

ISBN 3-88314-922-5

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 163

Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen

von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner
Dipl.-Ing. Günter Mellmann
Dr.-Ing. Werner Struck

Juli 1989

68 Seiten, 51 Abbildungen, 14 Tabellen

Zusammenfassende Auswertung von

Abschlußbericht I:

Untersuchungen zur Biegefestigkeit von Flachglas

Bearbeiter: Dipl.-Ing. G. Mellmann

Dr.-Ing. M. Maultzsch

und

Abschlußbericht II:

Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben

Bearbeiter: Dipl.-Ing. W. Brünner

zu den Vorhaben

BAM Vh-Nr. 2127: Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas
für bauliche Anlagen

BAM Vh-Nr. 2216: Die Tragfähigkeit großer Glasscheiben bei gleichmäßig verteilter
Flächenbelastung,

Die Vorhaben wurden vom Institut für Bautechnik, Berlin, finanziell gefördert,
Förderkennzeichen: VII 1-5-298/81 bzw. IV 1-5-409/84

Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

An den Arbeiten im Rahmen der Vorhaben waren die nachfolgend genannten Mitarbei-
ter beteiligt:

Hans-Peter Gaede

Werner Krahmer

Hans-Joachim Krupke

Peter Lenke

Eberhard Marx

Thomas Nagel

Gerhard Schneider

Alexander Stephan

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 112 029 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1989 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Zusammenfassung

Die in den Abschlußberichten zu den Vorhaben zur Ermittlung der Prüffestigkeit von Flachglas [1: Mellmann, Maultzsch, 1989] und zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben [2: Brünner, 1989] dokumentierten Ergebnisse von in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführten Balken-Biegeversuchen und Doppelring-Biegeversuchen in Anlehnung an DIN 52