine Sinushalbwellen beschrieben werden. Die Schwingungsgleichungen eines Einmassenschwingers lautet für den ungedämpften Fall [8]:

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.1)$$

$$\dot{x} = x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.2)$$

$$\ddot{x} = -x_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.3)$$

mit  $x_0$  = Schwingungsamplitude,  $\omega$  = Eigenkreisfrequenz,  $t$  = Zeit.

Mit dem bekannten Beschleunigungs-Zeit-Verlauf und der Anfangsbedingung:

$$v_0 = \dot{x} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4.4)$$

aus der Energiebilanz  $E_{pot} = E_{kin}$  läßt sich die Steifigkeit des Doppelreifens zu  $k_p = 396000$  N/m abschätzen.

## 4.3 Modalanalyse des Zweimassen-Zweifeder-Modells

Für das in Abbildung 4.3 dargestellte System ergibt sich für das dynamische Gleichgewicht der Teilkörper:

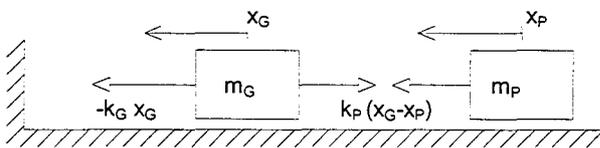


Abbildung 4.3: Freigeschnittenes Zweimassen-Zweifeder-Modell

Aus dem „dynamischen“ Gleichgewicht der einzelnen Teilkörper ergibt sich [15]:

$$\begin{aligned} m_G \cdot \ddot{x}_G &= -k_G \cdot x_G - k_P \cdot (x_G - x_P) \\ m_P \cdot \ddot{x}_P &= k_P \cdot (x_G - x_P) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Als Lösungsansatz der Gleichung 4.5 wird die Funktion

$$\begin{aligned}
x_j &= x_{0j} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \\
\ddot{x}_j &= -x_{0j} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \\
i &= G, P
\end{aligned} \tag{4.6}$$

verwendet. Daraus lässt sich Gleichung 4.5 in

$$[k_{ij} - m_{ij} \cdot \omega^2] \cdot x_j = 0 \tag{4.7}$$

überführen aus der sich über

$$\det[[k_{ij} - m_{ij} \cdot \omega^2]] = 0 \tag{4.8}$$

als nichttriviale Lösungen die Eigenwerte bestimmen lassen. Sie lauten:

$$\begin{aligned}
\omega_{1/2}^2 &= \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \beta} \\
\text{mit} \\
\alpha &= \frac{k_p}{m_p} + \frac{k_p}{m_G} + \frac{k_G}{m_G} \\
\beta &= \frac{k_p \cdot k_G}{m_p \cdot m_G}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Die Eigenvektoren ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}
\bar{\Psi}_n &= \begin{bmatrix} \Psi_{Gn} \\ \Psi_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{k_p}{k_p - m_p \omega_n^2} \end{bmatrix} \\
n &= 1, 2
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Durch Überlagerung der Eigenformen erhält man die Bewegungsgleichungen:

$$\begin{bmatrix} x_G \\ x_P \end{bmatrix} = A_1 \cdot \bar{\Psi}_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + A_2 \cdot \bar{\Psi}_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \tag{4.11}$$

und mit den Anfangsbedingungen

$$\begin{aligned}
x_G(t=0) &= 0 & x_P(t=0) &= 0 \\
\dot{x}_G(t=0) &= 0 & \dot{x}_P(t=0) &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \\
\ddot{x}_G(t=0) &= 0 & \ddot{x}_P(t=0) &= 0
\end{aligned} \tag{4.12}$$

erhält man:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{G1} \cdot \omega_1 & \Psi_{G2} \cdot \omega_2 \\ \Psi_{P1} \cdot \omega_1 & \Psi_{P2} \cdot \omega_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Dieses Ergebnis wurde in ein Visual-Basic-Programm implementiert.

#### 4.4 Bestimmung der Steifigkeit der Glasscheibe über $\Delta\Delta w=0$ für eine Platte unter Teilflächenlast

Mit einem in [7] beschriebenen Verfahren wird über eine Reihenentwicklung der Belastung und der Funktion der Durchbiegung für die Differentialgleichung der Platte unter Teilflächenbelastung eine Lösung erzeugt.

$$w(x,y) = \sum_m \sum_n \frac{P_{mn}}{K\pi^4 \left[ \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right]^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \tag{4.14}$$

$$P_{mn} = 16 \frac{p_0}{m\pi^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a}u\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a}c\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}v\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}d\right) \tag{4.15}$$

Die Zugspannungen auf der Plattenunterseite ergeben sich aus den partiellen Ableitungen der Funktion  $w(x,y)$ :

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= -\frac{E}{1-\nu^2} (w_{/xx} + \nu \cdot w_{/yy}) \cdot \frac{t}{2} \\
\sigma_y &= -\frac{E}{1-\nu^2} (w_{/yy} + \nu \cdot w_{/xx}) \cdot \frac{t}{2}
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Die Ersatzfedersteifigkeit der Platte ergibt sich mit  $c=d$  aus:

$$w(u,v) = p_0 \cdot w_0(u,v), \text{ mit } p_0 = \frac{F}{(2 \cdot c)^2} \tag{4.17}$$

$$\frac{F}{k_G} = w(u, v) \Rightarrow k_G = \frac{(2 \cdot c)^2}{w_0(u, v)} \quad (4.18)$$

#### 4.5 Bestimmung der mitschwingenden Masse

Die mitschwingende Masse wird über die Integration der normierten statischen Verformung ermittelt, wobei vorausgesetzt wird, daß die sich unter der dynamischen Einwirkung einstellende Verformung affin zur statischen ist. Die mitschwingende Masse ergibt sich im Sinne einer generalisierten Masse und der aus [8] entnommene Ausdruck:

$$M_i^* = \sum_{k=1}^n m_k \cdot \Psi_{ik}^2 \quad (4.19)$$

mit:

$M_i^*$  generalisierte Masse der Eigenform  $i$

$m_k$  Einzelmassen eines Systems mit diskreter Massenbelegung

$\Psi_{ik}$  normalisierter Eigenvektor

wird in ein Integral überführt:

$$M_i^* = m_G = \int_0^b \int_0^a \rho \cdot t \cdot w_0^2 \, dx \, dy \quad (4.20)$$

Als generalisierte Einwirkungsgröße wird die Stoßlast

$$P_i^* = \{\Psi_i\}^T \{P(t)\} \quad (4.21)$$

mit  $\psi_i$  als fest vorgegebener Formfunktion angesetzt.

Um das Integral des Doppelreihenansatzes in dem hier verwendeten Programm bestimmen zu können, wurde der Wert des Integrals näherungsweise numerisch mit dem Verfahren der Gauß-Quadratur unter Berücksichtigung von sechs Gaußpunkten bestimmt.

## 4.6 Vergleich der Ergebnisse und Bewertung

### 4.6.1 Vergleichsberechnungen FE-Modell - Zweimassenschwingermodell

In Tabelle 4.1 sind Vergleichsberechnungen mit dem Zweimassenschwinger und ANSYS-Berechnungen für verschiedene Scheibenabmessungen, -dicken und Aufprallpunkte dargestellt.

Tabelle 4.1: Vergleich der Berechnungsergebnisse Zweimassenschwinger und ANSYS

| Scheibe<br>[mm <sup>3</sup> ] | Stoßpunkt | Fallhöhe<br>[mm] | maximale Pendel-<br>beschleunigung<br>[m/s <sup>2</sup> ] |        | Hauptzugspannungen<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |        | Abweichung |
|-------------------------------|-----------|------------------|---|--------|--|--------|------------|
|                               |           |                  | Federmod  | ANSYS  | Federmod                                   | ANSYS  |            |
| 1918 x 855 x 8                | Mitte     | 100              | 89,20   | 85,61  | 99,53                                      | 81,55  | 18%        |
|                               |           | 200              | 126,14  | 130,84 | 140,76                                     | 112,2  | 20%        |
|                               |           | 450              | 189,22  | 213,15 | 211,13                                     | 157,3  | 25%        |
|                               |           | 700              | 235,99  | 282,57 | 263,33                                     | 206,5  | 22%        |
|                               | Ecke      | 100              | 101,59  | 93,10  | 76,2                                       | 71,42  | 6%         |
|                               |           | 200              | 143,67  | 138,44 | 107,0                                      | 100,7  | 6%         |
|                               |           | 450              | 215,50  | 224,83 | 161,3                                      | 147,2  | 9%         |
| 855 x 85 5x 20                | Mitte     | 450              | 254,94  | 268,32 | 39,26                                      | 44,39  | -13%       |
|                               |           | Ecke             | 450   | 260,04 | 272,76                                     | 32,54  | 37,97      |
| 2300 x 2300 x 8               | Mitte     | 100              | 68,22   | 46,99  | 55,38                                      | 46,70  | 16%        |
|                               |           | Ecke             | 100   | 83,66  | 87,55                                      | 104,62 | 77,21      |
| 4000 x 2000 x 10              | Mitte     | 450              | -   | -      | 83,2                                       | 89,4   | 7%         |

Zusätzlich wurde für die unter 2.3 und 3.3.3 dargestellte Balkonbrüstungsverglasung eine Vergleichsrechnung mit dem Zweimassenschwingermodell durchgeführt. Hier beeinflusst die Steifigkeit der Holme die dynamische Berechnung. Trifft der Doppelreifen gegen die zwischen Holmen eingespannte Glasscheibe, so weicht die Glasscheibe zum einen wegen

ihrer durch die Ersatzfeder  $k_S$  abgebildeten Steifigkeit zurück und entzieht sich damit der Lastaufnahme. Zusätzlich weicht aber auch die Glasscheibe als Ganzes zurück, weil die Holme unter der Last nachgeben. Die Beanspruchung der Glasscheibe verringert sich dadurch. Eine Vergleichsrechnung der Ersatzfedersteifigkeit  $k_S$  aus Hintereinanderschaltung der Federn  $k_S$  und  $k_H$  zu ( $k_H$ =Steifigkeit des Holmes) ergibt:

$$\frac{1}{k_S^*} = \frac{1}{k_S} + \frac{1}{k_H}$$

Daraus läßt sich über das Zweimassen-Zweifedermodell die Beschleunigung von  $120 \text{ m/s}^2$  ermitteln, die mit den gemessenen  $100 \text{ m/s}^2$  in guter Näherung übereinstimmen. Allerdings kann mit dem vereinfachten Modell kein mehrmaliger Kontakt simuliert werden und der Ort der maximalen Spannung stimmt nicht mit der dynamischen FE-Berechnung überein.

#### 4.6.2 Schlußfolgerungen

Die für den Zweimassenschwinger getroffenen Vereinfachungen rufen zum Teil beachtliche Unterschiede in den ermittelten Spannungen hervor. Während für dicke und „steife“ Scheiben gute Übereinstimmung erzielt wird, treten die größten Unterschiede für „weiche“ Scheiben mit großen Deformationen auf. Dies kann u.a. darauf zurückgeführt werden, daß die Membrantragwirkung hier starken Einfluß hat und die Bestimmung der mitschwingenden Masse eine Näherung ist. Dieser Einfluß wirkt sich günstig auf die entstehenden Zugspannungen aus, allerdings wird er andererseits die Pendelbeschleunigung und damit auch die Belastung leicht erhöhen. Berücksichtigt man, daß das Verfahren der statischen Ersatzlasten ein sehr vereinfachtes Verfahren ist (Abbildung der Glasscheibe durch eine Punktmasse mit Feder), so sind die erzielten Ergebnisse ausreichend genau. Die Glasscheibe kann mit Hilfe der statischen Ersatzlasten innerhalb weniger Minuten auf durchschnittlich 15 % genau bemessen werden.

#### 4.7 Bemessung von Isolierglas

Wie aus den Versuchen mit Isolierglas hervorgeht, ist der Koppeleffekt nur bei kleinen Fallhöhen direkt wirksam und wirkt bei Fallhöhen ab 450 mm nur verzögert (Abbildungen 2.13 und 2.14), vermutlich wegen der Kompression des Gases im Scheibenzwischenraum. Anhand der Versuchsergebnisse wird vermutet, daß es im SZR bei hohen Fallhöhen zu einem Kontakt zwischen den Scheiben kommt. Für die Bemessung von Isolierglas sollte daher die Innenscheibe für die Stoßlasten ausreichend dimensioniert werden und der Koppeleffekt vernachlässigt werden, bis weitere Versuchsergebnisse vorliegen.

## 5 Statische Ersatzlasten

### 5.1 Allgemeine Ersatzlasttafel

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Möglichkeiten der Lagerung und der unterschiedlichen Anprallstellen des Pendelkörpers ist es nicht möglich, für jeden einzelnen Fall eine statische Ersatzlast anzugeben und diese Werte zu tabellieren. Daher wurde eine allgemeine Ersatzlasttafel entwickelt, mit der für jeden denkbaren Fall die statische Ersatzlast ermittelt werden kann. Die Allgemeine Ersatzlasttafel hat zwei Eingangswerte: Zum einen die Ersatzfedersteifigkeit der Glasscheibe  $k_s$ , zum anderen die mitschwingende Glasmasse  $m_{s, \text{eff}}$ . Aus diesen Eingangsparametern kann die statische Ersatzlast bestimmt werden (Tabelle 5.2). Hierbei ist zu beachten, daß die statischen Ersatzlasten sich auf eine Fallhöhe von 450 mm beziehen und entsprechend Tabelle 5.4 mit einem Faktor  $k_1$  multipliziert werden müssen. Als Aufprallfläche wurden die in den Versuchen ermittelten 200 mm x 200 mm festgelegt. Es wird von vollem Schubverbund bei Verbund-(Sicherheits-)glas ausgegangen.

Die Beanspruchung der Scheibe hängt von der Anprallgeschwindigkeit  $v_0$  des Doppelreifens ab. Diese Anprallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Auslenkungshöhe  $h$  zu  $v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ .

Der Umrechnungsfaktor  $k_1$  ergibt sich also in Abhängigkeit von der Auslenkungshöhe  $h$  zu

$$k_1 = \frac{v_0(h)}{v_0(h = 45 \text{ cm})} = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot 45 \text{ cm}}} = \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{45 \text{ cm}}} = \sqrt{\frac{h}{45 \text{ cm}}}$$

Zur Bestätigung dieses Zusammenhangs wurden an der FMPA Baden-Württemberg in Stuttgart mehrere Versuchsreihen [2] mit unterschiedlichen Fallhöhen und unterschiedlichem Reifendruck an Scheiben der Abmessungen 1050mm x 2056mm x 8mm durchgeführt. Die Auswertung dieser Versuche ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 5.1: Vergleich zwischen dem Umrechnungsfaktor  $k_1$  aus gemessenen Dehnungen und aus theoretischen Berechnungen

| Fallhöhe $h$ | Versuchsreihe 2,0 bar |       | Versuchsreihe 3,5 bar |       | Versuchsreihe 5,0 bar |       | theoretisch: |
|--------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|--------------|
|              | $\varepsilon$ [10-6]  | $k_1$ | $\varepsilon$ [10-6]  | $k_1$ | $\varepsilon$ [10-6]  | $k_1$ | $k_1$        |
| 5 cm         | 616                   | 0,65  | 628                   | 0,64  | 666                   | 0,64  | 0,33         |
| 20 cm        | 1086                  | 0,86  | 1161                  | 0,86  | 1196                  | 0,86  | 0,67         |
| 45 cm        | 1455                  | 1,00  | 1555                  | 1,00  | 1636                  | 1,00  | 1,00         |
| 120 cm       | 1709                  | 1,08  | 1971                  | 1,13  | 2184                  | 1,16  | 1,63         |

Es ergeben sich bei unterschiedlichem Reifendruck immer die gleichen Umrechnungsfaktoren. Die Versuchsergebnisse stimmen aber mit der theoretischen Überlegung nicht überein. Die Ursache liegt erneut vermutlich darin, daß bei zunehmender

Fallhöhe  $h$  des Doppelreifens und damit zunehmender Durchbiegung der Glasscheibe der Membraneffekt berücksichtigt werden muß. Dieser Effekt lässt die auftretenden Spannungen und Dehnungen nicht so stark wie angenommen ansteigen. Als eine weitere Ursache für die Abweichungen zwischen den theoretischen Umrechnungsfaktoren und den experimentell ermittelten Umrechnungsfaktoren könnte man ein nichtlineares Verhalten des Reifens vermuten (keine linear-elastische Feder). In Abbildung 5.1 ist daher ein Vergleich zwischen dem theoretischen Umrechnungsfaktor  $k_1$  und den experimentell bestimmten Werten aus Abbildung 2.2 und Tabelle 2.1 aufgeführt.

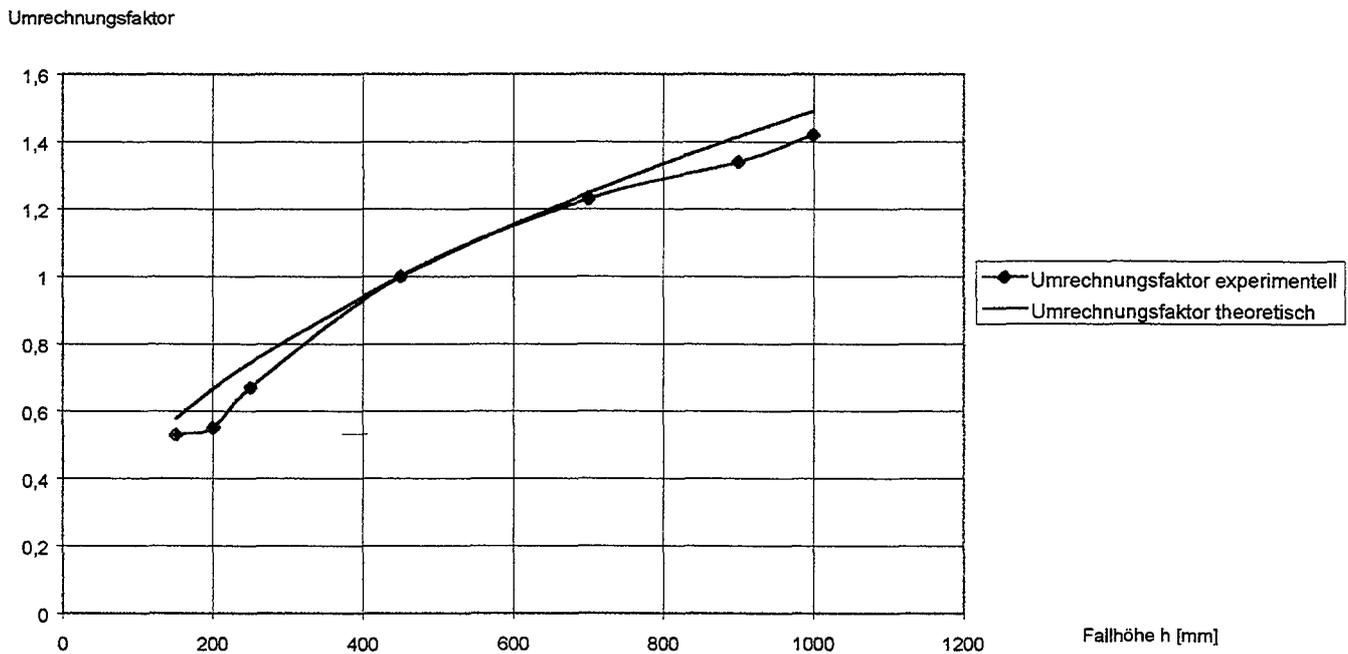


Abbildung 5.1: Vergleich zwischen den aus den Maximalbeschleunigungen des Reifens ermittelten Umrechnungsfaktoren (blau) und den theoretischen Umrechnungsfaktoren (rot)

Hier ergeben sich nur geringe Abweichungen zwischen den aus den Maximalbeschleunigungen ermittelten Umrechnungsfaktoren und den theoretischen Werten.

Tabelle 5.2: Allgemeine Ersatzlasttafel zur Bestimmung der statischen Ersatzlast

| Tafelwerte in kN |       | ks in kN/m |     |     |      |      |      |       |       |       |       |       |        |
|------------------|-------|------------|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                  |       | 50         | 100 | 200 | 300  | 400  | 500  | 1.000 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 5.000 | 10.000 |
| ms, eff          | 2,5   | 4,7        | 6,4 | 8,3 | 9,3  | 10,0 | 10,6 | 12,3  | 13,1  | 13,3  | 13,4  | 13,3  | 13,5   |
|                  | in kg | 5,0        | 4,7 | 6,4 | 8,7  | 10,0 | 10,9 | 11,5  | 13,0  | 13,2  | 13,6  | 13,9  | 13,7   |
|                  | 7,5   | 4,5        | 6,6 | 8,6 | 9,7  | 10,4 | 11,0 | 12,9  | 14,1  | 13,9  | 13,5  | 14,0  | 13,8   |
|                  | 10,0  | 4,6        | 6,6 | 8,1 | 9,3  | 10,3 | 11,0 | 12,1  | 14,1  | 14,5  | 14,3  | 13,9  | 14,1   |
|                  | 12,5  | 4,6        | 6,4 | 8,2 | 9,9  | 12,5 | 11,7 | 12,9  | 13,7  | 14,6  | 14,7  | 14,5  | 14,3   |
|                  | 15,0  | 4,6        | 6,2 | 8,5 | 10,4 | 11,5 | 12,3 | 13,7  | 13,1  | 14,4  | 14,8  | 14,8  | 14,1   |
|                  | 17,5  | 4,6        | 5,9 | 8,7 | 10,7 | 11,9 | 12,8 | 14,3  | 13,8  | 13,9  | 14,7  | 14,9  | 14,0   |
|                  | 20,0  | 4,5        | 5,7 | 8,9 | 10,9 | 12,3 | 13,2 | 14,8  | 14,5  | 13,5  | 14,4  | 14,9  | 14,4   |
|                  | 22,5  | 4,5        | 5,8 | 9,0 | 11,1 | 12,5 | 13,5 | 15,3  | 15,0  | 14,1  | 14,0  | 14,7  | 14,7   |
|                  | 25,0  | 4,4        | 5,8 | 9,1 | 11,3 | 12,7 | 13,7 | 15,7  | 15,5  | 14,6  | 13,7  | 14,5  | 14,9   |
|                  | 27,5  | 4,3        | 5,8 | 9,2 | 11,4 | 12,8 | 13,9 | 16,0  | 16,0  | 15,1  | 14,2  | 14,1  | 15,1   |
|                  | 30,0  | 4,2        | 5,8 | 9,2 | 11,4 | 12,9 | 14,0 | 16,3  | 16,4  | 15,5  | 14,6  | 13,8  | 15,2   |
|                  | 32,5  | 4,2        | 5,8 | 9,2 | 11,5 | 13,0 | 14,1 | 16,5  | 16,8  | 15,9  | 15,0  | 14,2  | 15,2   |
|                  | 35,0  | 4,1        | 5,8 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,2 | 16,7  | 17,1  | 16,3  | 15,4  | 14,6  | 15,2   |
|                  | 37,5  | 4,1        | 5,7 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,3 | 16,9  | 17,4  | 16,6  | 15,8  | 15,0  | 15,2   |
|                  | 40,0  | 4,0        | 5,7 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,3 | 17,1  | 17,6  | 17,0  | 16,1  | 15,3  | 15,1   |
|                  | 42,5  | 3,9        | 5,7 | 9,1 | 11,5 | 13,1 | 14,4 | 17,2  | 17,9  | 17,2  | 16,4  | 15,6  | 15,0   |
|                  | 45,0  | 3,9        | 5,6 | 9,1 | 11,5 | 13,1 | 14,4 | 17,3  | 18,1  | 17,5  | 16,7  | 15,9  | 14,8   |
|                  | 47,5  | 3,8        | 5,6 | 9,1 | 11,4 | 13,1 | 14,4 | 17,4  | 18,3  | 17,8  | 17,0  | 16,2  | 14,6   |
|                  | 50    | 3,8        | 5,5 | 9,0 | 11,4 | 13,1 | 14,4 | 17,5  | 18,5  | 18,0  | 17,2  | 16,5  | 14,5   |
|                  | 60    | 3,6        | 5,3 | 8,8 | 11,2 | 12,9 | 14,3 | 17,7  | 19,1  | 18,8  | 18,1  | 17,4  | 14,5   |
|                  | 70    | 3,5        | 5,1 | 8,5 | 10,9 | 12,7 | 14,1 | 17,8  | 19,5  | 19,4  | 18,8  | 18,2  | 15,3   |
|                  | 80    | 3,4        | 4,9 | 8,2 | 10,6 | 12,4 | 13,8 | 17,7  | 19,8  | 19,8  | 19,4  | 18,8  | 16,0   |
|                  | 90    | 3,3        | 4,7 | 7,9 | 10,3 | 12,1 | 13,6 | 17,6  | 20,0  | 20,2  | 19,9  | 19,3  | 16,7   |
|                  | 100   | 3,2        | 4,5 | 7,7 | 10,0 | 11,8 | 13,3 | 17,5  | 20,1  | 20,5  | 20,2  | 19,8  | 17,2   |
|                  | 120   | 3,0        | 4,2 | 7,2 | 9,5  | 11,3 | 12,7 | 17,1  | 20,2  | 20,9  | 20,8  | 20,5  | 18,2   |
|                  | 140   | 2,8        | 3,9 | 6,7 | 8,9  | 10,7 | 12,2 | 16,7  | 20,1  | 21,1  | 21,2  | 21,0  | 19,0   |
|                  | 160   | 2,7        | 3,6 | 6,3 | 8,5  | 10,2 | 11,6 | 16,3  | 19,9  | 21,1  | 21,4  | 21,3  | 19,6   |
|                  | 180   | 2,6        | 3,4 | 6,0 | 8,0  | 9,7  | 11,1 | 15,8  | 19,7  | 21,1  | 21,6  | 21,6  | 20,1   |
|                  | 200   | 2,4        | 3,2 | 5,6 | 7,6  | 9,3  | 10,7 | 15,4  | 19,5  | 21,0  | 21,6  | 21,8  | 20,6   |
|                  | 220   | 2,3        | 3,2 | 5,3 | 7,3  | 8,9  | 10,3 | 14,9  | 19,2  | 20,9  | 21,6  | 21,9  | 21,0   |
|                  | 240   | 2,2        | 3,1 | 5,1 | 6,9  | 8,5  | 9,9  | 14,5  | 18,9  | 20,8  | 21,6  | 22,0  | 21,3   |
|                  | 260   | 2,1        | 3,0 | 4,8 | 6,6  | 8,2  | 9,5  | 14,1  | 18,6  | 20,6  | 21,6  | 22,0  | 21,5   |
|                  | 280   | 2,1        | 3,0 | 4,6 | 6,4  | 7,9  | 9,1  | 13,7  | 18,3  | 20,4  | 21,5  | 22,0  | 21,8   |
|                  | 300   | 2,0        | 2,9 | 4,4 | 6,1  | 7,6  | 8,8  | 13,4  | 18,0  | 20,2  | 21,4  | 21,9  | 22,0   |
|                  | 320   | 1,9        | 2,8 | 4,2 | 5,9  | 7,3  | 8,5  | 13,0  | 17,7  | 20,0  | 21,2  | 21,9  | 22,1   |
|                  | 340   | 1,9        | 2,8 | 4,1 | 5,7  | 7,0  | 8,2  | 12,7  | 17,4  | 19,8  | 21,1  | 21,8  | 22,2   |
|                  | 360   | 1,8        | 2,7 | 3,9 | 5,5  | 6,8  | 8,0  | 12,4  | 17,2  | 19,6  | 20,9  | 21,7  | 22,4   |
|                  | 380   | 1,7        | 2,7 | 3,8 | 5,3  | 6,6  | 7,7  | 12,1  | 16,9  | 19,4  | 20,8  | 21,6  | 22,4   |
|                  | 400   | 1,7        | 2,6 | 3,6 | 5,1  | 6,4  | 7,5  | 11,8  | 16,6  | 19,1  | 20,6  | 21,5  | 22,5   |
|                  | 420   | 1,6        | 2,5 | 3,5 | 4,9  | 6,2  | 7,3  | 11,5  | 16,3  | 18,9  | 20,4  | 21,4  | 22,6   |
|                  | 440   | 1,6        | 2,5 | 3,4 | 4,8  | 6,0  | 7,1  | 11,3  | 16,1  | 18,7  | 20,3  | 21,3  | 22,6   |
|                  | 460   | 1,6        | 2,4 | 3,3 | 4,6  | 5,8  | 6,9  | 11,0  | 15,8  | 18,5  | 20,1  | 21,1  | 22,6   |
|                  | 480   | 1,6        | 2,4 | 3,2 | 4,5  | 5,7  | 6,7  | 10,8  | 15,6  | 18,3  | 19,9  | 21,0  | 22,6   |
|                  | 500   | 1,6        | 2,3 | 3,1 | 4,4  | 5,5  | 6,5  | 10,5  | 15,3  | 18,1  | 19,8  | 20,9  | 22,7   |

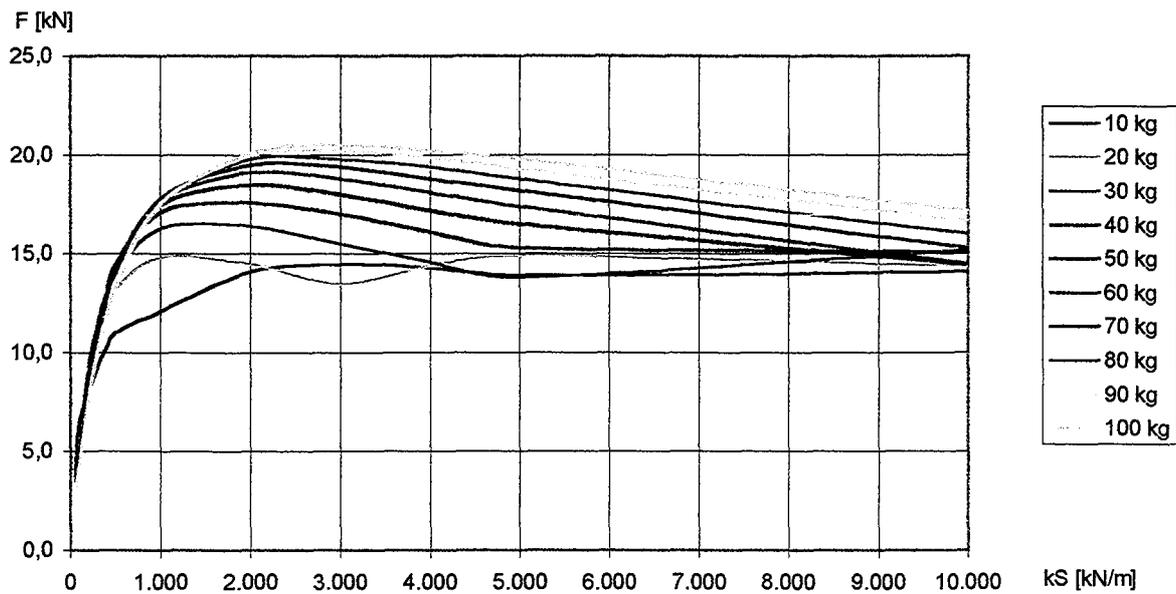


Abbildung 5.2: Statische Ersatzlast in Abhängigkeit der Scheibensteifigkeit  $k_S$ , aufgetragen für verschiedene mitschwingende Scheibenmassen  $m_{S,eff}$ .

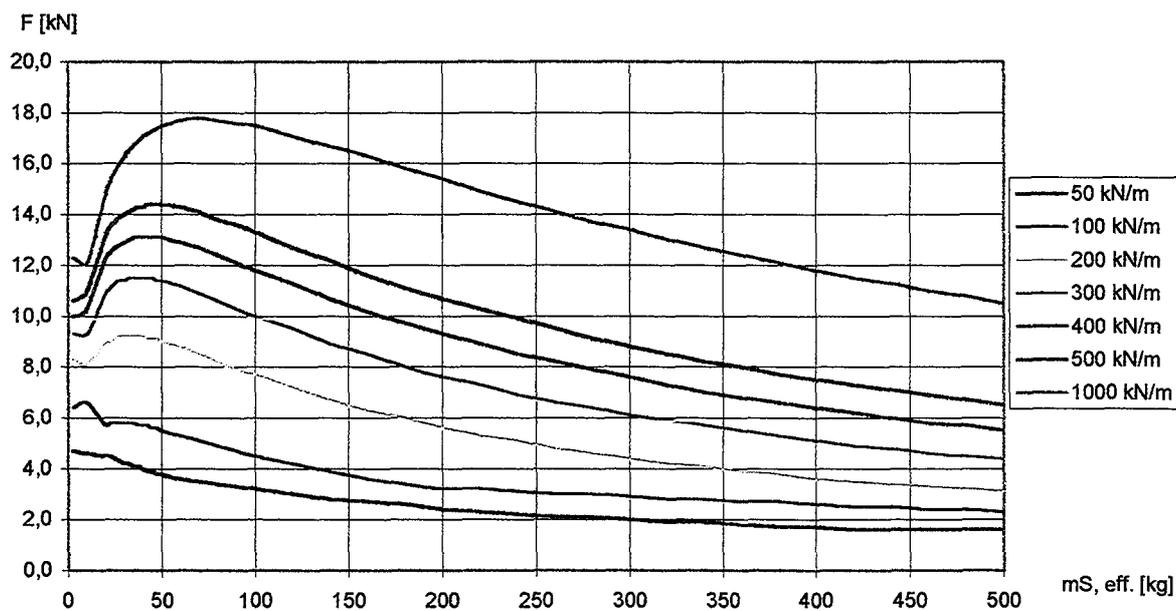


Abbildung 5.3: Statische Ersatzlast in Abhängigkeit der mitschwingenden Scheibenmasse  $m_{S,eff}$ , aufgetragen für verschiedene Scheibensteifigkeiten  $k_S$

Wie man in den Abbildungen entnehmen kann, existieren folgende grundsätzliche Zusammenhänge:

1. Bei zunehmender Scheibensteifigkeit aber konstanter mitschwingender Masse nimmt die statische Ersatzlast bis zu einem Maximum zu und konvergiert dann für alle mitschwingenden Massen  $m_{S, \text{eff}}$  gegen einen Wert von 13,9 kN, der Wert, der beim Anprall gegen eine starre Wand festgestellt wurde.
2. Bei zunehmender mitschwingender Masse, aber konstanter Scheibensteifigkeit nimmt die statische Ersatzlast bis zu einem Maximum zu und läuft dann asymptotisch gegen Null. In diesem Grenzfall (mitschwingende Masse „unendlich groß“ im Vergleich zur Scheibensteifigkeit) wird die Last des anprallenden Reifens nur über Trägheitskräfte abgetragen.

Die Eingangswerte  $k_S$  und  $m_{S, \text{eff}}$  sind vom Nutzer selbst zu bestimmen. Die mitschwingende Masse  $m_{S, \text{eff}}$  beträgt für den mittigen Stoß einer zweiseitig gelagerten Glasscheibe  $m_{S, \text{eff}} = \frac{1}{2} m_S$ , für den mittigen Stoß einer vierseitig gelagerten Glasscheibe  $m_{S, \text{eff}} = \frac{1}{4} m_S$ . Für alle anderen Anprallorte muß sich der Nutzer die mitschwingende Masse selbst herleiten oder kann sie der Literatur entnehmen.

## 5.2 Statische Ersatzlasten für die vierseitig gelenkig gelagerte Scheibe

Für die vierseitig gelenkig gelagerte Glasscheibe sind im Anhang statische Ersatzlasten für übliche lieferbare Scheibenabmessungen und Scheibendicken tabelliert. Als mögliche Anprallorte des Doppelreifens wurden gewählt:

1. Scheibenmitte
2. Scheibenrand (Seitenhalbierende der langen Seite, Abstand 250 mm von der Kante)
3. Scheibenrand (Seitenhalbierende der kurzen Seite, Abstand 250 mm von der Kante)
4. Scheibenecke (Abstand 250 mm von beiden Kanten)

Die Verwendung dieser vier Tabellen sollen nun beispielhaft für den mittigen Stoß erklärt werden (Tabelle 5.3):

Tabelle 5.3: Ersatzlasttafel für mittigen Stoß auf die vierseitig gelenkig gelagerte Scheibe, Fallhöhe 450 mm

| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           | 6,9  | 5,8  | 5,8  | 5,8  | 6,0  | 6,1  | 3,2  | 2,6  | 2,3  | 2,3  | 2,7  | 1,8  | 1,4  | 1,3  | 1,2  |
|                 | 8           | 9,8  | 8,7  | 8,7  | 8,8  | 8,8  | 8,6  | 5,4  | 4,2  | 3,7  | 3,6  | 4,3  | 3,2  | 2,6  | 2,4  | 2,3  |
|                 | 10          | 11,8 | 10,0 | 9,9  | 10,3 | 10,8 | 10,9 | 7,0  | 5,9  | 5,6  | 5,5  | 5,5  | 4,1  | 3,6  | 3,3  | 3,2  |
|                 | 12          | 13,0 | 11,6 | 11,7 | 11,2 | 12,0 | 12,3 | 9,9  | 8,6  | 8,1  | 8,0  | 8,0  | 5,6  | 4,4  | 3,9  | 3,7  |
|                 | 14          | 13,8 | 12,6 | 12,7 | 12,1 | 12,9 | 13,3 | 12,5 | 11,1 | 10,6 | 10,5 | 10,5 | 7,6  | 6,1  | 5,4  | 5,1  |
|                 | 15          | 14,1 | 12,8 | 13,0 | 12,6 | 13,3 | 13,6 | 13,6 | 12,3 | 11,8 | 11,7 | 11,7 | 8,6  | 6,9  | 6,1  | 5,8  |
|                 | 16          | 14,2 | 12,9 | 13,1 | 13,0 | 13,7 | 13,9 | 14,6 | 13,4 | 12,9 | 12,8 | 12,8 | 9,6  | 7,8  | 6,9  | 6,5  |
|                 | 20          | 14,2 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,6 | 14,3 | 17,3 | 16,9 | 16,5 | 16,4 | 16,4 | 13,3 | 11,1 | 10,0 | 9,5  |
|                 | 22          | 13,9 | 14,7 | 14,6 | 14,8 | 14,8 | 14,2 | 18,0 | 18,0 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 14,9 | 12,7 | 11,5 | 10,9 |
|                 | 24          | 14,0 | 15,0 | 14,9 | 15,0 | 14,7 | 14,0 | 18,4 | 18,9 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 16,3 | 14,1 | 12,9 | 12,3 |
|                 | 27          | 14,3 | 15,1 | 15,1 | 14,9 | 14,4 | 14,1 | 18,5 | 19,7 | 19,8 | 19,8 | 19,8 | 18,0 | 16,0 | 14,8 | 14,2 |
|                 | 30          | 14,3 | 14,9 | 14,9 | 14,6 | 13,9 | 14,3 | 18,4 | 20,1 | 20,4 | 22,3 | 22,2 | 19,3 | 17,8 | 16,4 | 15,8 |
|                 | 38          | 14,1 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,4 | 13,9 | 17,1 | 19,7 | 20,5 | 20,7 | 20,6 | 21,3 | 24,9 | 29,0 | 28,9 |

In den Spalten der Tabelle sind Länge und Breite der Glasscheibe in Intervallen von vollen Metern aufgetragen. Die maximal lieferbare Scheibengröße beträgt i.d.R. 6 m x 3 m. In den einzelnen Zeilen der Tabelle sind die Scheibendicken aufgetragen. Die Dicken wurden so gewählt, daß sich für VSG-Scheiben sinnvolle Kombinationen ergeben, beispielsweise VSG aus zwei ESG-Scheiben einer Dicke von 12 mm ergibt t=24mm. Der in der Tabelle abgelesene Wert ist die statische Ersatzlast in kN nach linearer Plattentheorie. Trägt man die statische Ersatzlast über die Scheibenlänge a in einem Diagramm auf, so erhält man:

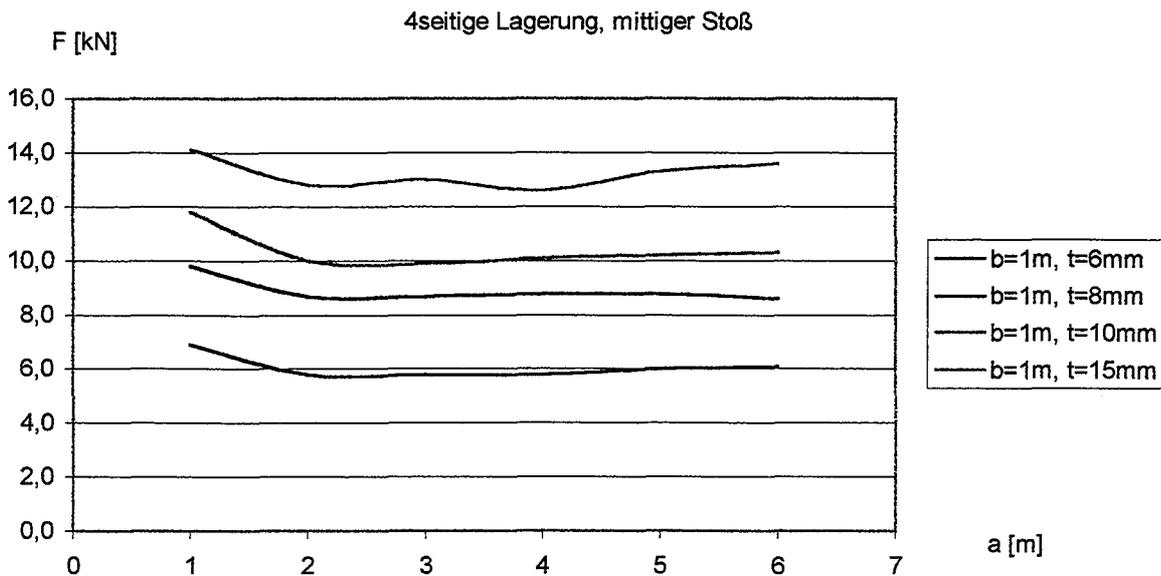


Abbildung 5.4: Statische Ersatzlast in Abhängigkeit der Scheibengeometrie bei vierseitiger Lagerung und mittigem Stoß, Fallhöhe  $h = 45$  cm, Breite jeweils 1 m

Trägt man in einem Diagramm verschiedene Scheibenbreiten bei gleicher Scheibendicke auf, so erhält man die folgende Abbildung:

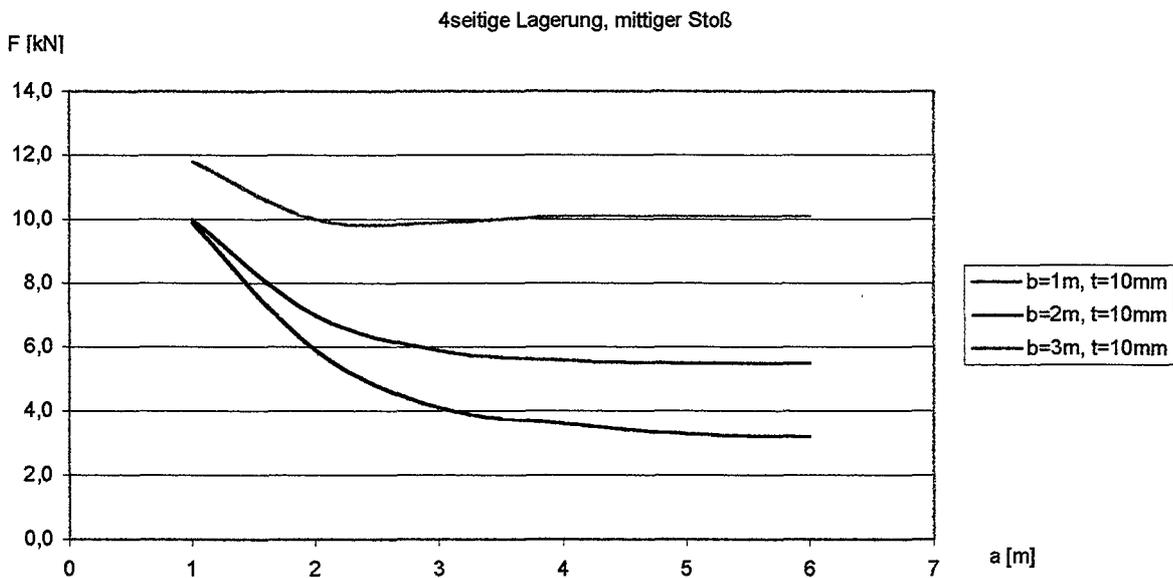


Abbildung 5.5: Statische Ersatzlast in Abhängigkeit der Scheibengeometrie bei vierseitiger Lagerung und mittigem Stoß, Fallhöhe  $h = 45$  cm, Scheibendicke jeweils 10 mm

Vergleicht man die statischen Ersatzlasten bei gleicher Scheibengeometrie, aber unterschiedlichem Anprallort, so stellt man fest, daß bei mittigem Stoß die geringste Ersatzlast ermittelt wird, und beim Eckstoß die höchste. Dies deckt sich mit den FE-Berechnungen und den empirischen Beobachtungen bei Experimenten und erklärt sich, wie bereits erwähnt, dadurch, daß die Glasscheibe beim Eckstoß steifer reagiert als beim

mittigen Stoß und sich deshalb der Lastaufnahme nicht durch Verformung entziehen kann. Die höhere statische Ersatzlast beim Eckstoß muß aber nicht zwangsläufig auch zu höheren Spannungen in der Scheibe führen, als sie bei mittigem Stoß auftreten. Die Lastabtragung ist beim Eckstoß wegen der Nähe zu zwei Lagern günstiger als bei mittigem Stoß. Welcher Anprallort des Reifens die höchsten Spannungen bewirkt und damit maßgebend ist, muß in jedem Einzelfall untersucht werden.

### **5.3 Statische Ersatzlasten für die zweiseitig gelenkig gelagerte Scheibe**

Für die zweiseitig linienförmig gelagerte Scheibe sind für mittigen Stoß, Eckstoß und Randstoß die Ersatzlasttabellen im Anhang abgedruckt. Es existieren 8 solcher Tabellen:

Lagerung der langen Seite

1. Mittiger Stoß
2. Randstoß auf die lange Seite
3. Randstoß auf die kurze Seite
4. Eckstoß

Lagerung der kurzen Seite:

5. Mittiger Stoß
6. Randstoß auf die lange Seite
7. Randstoß auf die kurze Seite
8. Eckstoß

### **5.4 Bestimmung der erforderlichen Fallhöhen zur rechnerischen Bemessung absturzsichernder Verglasungen**

Wie aus allen durchgeführten Untersuchungen der TU Darmstadt und der FMPA Stuttgart hervorgeht, wird bereits mit der Fallhöhe 450 mm ein Sicherheitsfaktor von ca. 2,0 gegenüber menschlichem Körperstoß erreicht. Soll eine rechnerische Bemessung auf die Fraktilwerte der mechanischen Festigkeiten des Glases nach DIN 1249 erfolgen, muß die Fallhöhe angepaßt werden, da sonst sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite ein Sicherheitsabstand berücksichtigt wird, der im Experiment nur auf der Einwirkungsseite vorliegt. Bei der experimentellen Untersuchung von nur zwei -zumeist fabrikneuen- Verglasungen muß von der Glasfestigkeit im Bereich des Erwartungswertes (Mittelwertes) ausgegangen werden. Zur rechnerischen Bemessung kann die Fallhöhe im Verhältnis des Abstandes von Mittelwert zu Fraktilwert der Biegefestigkeit entsprechend des oben dargestellten nichtlinearen Zusammenhanges zwischen Fallhöhe und Pendelbeschleunigung abgemindert werden.

Es ergeben sich aus:  $x_{5\%} = \bar{x} - 1,645 \cdot \sigma$

mit  $x_{5\%}$  = 5%-Fraktilwert,  $\bar{x}$  = Mittelwert,  $\sigma$  = Standardabweichung

und  $v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$  mit  $v$  = Variationskoeffizient

für einen konservativ angenommenen Variationskoeffizienten von 0,10 (bei fabrikneuem Glas liegt der Variationskoeffizient i.d.R. bei 0,2 bis 0,3, siehe auch [11]) folgende Fallhöhen im Vergleich mit den Fallhöhen bei experimentellen Untersuchungen:

Tabelle 5.4: Fallhöhen und Umrechnungsfaktoren zur Ermittlung statischer Ersatzlasten im Vergleich mit Fallhöhen zur experimentellen Absicherung:

| für $v = 0,10$   |                   |                         |
|------------------|-------------------|-------------------------|
| Fallhöhe Versuch | Fallhöhe Rechnung | Umrechnungsfaktor $k_1$ |
| 450 mm           | 325 mm            | 0,85                    |
| 700 mm           | 470 mm            | 1,02                    |
| 900 mm           | 575 mm            | 1,13                    |

Für höhere Variationskoeffizienten ergeben sich wesentlich höhere Abminderungen.

## 6 Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit von gefloatetem Alkali-Kalk-Silicatglas bei Stoßbeanspruchung durch weichen Stoß

### 6.1 Einleitung

Aus den Berechnungen und Ergebnissen der Stoßversuche ist ersichtlich, daß die Scheiben unter kurzzeitiger Belastung eine höhere Materialfestigkeit besitzen als die aus statischen Versuchen ermittelte. Dieser Sachverhalt ist damit zu erklären, daß es bei Glas unter anhaltender Spannung während der Biegeversuche zu unterkritischem Rißwachstum kommt, wodurch die Lebensdauer begrenzt wird. Dieses Rißwachstum wird stark durch chemische Korrosionsvorgänge an der Rißspitze beeinflusst. [10], [11], [13], [14], [18]. Diese chemischen Reaktionen benötigen jedoch Zeit, so daß bei kurzen Einwirkungszeiten das Versagen durch das Bruchkriterium  $K_I = K_{Ic}$  beschrieben werden kann. Im folgenden werden die Versuchsergebnisse bruchmechanischen Berechnungen auf Basis einer Lebensdauerprognose und auf Basis der Annahme  $K_I = K_{Ic}$  für den Stoßvorgang gegenübergestellt.

## 6.2 Bestimmung der Bruchspannungen bei Stoßbelastung aus einer Lebensdauerberechnung

Grundlage von bruchmechanischen Berechnungen ist der Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$ , [12] der bei Glas i.d.R. in seinem Modus I maßgebend wird:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y(\text{Geom.}, \dots) \quad (6.1)$$

Aus den in [11] oder [13] dargestellten Grundlagen zur Berücksichtigung des subkritischen Rißwachstums, beispielsweise über ein Potenzgesetz der Form:

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n \quad (6.2)$$

für den Bereich I in Abbildung 5.1 läßt sich über einige Umformungen die Integralgleichung

$$\int_0^{t_c} \sigma(t)^n dt = \frac{2}{(n-2) A Y^n a^{(n-2)/2}} \cdot \quad (6.3)$$

mit:

$n$  = Rißwachstumsparameter

$A$  = Rißausbreitungskonstante

$Y$  = Geometriefaktor

$a$  = Anfangsrißlänge

$\sigma(t)$  = Spannungs-Zeit-Verlauf

$t_c$  = Versagenszeitpunkt

zur Bestimmung der Lebensdauer des Bauteils finden. Dabei ist zu beachten, daß man den Wert des Integrals als konstant voraussetzt, so daß die in [11] erwähnten Effekte der Rißheilung nicht berücksichtigt werden. Für die vorliegenden Versuche, bei denen die Scheiben innerhalb weniger Minuten mehrmals belastet wurden, ist dies gerechtfertigt.

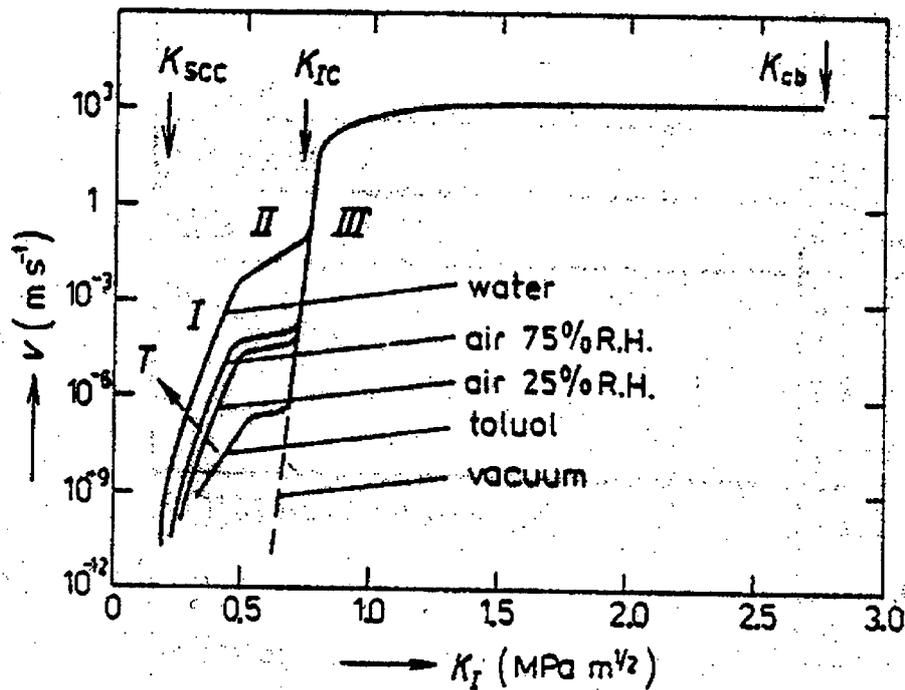


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Rißwachstumsgeschwindigkeit und  $K_{Ic}$  nach [14]

Für die Versuche an VSG aus 2 x 3 mm Floatglas in Kapitel 2 läßt sich der Verlauf der maximalen Zugspannung in Plattenmitte näherungsweise als Sinushalbwellen in der Form

$$\sigma_P(t) = \sigma_{PMax} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_P} t\right) \quad (6.4)$$

darstellen.  $\sigma_{Pmax}$  bezeichnet den Maximalwert der Spannung und  $t_P$  die halbe Periodendauer einer Sinusschwingung, d.h. die Einwirkungsdauer. Der Wert des Integrals  $I_P$  ergibt sich so aus Gleichung 5.3 zu:

$$I_P = \int \left( \sigma_{PMax} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_P} t\right) \right)^n dt. \quad (6.5)$$

Für diese Integral existiert keine Stammfunktion, es läßt sich jedoch durch eine Reihenentwicklung lösen, die [14] entnommen wurde.

$$I_P = \sigma_{PMax}^n \cdot t_P \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot n}} \left/ \left( 1 + \frac{1}{4 \cdot n} + \frac{1}{32 \cdot n^2} + \dots \right) \right. \quad (6.6)$$

Als Maß für die Lebensdauer können die Ergebnisse von Biegeversuchen herangezogen werden, die z.B. in DIN 52292 mit einer konstanten Spannungsrate bis zum Bruch belastet werden. Hier ergibt sich der Wert des Integrals aus Gleichung 6.3 zu:

$$I_V = \dot{\sigma}_V^n \cdot \frac{\sigma_{VB}^{n+1}}{(n+1) \cdot \dot{\sigma}_V^{n+1}} = \frac{\sigma_{VB}^{n+1}}{(n+1) \cdot \dot{\sigma}_V} \quad (6.7)$$

mit:

$\dot{\sigma}_V$  = Spannungsrate im Biegeversuch

$\sigma_{VB}$  = Bruchspannung im Biegeversuch

Gleichsetzen ergibt:

$$\sigma_{PMax} = \left[ \frac{\sigma_{VB}^{n+1} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot n} + \frac{1}{32 \cdot n^2}\right)}{\dot{\sigma}_V \cdot t_p \cdot (n+1) \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot n}}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6.8)$$

Mit Werten der Biegefestigkeit von Floatglas (5%-Fraktilwert der Biegefestigkeit nach DIN 1249 T10)  $f_{ik} = 45 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{imk} = 115 \text{ N/mm}^2$  (Mittelwert von fabrikneuen Scheiben aus Floatglas),  $n = 12 - 17$ , einer Belastungsrate von  $\dot{\sigma}_{VB} = 2 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{s)}$ , ergibt sich eine theoretische Festigkeitssteigerung von 30%-50% bezogen auf den 5%-Fraktilwert und von 40%-60% bezogen auf den Mittelwert gegenüber der statischen. Als Belastung ist hier ein einmaliger Pendelstoß angesetzt. Die Festigkeit definiert sich als der Maximalwert der während dieses Stoßes erreichten Spannung.

### 6.3 Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit bei Stoßbelastung mit $K_I=K_{Ic}$

Aus den statischen Versuchen läßt sich für bekannte Spannungsrate und Bruchspannung die Vorschädigung abschätzen. Je nach Bruchspannung erhält man für  $f_{mk} = 115 \text{ N/mm}^2$  eine Vorschädigung von  $a_0=2 \mu\text{m}$  und für  $f_{ik} = 45 \text{ N/mm}^2$  eine Vorschädigung von  $a_0=25 \mu\text{m}$  aus den Werten:

$$A = 0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \left[ \text{MN}^{-1} \cdot \text{m}^{2/3} \right]^n \quad (50\% \text{ rel. Luftfeuchte}) \quad [11],$$

$$Y = 1,12 \cdot \sqrt{\pi} = 1,99 \quad [14],$$

$$n = 15,$$

$$\dot{\sigma} = 2 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}) \text{ und}$$

$$\sigma = 115 \text{ N/mm}^2 = f_{mk}$$

Aus Gleichung  $K_I = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y(\text{Geom.}, \dots)$  (6.1) ergibt sich mit:

$$K_{Ic} = 0,78 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-\frac{3}{2}} \quad [11]$$

für den Mittelwert eine kalkulierte Bruchspannung von  $248 \text{ N/mm}^2$  und für den 5%-Fraktilwert eine Bruchspannung von  $78 \text{ N/mm}^2$ .

### 6.4 Vergleich mit den Versuchsergebnissen

Aus den in Kap. 2 dargestellten Beschleunigungs-Zeit-Verläufen läßt sich der Zeitpunkt des Versagens für die VSG-Scheiben aus 2 x 3 mm Floatglas ermitteln. Den so gefundenen Belastungszeiten kann man nun anhand der berechneten Spannungs-Zeit-Verläufe Bruchspannungen zuordnen. Für die Lebensdauerberechnung wurde die Integration bis zum Bruchzeitpunkt durchgeführt. Es ist zu beachten, daß bei einigen Versuchen die Scheiben mehrmals belastet wurden und es trotz maximaler Fallhöhe von 1200 mm nicht zum Bruch kam. Bei diesen Scheiben wird nur der Wert der erreichten Spannung bei einmaligem Pendeln angegeben. Es wurde für die kurzzeitige Belastung von vollem Schubverbund zwischen den Scheiben ausgegangen. In Abbildung 6.2 sind die Ergebnisse dargestellt.

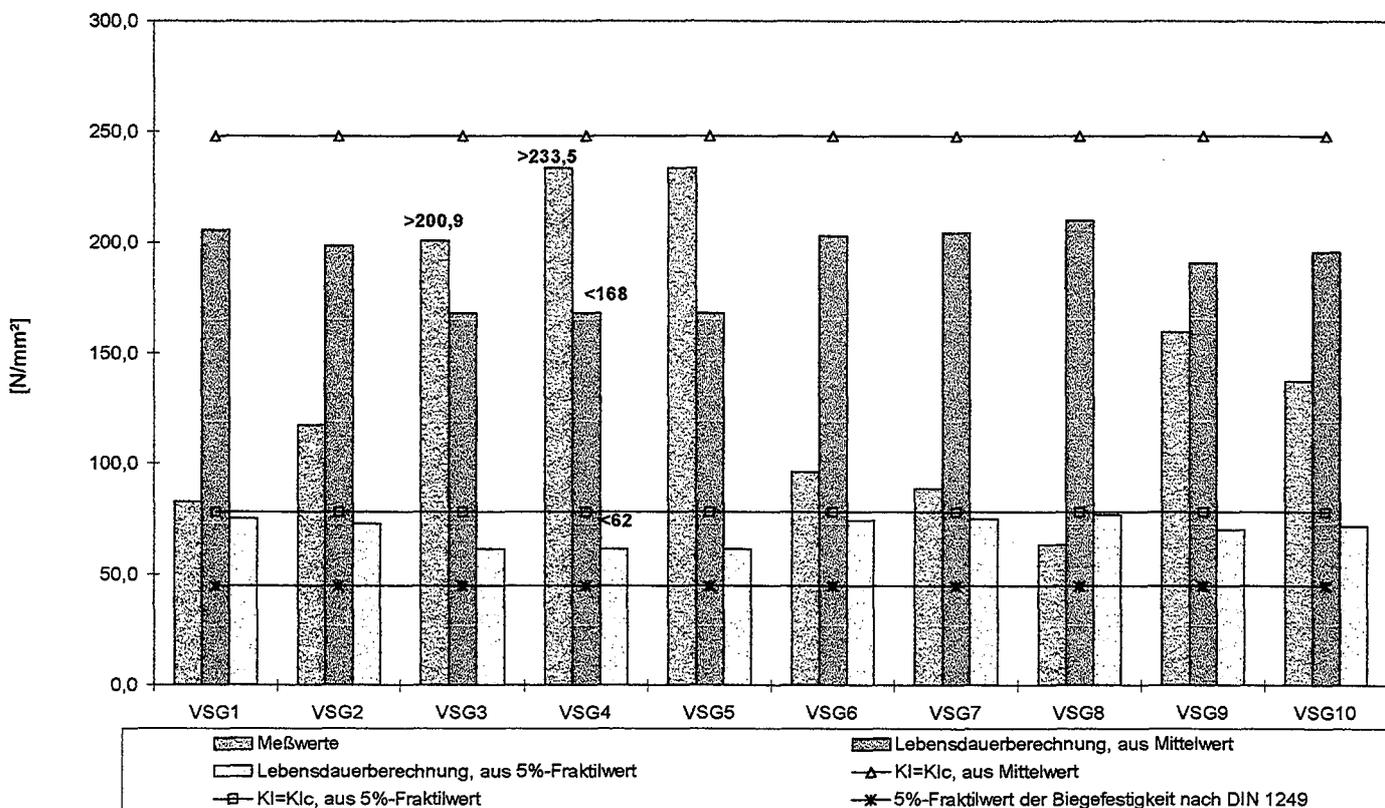


Abbildung 6.2: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Bruchspannungen [N/mm²] von Floatglas unter Stoßbelastung.

Für eine statistisch abgesicherte Aussage ist die Zahl der vorliegenden Versuche nicht ausreichend und zudem ist der Zeitpunkt des Versagens aus den Beschleunigungs-Zeit-Diagrammen nicht exakt zu bestimmen. Dennoch kann man die Tendenz zu den theoretisch hergeleiteten höheren Festigkeiten deutlich erkennen, insbesondere bei Scheiben, die trotz Spannungen >200 N/mm² nicht zu Bruch gingen. Zu einer ersten Abschätzung der Kurzzeitfestigkeit unter Stoßbelastung ist die vorliegende Abbildung mit den Grenzwerten  $K_I=K_{Ic}$  geeignet. Zusätzlich könnte man für eine noch genauere Betrachtung der

Lebensdauerberechnung auch den Bereich II in Abbildung 6.1 heranziehen. Die Biegefestigkeit von Floatglas unter Stoßbelastung könnte in erster Näherung für den 5%-Fraktilwert der Biegefestigkeit nach DIN 1249 T10 auf etwa 70 N/mm<sup>2</sup> erhöht werden. Für vorgespannte Gläser kann die höhere Eigenfestigkeit dem Anteil der Vorspannung von ca. 100 N/mm<sup>2</sup> für Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und ca. 50 N/mm<sup>2</sup> für teilvorgespanntes Glas (TVG) zur „Eigenfestigkeit“ des Floatglases addiert werden. Diese Werte bedürfen allerdings weiterer experimenteller Absicherung.

## 7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurde gezeigt, daß man mit Hilfe experimentell ermittelter Kenngrößen den dynamischen Vorgang des weichen Stoßes auf Verglasungen rechnerisch simulieren kann. Für Pendelschlagversuche nach E DIN EN 12600 gelingt die Simulation für beliebige Konstruktionen mit Hilfe eines Finite-Element-Modells trotz starker Vereinfachung des Pendelkörpers mit guter Übereinstimmung. Die Simulation ist allerdings mit einem erhöhten numerischen Aufwand unter Zuhilfenahme eines aufwendigen Softwarepaketes verbunden. Daher wurde versucht, ein vereinfachtes Modell auf der Basis eines Zweimassenschwingers zu entwickeln, das mit einem Tabellenkalkulationsprogramm eine Berechnung für die vierseitig gelagerte Scheibe ermöglicht. Dieses Modell zeigt bei den vorliegenden Versuchen eine akzeptable Übereinstimmung mit den in Versuch und FE-Rechnung ermittelten Werten. Es konnte gezeigt werden, daß die Pendelschlagversuche mit dem Doppelreifen-Versuchskörper eine sehr gute Reproduzierbarkeit ermöglichen, die mit anderen Versuchskörpern (z.B. Bleischrotsack) nicht gewährleistet ist. Allerdings ist nach den hier und in [2] vorliegenden Versuchen die Beanspruchung der Scheiben mit dem Doppelreifen-Versuchskörper bereits für die geringste der derzeit zum Nachweis absturzsichernder Verglasungen üblichen Fallhöhe (450 mm) höher als die durch menschlichen Körperstoß verursachte. Dies ist auf die gegenüber dem Versuchskörper geänderten Massen-/ Steifigkeitsverhältnisse des menschlichen Körpers und seine Aufprallfläche und Anlaufgeschwindigkeit zurückzuführen. Diese schwanken jedoch stark und es ist keine Reproduzierbarkeit gewährleistet. Eine Berechnung der kalkulierten Fallhöhen des Pendelkörpers aus Anlaufgeschwindigkeiten des Menschen, wie dies aufgrund von  $E_{kin} = E_{pot}$  zur Festlegung der Fallhöhen offensichtlich ursprünglich erfolgte, ist für Pendelschlagversuche mit dem Doppelreifen-Versuchskörper nicht hinreichend und somit die Umrechnung einer Anlaufgeschwindigkeit zur Bestimmung der Fallhöhen nicht zutreffend.

Fallhöhen  $\geq 450$  mm sind zwar für die versuchstechnische Absicherung von absturzsichernden Verglasungen im Rahmen der Zustimmungsverfahren vertretbar, da meist nur

zwei oder drei Probekörper zur Verfügung stehen, müssen jedoch für rechnerische Nachweise unter Berücksichtigung des Abstandes des Mittelwertes zum 5%-Fraktilwert reduziert werden, wenn auf Fraktilwerte der Biegefestigkeit der Gläser bemessen werden soll.

Der in den Normen festgelegte Fraktilwert der Biegefestigkeit von Floatglas könnte zudem aufgrund der theoretischen Untersuchungen und mit weiteren experimentellen Ergebnissen um etwa 50% erhöht werden.

Mit den vorliegenden Tabellen können statische Ersatzlasten bestimmt werden, die eine Bemessung von absturzsichernde Verglasungen bei Einwirkung eines weichen Stoßes mit dem Pendelkörper nach E DIN EN 12600 1998-06 ermöglichen.

## Literatur

- [1] Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Landesstelle für Bautechnik, Merkblätter aus dem Bereich Glasbau, <http://www.lgabw.de/lfb>
- [2] FMPA Baden-Württemberg, Abteilung 2 Baukonstruktion (1999) Forschungsbericht Nr. 25-204338: Untersuchung von vierseitig linienförmig gelagerten Scheiben bei Stoßbelastung.
- [3] Eibl J, Henseleit O, Schlüter F-H (1988) Baudynamik. Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1988, Ernst&Sohn Verlag, S. 720 ff.
- [4] Flachglas AG, Fax vom 19.02.99.
- [5a] Struck W, Limberger E (1982) DIN 4103 – Nichttragende Trennwände, Untersuchungen zur Festlegung des Anforderungsniveaus – statische und stoßartige Belastungen, Bautechnik 11 (1982), S. 367 ff.
- [5b] Struck W, Limberger E (1994) Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß- eine erweiterte Modellvorstellung, BAM Forschungsbericht 204.
- [6] Clough R W, Penzien J (1975) Dynamics of Structures, McGRAW-HILL International.
- [7] Hauger W, Schnell W, Gross D, Wriggers P (1995) Technische Mechanik 4, Hydromechanik, Elemente der höheren Mechanik, Numerische Methoden, Springer Verlag.
- [8] Constantinescu D, Wörner J D (1998) Skriptum zur Vorlesung Baudynamik 1, Institut für Statik, TU-Darmstadt.
- [9] Wuttke U (1999) Berechnung und Simulation des Pendelschlagversuchs, Vertiefearbeit am Institut für Statik der TU Darmstadt, unveröffentlicht.
- [10] Kerkhof F, Richter H, Stahn D (1981) Festigkeit von Glas, Zur Abhängigkeit von Belastungsdauer und -verlauf. Glastechnische Berichte 54, 1981.

- [11] Fink A (1999) Mechanische Eigenschaften und Dauerstandsverhalten von Flachglas für bauliche Anlagen, VDI-Bericht 1527 Bauen mit Glas.
- [12] Gross D (1996) Bruchmechanik. Springer Verlag, Berlin.
- [13] Wiederhorn S M, Bolz L H (1970) Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass. Journal of The American Ceramic Society, Vol. 53, No. 10, 1970.
- [14] Mencik J (1992) Strength and fracture of glass and ceramics. Glass Science & Technology Vol. 12, Elsevier Science Ltd.
- [15] Hauger W, Schnell W, Gross D (1995) Technische Mechanik 3: Kinetik, 5. Auflage Springer Verlag, Berlin.
- [16] Bathe K J (1990) Finite-Elemente-Methoden, Springer Verlag, Berlin.
- [17] Seeger T (1995) Skriptum Werkstoffmechanik/Werkstofftechnologie, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TH-Darmstadt.
- [18] Exner G, Lindig O (1982) Bestimmung des Widerstandswertes der Spannungsrisskorrosion an Borosilicatglas DURAN, Glastechnische Berichte 55 (1982).
- [19] Huber K (1995) Entwicklung eines Stoßkörpers für Pendelschlagversuche. Seminarband Rosenheimer Fenstertage 1995, S. 69 – 78.
- [20] Schneider J: Ein Beitrag zum Nachweis der Tragfähigkeit von Flachglas: Punktgelagerte und absturzsichernde Verglasungen, Dissertation, in Vorbereitung.
- [21] Ostermann D (2000) Ermittlung von statischen Ersatzlasten für die dynamische Einwirkung von Stößen auf absturzsichernde Verglasungen. Diplomarbeit, TU Darmstadt, Institut für Statik, unveröffentlicht.
- [22] Schneider J, Wuttke U (2000) Experimentelle und rechnerische Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß, VDI-Bericht 1527 Bauen mit Glas.

Vielen Dank an Dr.-Ing. Hans Schneider für wertvolle Anregungen und Tips zur ANSYS-Modellierung.

Versuche an Einfachverglasungen:

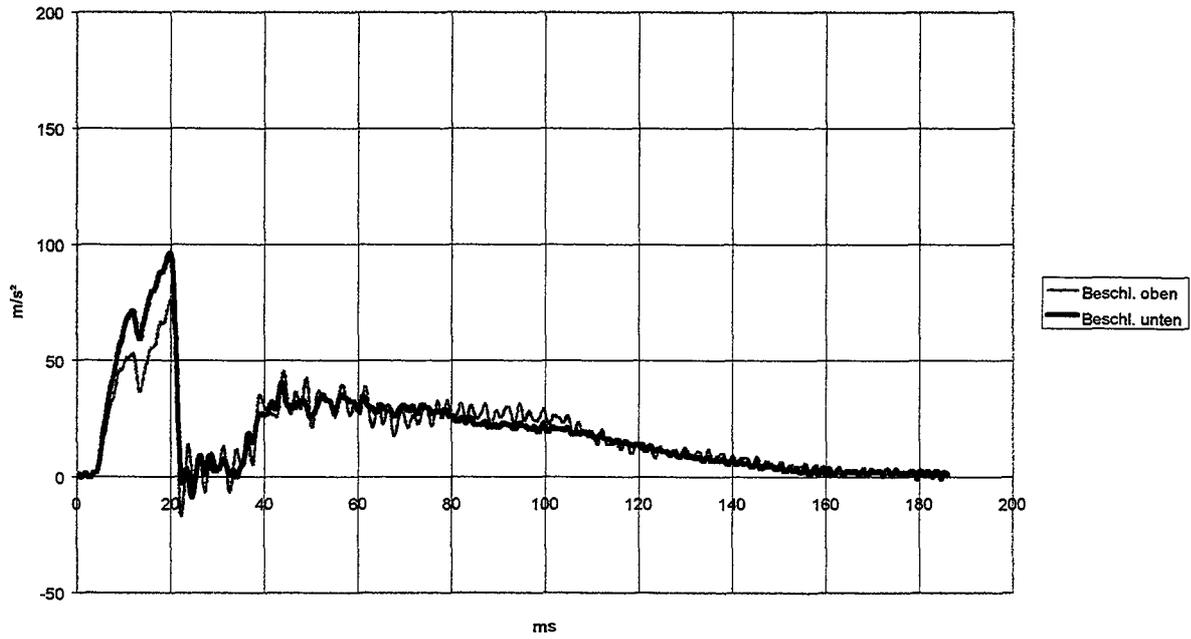
| Versuch Nr. | Scheibe Nr. | Aufbau         | Fallhöhe [mm] | zerstört ? | bestanden? | Körper         | max a | max E hor. | max E vert. |
|-------------|-------------|----------------|---------------|------------|------------|----------------|-------|------------|-------------|
| 1           | VSG 1       | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | ja         | Doppelreifen   | 86    | -          | -           |
| 2           | VSG 2       | 2 x 3 mm Float | 450           | hintere S. | "          | (50 kg)        | 164   | -          | -           |
| 3           | VSG 3       | 2 x 3 mm Float | 450           | keine S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 4           | "           | "              | 700           | beide S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 5           | VSG 4       | 2 x 3 mm Float | 450           | keine S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 6           | "           | "              | 700           | keine S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 7           | "           | "              | 1200          | keine S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 8           | VSG 5       | 2 x 3 mm Float | 450           | keine S.   | "          | "              | 189   | -          | -           |
| 9           | "           | "              | 700           | keine S.   | "          | "              | -     | -          | -           |
| 10          | VSG 6       | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | "          | "              | 78    | -          | -           |
| 11          | VSG 7       | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | nein       | "              | 88    | -          | -           |
| 12          | VSG 8       | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | ja         | "              | 100   | -          | -           |
| 13          | VSG 9       | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | "          | "              | 116   | -          | -           |
| 14          | VSG 10      | 2 x 3 mm Float | 450           | beide S.   | "          | "              | 123   | -          | -           |
| 15          | ESG 1       | 8 mm ESG       | 450           | -          | ja         | "              | 209   | 1999,9     | 1403,2      |
| 16          | "           | "              | 450           | -          | "          | "              | 213   | 2002,6     | 1416,4      |
| 17          | "           | "              | 450           | -          | "          | "              | 211   | 1985,8     | 1403,5      |
| 18          | "           | "              | 450           | -          | "          | "              | 210   | 1979,2     | 1399,1      |
| 19          | "           | "              | 450           | -          | "          | "              | 212   | 1988,7     | 1404,7      |
| 20          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | -     | -          | -           |
| 21          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | 270   | -          | -           |
| 22          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | 265   | 2245,0     | 1621,0      |
| 23          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | 264   | 2250,6     | 1623,0      |
| 24          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | 267   | 2261,6     | 1635,4      |
| 25          | "           | "              | 700           | -          | "          | Bleischrotsack | -     | 1838,1     | 1278,0      |
| 26          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | -     | 1826,4     | 1260,9      |
| 27          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | -     | 1826,4     | 1253,4      |
| 28          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | -     | 1825,9     | 1252,9      |
| 29          | "           | "              | 700           | -          | "          | "              | -     | 1851,0     | 1273,6      |
| 30          | "           | "              | 90 kg, 2,50 m | -          | "          | menschl. Stoß  | -     | 637,157    | 202,477     |
| 31          | "           | "              | "             | -          | "          | "              | -     | 840,609    | 318,457     |
| 32          | "           | "              | 83 kg, 2,50 m | -          | "          | "              | -     | 1031,147   | 333,32      |
| 33          | "           | "              | "             | -          | "          | "              | -     | 781,157    | 312,365     |
| 34          | "           | "              | 68 kg, 2,50 m | -          | "          | "              | -     | 477,563    | 160,812     |
| 35          | "           | "              | "             | -          | "          | "              | -     | 865,706    | 376,447     |
| 36          | "           | "              | 1200          | -          | "          | Doppelreifen   | 368   | 2538,396   | 1919,269    |
| 37          | "           | "              | "             | -          | "          | "              | 367   | 2530,355   | 1909,279    |
| 38          | "           | "              | "             | -          | "          | "              | 372   | 2534,741   | 1909,279    |
| 39          | Stahlwand   | -              | 200           | -          | -          | Doppelreifen   | 148   | -          | -           |
| 40          | "           | -              | 150           | -          | -          | (45 kg)        | 142   | -          | -           |
| 41          | "           | -              | 250           | -          | -          | "              | 181   | -          | -           |
| 42          | "           | -              | 450           | -          | -          | "              | 270   | -          | -           |
| 43          | "           | -              | 700           | -          | -          | "              | 327   | -          | -           |
| 44          | "           | -              | 1000          | -          | -          | "              | 384   | -          | -           |

## Versuche an Isolierverglasungen:

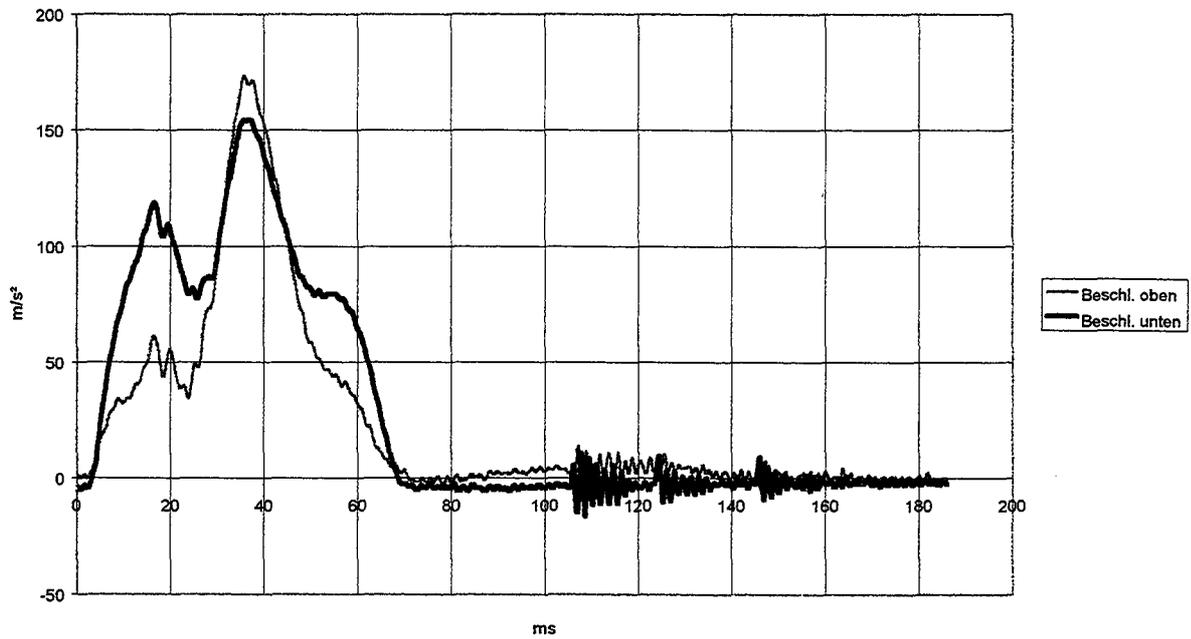
| Versuch Nr. | Auftreffstelle   | Aufbau  | Fallhöhe [mm], Gewicht u. Anlaufstrecke | zerstört?            | bestanden? | Körper       | max a | max E hor.                             | max E vert.             |
|-------------|--|---|---|----------------------|------------|--------------|-------|--|-------------------------|
| Iso 1       | Scheibenmitte  | 2 x 6 mm VSG aus Float/<br>15 mm SZR/<br>8 mm Float | 200                                     | keine S.             | ja         | Doppelreifen | 145   | 894                                    | 583                     |
| Iso 2       | "  | "   | 300                                     | innere S. des VSG    | "          | "            | 157   | 1069                                   | 680                     |
| Iso 3a      | "  | "   | 300                                     | äußere S. des VSG    | "          | "            | 137   | 592                                    | 192                     |
| Iso 3b      | Scheibenecke (Abstand jeweils 300 mm von der Kante)                              | "   | 300                                     | keine weitere S.     | "          | "            | 130   | 810 (VSG)<br>1120 (Fit)                | 231 (VSG)<br>1120 (Fit) |
| Iso 4       | Scheibenmitte  | "   | 108 kg, 2,00 m                          | "                    | "          | Mensch       | -     | 530 (Float)                            | 403 (Float)             |
| Iso 5       | "  | "   | 108 kg, 3,00 m                          | "                    | "          | "            | -     | 557 (Float)                            | 432 (Float)             |
| Iso 6       | "  | "   | 108 kg, 5,00 m                          | "                    | "          | "            | -     | 624 (Float)                            | 481 (Float)             |
| Iso 7       | "  | "   | 68 kg, 5,00 m                           | "                    | "          | "            | -     | 452 (Float)                            | 345 (Float)             |
| Iso 8       | "  | "   | Tritt                                   | "                    | "          | Fußtritt     | -     | 538 (Float)                            | 468 (Float)             |
| Iso 9       | "  | "   | "                                       | "                    | "          | "            | -     | 748 (Float)                            | 429 (Float)             |
| Iso 10      | Scheibenecke   | "   | Tritt                                   | "                    | "          | "            | -     | 89 (Float, Ecke)<br>107 (Float, Mitte) | 19 (Float, Ecke)        |
| Iso 11      | Scheibenmitte  | 6 mm ESG (innen), 15mm SZR, 8 mm ESG (außen)        | 108 kg, 3,00 m                          | keine S.             | "          | Mensch       | -     | 445                                    | 302                     |
| Iso 12      | "  | "   | Ellenbogenstoß                          | "                    | "          | "            | -     | 96                                     | 82                      |
| Iso 13      | "  | "   | "                                       | "                    | "          | "            | -     | 443                                    | 285                     |
| Iso 14      | "  | "   | 200                                     | "                    | "          | Doppelreifen | 122   | 1787                                   | 1309                    |
| Iso 15      | "  | "   | 300                                     | "                    | "          | "            | 159   | 2055                                   | 1421                    |
| Iso 16      | "  | "   | 450                                     | "                    | "          | "            | 248   | 2628                                   | 1757                    |
| Iso 17      | Scheibenrand (vertikal Scheibenmitte, horizontal Abstand 300 mm von Seitenkante) | "   | 200                                     | "                    | "          | "            | 129   | 1888                                   | 1200                    |
| Iso 18      | "  | "   | 300                                     | "                    | "          | "            | 159   | 2139                                   | 1391                    |
| Iso 19      | Scheibenmitte  | "   | 65 kg, 3,00 m                           | "                    | "          | Mensch       | -     | 354                                    | 186                     |
| Iso 20      | Scheibenecke   | "   | Tritt                                   | "                    | "          | Fußtritt     | -     | 767                                    | 530                     |
| Iso 21      | "  | "   | 200                                     | "                    | "          | Doppelreifen | 139   | 1678                                   | 1511                    |
| Iso 22      | "  | "   | 300                                     | "                    | "          | "            | 178   | 1733                                   | 1631                    |
| Iso 23      | "  | "   | 450                                     | "                    | "          | "            | 224   | 1825                                   | 1744                    |
| Iso 24      | "  | "   | 700                                     | "                    | "          | "            | 276   | 1873                                   | 1805                    |
| Iso 25      | Scheibenmitte  | "   | 700                                     | "                    | "          | "            | 240   | 2669                                   | 1776                    |
| Iso 26      | "  | "   | 900                                     | innere S. (ESG 6 mm) | "          | "            | 270   | 2607                                   | 1921                    |
| Iso 27      | Scheibenecke   | 8 mm ESG (verbliebene Scheibe)                      | 700                                     | nein                 | "          | "            | 275   | 1954                                   | -                       |
| Iso 28      | "  | "   | 900                                     | "                    | "          | "            | 309   | 2266                                   | -                       |
| Iso 29      | "  | "   | 1200                                    | 8 mm ESG             | nein       | "            | 303   | 2190                                   | -                       |

Max a in [m/s<sup>2</sup>], max E Dehnung in [µm/m]. Alle hier angegebenen Dehnungen wurden an den Aufprallstellen gemessen, dabei war die Meßrichtung der Dehnungsmeßstreifen parallel zu den Scheibenkanten. Die angegebenen Beschleunigungen wurden jeweils aus den Messungen am oberen und unteren Gewicht des Fallkörpers gemittelt.

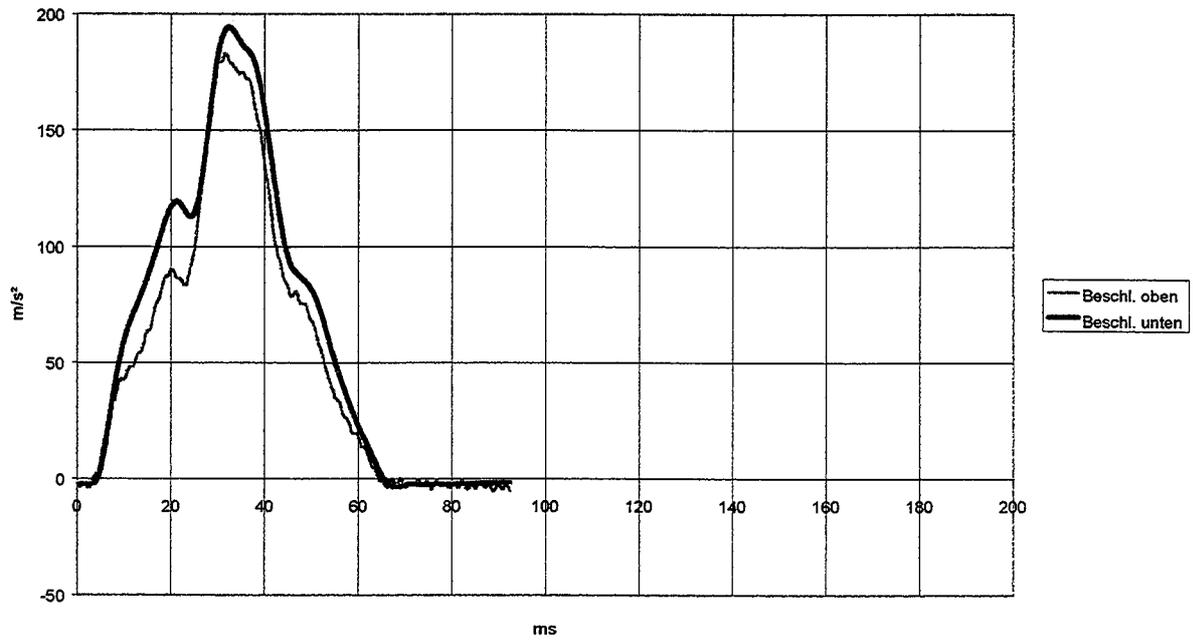
Versuch 01, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, hintere Scheibe gebrochen



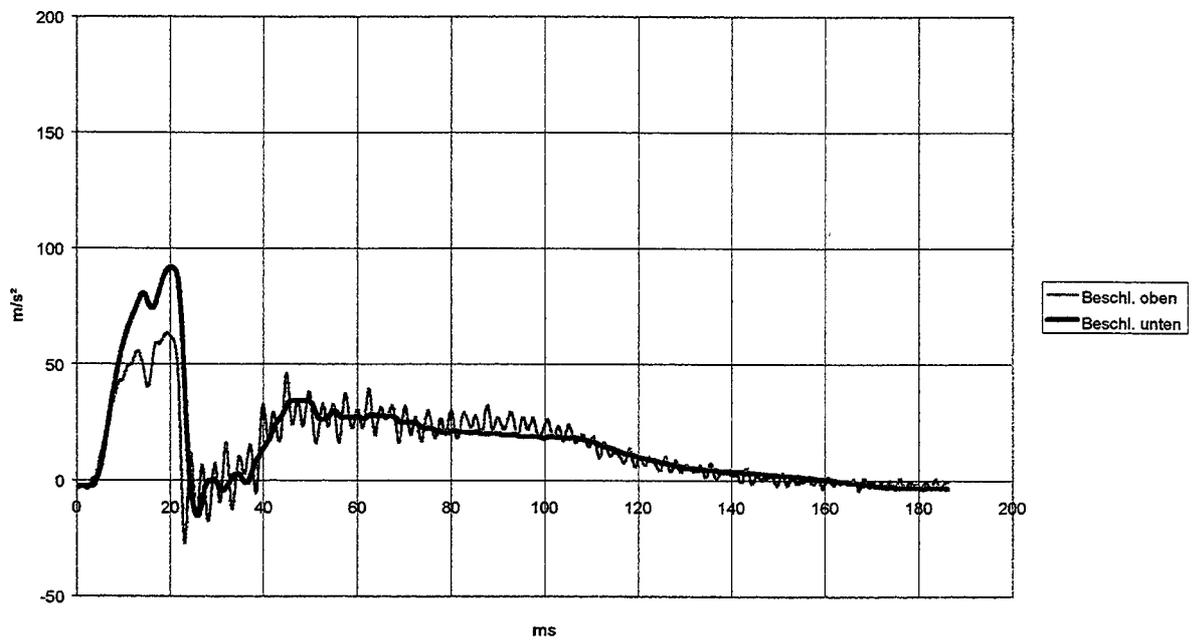
Versuch 02, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, Bruch beider Scheiben



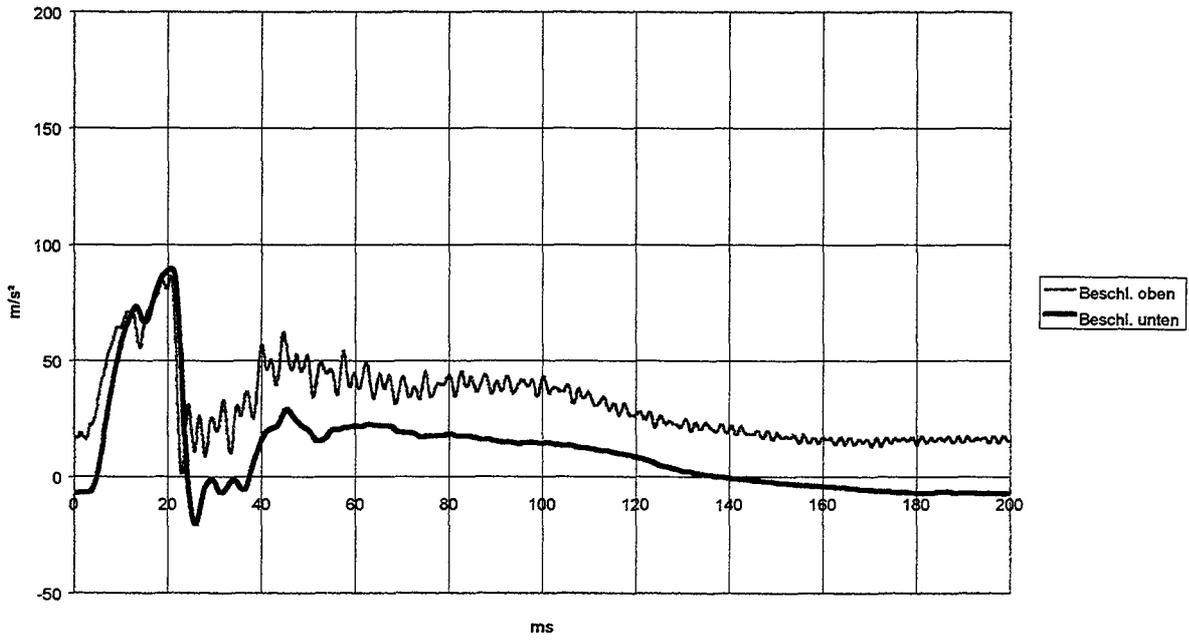
Versuch 08, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, keine Scheibe gebrochen



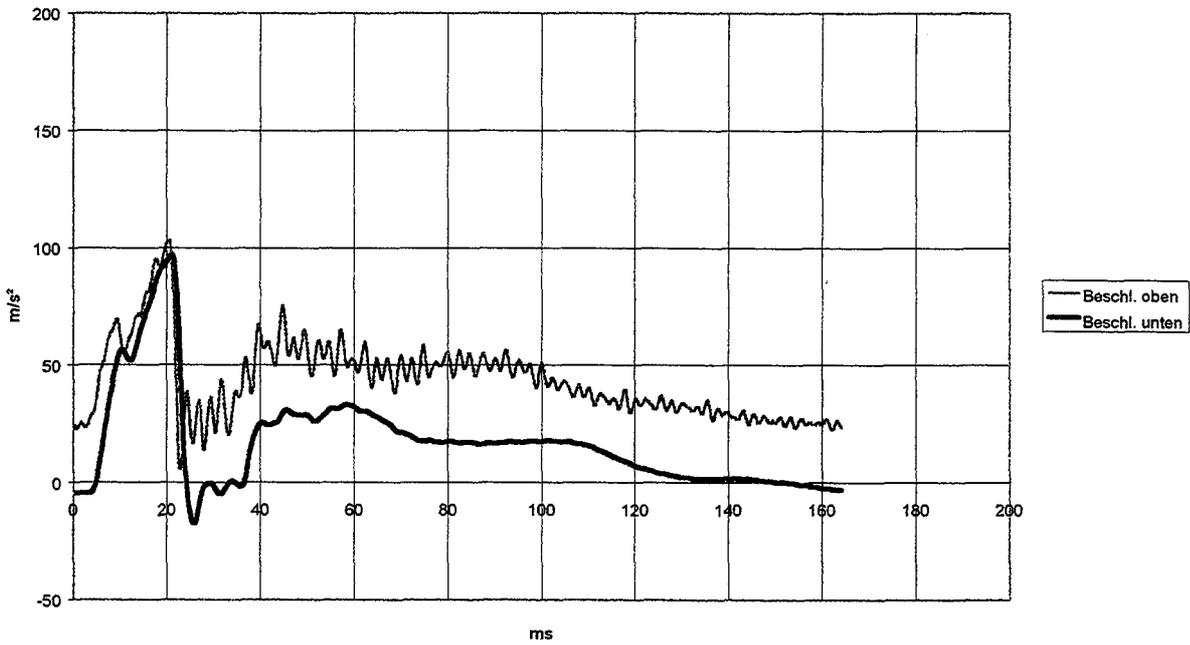
Versuch 10, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, beide Scheiben gebrochen



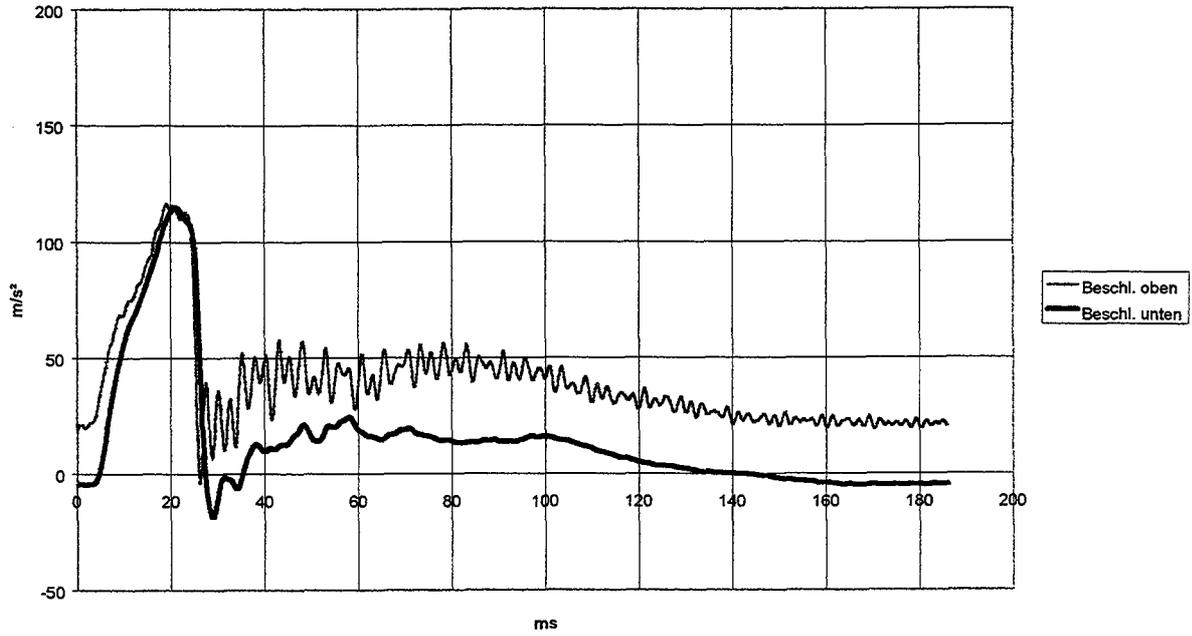
Versuch 11, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, beide Scheiben gebrochen



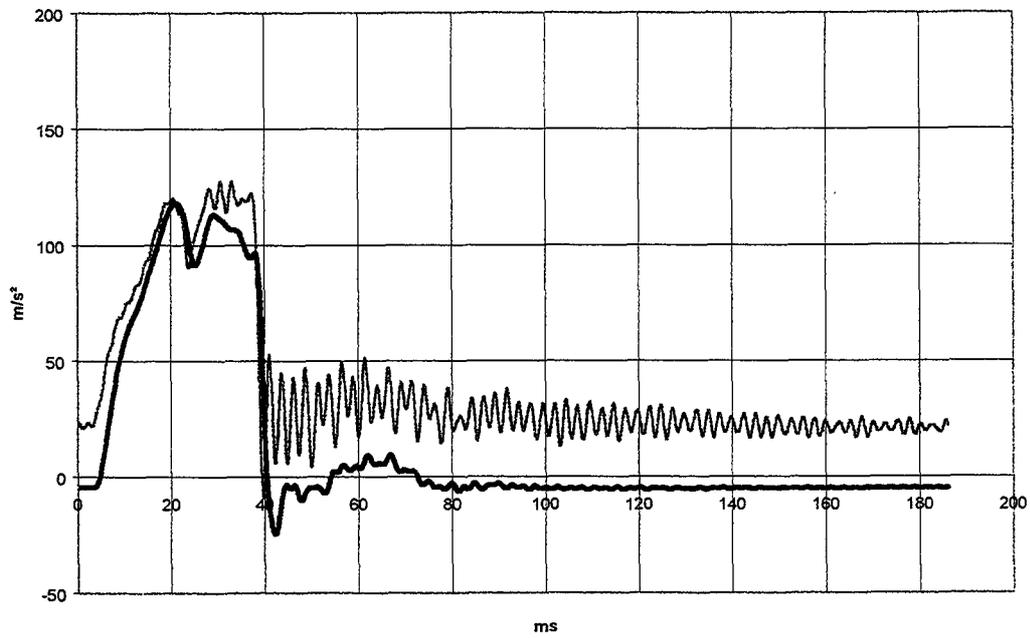
Versuch 12, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, beide Scheiben gebrochen



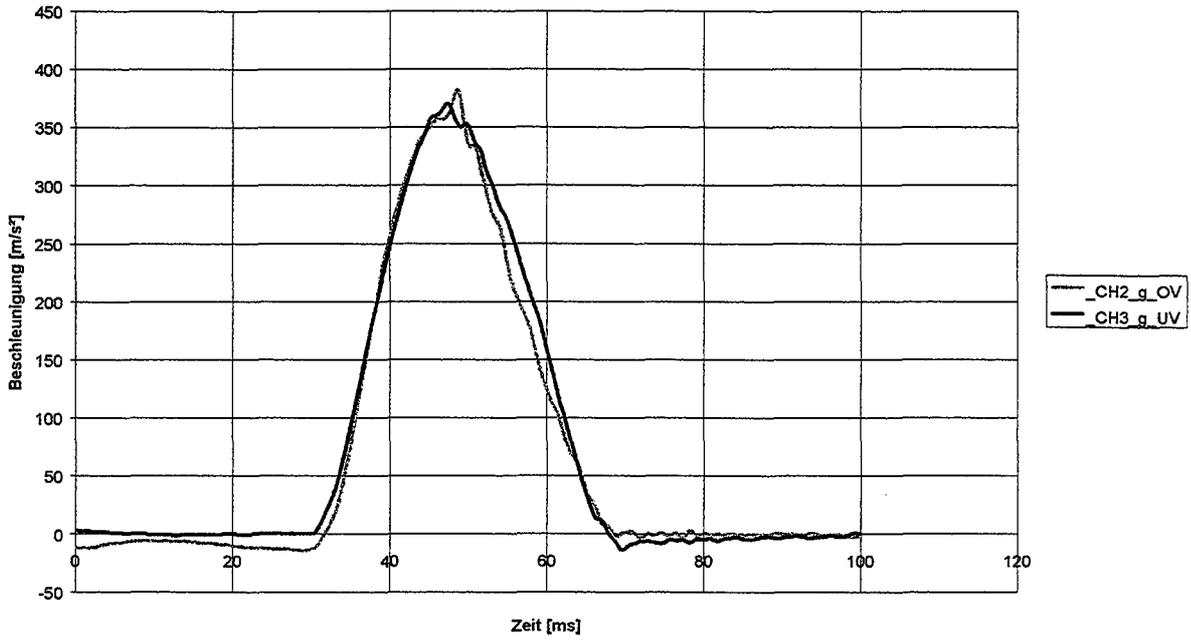
Versuch 13, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, beide Scheiben gebrochen



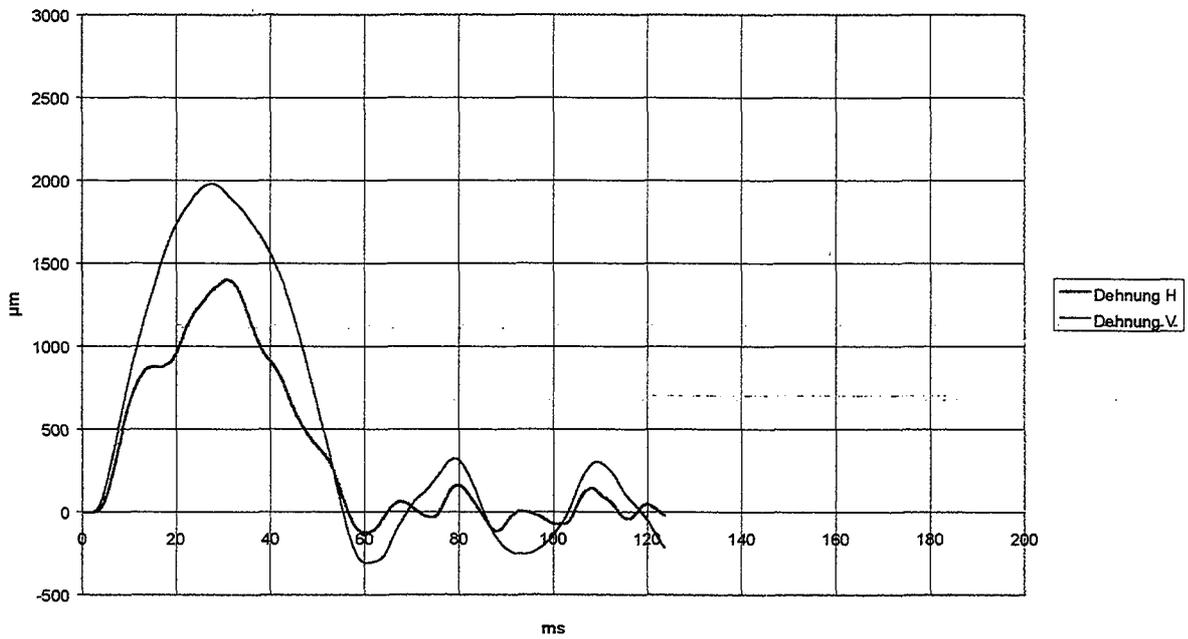
Versuch 14, VSG 2 x 3 mm Floatglas, Fallhöhe 450 mm, beide Scheiben gebrochen



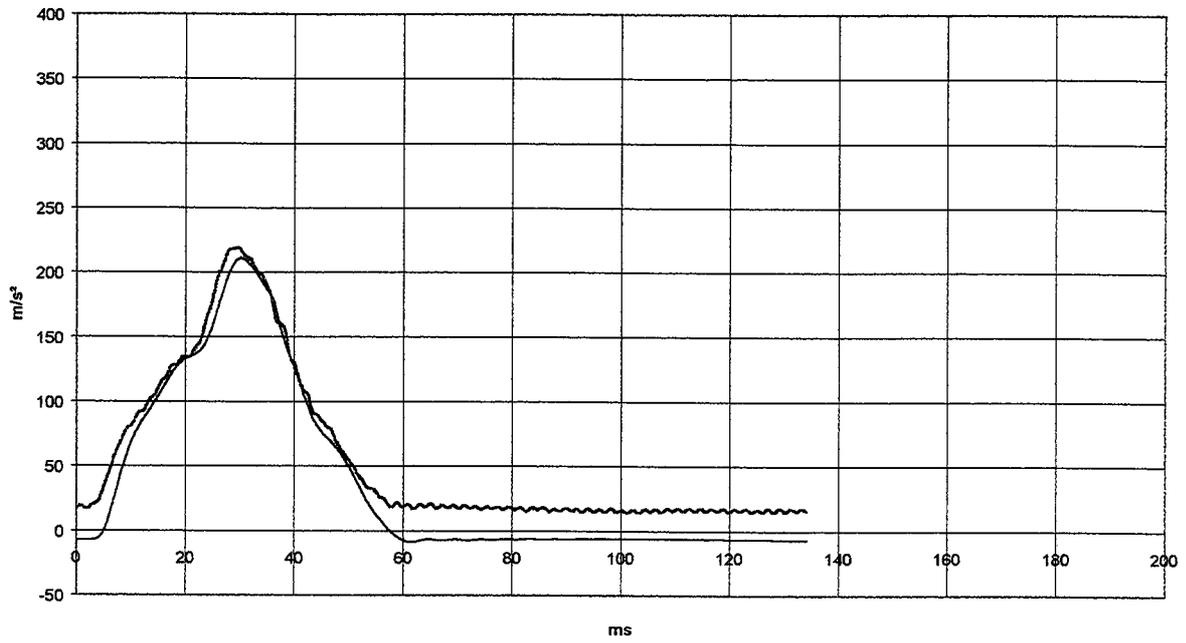
Pendelschlagversuch gegen Stahlwand, 50kg, 900mm



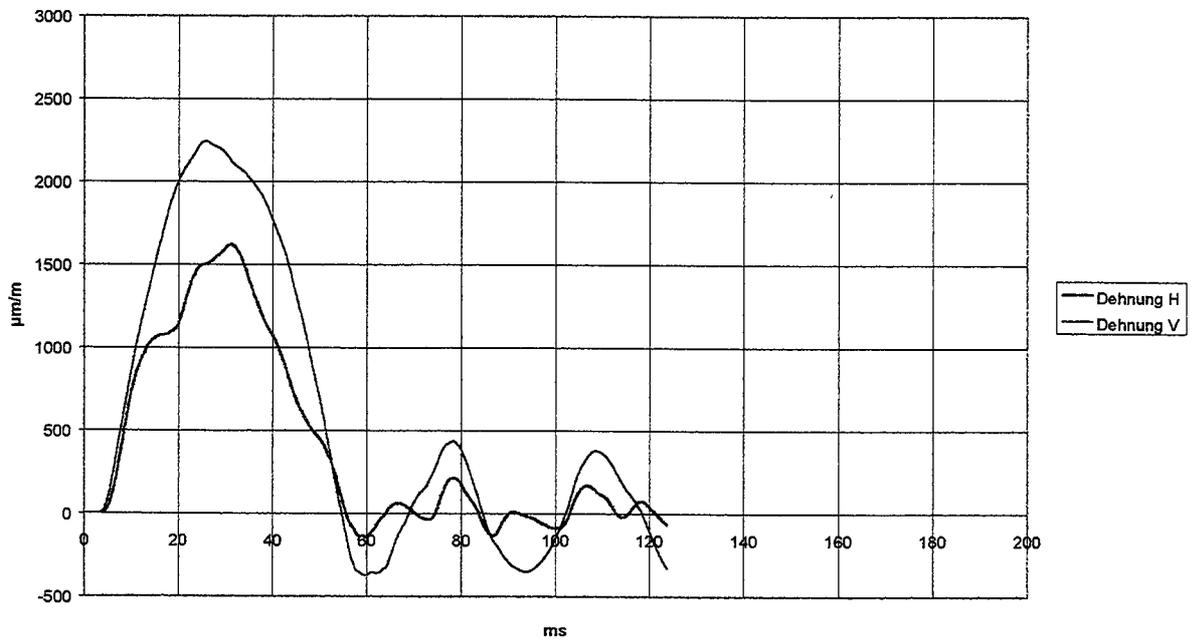
Versuch 18, ESG 8 mm, Fallhöhe 450 mm mit DMS



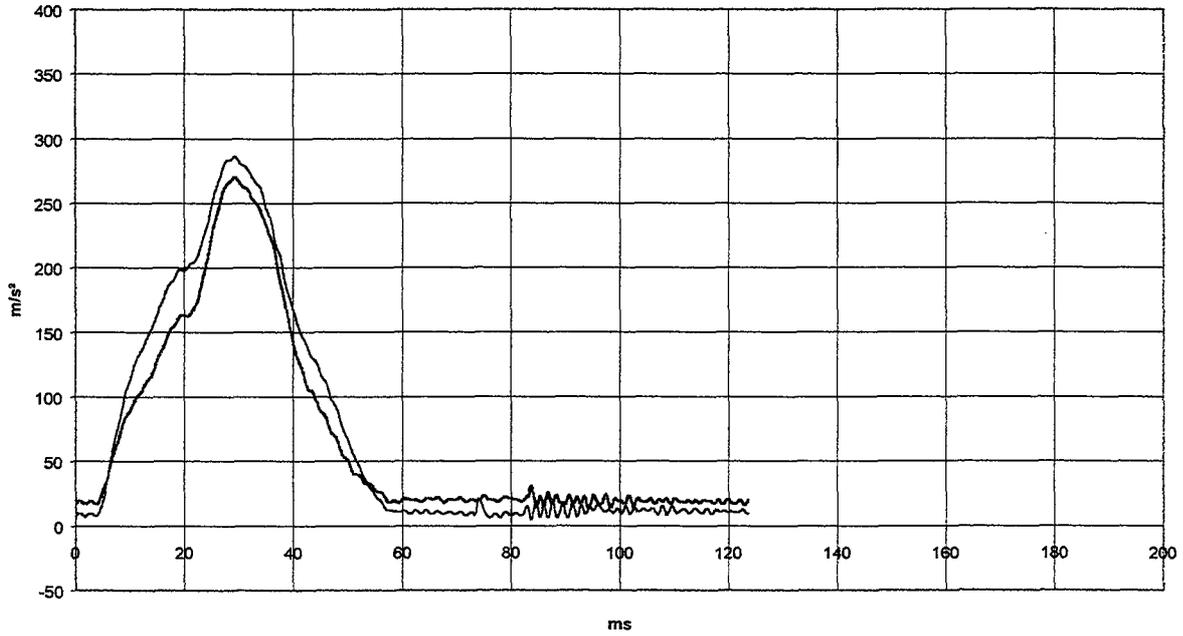
Versuch 18, ESG 8 mm, Fallhöhe 450 mm mit DMS



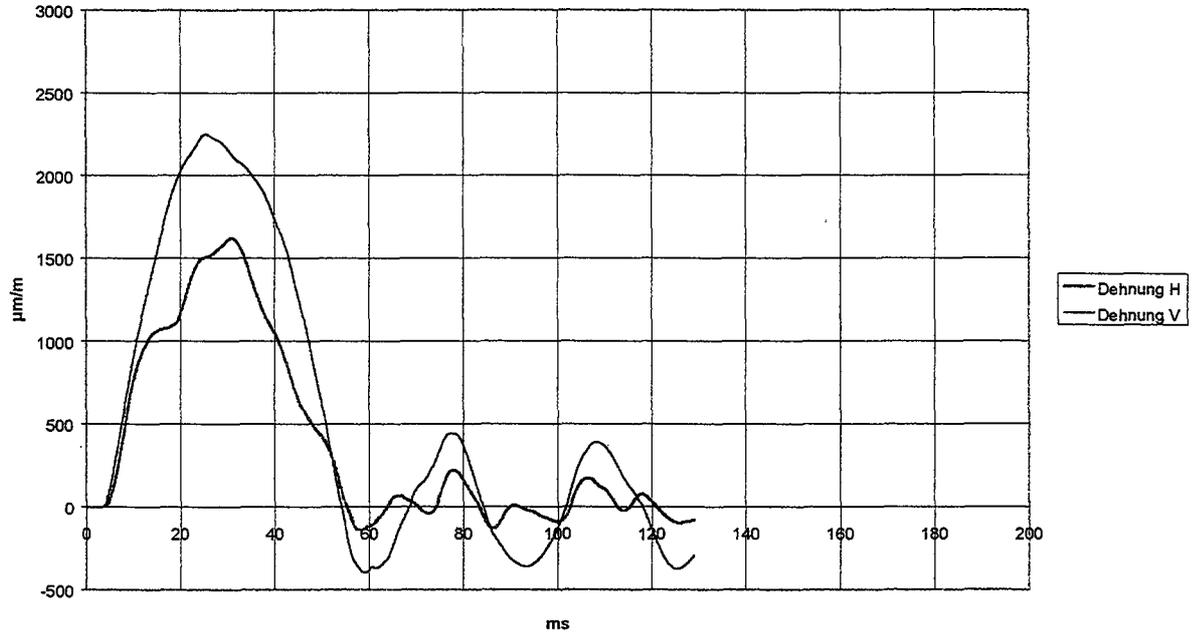
Versuch 22, ESG 8 mm, Fallhöhe 700 mm mit DMS



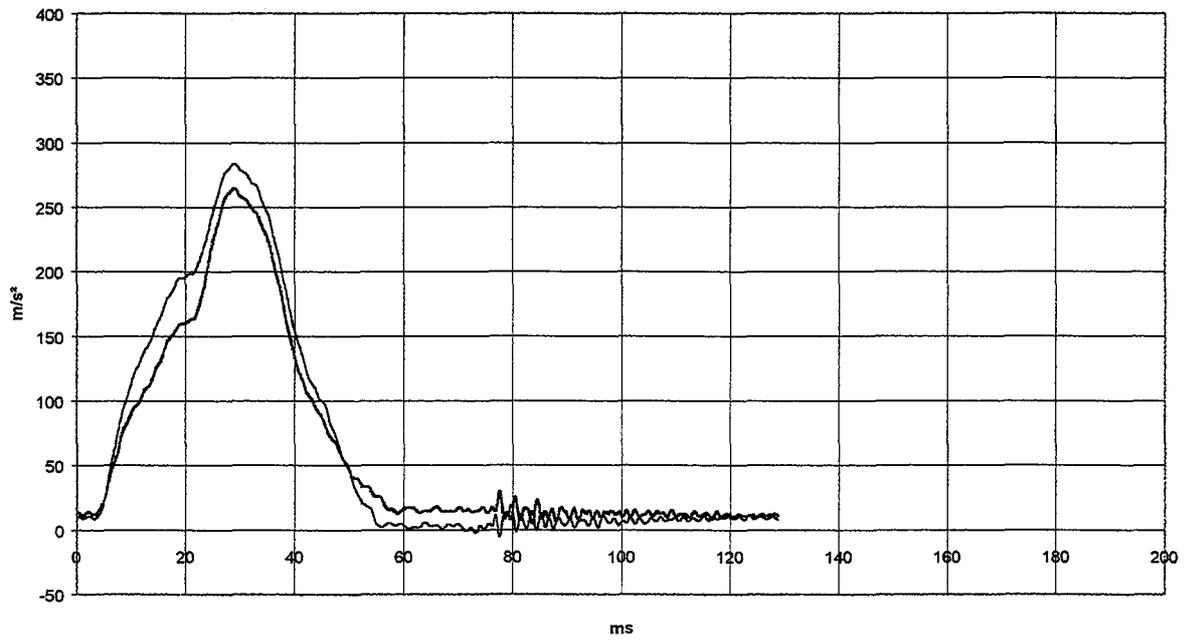
Versuch 22, ESG 8 mm, Fallhöhe 700 mm mit DMS



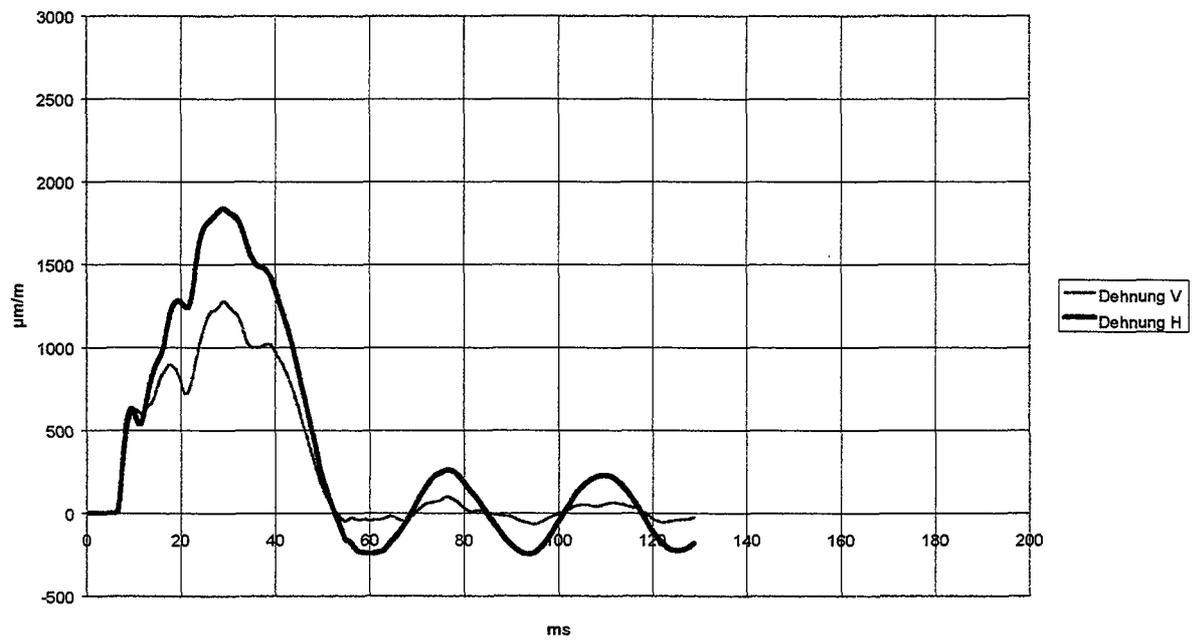
Versuch 23, ESG 8 mm, Fallhöhe 700 mm mit DMS



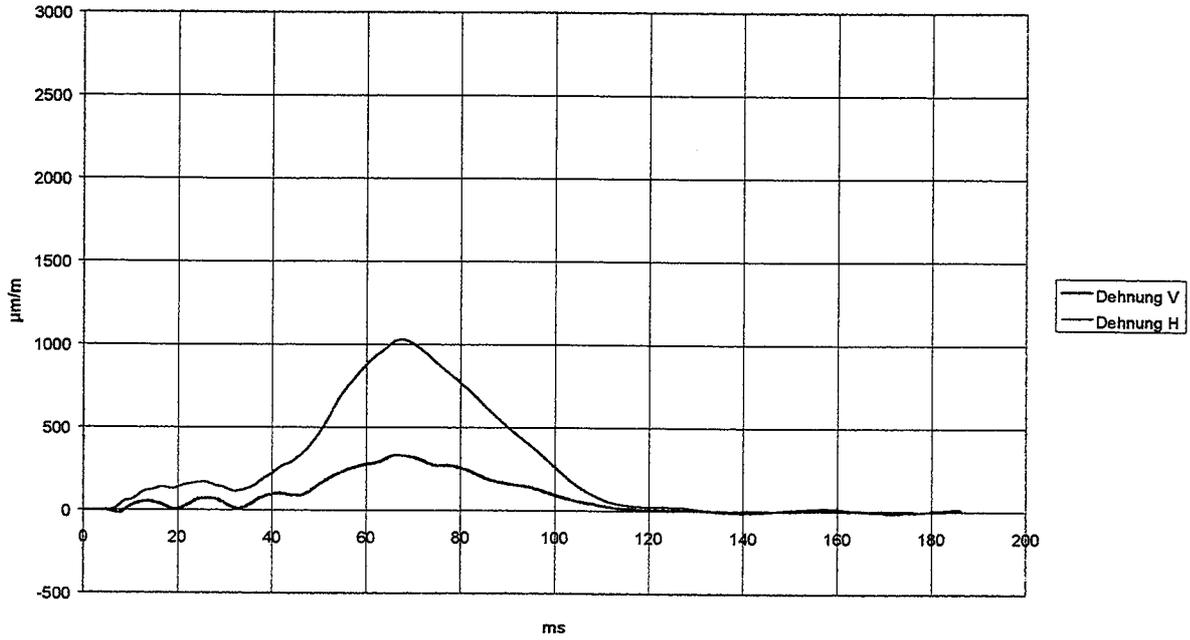
Versuch23, ESG 8 mm, Fallhöhe 700 mm mit DMS



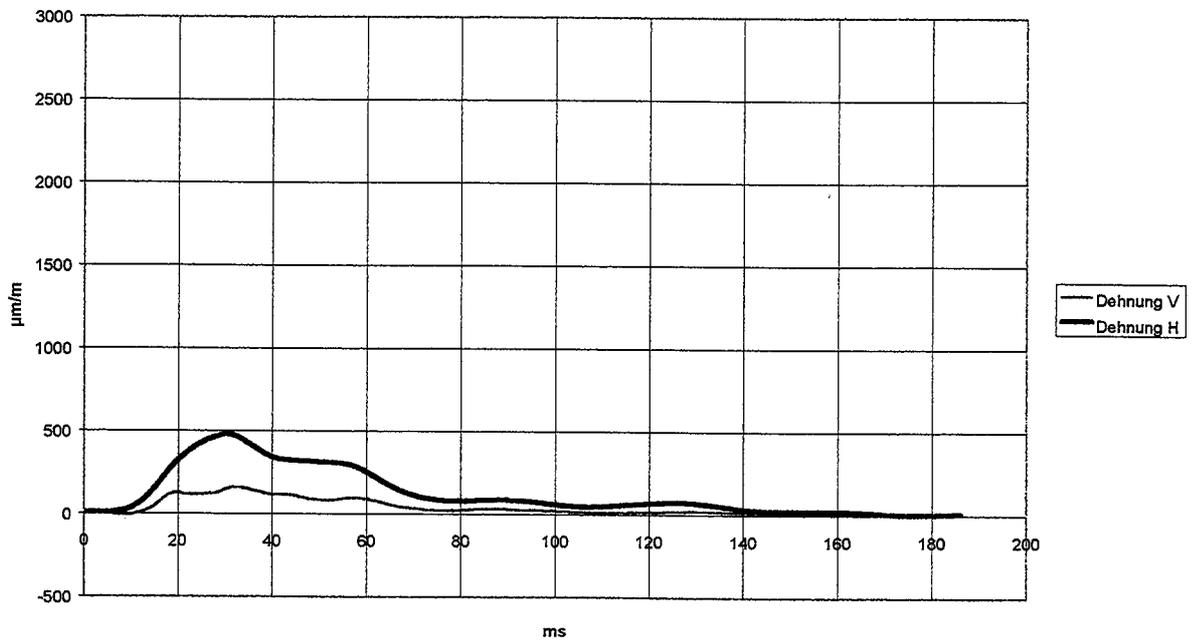
Versuch 25, ESG 8 mm, Bleischrotsack, Fallhöhe 700 mm mit DMS, ohne Beschleunigungsmess.



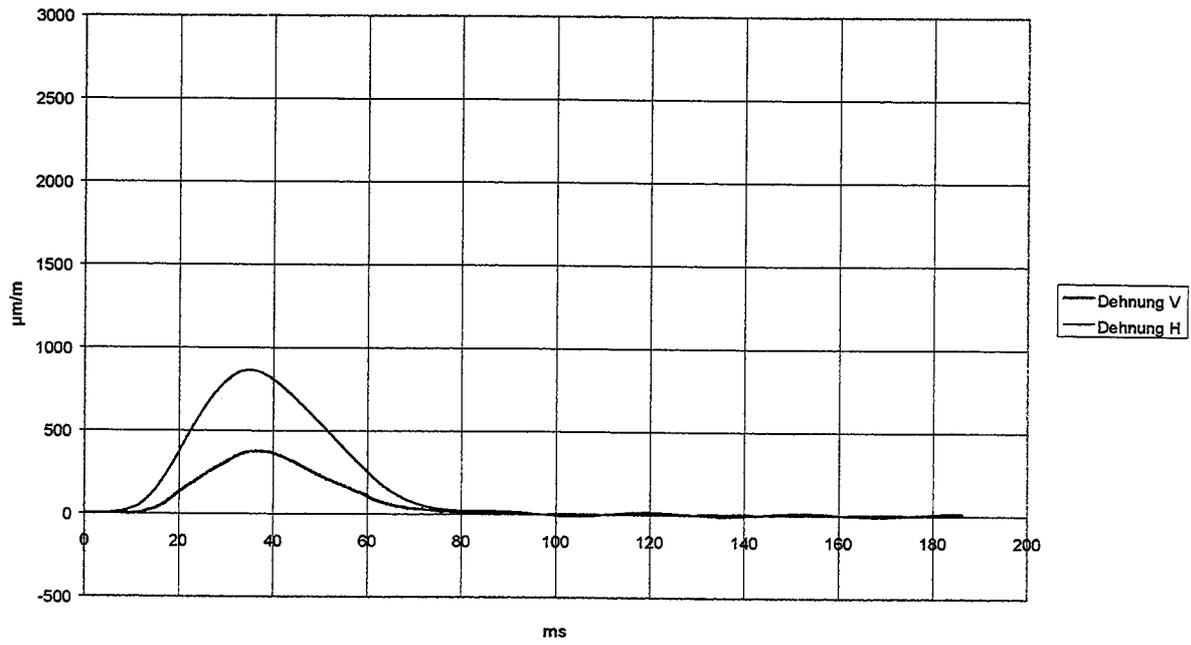
Versuch 32, ESG 8 mm, menschlicher Stoß mit Anlauf 2,50 m, Gewicht 85 kg



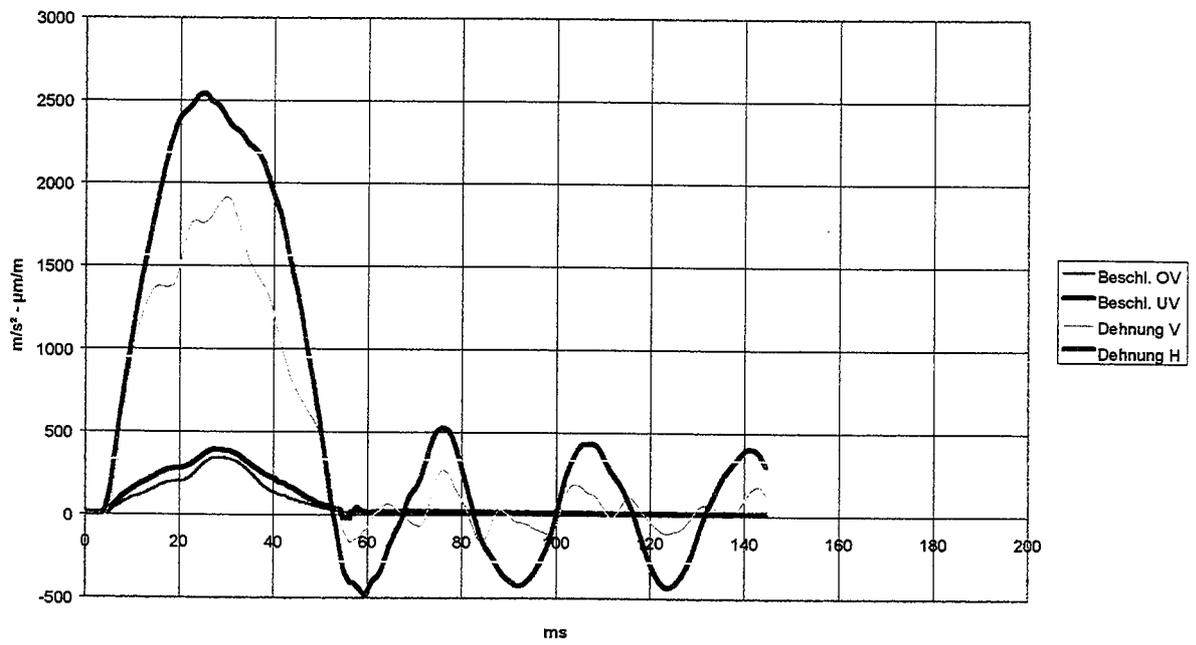
Versuch 34, ESG 8 mm, menschlicher Stoß mit Anlauf 2,50 m, Gewicht 68 kg



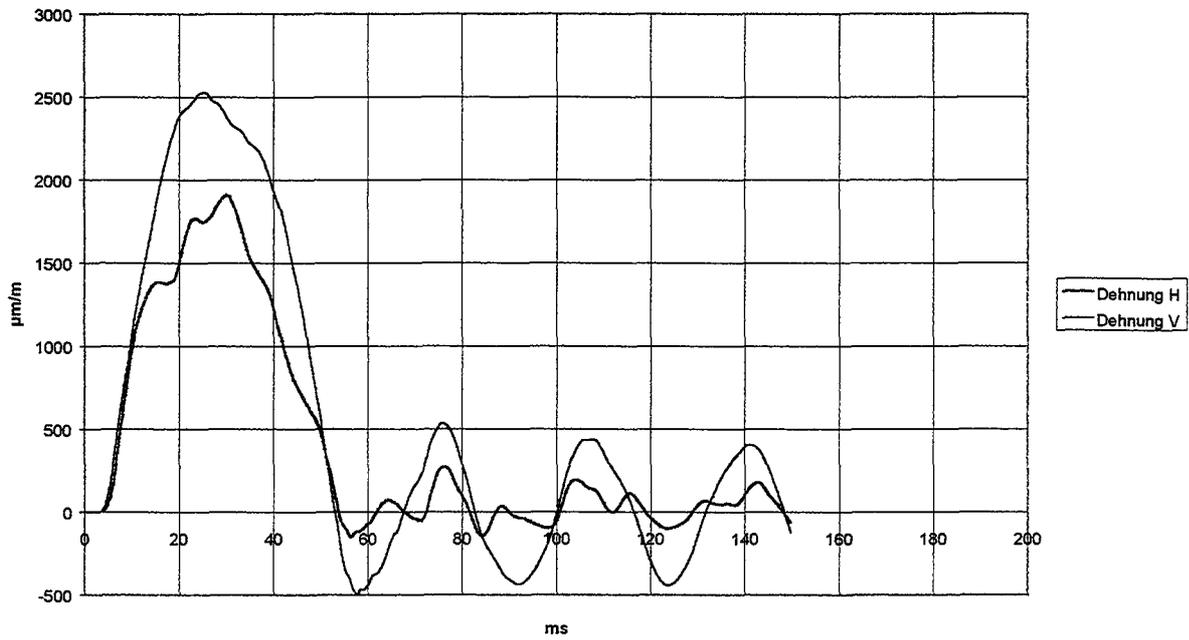
Versuch 35, ESG 8 mm, menschlicher Stoß mit Anlauf 2,50 m, Gewicht 68 kg



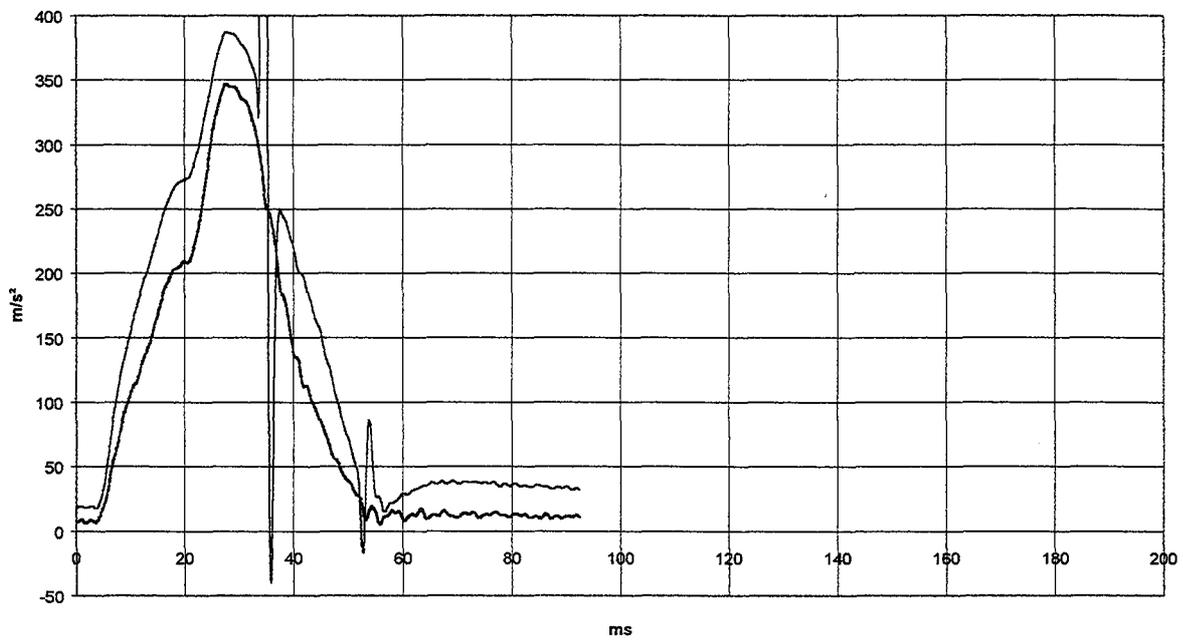
Versuch 36, ESG 8 mm, Fallhöhe 1200 mm mit DMS



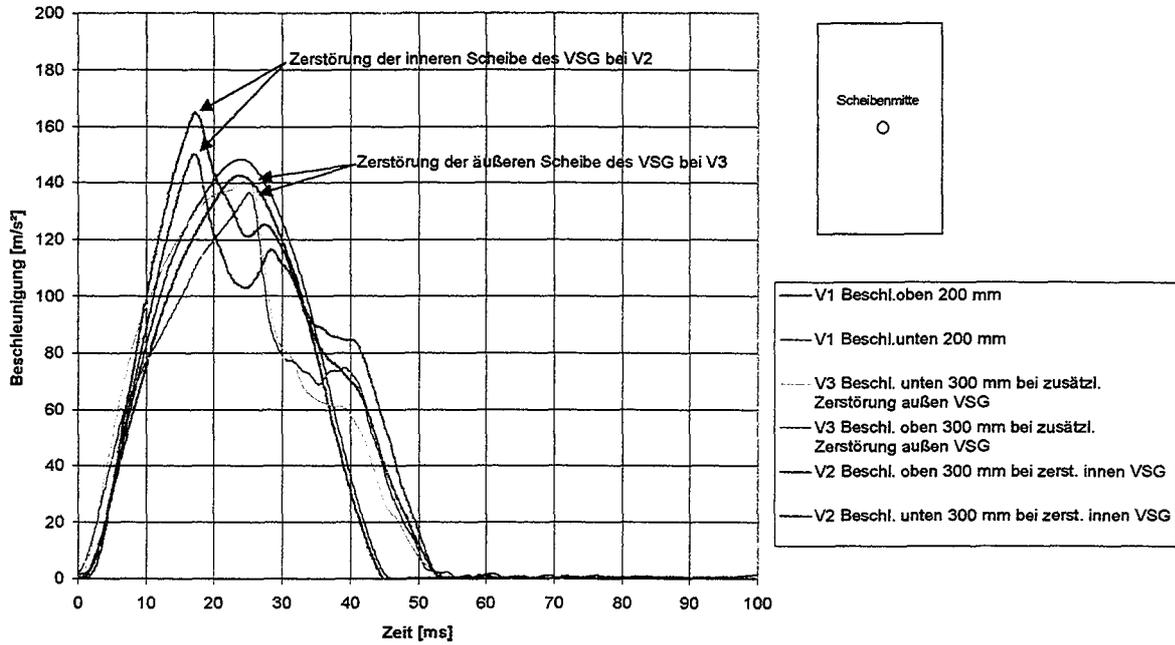
Versuch 37, ESG 8 mm, Fallhöhe 1200 mm mit DMS



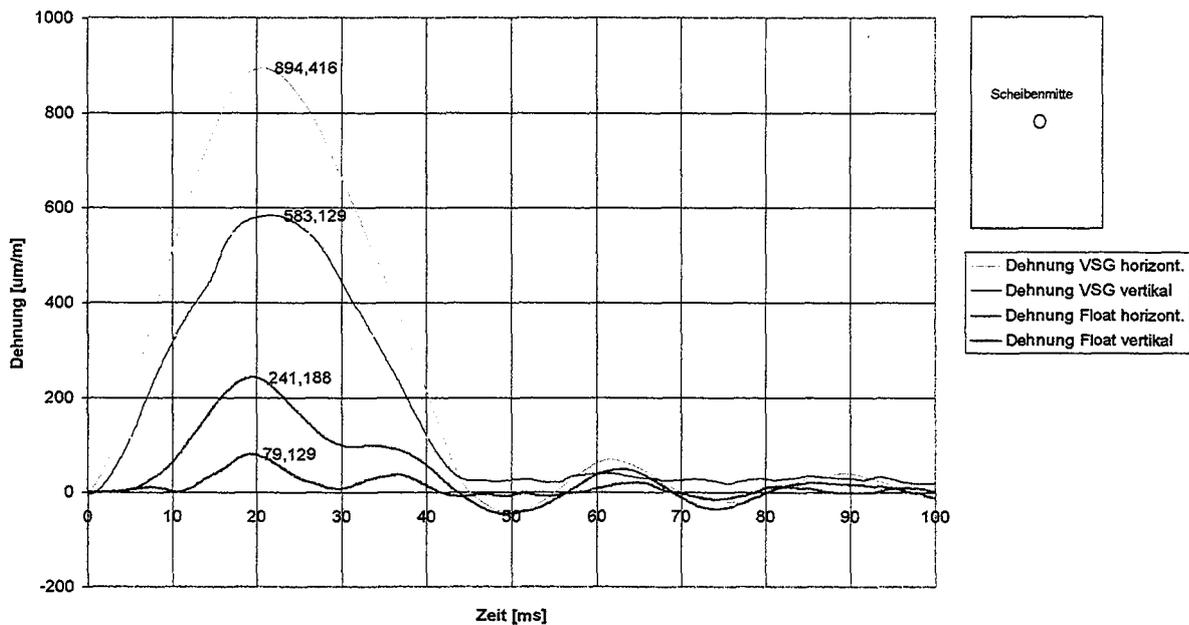
Versuch 37, ESG 8 mm, Fallhöhe 1200 mm mit DMS



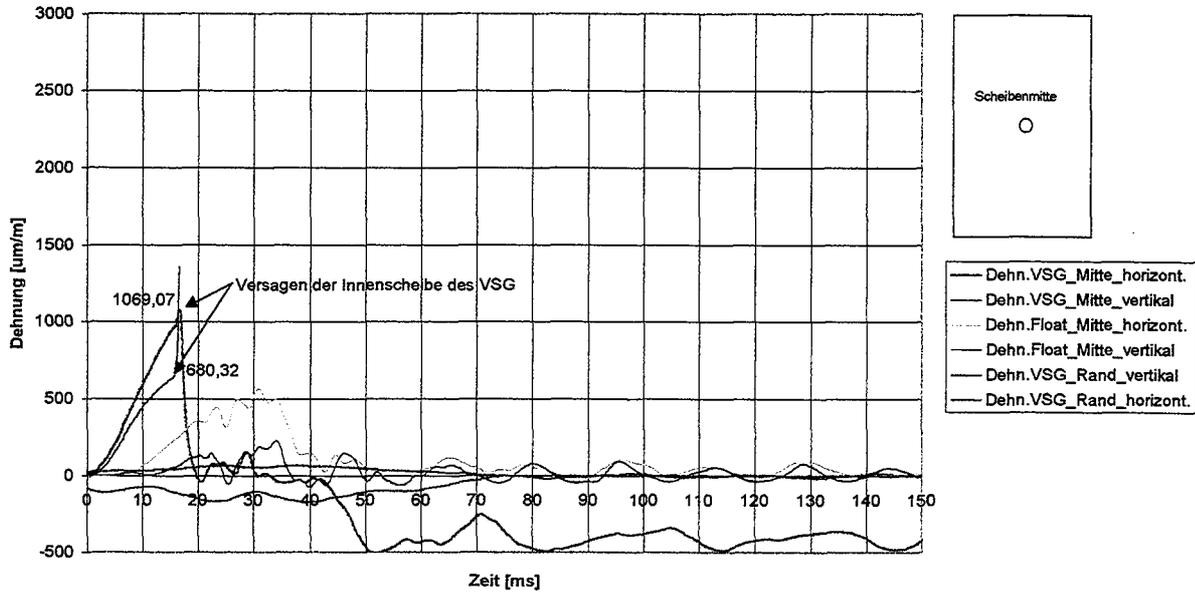
**E DIN EN 12600 V1, V2, V3 Isolierglas VSG Float 2x6mm (innen)/ Float 8mm (außen), Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 200 mm und 300 mm**



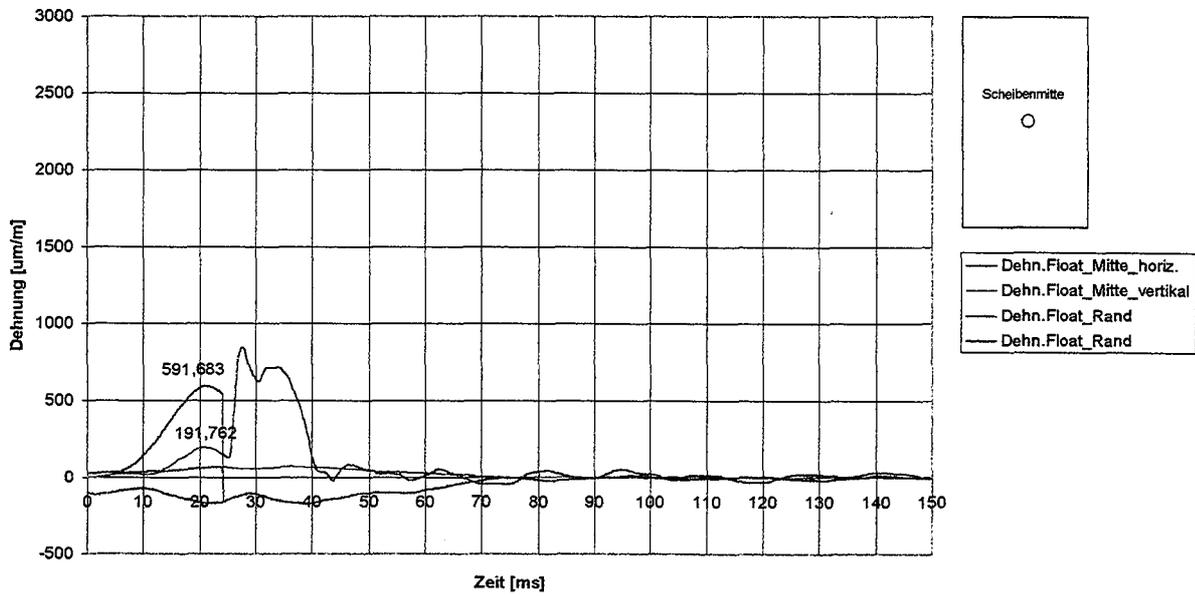
**V1 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen)  
Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 200 mm, keine Scheibe zerstört**



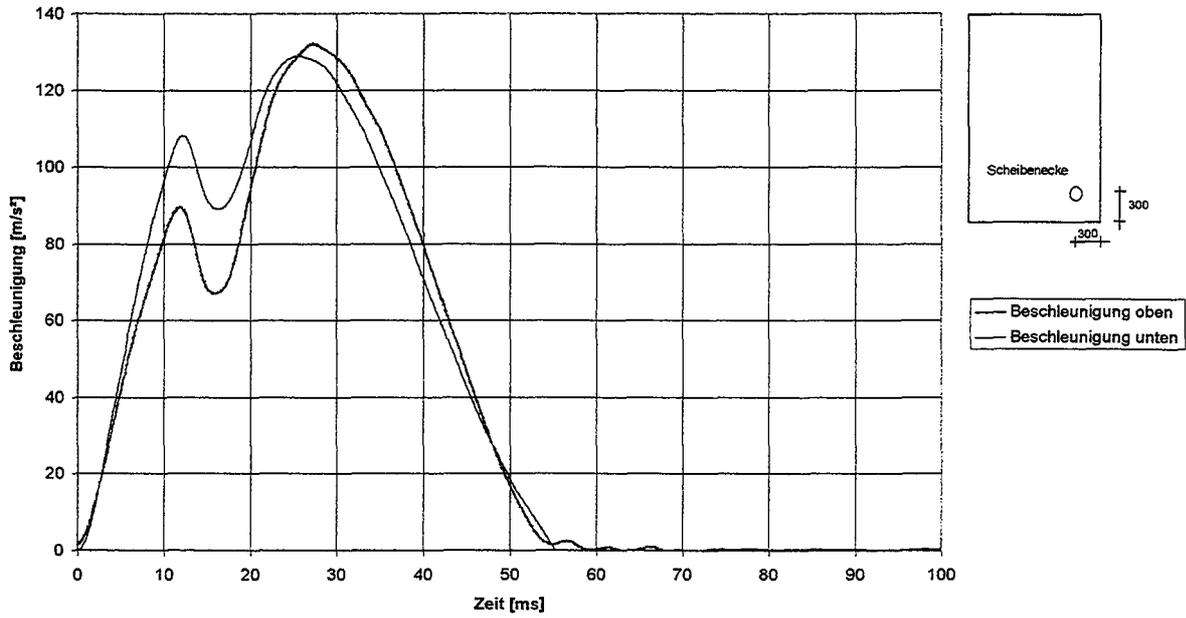
V2 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Float (innen)/ 8mm Float (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 300 mm bei Zerstörung Innenscheibe VSG



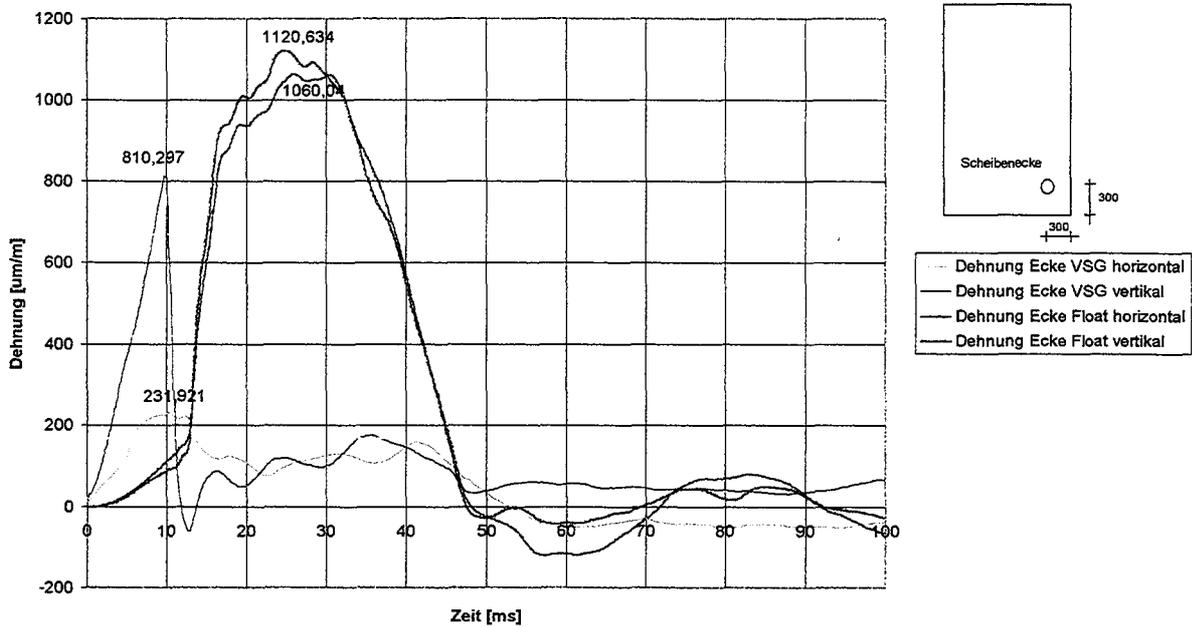
V3a E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Float (innen)/ 8mm Float (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 300 mm, bei Zerstörung Außenscheibe VSG



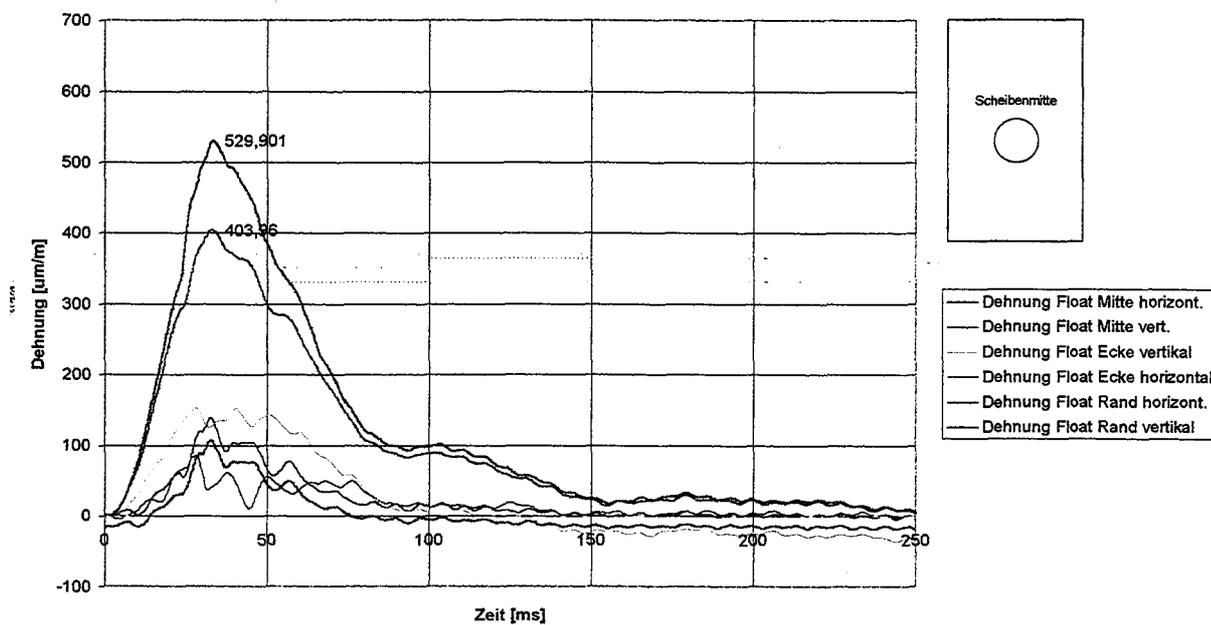
**E DIN EN 12600 V3b Isolierglas VSG 2x6mm Float (innen)/ 8mm Float (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm, VSG Scheiben bereits zerstört**



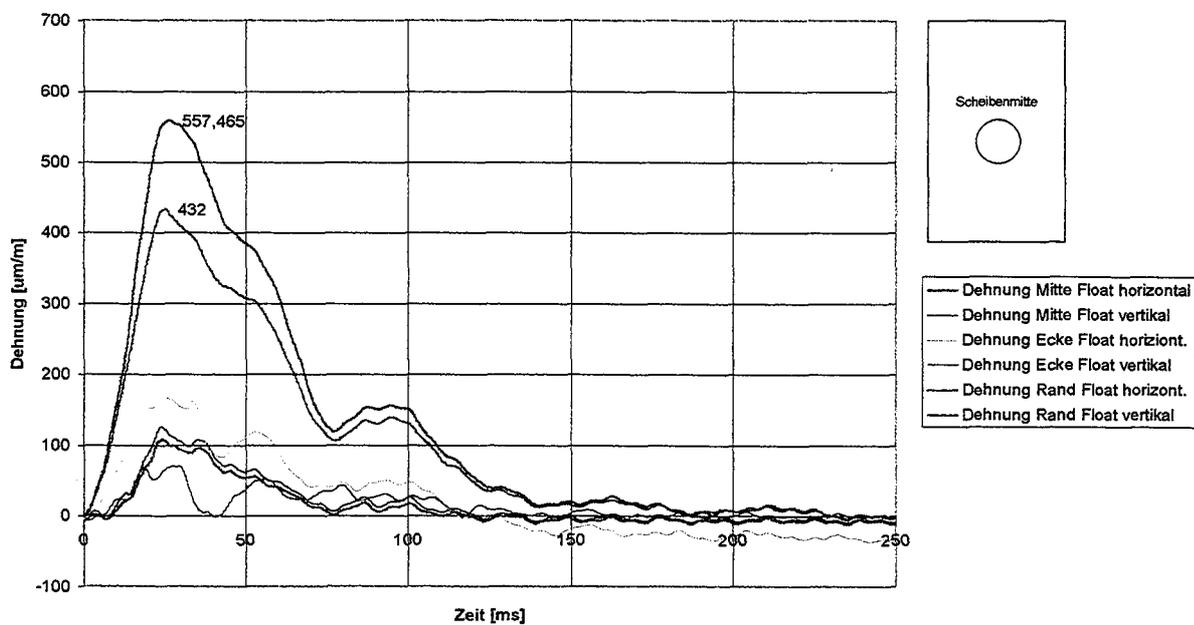
**V3b E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Float (innen)/ 8mm Float (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm beide Scheiben des VSG bereits zerstört**



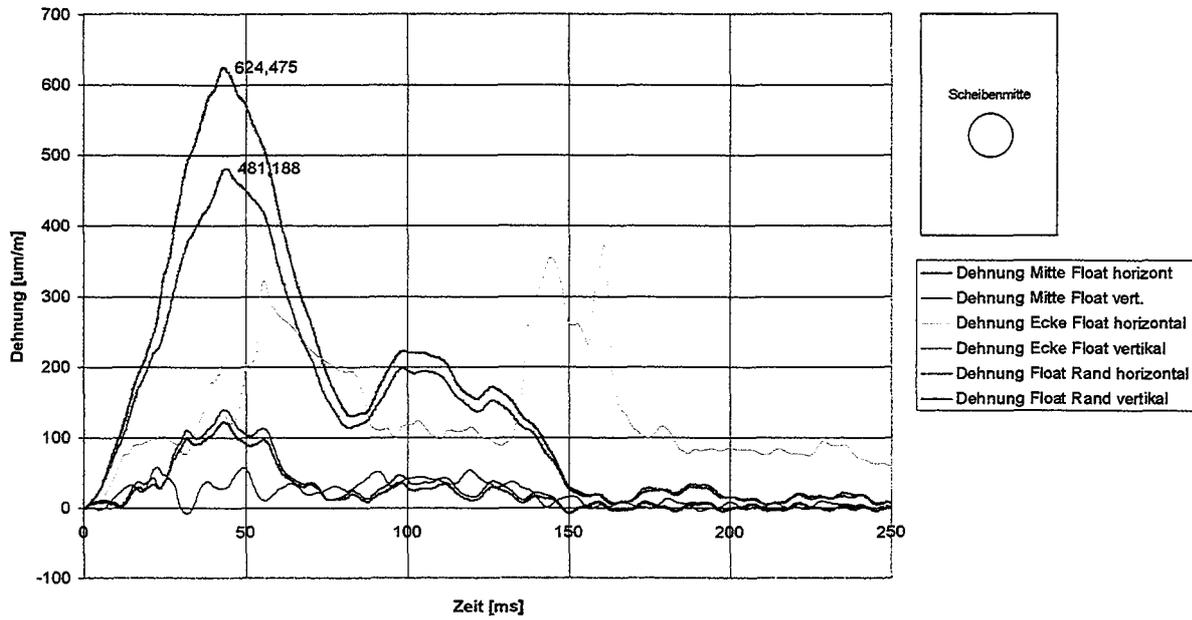
V4 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen);  
 menschlicher Stoß 108 kg mit 2 m Anlauf, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



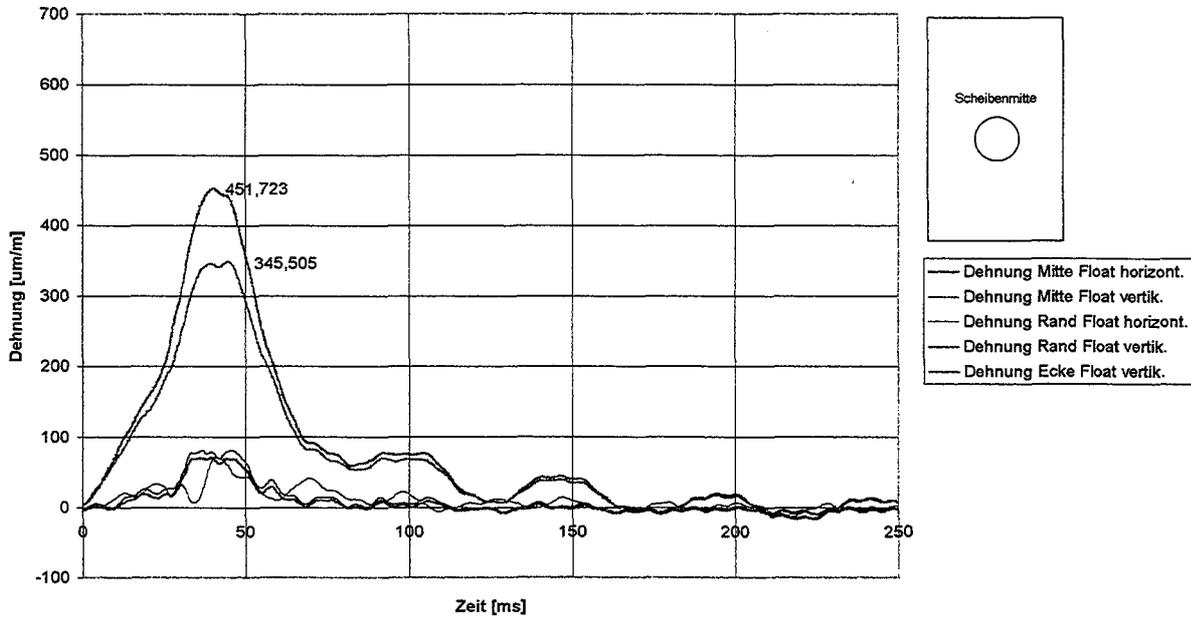
V5 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
 menschlicher Stoß 108 kg mit 3 m Anlauf, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



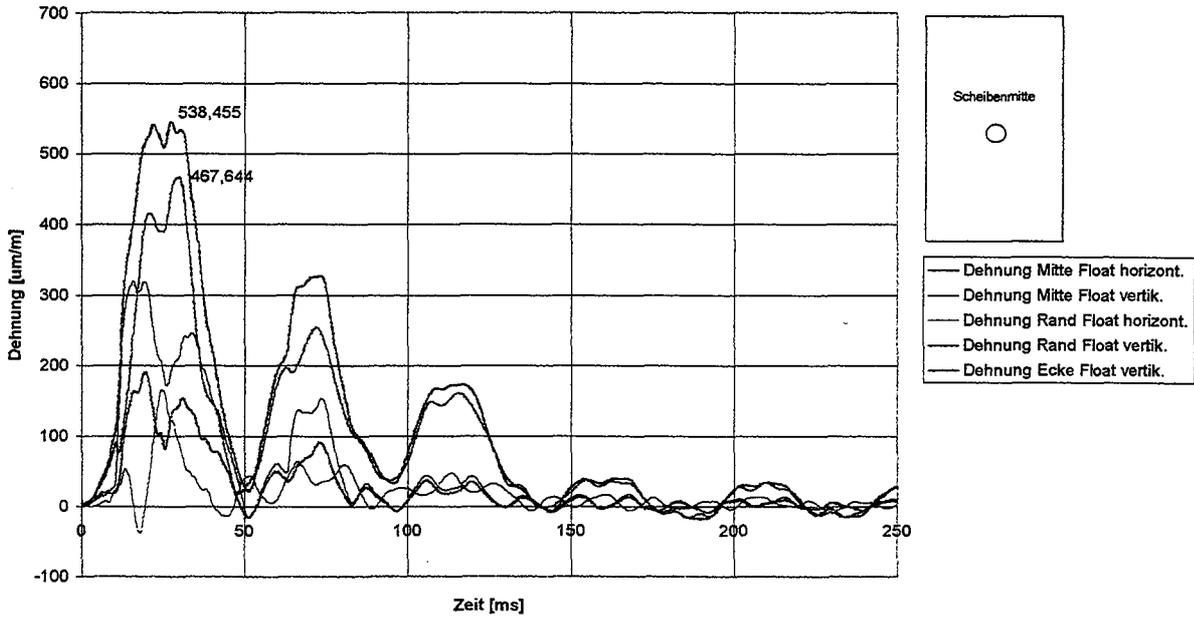
V6 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
menschlicher Stoß 108 kg mit 5 m Anlauf, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



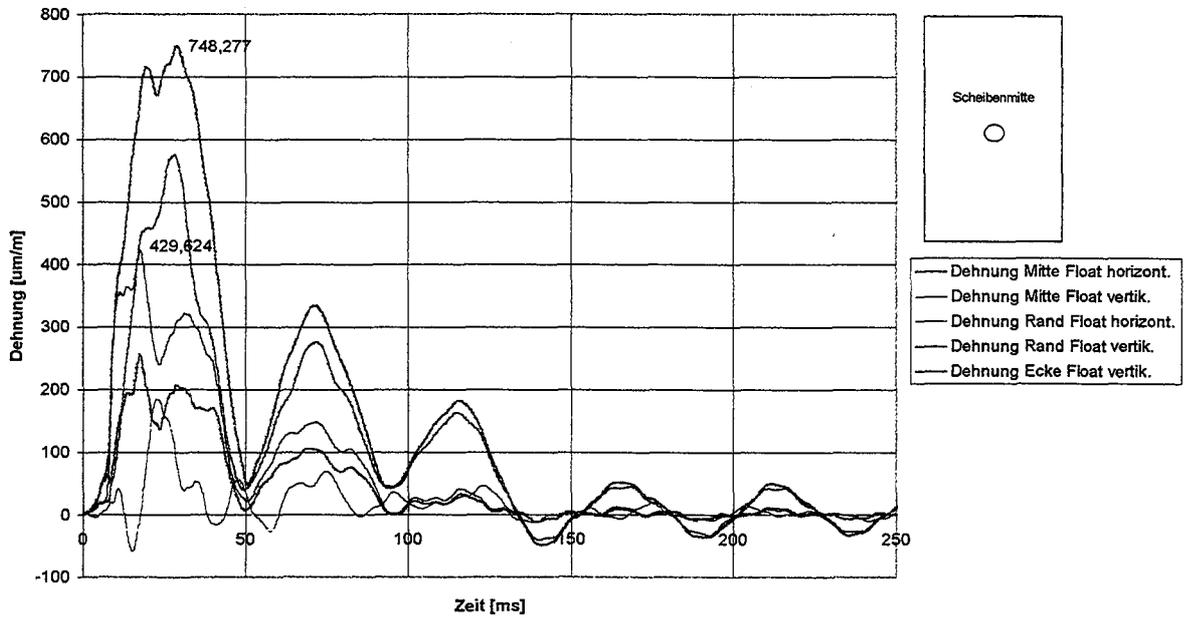
V7 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
menschlicher Stoß 68 kg mit 5 m Anlauf, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



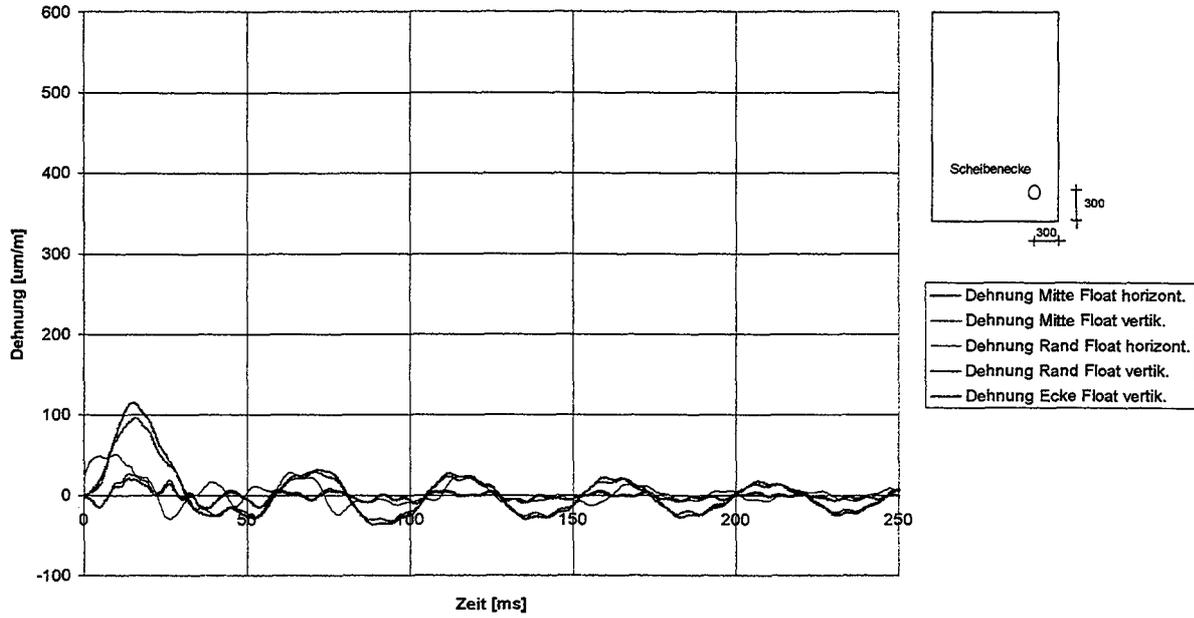
V8 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
Fußtritt in die Scheibenmitte, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



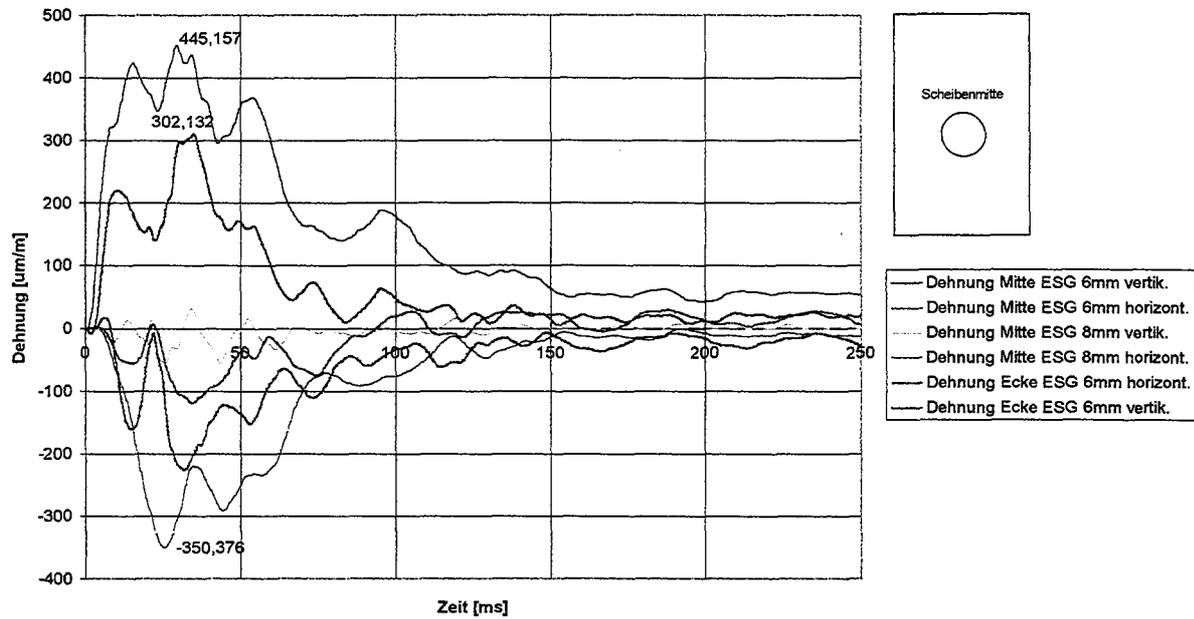
V9 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
Fußtritt in die Scheibenmitte, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



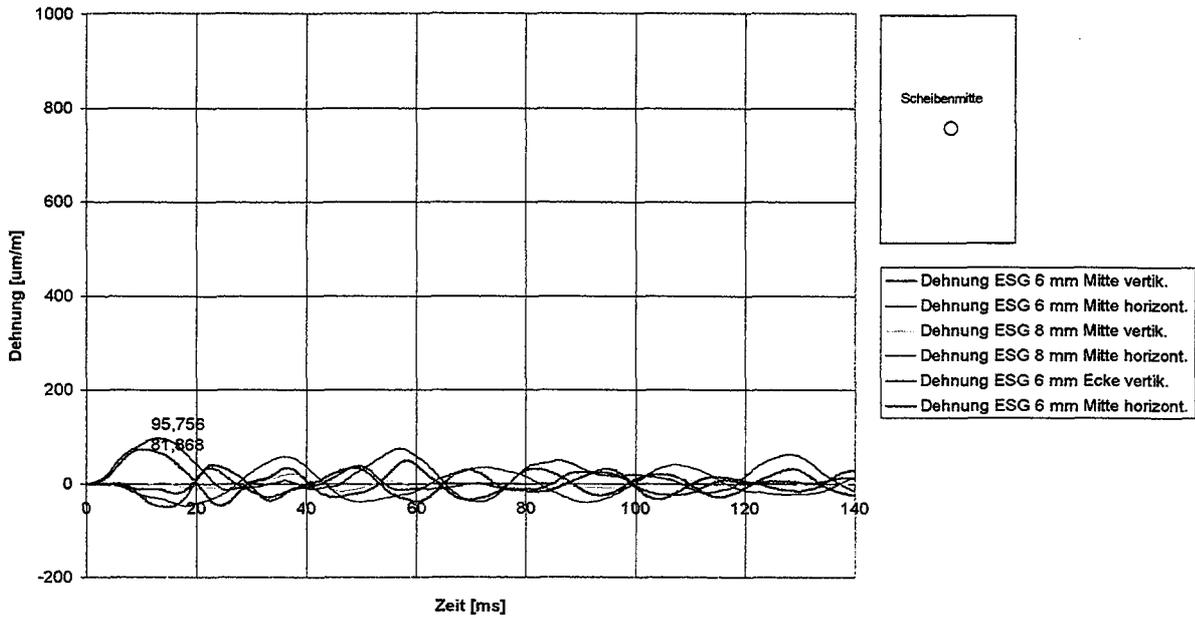
V10 E DIN EN 12600 Isolierglas VSG 2x6mm Floatglas (innen)/ 8 mm Floatglas (außen),  
Fußtritt in die Scheibenecke, beide Scheiben des VSG bereits vorher zerstört



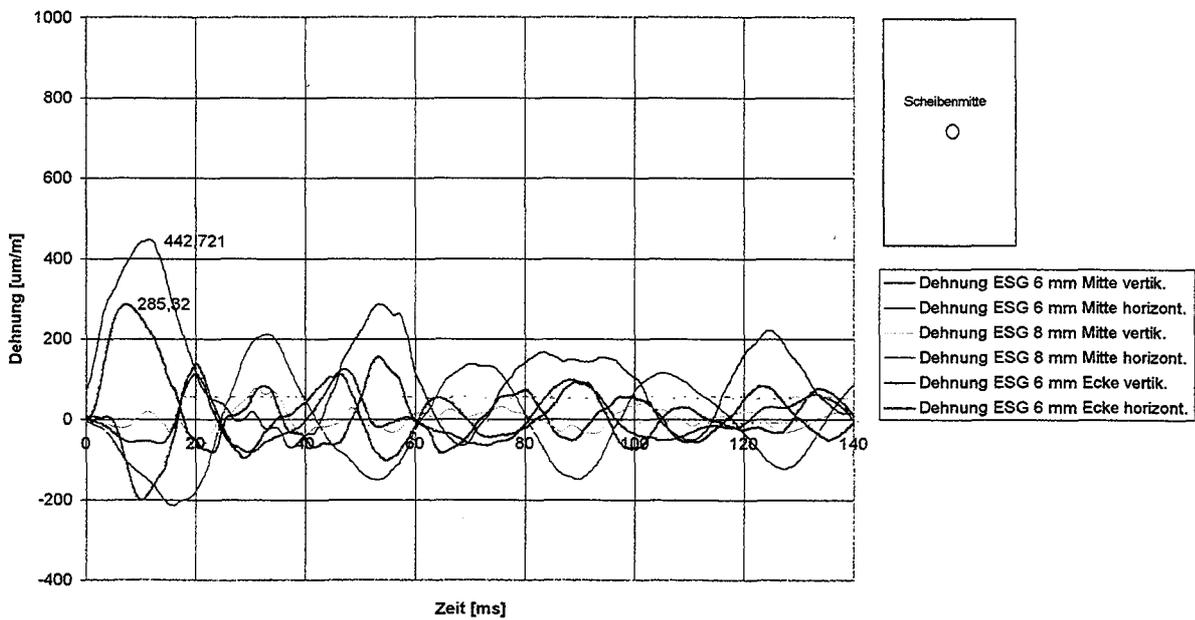
V11 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
menschlicher Stoß 108 kg mit 3 m Anlauf



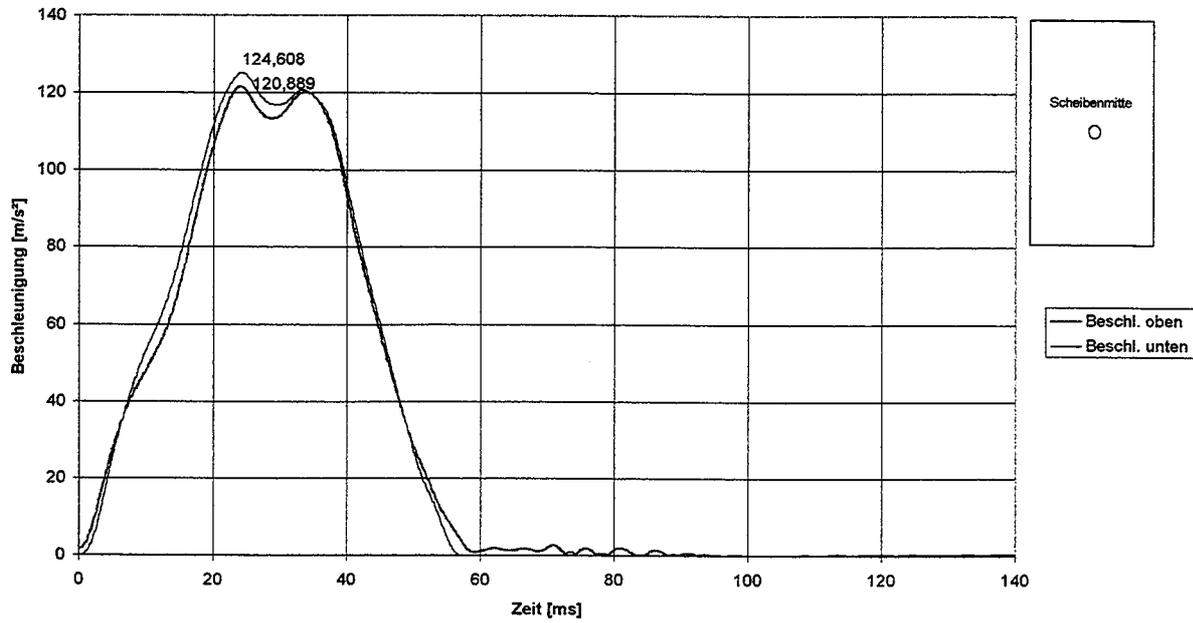
V12 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Stoß mit dem Ellenbogen, Aufprallpunkt Scheibenmitte



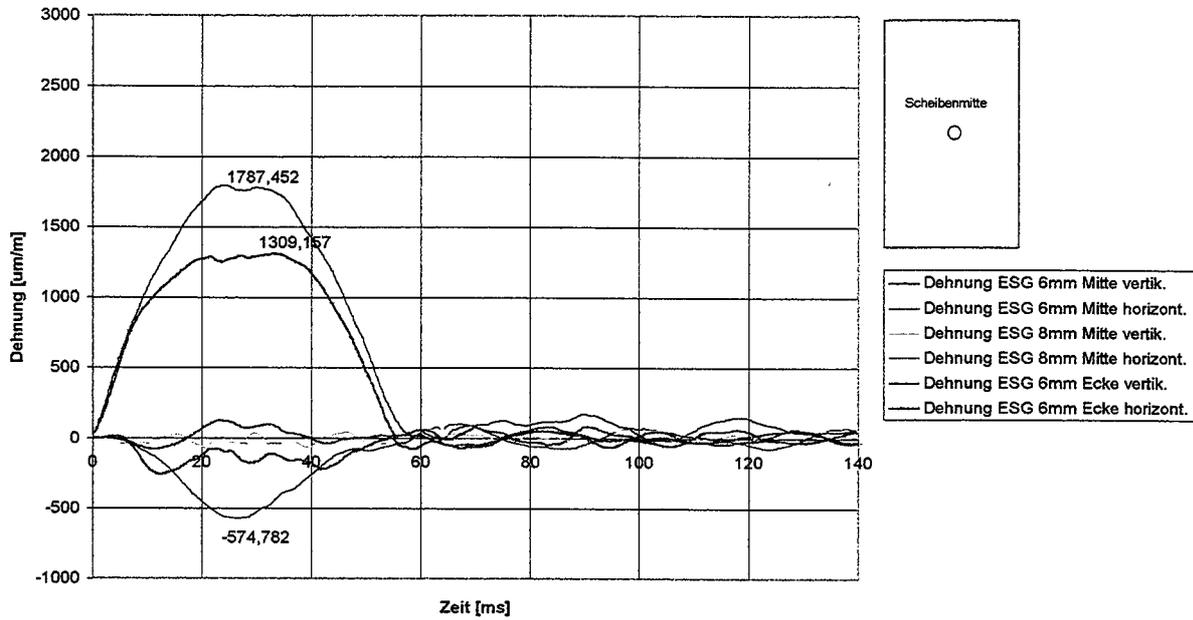
V13 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Stoß mit dem Ellenbogen, Aufprallpunkt Scheibenmitte



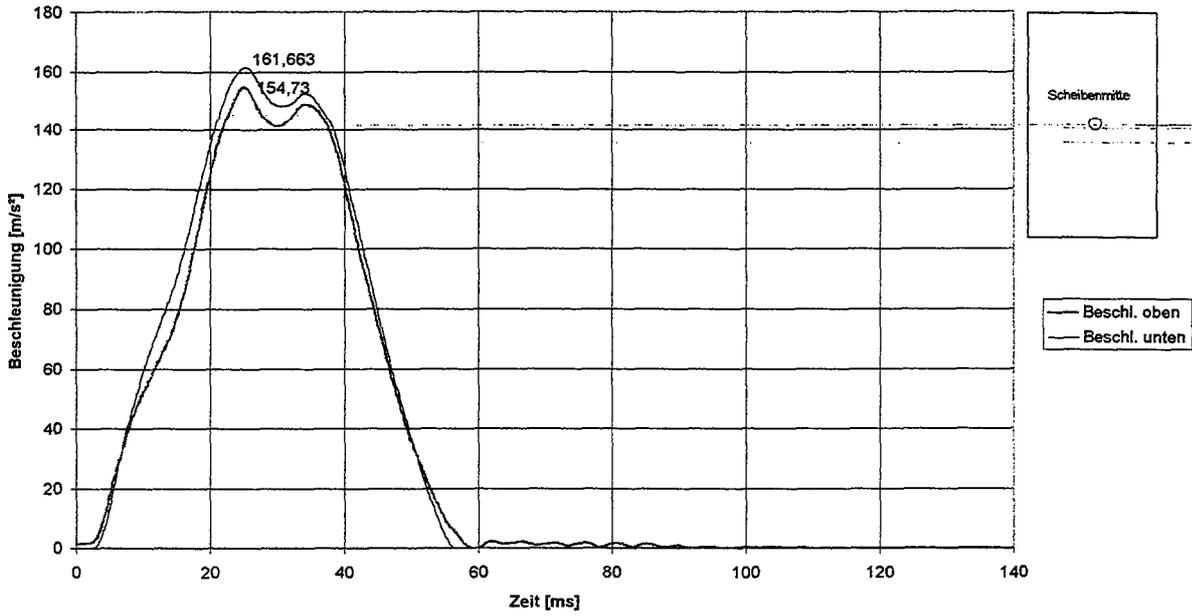
V14 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 200 mm



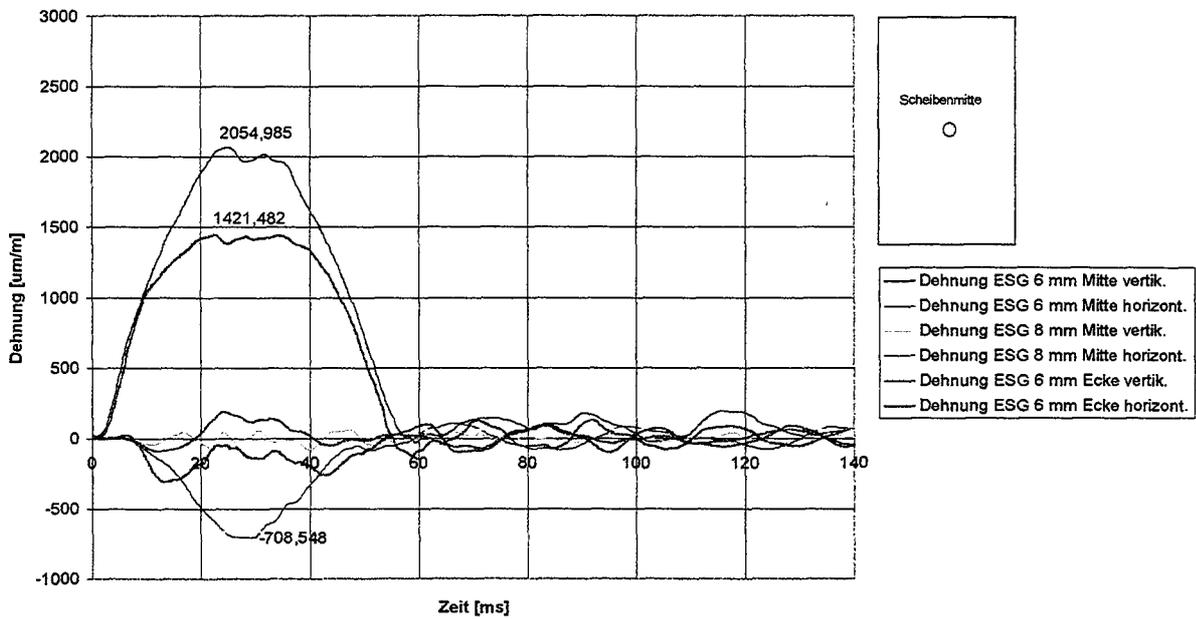
V14 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 200 mm



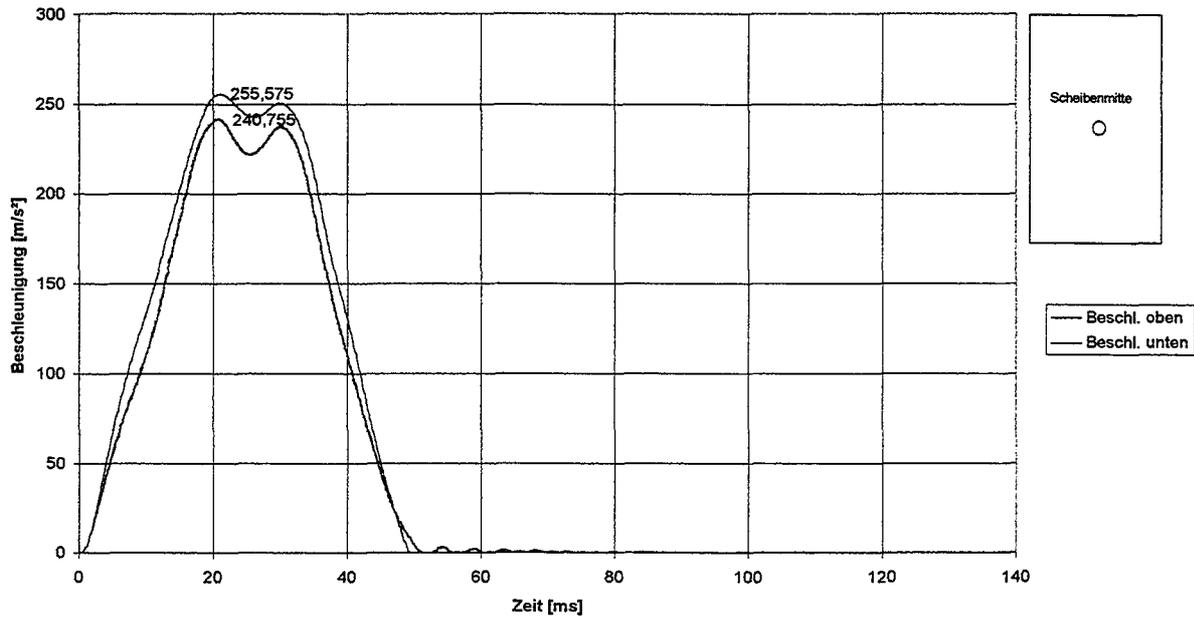
V15 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 300 mm



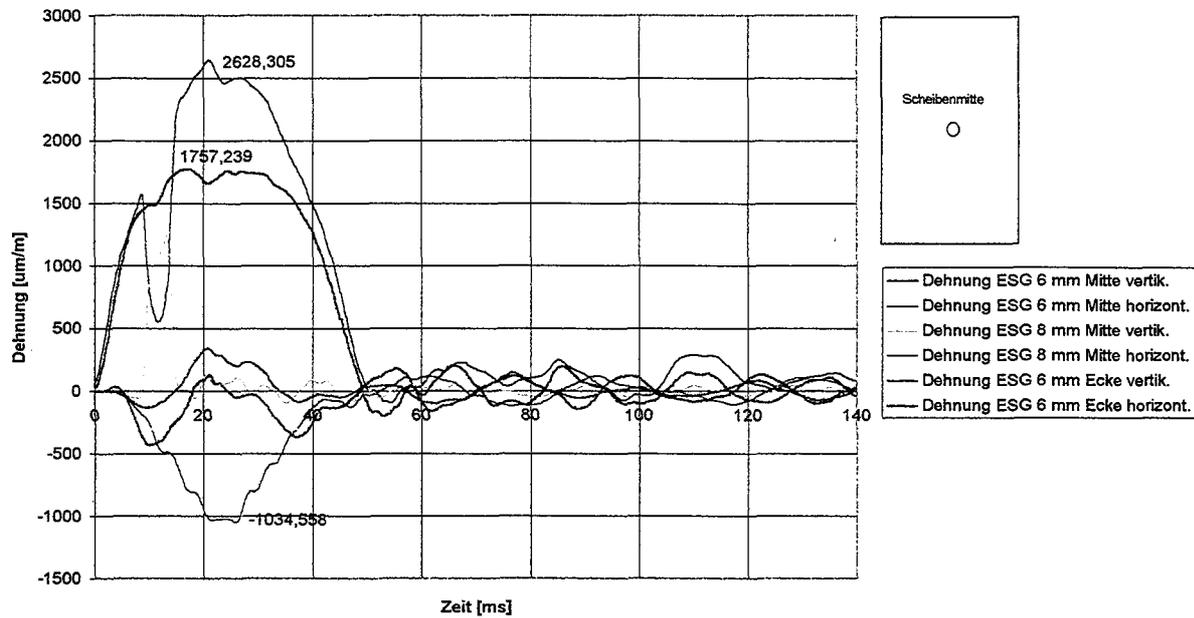
V15 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 300 mm



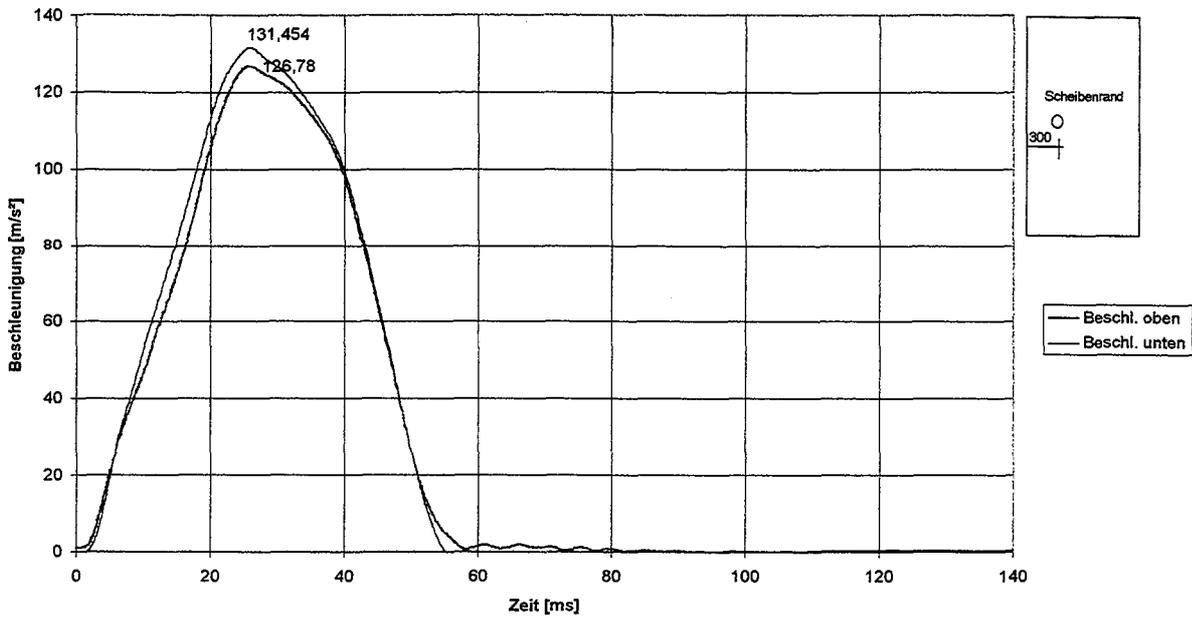
V16 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 450 mm



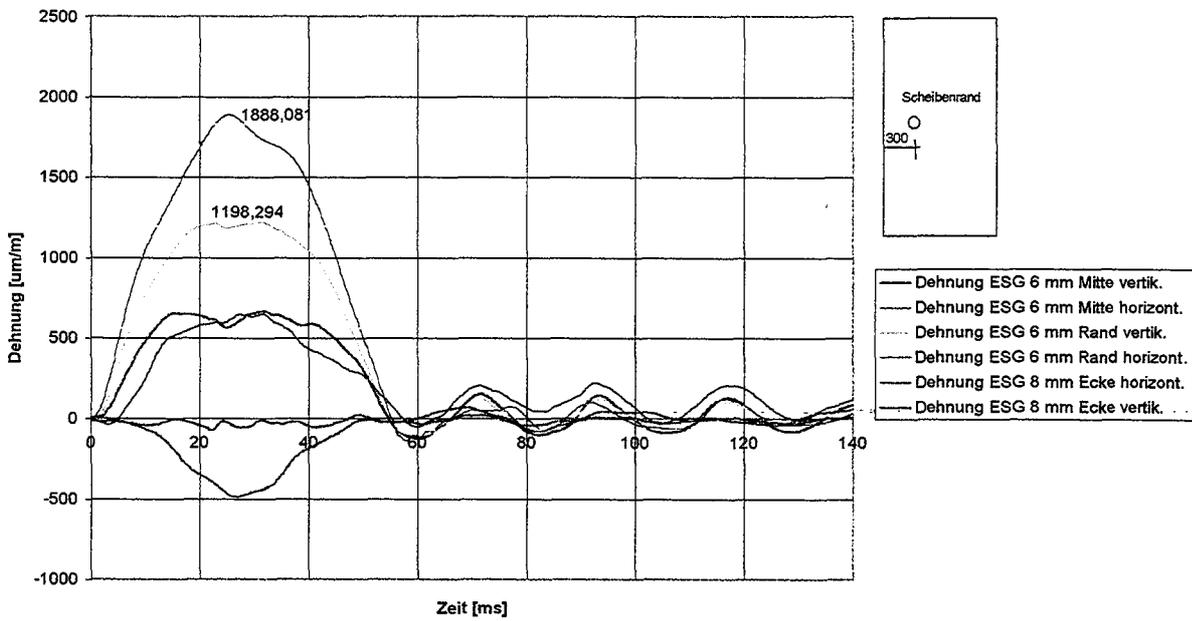
V16 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 450 mm



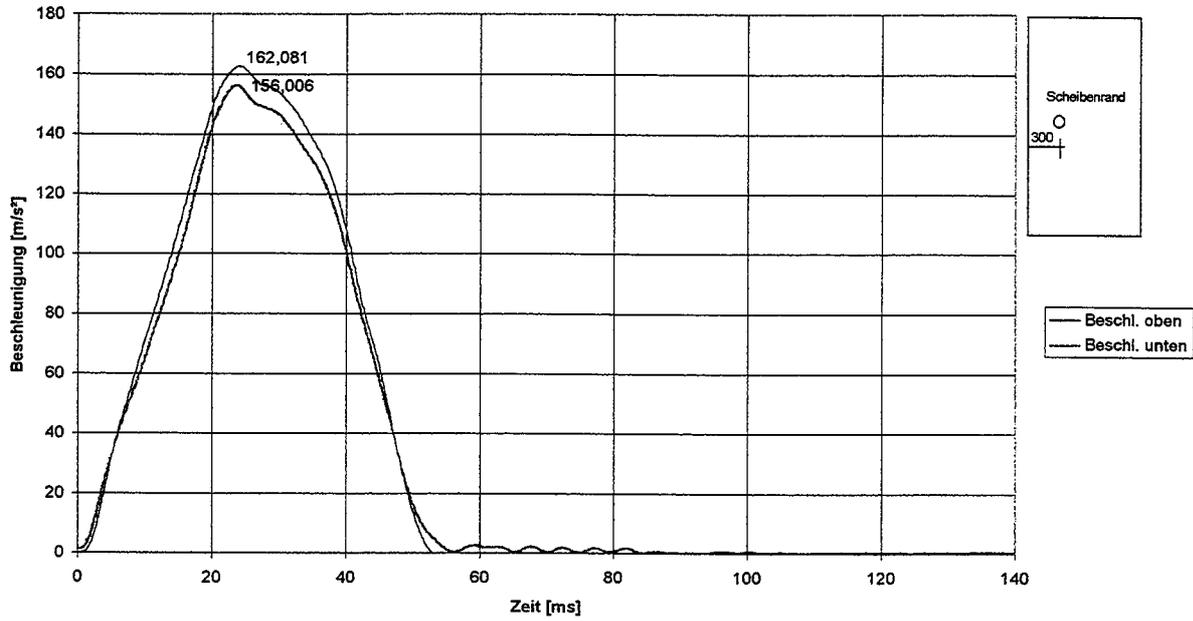
V17 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenrand, Fallhöhe 200 mm



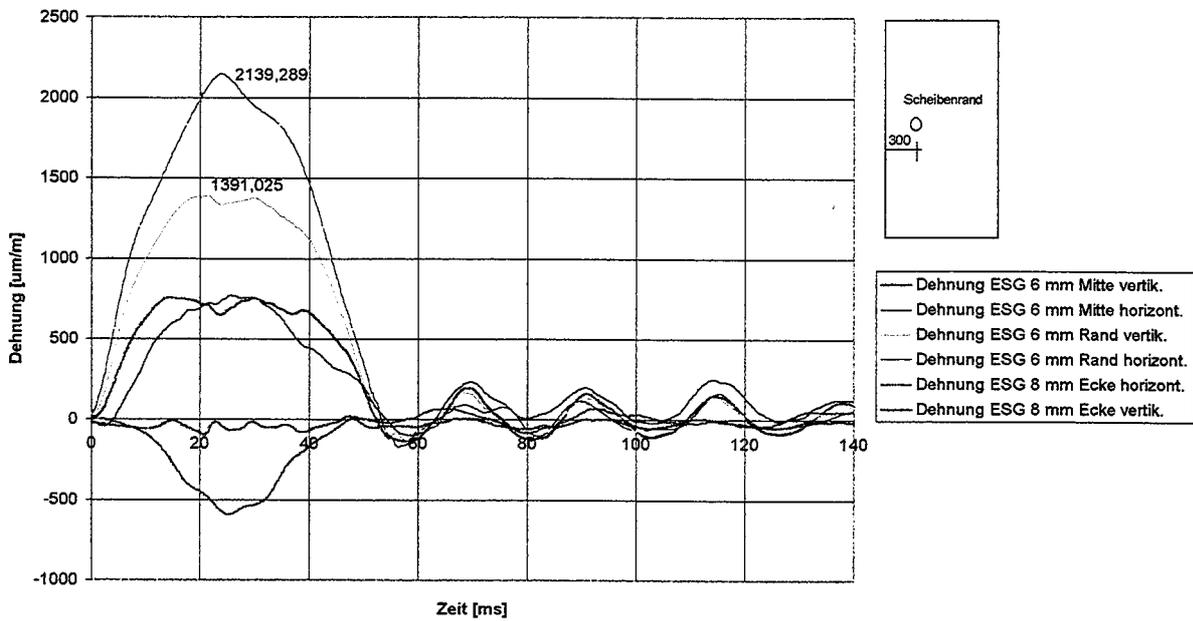
V17 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenrand, Fallhöhe 200 mm



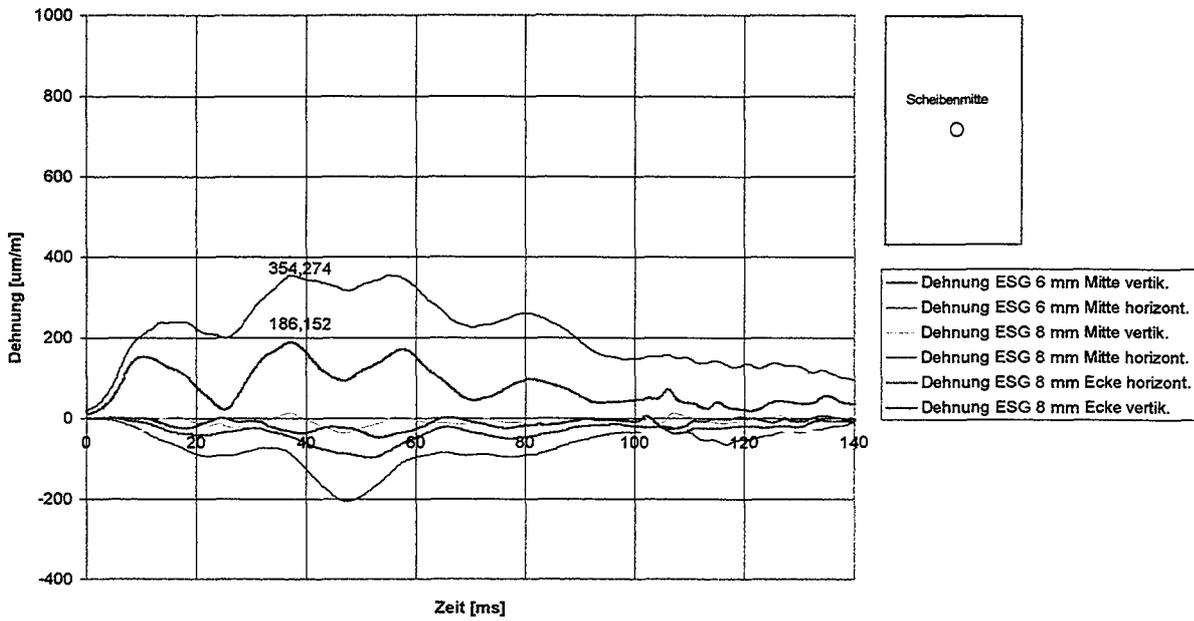
V18 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenrand, Fallhöhe 300 mm



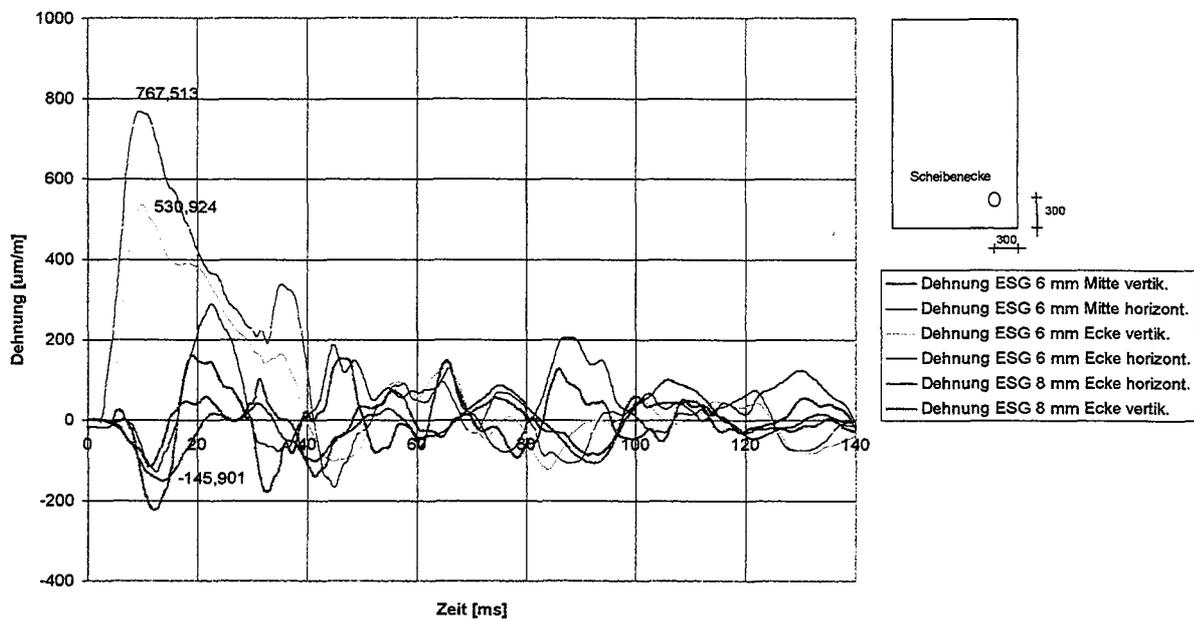
V18 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenrand, Fallhöhe 300 mm



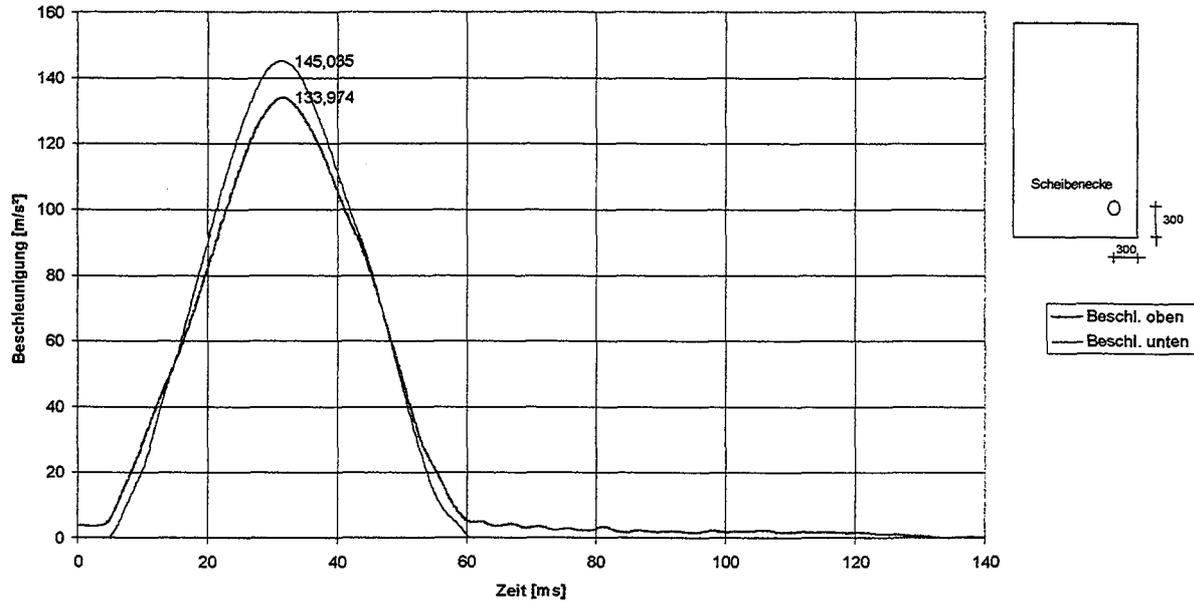
V19 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
menschlicher Anprall mit 65 kg 3 m Anlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte



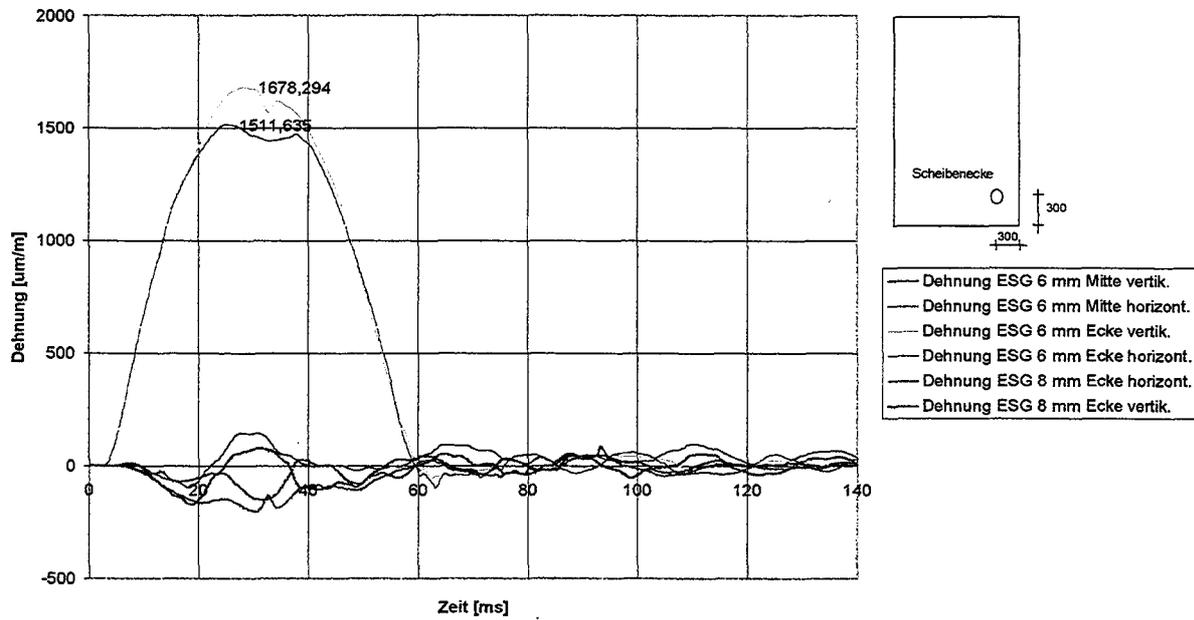
V20 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf, Fußtritt  
in die Scheibenecke



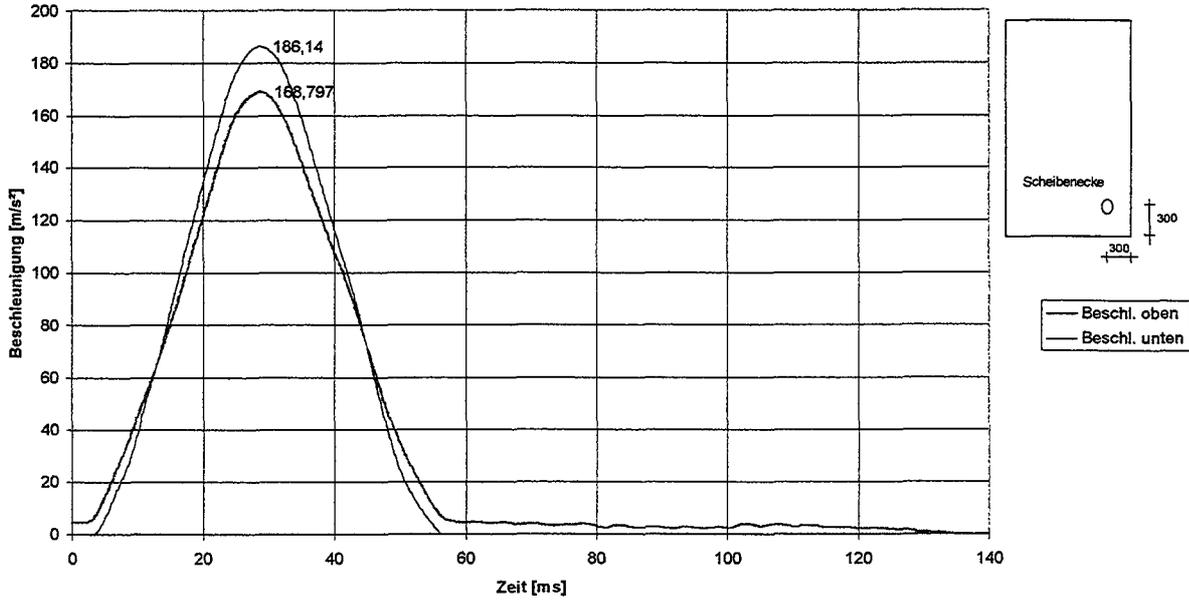
V21 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 200 mm



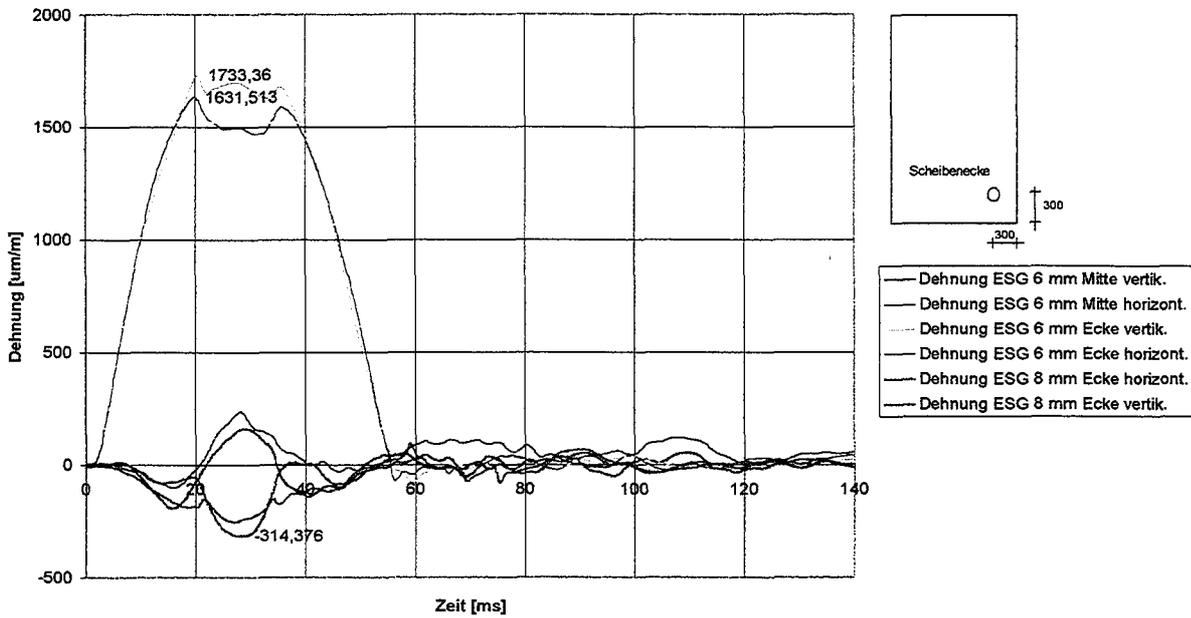
V21 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 200 mm



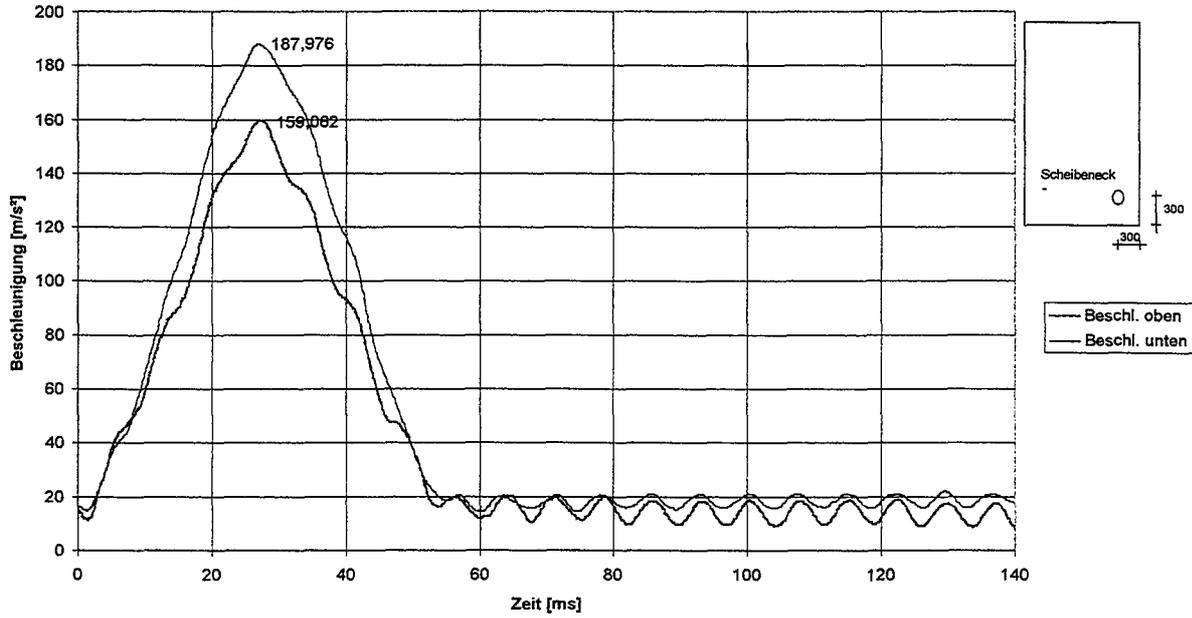
V22-1 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm



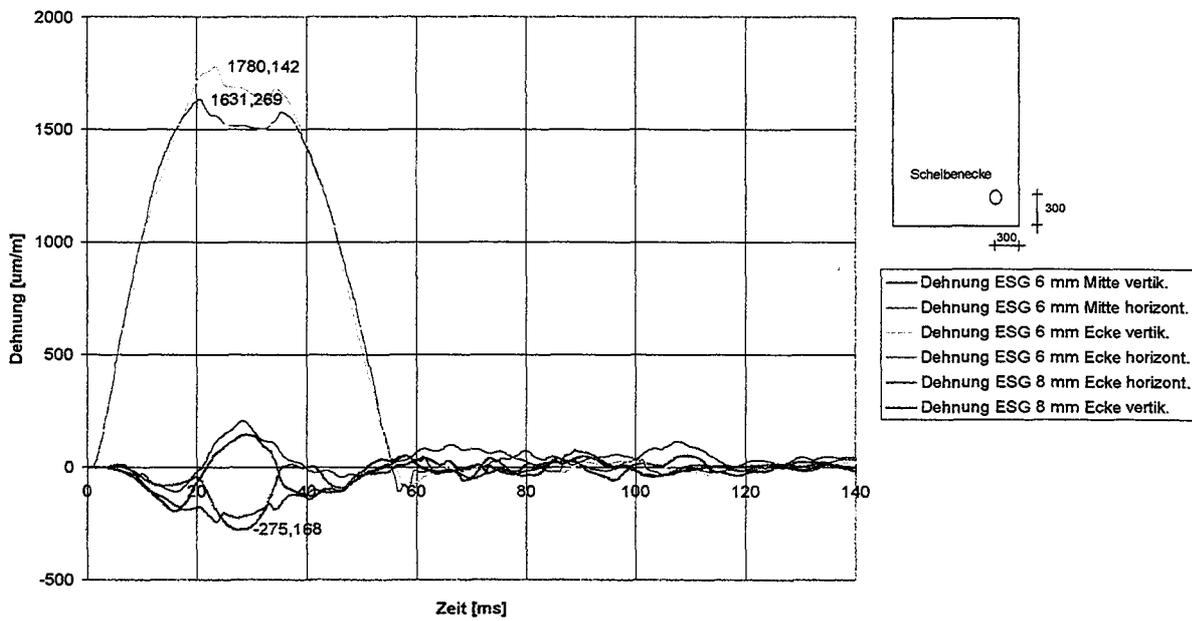
V22-1 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm



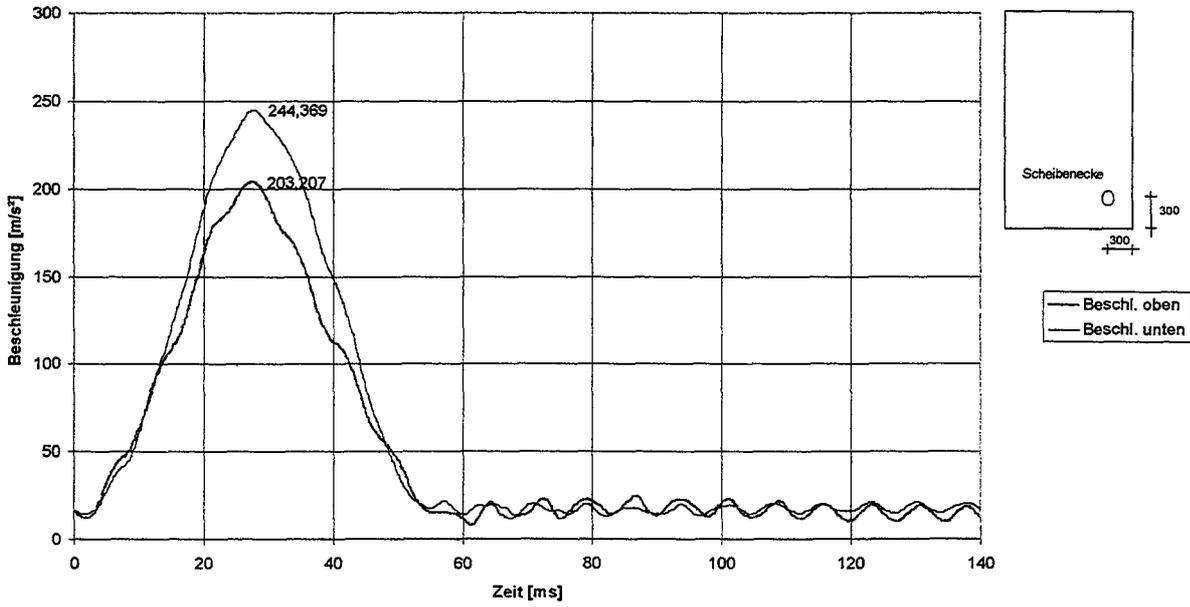
V22-2 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm



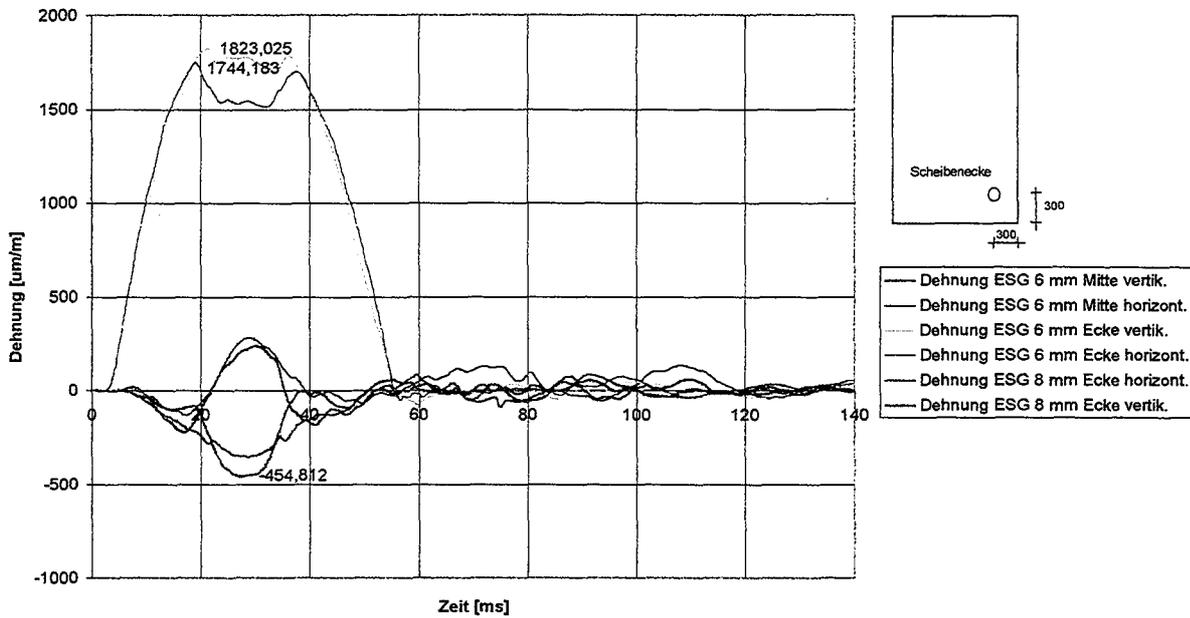
V22-2 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 300 mm



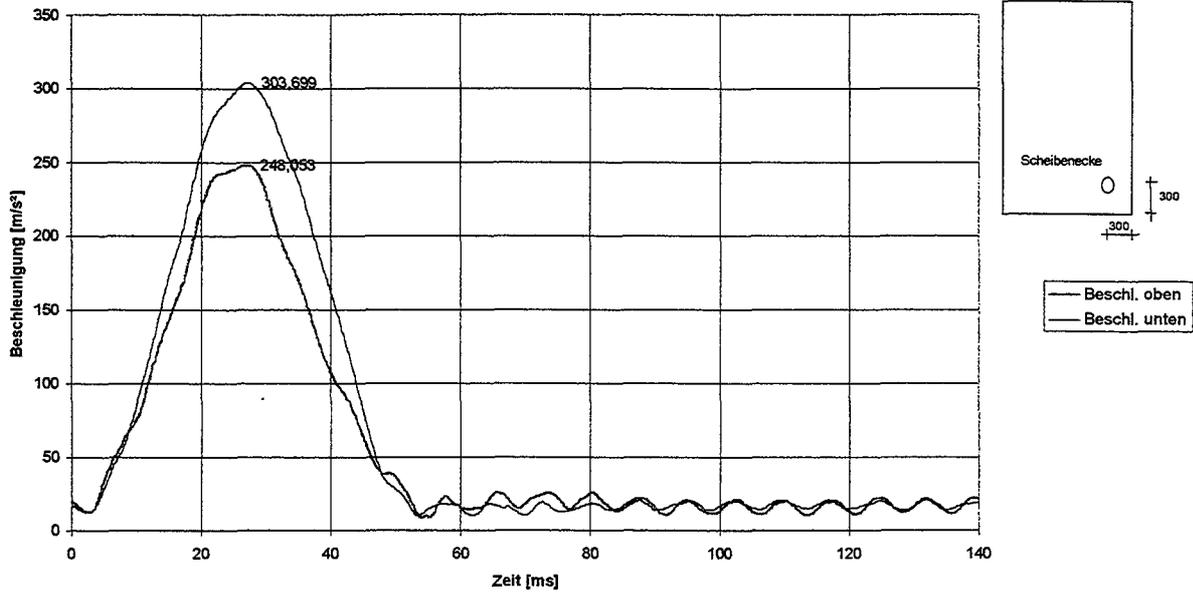
V23 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 450 mm



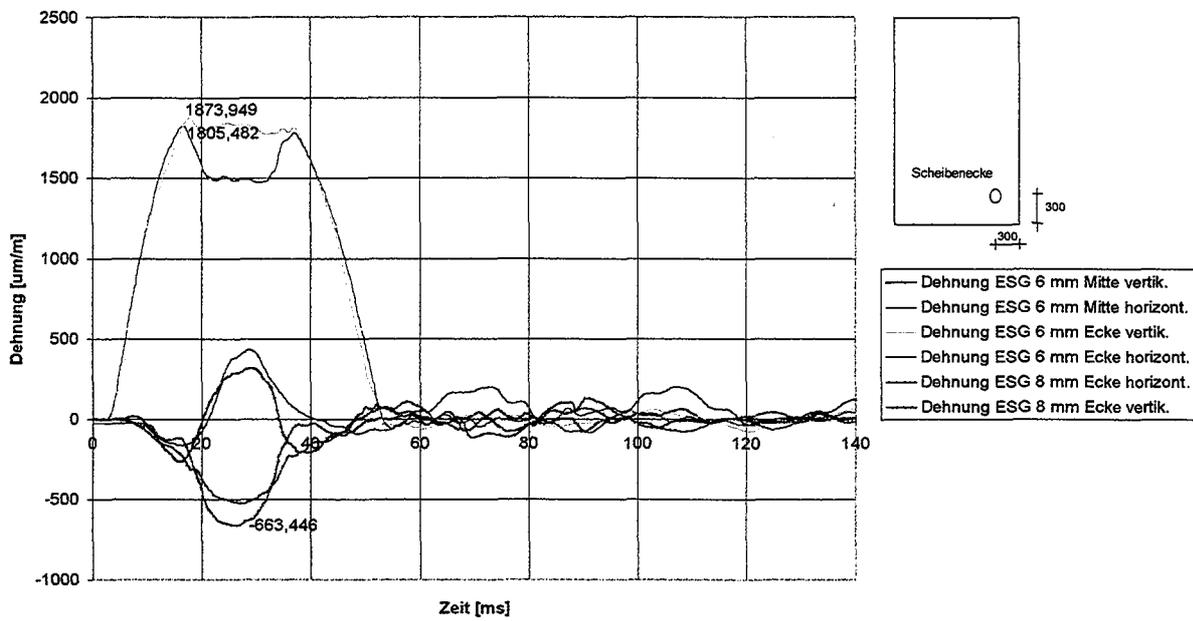
V23 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 450 mm



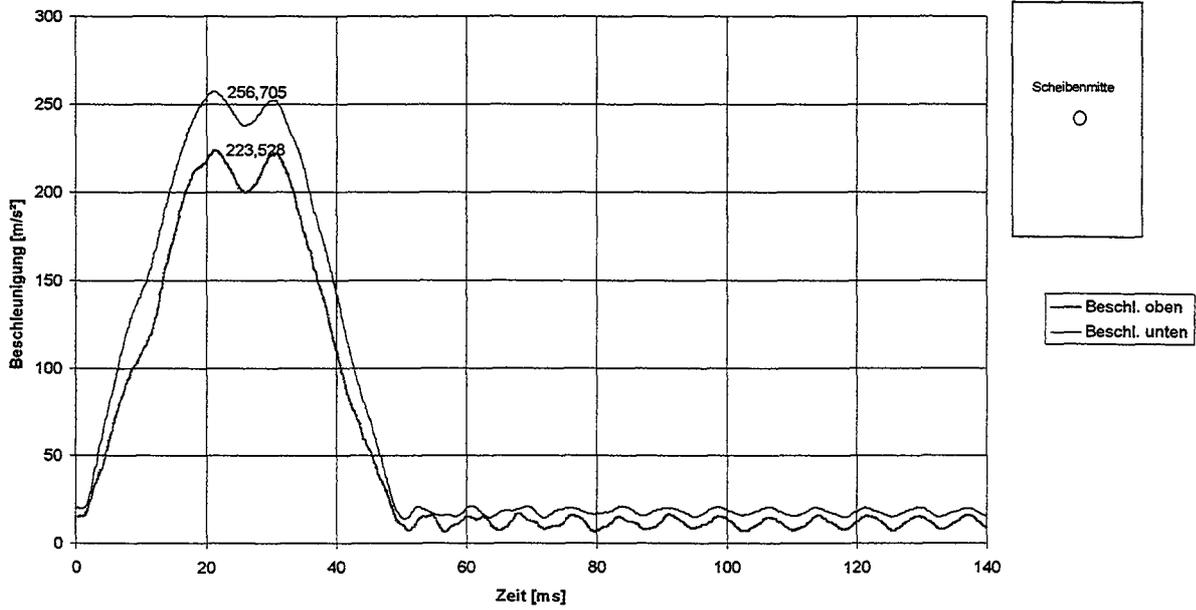
V24 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 700 mm



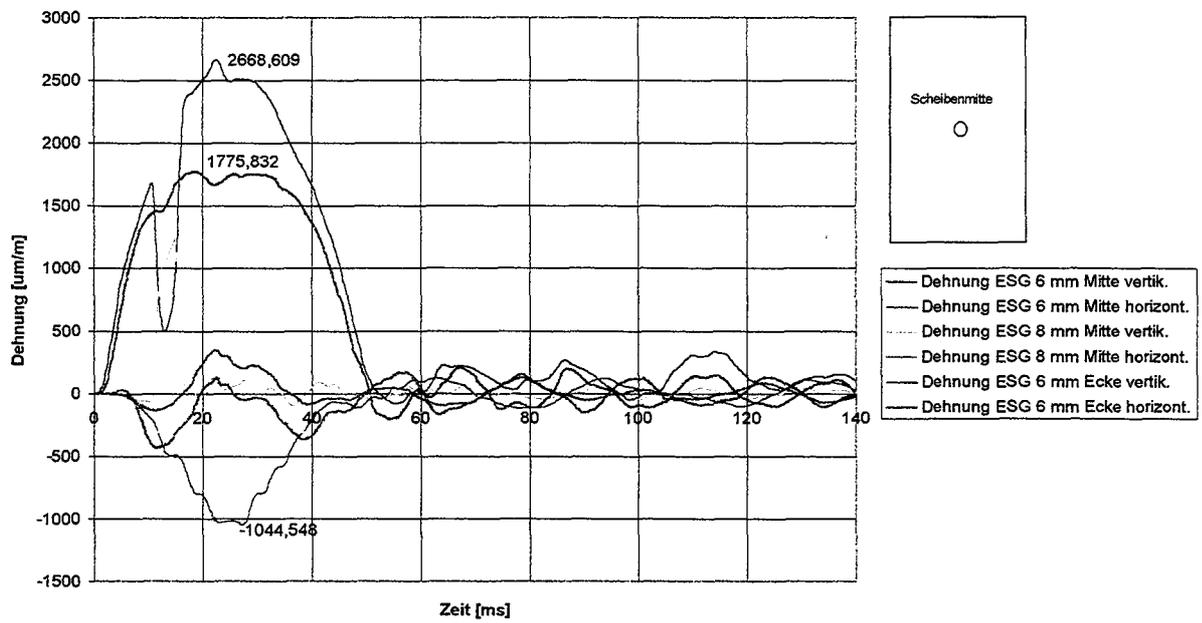
V24 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 700 mm



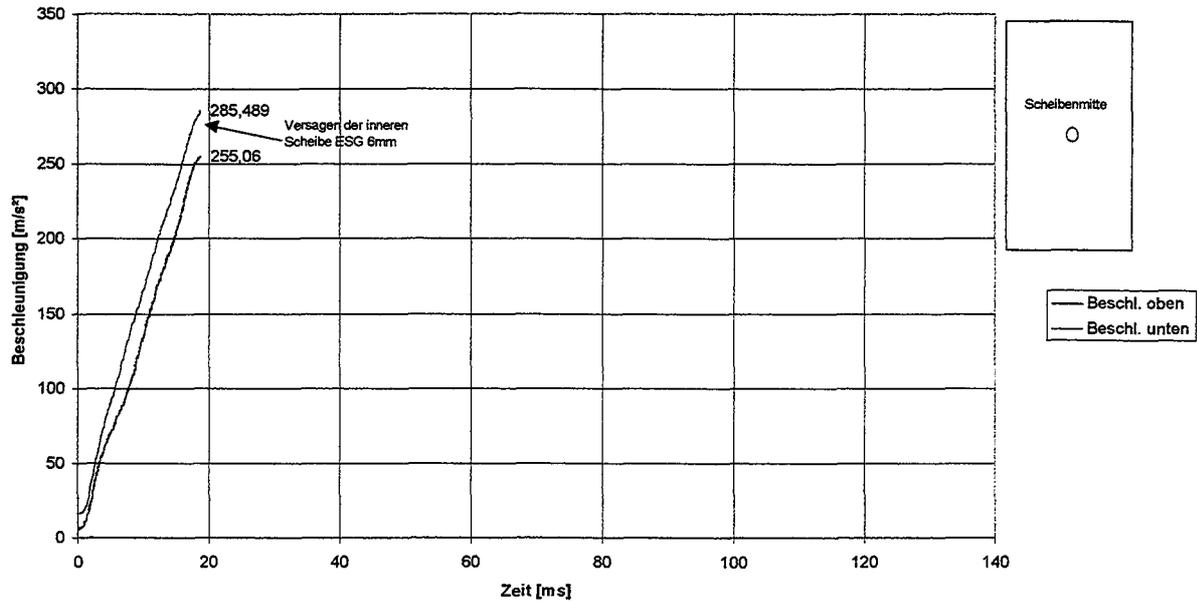
V25 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 700 mm



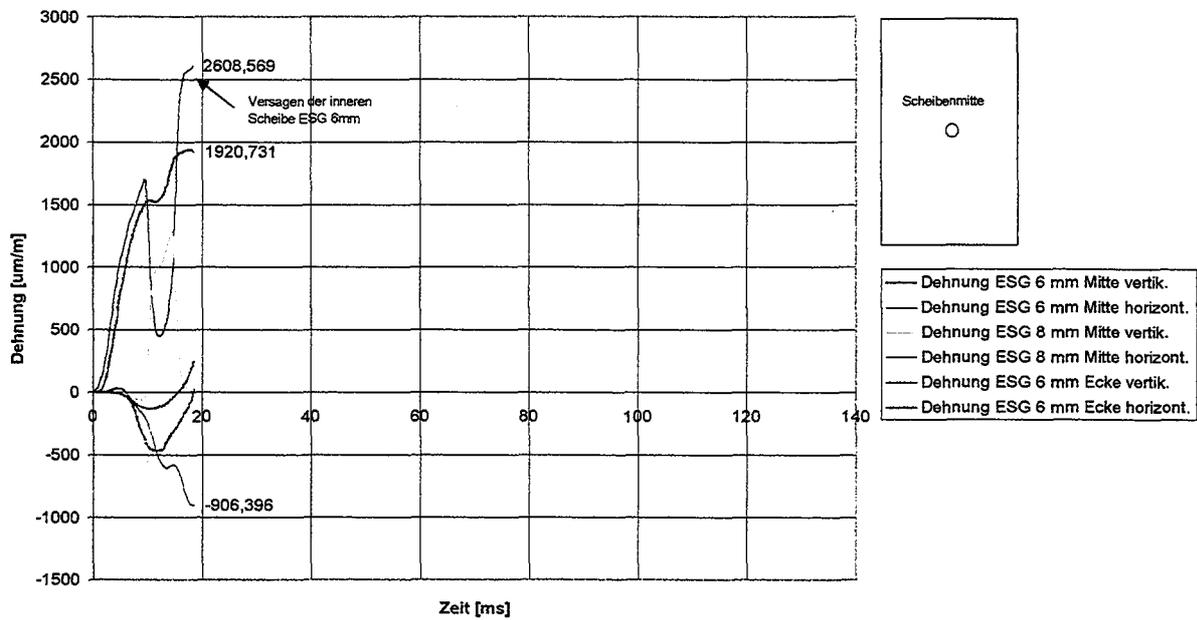
V25 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 700 mm



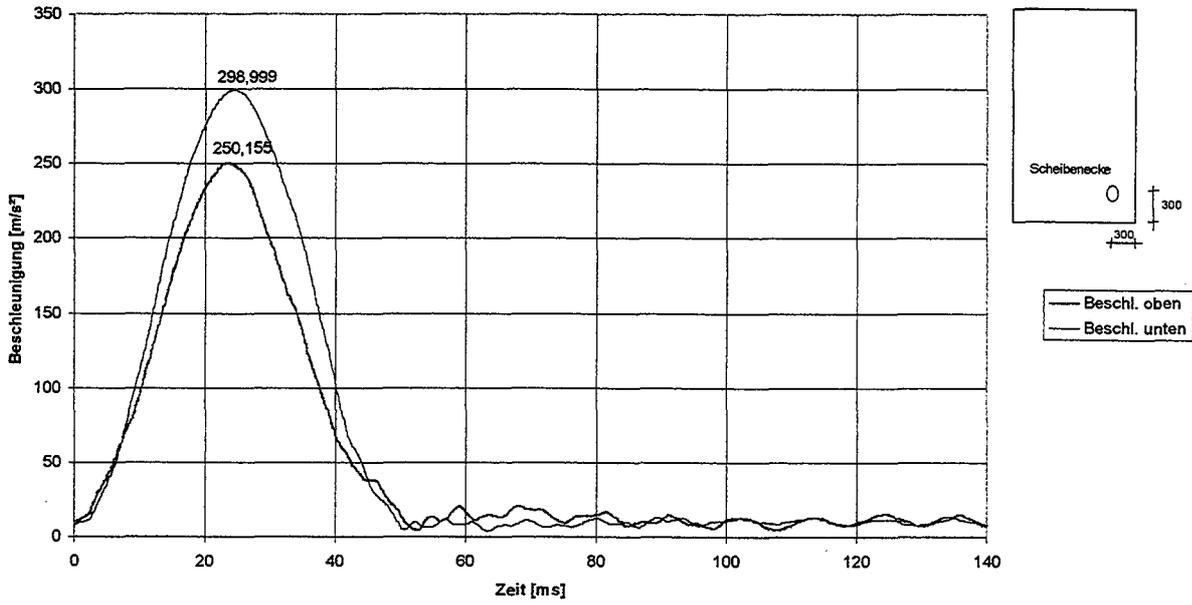
V26 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen),  
 Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 900 mm,  
 Versagen der inneren Scheibe



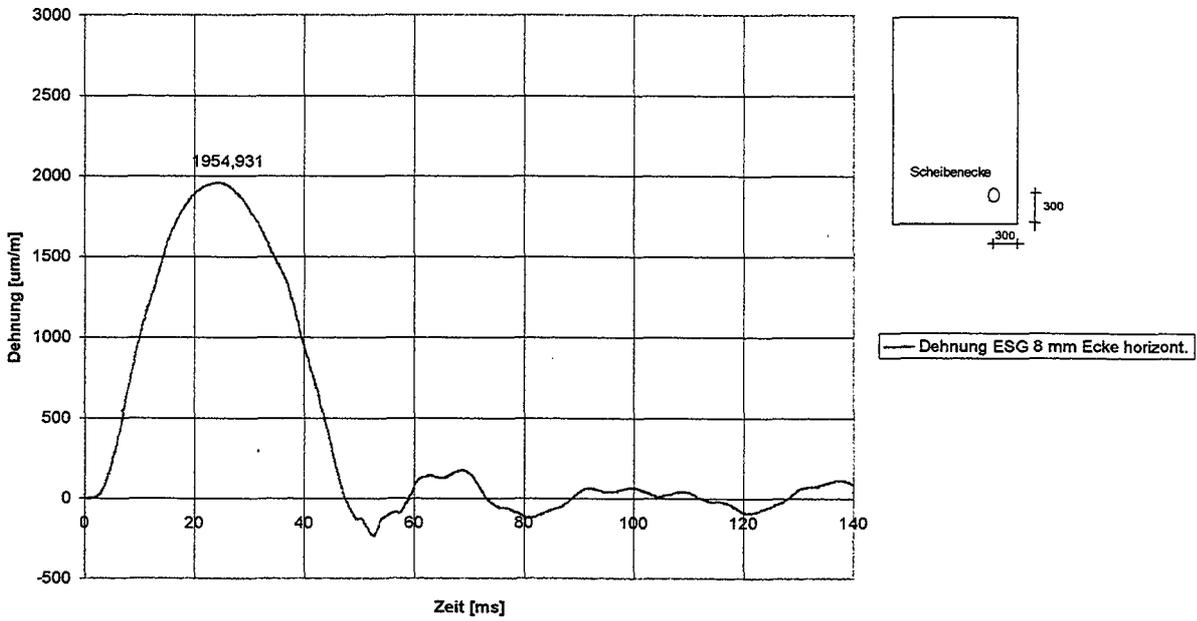
V26 E DIN EN 12600 Isolierglas 6mm ESG (innen)/ 8mm ESG (außen), Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
 Aufprallpunkt Scheibenmitte, Fallhöhe 900 mm, Versagen der inneren Scheibe



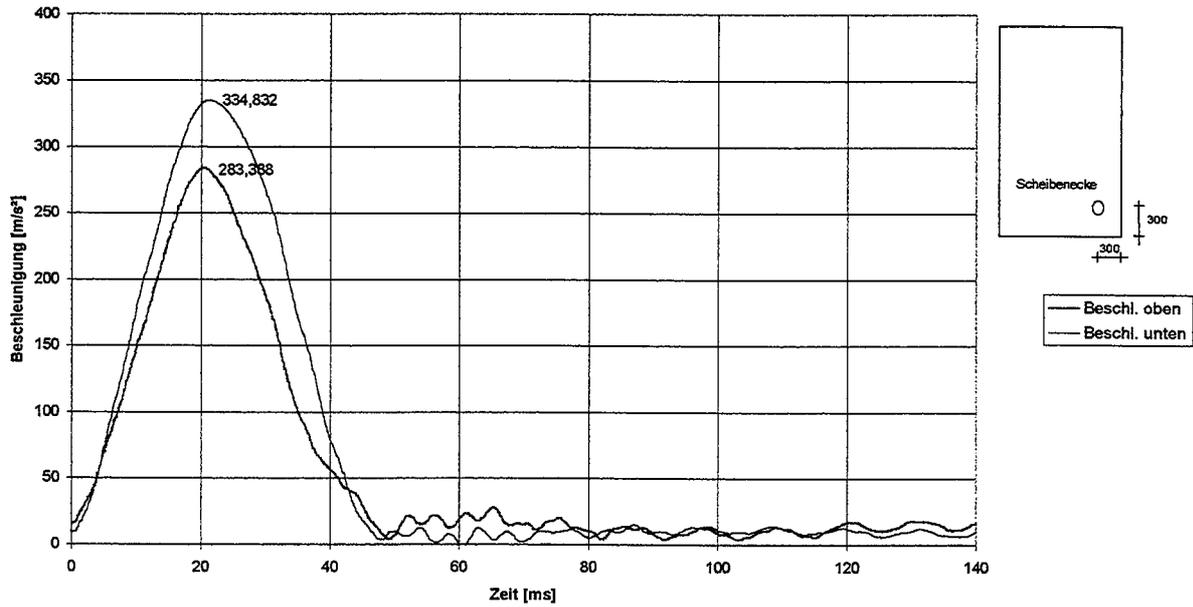
V27 E DIN EN 12600 8mm ESG,  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 700 mm



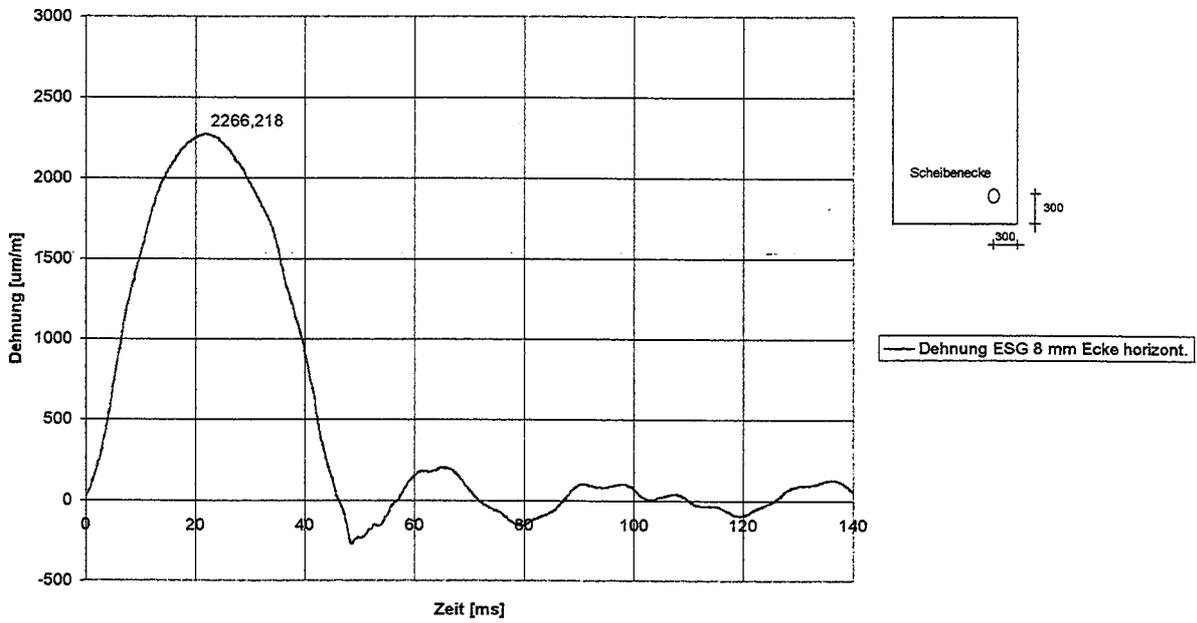
V27 E DIN EN 12600 8mm ESG, Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 700 mm



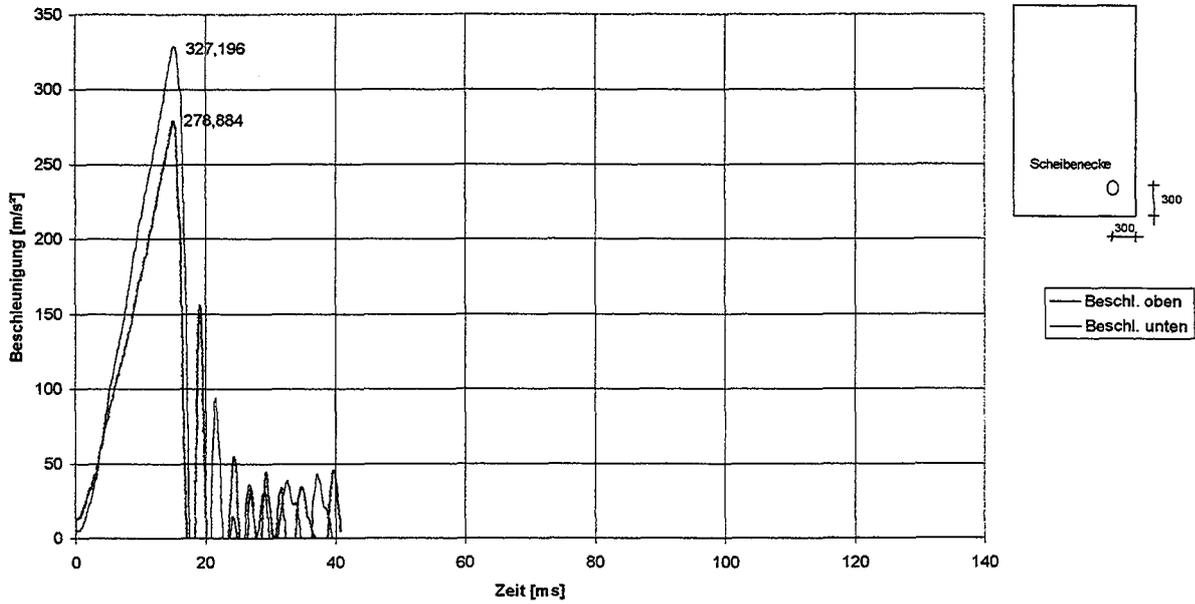
V28 E DIN EN 12600 8mm ESG,  
Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 900 mm



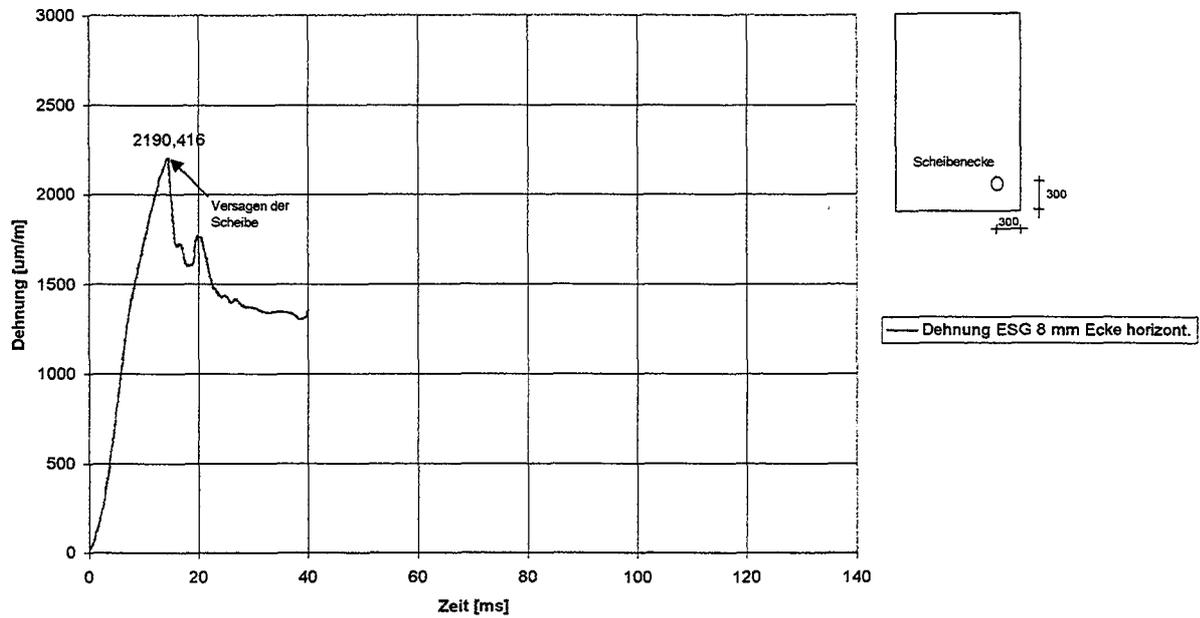
V28 E DIN EN 12600 8mm ESG, Dehnungs-Zeit-Verlauf,  
Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 900 mm



V29 E DIN EN 12600 8mm ESG, Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 1200 mm, Versagen der Scheibe



V29 E DIN EN 12600 8mm ESG, Dehnungs-Zeit-Verlauf, Aufprallpunkt Scheibenecke, Fallhöhe 1200 mm, Versagen der Scheibe



# Allgemeine Ersatzlasttafel

gilt nur für:

|                   |   |   |     |      |
|-------------------|---|---|-----|------|
| Reifendruck       | p | = | 4   | bar  |
| Reifenmasse       | m | = | 50  | kg   |
| Reifensteifigkeit | k | = | 396 | kN/m |
| Fallhöhe          | h | = | 45  | cm   |

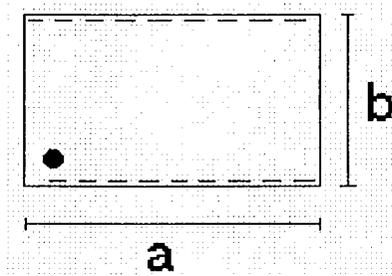
| Tafelwerte in kN |      | ks in kN/m |     |     |      |      |      |       |       |       |       |       |        |
|------------------|------|------------|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                  |      | 50         | 100 | 200 | 300  | 400  | 500  | 1.000 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 5.000 | 10.000 |
| ms, eff          | 2,5  | 4,7        | 6,4 | 8,3 | 9,3  | 10,0 | 10,6 | 12,3  | 13,1  | 13,3  | 13,4  | 13,3  | 13,5   |
| in kg            | 5,0  | 4,7        | 6,4 | 8,7 | 10,0 | 10,9 | 11,5 | 13,0  | 13,2  | 13,6  | 13,9  | 13,7  | 13,7   |
|                  | 7,5  | 4,5        | 6,6 | 8,6 | 9,7  | 10,4 | 11,0 | 12,9  | 14,1  | 13,9  | 13,5  | 14,0  | 13,8   |
|                  | 10,0 | 4,6        | 6,6 | 8,1 | 9,3  | 10,3 | 11,0 | 12,1  | 14,1  | 14,5  | 14,3  | 13,9  | 14,1   |
|                  | 12,5 | 4,6        | 6,4 | 8,2 | 9,9  | 12,5 | 11,7 | 12,9  | 13,7  | 14,6  | 14,7  | 14,5  | 14,3   |
|                  | 15,0 | 4,6        | 6,2 | 8,5 | 10,4 | 11,5 | 12,3 | 13,7  | 13,1  | 14,4  | 14,8  | 14,8  | 14,1   |
|                  | 17,5 | 4,6        | 5,9 | 8,7 | 10,7 | 11,9 | 12,8 | 14,3  | 13,8  | 13,9  | 14,7  | 14,9  | 14,0   |
|                  | 20,0 | 4,5        | 5,7 | 8,9 | 10,9 | 12,3 | 13,2 | 14,8  | 14,5  | 13,5  | 14,4  | 14,9  | 14,4   |
|                  | 22,5 | 4,5        | 5,8 | 9,0 | 11,1 | 12,5 | 13,5 | 15,3  | 15,0  | 14,1  | 14,0  | 14,7  | 14,7   |
|                  | 25,0 | 4,4        | 5,8 | 9,1 | 11,3 | 12,7 | 13,7 | 15,7  | 15,5  | 14,6  | 13,7  | 14,5  | 14,9   |
|                  | 27,5 | 4,3        | 5,8 | 9,2 | 11,4 | 12,8 | 13,9 | 16,0  | 16,0  | 15,1  | 14,2  | 14,1  | 15,1   |
|                  | 30,0 | 4,2        | 5,8 | 9,2 | 11,4 | 12,9 | 14,0 | 16,3  | 16,4  | 15,5  | 14,6  | 13,8  | 15,2   |
|                  | 32,5 | 4,2        | 5,8 | 9,2 | 11,5 | 13,0 | 14,1 | 16,5  | 16,8  | 15,9  | 15,0  | 14,2  | 15,2   |
|                  | 35,0 | 4,1        | 5,8 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,2 | 16,7  | 17,1  | 16,3  | 15,4  | 14,6  | 15,2   |
|                  | 37,5 | 4,1        | 5,7 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,3 | 16,9  | 17,4  | 16,6  | 15,8  | 15,0  | 15,2   |
|                  | 40,0 | 4,0        | 5,7 | 9,2 | 11,5 | 13,1 | 14,3 | 17,1  | 17,6  | 17,0  | 16,1  | 15,3  | 15,1   |
|                  | 42,5 | 3,9        | 5,7 | 9,1 | 11,5 | 13,1 | 14,4 | 17,2  | 17,9  | 17,2  | 16,4  | 15,6  | 15,0   |
|                  | 45,0 | 3,9        | 5,6 | 9,1 | 11,5 | 13,1 | 14,4 | 17,3  | 18,1  | 17,5  | 16,7  | 15,9  | 14,8   |
|                  | 47,5 | 3,8        | 5,6 | 9,1 | 11,4 | 13,1 | 14,4 | 17,4  | 18,3  | 17,8  | 17,0  | 16,2  | 14,6   |
|                  | 50   | 3,8        | 5,5 | 9,0 | 11,4 | 13,1 | 14,4 | 17,5  | 18,5  | 18,0  | 17,2  | 16,5  | 14,5   |
|                  | 60   | 3,6        | 5,3 | 8,8 | 11,2 | 12,9 | 14,3 | 17,7  | 19,1  | 18,8  | 18,1  | 17,4  | 14,5   |
|                  | 70   | 3,5        | 5,1 | 8,5 | 10,9 | 12,7 | 14,1 | 17,8  | 19,5  | 19,4  | 18,8  | 18,2  | 15,3   |
|                  | 80   | 3,4        | 4,9 | 8,2 | 10,6 | 12,4 | 13,8 | 17,7  | 19,8  | 19,8  | 19,4  | 18,8  | 16,0   |
|                  | 90   | 3,3        | 4,7 | 7,9 | 10,3 | 12,1 | 13,6 | 17,6  | 20,0  | 20,2  | 19,9  | 19,3  | 16,7   |
|                  | 100  | 3,2        | 4,5 | 7,7 | 10,0 | 11,8 | 13,3 | 17,5  | 20,1  | 20,5  | 20,2  | 19,8  | 17,2   |
|                  | 120  | 3,0        | 4,2 | 7,2 | 9,5  | 11,3 | 12,7 | 17,1  | 20,2  | 20,9  | 20,8  | 20,5  | 18,2   |
|                  | 140  | 2,8        | 3,9 | 6,7 | 8,9  | 10,7 | 12,2 | 16,7  | 20,1  | 21,1  | 21,2  | 21,0  | 19,0   |
|                  | 160  | 2,7        | 3,6 | 6,3 | 8,5  | 10,2 | 11,6 | 16,3  | 19,9  | 21,1  | 21,4  | 21,3  | 19,6   |
|                  | 180  | 2,6        | 3,4 | 6,0 | 8,0  | 9,7  | 11,1 | 15,8  | 19,7  | 21,1  | 21,6  | 21,6  | 20,1   |
|                  | 200  | 2,4        | 3,2 | 5,6 | 7,6  | 9,3  | 10,7 | 15,4  | 19,5  | 21,0  | 21,6  | 21,8  | 20,6   |
|                  | 220  | 2,3        | 3,2 | 5,3 | 7,3  | 8,9  | 10,3 | 14,9  | 19,2  | 20,9  | 21,6  | 21,9  | 21,0   |
|                  | 240  | 2,2        | 3,1 | 5,1 | 6,9  | 8,5  | 9,9  | 14,5  | 18,9  | 20,8  | 21,6  | 22,0  | 21,3   |
|                  | 260  | 2,1        | 3,0 | 4,8 | 6,6  | 8,2  | 9,5  | 14,1  | 18,6  | 20,6  | 21,6  | 22,0  | 21,5   |
|                  | 280  | 2,1        | 3,0 | 4,6 | 6,4  | 7,9  | 9,1  | 13,7  | 18,3  | 20,4  | 21,5  | 22,0  | 21,8   |
|                  | 300  | 2,0        | 2,9 | 4,4 | 6,1  | 7,6  | 8,8  | 13,4  | 18,0  | 20,2  | 21,4  | 21,9  | 22,0   |
|                  | 320  | 1,9        | 2,8 | 4,2 | 5,9  | 7,3  | 8,5  | 13,0  | 17,7  | 20,0  | 21,2  | 21,9  | 22,1   |
|                  | 340  | 1,9        | 2,8 | 4,1 | 5,7  | 7,0  | 8,2  | 12,7  | 17,4  | 19,8  | 21,1  | 21,8  | 22,2   |
|                  | 360  | 1,8        | 2,7 | 3,9 | 5,5  | 6,8  | 8,0  | 12,4  | 17,2  | 19,6  | 20,9  | 21,7  | 22,4   |
|                  | 380  | 1,7        | 2,7 | 3,8 | 5,3  | 6,6  | 7,7  | 12,1  | 16,9  | 19,4  | 20,8  | 21,6  | 22,4   |
|                  | 400  | 1,7        | 2,6 | 3,6 | 5,1  | 6,4  | 7,5  | 11,8  | 16,6  | 19,1  | 20,6  | 21,5  | 22,5   |
|                  | 420  | 1,6        | 2,5 | 3,5 | 4,9  | 6,2  | 7,3  | 11,5  | 16,3  | 18,9  | 20,4  | 21,4  | 22,6   |
|                  | 440  | 1,6        | 2,5 | 3,4 | 4,8  | 6,0  | 7,1  | 11,3  | 16,1  | 18,7  | 20,3  | 21,3  | 22,6   |
|                  | 460  | 1,6        | 2,4 | 3,3 | 4,6  | 5,8  | 6,9  | 11,0  | 15,8  | 18,5  | 20,1  | 21,1  | 22,6   |
|                  | 480  | 1,6        | 2,4 | 3,2 | 4,5  | 5,7  | 6,7  | 10,8  | 15,6  | 18,3  | 19,9  | 21,0  | 22,6   |
|                  | 500  | 1,6        | 2,3 | 3,1 | 4,4  | 5,5  | 6,5  | 10,5  | 15,3  | 18,1  | 19,8  | 20,9  | 22,7   |

# Eckstoß

Ecke,  
25 cm von beiden Rändern

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



zweiseitige Lagerung

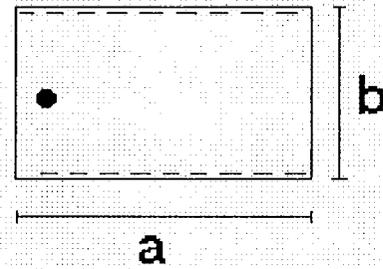
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 6,1  | 6,1  | 6,2  | 6,2  | 6,2  | 6,1  | 4,2  | 4,1  | 4,1  | 4,1  | 4,2  | 3,7  | 3,5  | 3,5  | 3,5  |
|                 | 8           |              | 8,8  | 8,8  | 8,9  | 8,8  | 8,9  | 9,0  | 6,2  | 6,3  | 6,3  | 6,3  | 6,3  | 5,1  | 4,9  | 4,9  | 4,9  |
|                 | 10          |              | 10,8 | 10,9 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 10,8 | 8,9  | 8,5  | 8,6  | 8,6  | 8,7  | 8,1  | 7,7  | 7,8  | 7,8  |
|                 | 12          |              | 12,0 | 12,2 | 12,4 | 12,4 | 12,3 | 12,0 | 11,9 | 11,5 | 11,5 | 11,6 | 11,7 | 11,1 | 10,7 | 10,7 | 10,7 |
|                 | 14          |              | 13,0 | 13,2 | 13,3 | 13,3 | 13,2 | 12,9 | 14,3 | 13,8 | 13,8 | 13,9 | 14,0 | 13,8 | 13,3 | 13,3 | 13,3 |
|                 | 15          |              | 13,4 | 13,6 | 13,7 | 13,7 | 13,6 | 13,4 | 15,2 | 14,7 | 14,7 | 14,8 | 14,9 | 14,9 | 14,5 | 14,5 | 14,5 |
|                 | 16          |              | 13,8 | 13,9 | 14,0 | 14,0 | 13,9 | 13,7 | 16,0 | 15,4 | 15,5 | 15,6 | 15,7 | 15,9 | 15,5 | 15,5 | 15,5 |
|                 | 20          |              | 14,6 | 14,6 | 14,5 | 14,4 | 14,6 | 14,7 | 17,6 | 16,5 | 17,0 | 17,2 | 17,3 | 18,8 | 18,5 | 18,5 | 18,5 |
|                 | 22          |              | 14,7 | 14,6 | 14,4 | 14,4 | 14,6 | 14,8 | 17,9 | 17,0 | 17,3 | 17,5 | 17,5 | 19,7 | 19,5 | 19,4 | 19,4 |
|                 | 24          |              | 14,6 | 14,4 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,7 | 17,8 | 17,2 | 17,2 | 17,4 | 17,4 | 20,2 | 20,1 | 20,0 | 20,0 |
|                 | 27          |              | 14,3 | 14,0 | 13,9 | 13,9 | 14,0 | 14,4 | 17,5 | 17,2 | 16,9 | 17,1 | 17,1 | 20,6 | 20,5 | 20,5 | 20,5 |
|                 | 30          |              | 13,9 | 14,2 | 14,3 | 14,3 | 14,2 | 13,9 | 16,9 | 16,8 | 16,3 | 16,5 | 16,5 | 20,6 | 20,6 | 20,5 | 20,5 |
|                 | 38          |              | 14,3 | 14,2 | 14,0 | 14,0 | 14,2 | 14,4 | 15,1 | 16,2 | 14,5 | 14,8 | 14,7 | 19,6 | 19,7 | 19,6 | 19,7 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der kurzen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



zweiseitige Lagerung

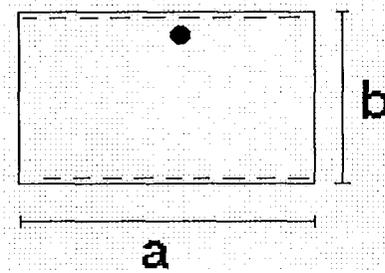
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 4,3  | 4,3  | 4,4  | 4,4  | 4,3  | 4,3  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
|                 | 8           |              | 6,2  | 6,3  | 6,4  | 6,4  | 6,3  | 6,4  | 2,8  | 2,8  | 2,8  | 2,7  | 2,8  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  |
|                 | 10          |              | 8,7  | 8,7  | 8,7  | 8,7  | 8,8  | 8,8  | 3,8  | 3,9  | 3,9  | 3,7  | 3,9  | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,3  |
|                 | 12          |              | 10,2 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,3 | 10,1 | 5,1  | 5,2  | 5,3  | 5,1  | 5,2  | 2,8  | 2,9  | 2,9  | 2,9  |
|                 | 14          |              | 11,0 | 11,4 | 11,6 | 11,5 | 11,3 | 10,9 | 5,8  | 5,8  | 5,9  | 5,7  | 5,9  | 3,6  | 3,7  | 3,7  | 3,7  |
|                 | 15          |              | 11,4 | 11,8 | 12,0 | 12,0 | 11,7 | 11,3 | 6,7  | 6,8  | 6,8  | 6,5  | 6,8  | 3,9  | 3,9  | 4,0  | 4,0  |
|                 | 16          |              | 11,8 | 12,2 | 12,4 | 12,4 | 12,1 | 11,7 | 7,7  | 7,7  | 7,8  | 7,5  | 7,8  | 4,1  | 4,1  | 4,1  | 4,1  |
|                 | 20          |              | 13,2 | 13,6 | 13,7 | 13,7 | 13,5 | 13,0 | 11,3 | 11,4 | 11,4 | 11,1 | 11,4 | 6,1  | 6,2  | 6,2  | 6,2  |
|                 | 22          |              | 13,8 | 14,1 | 14,2 | 14,2 | 14,0 | 13,7 | 13,0 | 12,9 | 13,0 | 12,7 | 13,0 | 7,3  | 7,5  | 7,5  | 7,5  |
|                 | 24          |              | 14,3 | 14,5 | 14,5 | 14,5 | 14,5 | 14,2 | 14,4 | 14,3 | 14,4 | 14,1 | 14,4 | 8,5  | 8,7  | 8,8  | 8,8  |
|                 | 27          |              | 14,8 | 14,8 | 14,7 | 14,7 | 14,8 | 14,7 | 16,1 | 16,0 | 16,0 | 15,8 | 16,1 | 10,4 | 10,6 | 10,6 | 10,6 |
|                 | 30          |              | 14,9 | 14,8 | 14,6 | 14,7 | 14,8 | 15,0 | 17,4 | 17,2 | 17,1 | 17,1 | 17,3 | 12,1 | 12,3 | 12,4 | 12,4 |
|                 | 38          |              | 14,4 | 14,0 | 14,0 | 14,0 | 14,1 | 14,6 | 19,0 | 18,6 | 18,5 | 18,7 | 18,9 | 16,0 | 16,2 | 16,3 | 16,3 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der langen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



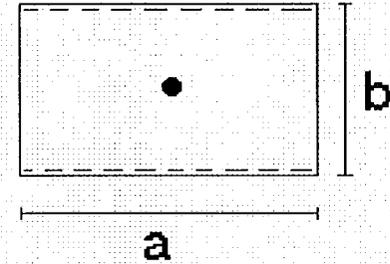
zweiseitige Lagerung

| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 6,7  | 7,4  | 7,6  | 7,6  | 7,6  | 7,5  | 4,7  | 4,7  | 4,9  | 5,1  | 5,1  | 3,8  | 3,7  | 3,8  | 3,9  |
|                 | 8           |              | 8,8  | 9,2  | 9,8  | 9,6  | 9,5  | 10,0 | 7,9  | 8,1  | 8,5  | 8,9  | 8,6  | 6,4  | 6,2  | 6,5  | 6,8  |
|                 | 10          |              | 11,3 | 11,8 | 11,5 | 11,7 | 12,2 | 12,7 | 11,5 | 11,8 | 12,2 | 12,6 | 12,4 | 9,4  | 9,1  | 9,6  | 10,0 |
|                 | 12          |              | 13,0 | 13,2 | 12,7 | 12,9 | 13,5 | 14,1 | 14,6 | 14,9 | 15,3 | 15,6 | 15,4 | 12,3 | 12,0 | 12,5 | 12,9 |
|                 | 14          |              | 13,8 | 13,7 | 12,9 | 13,2 | 13,8 | 14,5 | 17,0 | 17,2 | 17,5 | 17,7 | 17,5 | 14,8 | 14,5 | 15,0 | 15,4 |
|                 | 15          |              | 13,9 | 13,7 | 13,3 | 13,1 | 13,8 | 14,5 | 17,9 | 18,1 | 18,3 | 18,4 | 18,3 | 15,9 | 15,6 | 16,1 | 16,5 |
|                 | 16          |              | 13,9 | 13,5 | 13,8 | 13,6 | 13,6 | 14,4 | 18,7 | 18,9 | 19,0 | 19,0 | 18,9 | 16,9 | 16,6 | 17,1 | 17,5 |
|                 | 20          |              | 14,0 | 14,6 | 14,9 | 14,9 | 14,7 | 14,2 | 20,3 | 20,5 | 20,3 | 20,0 | 20,0 | 19,8 | 19,6 | 20,0 | 20,3 |
|                 | 22          |              | 14,6 | 15,0 | 15,1 | 15,1 | 15,0 | 14,8 | 20,6 | 20,7 | 20,4 | 19,9 | 20,1 | 20,8 | 20,6 | 20,9 | 21,1 |
|                 | 24          |              | 15,0 | 15,2 | 15,0 | 15,1 | 15,2 | 15,1 | 20,6 | 20,8 | 20,3 | 19,7 | 19,9 | 21,5 | 21,4 | 21,6 | 21,7 |
|                 | 27          |              | 15,2 | 15,1 | 14,7 | 14,8 | 15,1 | 15,3 | 20,3 | 20,5 | 19,9 | 19,1 | 19,4 | 22,1 | 22,1 | 22,1 | 22,1 |
|                 | 30          |              | 15,1 | 14,7 | 14,1 | 14,3 | 14,7 | 15,0 | 19,8 | 19,9 | 19,3 | 18,4 | 18,7 | 22,4 | 22,4 | 22,3 | 22,2 |
|                 | 38          |              | 14,1 | 14,4 | 14,5 | 14,5 | 14,4 | 14,2 | 18,0 | 18,1 | 17,3 | 16,3 | 16,6 | 21,9 | 22,1 | 21,8 | 21,5 |

# Mittiger Stoß

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$F = k \cdot x$



zweiseitige Lagerung

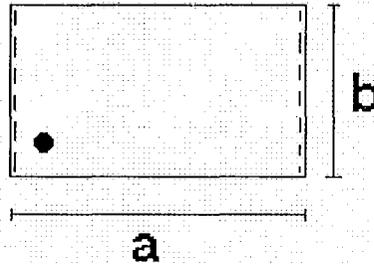
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 5,0  | 5,7  | 5,7  | 5,8  | 5,9  | 6,0  | 2,2  | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,7  | 1,2  | 1,4  | 1,4  | 1,5  |
|                 | 8           |              | 7,4  | 8,5  | 8,7  | 8,7  | 8,5  | 8,3  | 3,3  | 4,0  | 4,1  | 4,3  | 4,3  | 1,7  | 2,0  | 2,1  | 2,1  |
|                 | 10          |              | 9,6  | 9,8  | 10,0 | 9,8  | 10,2 | 10,7 | 4,1  | 5,1  | 5,3  | 5,5  | 5,5  | 2,3  | 2,8  | 2,9  | 3,0  |
|                 | 12          |              | 12,2 | 11,8 | 11,5 | 11,7 | 12,3 | 12,8 | 6,0  | 7,4  | 7,8  | 8,0  | 8,0  | 2,9  | 3,4  | 3,5  | 3,5  |
|                 | 14          |              | 13,9 | 12,9 | 12,6 | 12,8 | 13,4 | 14,0 | 8,0  | 9,8  | 10,2 | 10,5 | 10,5 | 3,3  | 4,1  | 4,4  | 4,6  |
|                 | 15          |              | 14,5 | 13,2 | 12,8 | 13,0 | 13,7 | 14,3 | 9,1  | 10,9 | 11,4 | 11,6 | 11,7 | 3,5  | 4,7  | 5,0  | 5,3  |
|                 | 16          |              | 14,9 | 13,3 | 12,9 | 13,1 | 13,8 | 14,5 | 10,1 | 12,0 | 12,5 | 12,8 | 12,8 | 4,0  | 5,4  | 5,7  | 6,0  |
|                 | 20          |              | 15,4 | 13,8 | 14,2 | 14,0 | 13,4 | 14,1 | 13,8 | 15,7 | 16,2 | 16,4 | 16,4 | 6,0  | 7,9  | 8,4  | 8,8  |
|                 | 22          |              | 15,1 | 14,4 | 14,7 | 14,6 | 14,2 | 13,7 | 15,3 | 17,2 | 17,6 | 17,7 | 17,7 | 7,1  | 9,2  | 9,7  | 10,2 |
|                 | 24          |              | 14,8 | 14,8 | 15,0 | 14,9 | 14,7 | 14,3 | 16,7 | 18,4 | 18,6 | 18,7 | 18,7 | 8,2  | 10,5 | 11,0 | 11,5 |
|                 | 27          |              | 14,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,0 | 18,4 | 19,7 | 19,8 | 19,8 | 19,8 | 9,7  | 12,3 | 12,8 | 13,3 |
|                 | 30          |              | 14,5 | 15,1 | 14,9 | 15,0 | 15,2 | 15,2 | 19,7 | 20,5 | 20,5 | 20,4 | 20,4 | 11,2 | 13,9 | 14,5 | 15,0 |
|                 | 38          |              | 15,3 | 14,1 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,8 | 21,5 | 21,3 | 20,9 | 20,5 | 20,5 | 14,8 | 17,5 | 18,1 | 18,5 |

# Eckstoß

Ecke,  
25 cm von beiden Rändern

Fallhöhe h = 45 cm

$$F = k \cdot x$$



zweiseitige Lagerung

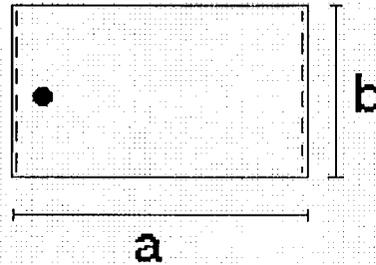
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 6,1  | 3,7  | 2,8  | 2,3  | 2,0  | 1,7  | 4,2  | 3,1  | 2,4  | 2,0  | 1,8  | 3,7  | 2,8  | 2,3  | 1,9  |
|                 | 8           |              | 8,8  | 5,8  | 4,4  | 3,6  | 3,0  | 2,5  | 6,2  | 4,5  | 3,7  | 3,1  | 2,6  | 5,1  | 3,9  | 3,4  | 2,9  |
|                 | 10          |              | 10,8 | 7,9  | 5,9  | 4,5  | 3,8  | 3,4  | 8,9  | 6,8  | 5,1  | 3,8  | 3,3  | 8,1  | 6,0  | 4,5  | 3,5  |
|                 | 12          |              | 12,0 | 10,8 | 8,6  | 6,6  | 5,1  | 4,1  | 11,9 | 9,6  | 7,3  | 5,5  | 4,2  | 11,1 | 8,4  | 6,9  | 4,9  |
|                 | 14          |              | 13,0 | 13,3 | 11,1 | 8,7  | 6,9  | 5,6  | 14,3 | 12,2 | 9,5  | 7,3  | 5,7  | 13,8 | 10,8 | 8,4  | 6,5  |
|                 | 15          |              | 13,4 | 14,4 | 12,3 | 9,8  | 7,9  | 6,3  | 15,2 | 13,4 | 10,6 | 8,2  | 6,4  | 14,9 | 11,9 | 9,3  | 7,3  |
|                 | 16          |              | 13,8 | 15,3 | 13,4 | 10,8 | 8,8  | 7,1  | 16,0 | 14,5 | 11,6 | 9,1  | 7,1  | 15,9 | 13,0 | 10,3 | 8,1  |
|                 | 20          |              | 14,6 | 17,5 | 16,9 | 14,6 | 12,3 | 10,2 | 17,6 | 17,8 | 15,3 | 12,4 | 10,1 | 18,8 | 16,6 | 13,8 | 11,2 |
|                 | 22          |              | 14,7 | 18,0 | 18,2 | 16,1 | 13,8 | 11,7 | 17,9 | 19,0 | 16,8 | 13,9 | 11,5 | 19,7 | 18,0 | 15,3 | 12,6 |
|                 | 24          |              | 14,6 | 18,1 | 19,1 | 17,4 | 15,2 | 13,1 | 17,8 | 19,9 | 18,0 | 15,3 | 12,8 | 20,2 | 19,1 | 16,6 | 14,0 |
|                 | 27          |              | 14,3 | 18,1 | 20,1 | 19,0 | 17,1 | 14,9 | 17,5 | 20,7 | 19,5 | 17,1 | 14,6 | 20,6 | 20,4 | 18,3 | 15,8 |
|                 | 30          |              | 13,9 | 17,7 | 20,6 | 20,1 | 18,5 | 16,6 | 16,9 | 21,1 | 20,6 | 18,6 | 16,2 | 20,6 | 21,3 | 19,6 | 17,3 |
|                 | 38          |              | 14,3 | 16,1 | 20,5 | 21,6 | 21,1 | 19,8 | 15,1 | 20,8 | 22,1 | 21,2 | 19,5 | 19,6 | 22,1 | 21,9 | 20,3 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der kurzen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



zweiseitige Lagerung

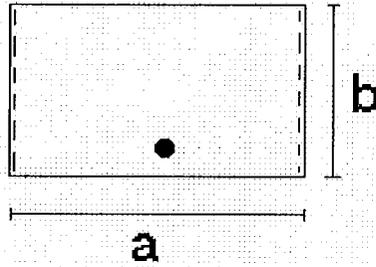
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 6,7  | 4,0  | 2,9  | 2,4  | 2,0  | 1,7  | 4,7  | 3,8  | 3,5  | 3,0  | 2,2  | 3,8  | 2,9  | 2,4  | 2,0  |
|                 | 8           |              | 8,8  | 5,6  | 4,4  | 3,6  | 3,0  | 2,5  | 7,9  | 6,1  | 5,4  | 4,2  | 3,3  | 6,4  | 4,1  | 3,3  | 3,0  |
|                 | 10          |              | 11,3 | 8,7  | 6,3  | 4,6  | 3,8  | 3,4  | 11,5 | 9,2  | 8,1  | 6,5  | 4,4  | 9,4  | 6,2  | 4,8  | 3,8  |
|                 | 12          |              | 13,0 | 11,8 | 8,9  | 6,7  | 5,2  | 4,1  | 14,6 | 12,1 | 10,9 | 8,8  | 6,2  | 12,3 | 8,4  | 6,6  | 5,3  |
|                 | 14          |              | 13,8 | 14,3 | 11,5 | 8,9  | 7,0  | 5,6  | 17,0 | 14,6 | 13,3 | 11,1 | 8,0  | 14,8 | 10,6 | 8,5  | 6,8  |
|                 | 15          |              | 13,9 | 15,3 | 12,7 | 10,0 | 7,9  | 6,4  | 17,9 | 15,7 | 14,5 | 12,2 | 8,9  | 15,9 | 11,6 | 9,4  | 7,6  |
|                 | 16          |              | 13,9 | 16,2 | 13,8 | 11,0 | 8,9  | 7,2  | 18,7 | 16,7 | 15,5 | 13,2 | 9,8  | 16,9 | 12,6 | 10,3 | 8,4  |
|                 | 20          |              | 14,0 | 18,5 | 17,3 | 14,7 | 12,3 | 10,3 | 20,3 | 19,7 | 18,8 | 16,7 | 13,2 | 19,8 | 16,0 | 13,6 | 11,5 |
|                 | 22          |              | 14,6 | 19,0 | 18,5 | 16,3 | 13,9 | 11,7 | 20,6 | 20,7 | 19,9 | 18,1 | 14,7 | 20,8 | 17,5 | 15,1 | 12,9 |
|                 | 24          |              | 15,0 | 19,2 | 19,4 | 17,6 | 15,3 | 13,1 | 20,6 | 21,3 | 20,8 | 19,2 | 16,0 | 21,5 | 18,7 | 16,4 | 14,2 |
|                 | 27          |              | 15,2 | 19,1 | 20,4 | 19,1 | 17,1 | 15,0 | 20,3 | 21,9 | 21,7 | 20,5 | 17,8 | 22,1 | 20,1 | 18,1 | 15,9 |
|                 | 30          |              | 15,1 | 18,7 | 20,9 | 20,3 | 18,6 | 16,6 | 19,8 | 22,1 | 22,2 | 21,5 | 19,2 | 22,4 | 21,2 | 19,4 | 17,5 |
|                 | 38          |              | 14,1 | 17,2 | 20,8 | 21,8 | 21,1 | 19,8 | 18,0 | 21,5 | 22,3 | 22,6 | 21,6 | 21,9 | 22,7 | 21,8 | 20,5 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der langen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



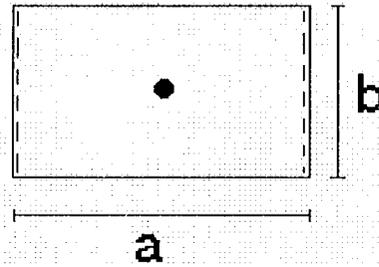
zweiseitige Lagerung

| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 3    | 4   | 5   | 6   |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1   | 1   | 1   | 1    | 2    | 2   | 2   | 2   | 2    | 2   | 3   | 3   |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 4,3  | 1,7  | 0,9  | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 1,8  | 1,1  | 0,7 | 0,4 | 0,3 | 1,1  | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
|                 | 8           |              | 6,2  | 2,6  | 1,3  | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 2,8  | 1,6  | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 1,6  | 1,0 | 0,7 | 0,5 |
|                 | 10          |              | 8,7  | 3,6  | 1,8  | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 3,8  | 2,2  | 1,3 | 0,9 | 0,6 | 2,2  | 1,4 | 0,9 | 0,6 |
|                 | 12          |              | 10,2 | 4,8  | 2,3  | 1,4 | 0,9 | 0,6 | 5,1  | 2,9  | 1,7 | 1,1 | 0,7 | 2,8  | 1,8 | 1,2 | 0,7 |
|                 | 14          |              | 11,0 | 5,3  | 2,9  | 1,7 | 1,1 | 0,8 | 5,8  | 3,6  | 2,0 | 1,3 | 0,9 | 3,6  | 2,1 | 1,4 | 0,9 |
|                 | 15          |              | 11,4 | 6,2  | 3,2  | 1,8 | 1,2 | 0,8 | 6,7  | 3,8  | 2,2 | 1,4 | 1,0 | 3,9  | 2,3 | 1,6 | 1,0 |
|                 | 16          |              | 11,8 | 7,1  | 3,5  | 2,0 | 1,3 | 0,9 | 7,7  | 3,9  | 2,5 | 1,6 | 1,0 | 4,1  | 2,6 | 1,7 | 1,0 |
|                 | 20          |              | 13,2 | 10,7 | 4,5  | 2,7 | 1,7 | 1,2 | 11,3 | 6,1  | 3,2 | 2,0 | 1,4 | 6,1  | 3,3 | 2,2 | 1,4 |
|                 | 22          |              | 13,8 | 12,4 | 5,5  | 3,1 | 1,9 | 1,3 | 13,0 | 7,3  | 3,4 | 2,3 | 1,5 | 7,3  | 3,6 | 2,6 | 1,5 |
|                 | 24          |              | 14,3 | 13,8 | 6,6  | 3,3 | 2,1 | 1,5 | 14,4 | 8,5  | 4,0 | 2,6 | 1,7 | 8,5  | 4,2 | 2,8 | 1,6 |
|                 | 27          |              | 14,8 | 15,7 | 8,2  | 3,7 | 2,5 | 1,7 | 16,1 | 10,3 | 5,0 | 3,0 | 1,9 | 10,4 | 5,3 | 3,1 | 1,9 |
|                 | 30          |              | 14,9 | 17,1 | 9,7  | 4,6 | 2,9 | 1,9 | 17,4 | 12,0 | 6,1 | 3,1 | 2,2 | 12,1 | 6,4 | 3,4 | 2,2 |
|                 | 38          |              | 14,4 | 19,2 | 13,6 | 7,1 | 3,6 | 2,6 | 19,0 | 15,9 | 9,0 | 4,7 | 2,9 | 16,0 | 9,4 | 5,3 | 2,8 |

# Mittiger Stoß

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



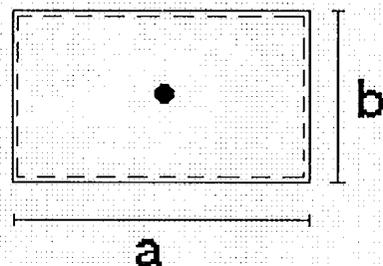
zweiseitige Lagerung

| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 3    | 4   | 5   | 6   |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1   | 1   | 1   | 2    | 2    | 2   | 2   | 2   | 3    | 3   | 3   | 3   |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 5,0  | 1,7  | 0,9  | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 2,2  | 1,1  | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 1,2  | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
|                 | 8           |              | 7,4  | 2,6  | 1,3  | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 3,3  | 1,6  | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 1,7  | 1,0 | 0,6 | 0,5 |
|                 | 10          |              | 9,6  | 3,7  | 1,7  | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 4,1  | 2,1  | 1,2 | 0,8 | 0,6 | 2,3  | 1,3 | 0,8 | 0,6 |
|                 | 12          |              | 12,2 | 4,6  | 2,2  | 1,3 | 0,9 | 0,6 | 6,0  | 2,8  | 1,6 | 1,0 | 0,7 | 2,9  | 1,6 | 1,0 | 0,7 |
|                 | 14          |              | 13,9 | 5,7  | 2,8  | 1,6 | 1,0 | 0,7 | 8,0  | 3,3  | 1,8 | 1,2 | 0,8 | 3,3  | 1,9 | 1,2 | 0,9 |
|                 | 15          |              | 14,5 | 6,6  | 3,1  | 1,8 | 1,2 | 0,8 | 9,1  | 3,4  | 2,0 | 1,3 | 0,9 | 3,5  | 2,2 | 1,4 | 0,9 |
|                 | 16          |              | 14,9 | 7,5  | 3,4  | 1,9 | 1,2 | 0,9 | 10,1 | 3,8  | 2,2 | 1,4 | 1,0 | 4,0  | 2,4 | 1,5 | 1,0 |
|                 | 20          |              | 15,4 | 11,1 | 4,3  | 2,6 | 1,7 | 1,1 | 13,8 | 5,8  | 2,9 | 1,8 | 1,2 | 6,0  | 3,0 | 1,9 | 1,3 |
|                 | 22          |              | 15,1 | 12,7 | 5,3  | 3,0 | 1,8 | 1,3 | 15,3 | 6,9  | 3,1 | 2,0 | 1,4 | 7,1  | 3,1 | 2,1 | 1,4 |
|                 | 24          |              | 14,8 | 14,2 | 6,3  | 3,2 | 2,1 | 1,4 | 16,7 | 8,0  | 3,4 | 2,3 | 1,5 | 8,2  | 3,7 | 2,4 | 1,6 |
|                 | 27          |              | 14,1 | 16,1 | 7,8  | 3,5 | 2,4 | 1,6 | 18,4 | 9,6  | 4,3 | 2,6 | 1,7 | 9,7  | 4,5 | 2,7 | 1,8 |
|                 | 30          |              | 14,5 | 17,6 | 9,3  | 4,3 | 2,8 | 1,8 | 19,7 | 11,1 | 5,2 | 2,9 | 2,0 | 11,2 | 5,4 | 2,9 | 2,1 |
|                 | 38          |              | 15,3 | 20,0 | 13,0 | 6,7 | 3,4 | 2,5 | 21,5 | 14,8 | 7,6 | 3,9 | 2,6 | 14,8 | 7,9 | 4,1 | 2,7 |

# Mittiger Stoß

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



vierseitige Lagerung

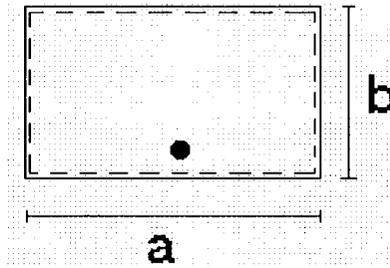
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m]<br>Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |                             | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6                           | 6,9  | 5,8  | 5,8  | 5,8  | 6,0  | 6,1  | 3,2  | 2,6  | 2,3  | 2,3  | 2,7  | 1,8  | 1,4  | 1,3  | 1,2  |
|                 | 8                           | 9,8  | 8,7  | 8,7  | 8,8  | 8,8  | 8,6  | 5,4  | 4,2  | 3,7  | 3,6  | 4,3  | 3,2  | 2,6  | 2,4  | 2,3  |
|                 | 10                          | 11,8 | 10,0 | 9,9  | 10,3 | 10,8 | 10,9 | 7,0  | 5,9  | 5,6  | 5,5  | 5,5  | 4,1  | 3,6  | 3,3  | 3,2  |
|                 | 12                          | 13,0 | 11,6 | 11,7 | 11,2 | 12,0 | 12,3 | 9,9  | 8,6  | 8,1  | 8,0  | 8,0  | 5,6  | 4,4  | 3,9  | 3,7  |
|                 | 14                          | 13,8 | 12,6 | 12,7 | 12,1 | 12,9 | 13,3 | 12,5 | 11,1 | 10,6 | 10,5 | 10,5 | 7,6  | 6,1  | 5,4  | 5,1  |
|                 | 15                          | 14,1 | 12,8 | 13,0 | 12,6 | 13,3 | 13,6 | 13,6 | 12,3 | 11,8 | 11,7 | 11,7 | 8,6  | 6,9  | 6,1  | 5,8  |
|                 | 16                          | 14,2 | 12,9 | 13,1 | 13,0 | 13,7 | 13,9 | 14,6 | 13,4 | 12,9 | 12,8 | 12,8 | 9,6  | 7,8  | 6,9  | 6,5  |
|                 | 20                          | 14,2 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,6 | 14,3 | 17,3 | 16,9 | 16,5 | 16,4 | 16,4 | 13,3 | 11,1 | 10,0 | 9,5  |
|                 | 22                          | 13,9 | 14,7 | 14,6 | 14,8 | 14,8 | 14,2 | 18,0 | 18,0 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 14,9 | 12,7 | 11,5 | 10,9 |
|                 | 24                          | 14,0 | 15,0 | 14,9 | 15,0 | 14,7 | 14,0 | 18,4 | 18,9 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 16,3 | 14,1 | 12,9 | 12,3 |
|                 | 27                          | 14,3 | 15,1 | 15,1 | 14,9 | 14,4 | 14,1 | 18,5 | 19,7 | 19,8 | 19,8 | 19,8 | 18,0 | 16,0 | 14,8 | 14,2 |
|                 | 30                          | 14,3 | 14,9 | 14,9 | 14,6 | 13,9 | 14,3 | 18,4 | 20,1 | 20,4 | 22,3 | 22,2 | 19,3 | 17,8 | 16,4 | 15,8 |
|                 | 38                          | 14,1 | 14,2 | 14,1 | 14,4 | 14,4 | 13,9 | 17,1 | 19,7 | 20,5 | 20,7 | 20,6 | 21,3 | 24,9 | 29,0 | 28,9 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der langen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



vierseitige Lagerung

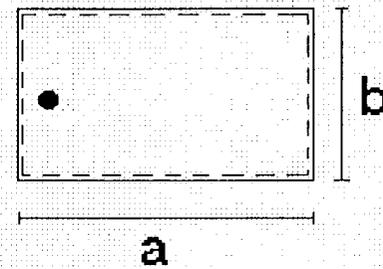
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 8,2  | 7,6  | 7,6  | 7,6  | 7,6  | 7,5  | 5,8  | 5,1  | 4,8  | 4,8  | 4,8  | 4,1  | 3,2  | 2,7  | 2,5  |
|                 | 8           |              | 11,1 | 9,4  | 9,4  | 9,7  | 10,2 | 10,5 | 10,1 | 9,1  | 8,6  | 8,5  | 8,5  | 7,3  | 5,6  | 4,8  | 4,4  |
|                 | 10          |              | 12,7 | 11,9 | 12,1 | 11,7 | 11,4 | 12,2 | 13,9 | 12,8 | 12,2 | 12,0 | 12,1 | 10,6 | 8,3  | 7,1  | 6,6  |
|                 | 12          |              | 13,8 | 13,2 | 13,4 | 12,9 | 12,5 | 13,3 | 16,6 | 15,8 | 15,2 | 15,1 | 15,2 | 13,5 | 10,8 | 9,5  | 8,8  |
|                 | 14          |              | 14,3 | 13,5 | 13,7 | 13,1 | 13,5 | 14,1 | 18,2 | 18,0 | 17,6 | 17,5 | 17,5 | 16,0 | 13,2 | 11,7 | 10,9 |
|                 | 15          |              | 14,4 | 13,5 | 13,7 | 13,2 | 14,0 | 14,3 | 18,7 | 18,9 | 18,5 | 18,4 | 18,5 | 17,0 | 14,3 | 12,7 | 11,9 |
|                 | 16          |              | 14,4 | 13,3 | 13,6 | 13,7 | 14,3 | 14,5 | 19,1 | 19,6 | 19,3 | 19,2 | 19,3 | 18,0 | 15,3 | 13,7 | 12,9 |
|                 | 20          |              | 14,3 | 14,8 | 14,7 | 14,9 | 14,9 | 14,5 | 19,3 | 21,0 | 21,2 | 21,2 | 21,2 | 20,6 | 18,5 | 17,0 | 16,2 |
|                 | 22          |              | 14,3 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 14,9 | 14,2 | 19,0 | 21,2 | 21,6 | 21,6 | 21,7 | 21,4 | 19,7 | 18,4 | 17,6 |
|                 | 24          |              | 14,3 | 15,2 | 15,2 | 15,1 | 14,6 | 13,9 | 18,5 | 21,1 | 21,7 | 21,8 | 21,8 | 21,9 | 20,7 | 19,5 | 18,8 |
|                 | 27          |              | 14,3 | 15,0 | 15,0 | 14,8 | 14,1 | 14,3 | 17,7 | 20,8 | 21,5 | 21,7 | 21,7 | 22,3 | 21,7 | 20,8 | 20,2 |
|                 | 30          |              | 14,2 | 14,5 | 14,7 | 14,3 | 14,3 | 14,4 | 16,8 | 20,2 | 21,1 | 21,4 | 21,4 | 22,4 | 22,4 | 21,8 | 21,3 |
|                 | 38          |              | 14,0 | 14,5 | 14,5 | 14,5 | 14,2 | 14,1 | 14,6 | 18,3 | 19,5 | 19,8 | 19,8 | 21,6 | 22,9 | 22,9 | 22,8 |

# Randstoß

Seitenhalbierende der kurzen Seite,  
25 cm vom Rand

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



vierseitige Lagerung

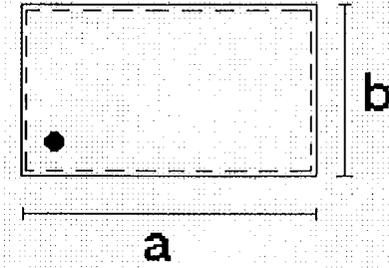
| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 8,2  | 8,3  | 8,3  | 8,4  | 8,6  | 8,9  | 5,8  | 5,7  | 5,7  | 5,9  | 6,1  | 4,1  | 3,8  | 3,7  | 3,7  |
|                 | 8           |              | 11,1 | 10,6 | 10,6 | 10,8 | 11,1 | 11,4 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,2 | 10,5 | 7,3  | 6,7  | 6,5  | 6,4  |
|                 | 10          |              | 12,7 | 11,9 | 11,9 | 12,2 | 12,6 | 12,9 | 13,9 | 13,8 | 13,8 | 14,0 | 14,3 | 10,6 | 9,6  | 9,3  | 9,2  |
|                 | 12          |              | 13,8 | 13,0 | 13,0 | 13,3 | 13,7 | 13,9 | 16,6 | 16,6 | 16,7 | 16,9 | 17,1 | 13,5 | 12,4 | 12,1 | 11,9 |
|                 | 14          |              | 14,3 | 14,0 | 14,0 | 14,2 | 14,4 | 14,5 | 18,2 | 18,5 | 18,6 | 18,8 | 19,0 | 16,0 | 14,9 | 14,5 | 14,4 |
|                 | 15          |              | 14,4 | 14,4 | 14,4 | 14,5 | 14,6 | 14,6 | 18,7 | 19,2 | 19,3 | 19,4 | 19,6 | 17,0 | 16,0 | 15,6 | 15,4 |
|                 | 16          |              | 14,4 | 14,6 | 14,6 | 14,7 | 14,7 | 14,7 | 19,1 | 19,6 | 19,8 | 19,9 | 20,1 | 18,0 | 19,4 | 16,6 | 16,4 |
|                 | 20          |              | 14,3 | 14,9 | 14,9 | 14,7 | 14,4 | 14,2 | 19,3 | 20,3 | 20,5 | 20,6 | 20,7 | 20,6 | 19,9 | 19,6 | 19,5 |
|                 | 22          |              | 14,3 | 14,6 | 14,6 | 14,4 | 14,0 | 14,0 | 19,0 | 20,2 | 20,4 | 20,5 | 20,6 | 21,4 | 20,9 | 20,7 | 20,6 |
|                 | 24          |              | 14,3 | 14,3 | 14,3 | 14,0 | 14,2 | 14,3 | 18,5 | 19,8 | 20,1 | 20,2 | 20,3 | 21,9 | 21,6 | 21,5 | 21,4 |
|                 | 27          |              | 14,3 | 14,2 | 14,2 | 14,3 | 14,4 | 14,4 | 17,7 | 19,1 | 19,4 | 19,5 | 19,6 | 22,3 | 22,3 | 22,2 | 22,2 |
|                 | 30          |              | 14,2 | 14,4 | 14,4 | 14,4 | 14,3 | 14,1 | 16,8 | 18,4 | 18,6 | 18,7 | 18,8 | 22,4 | 22,6 | 22,6 | 22,7 |
|                 | 38          |              | 14,0 | 13,9 | 13,9 | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,6 | 16,2 | 16,4 | 16,5 | 16,6 | 21,6 | 22,3 | 22,6 | 22,7 |

# Eckstoß

Ecke,  
25 cm von beiden Rändern

Fallhöhe  $h = 45 \text{ cm}$

$$F = k \cdot x$$



vierseitige Lagerung

| Ersatzlast [kN] | Länge a [m] | Breite b [m] | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |             |              | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    |
| Dicke t [mm]    | 6           |              | 9,5  | 9,5  | 9,5  | 9,6  | 9,9  | 10,3 | 9,5  | 9,8  | 10,0 | 10,5 | 11,1 | 9,6  | 9,5  | 9,5  | 9,7  |
|                 | 8           |              | 12,0 | 11,4 | 11,5 | 11,7 | 12,0 | 12,3 | 14,1 | 14,5 | 14,7 | 15,2 | 15,9 | 14,5 | 14,3 | 14,3 | 14,4 |
|                 | 10          |              | 13,4 | 12,8 | 12,8 | 13,1 | 13,4 | 13,6 | 16,7 | 17,3 | 17,6 | 18,0 | 18,6 | 17,9 | 17,7 | 17,7 | 17,8 |
|                 | 12          |              | 14,1 | 13,9 | 13,9 | 14,1 | 14,3 | 14,5 | 17,7 | 18,6 | 18,8 | 19,2 | 19,7 | 19,8 | 19,9 | 20,0 | 20,1 |
|                 | 14          |              | 14,3 | 14,6 | 14,6 | 14,7 | 14,7 | 14,7 | 17,7 | 18,9 | 19,1 | 19,5 | 19,9 | 20,7 | 21,0 | 21,2 | 21,4 |
|                 | 15          |              | 14,2 | 14,8 | 14,8 | 14,8 | 14,7 | 14,7 | 17,6 | 18,8 | 19,0 | 19,4 | 19,8 | 20,9 | 25,9 | 21,6 | 21,8 |
|                 | 16          |              | 14,2 | 14,9 | 14,9 | 14,8 | 14,7 | 14,6 | 17,3 | 18,6 | 18,8 | 19,1 | 19,6 | 20,9 | 21,5 | 21,8 | 22,0 |
|                 | 20          |              | 14,2 | 14,4 | 14,4 | 14,2 | 13,9 | 14,1 | 15,8 | 17,2 | 17,5 | 17,8 | 18,2 | 20,3 | 21,2 | 21,6 | 22,0 |
|                 | 22          |              | 14,3 | 14,0 | 14,0 | 14,1 | 14,3 | 14,4 | 15,0 | 16,4 | 16,7 | 17,0 | 17,4 | 19,7 | 20,7 | 21,2 | 21,6 |
|                 | 24          |              | 14,2 | 14,3 | 14,3 | 14,4 | 14,4 | 14,4 | 14,2 | 15,7 | 15,9 | 16,2 | 16,5 | 19,0 | 20,1 | 20,7 | 21,2 |
|                 | 27          |              | 13,9 | 14,4 | 14,4 | 14,4 | 14,2 | 14,1 | 15,0 | 14,5 | 14,8 | 15,1 | 15,4 | 18,0 | 19,2 | 19,8 | 20,3 |
|                 | 30          |              | 14,1 | 14,2 | 14,2 | 14,0 | 14,0 | 14,1 | 15,4 | 14,8 | 14,6 | 14,4 | 14,3 | 16,9 | 18,2 | 18,9 | 19,4 |
|                 | 38          |              | 13,9 | 14,1 | 14,1 | 14,0 | 13,9 | 13,9 | 15,0 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 14,5 | 15,8 | 16,5 | 17,0 |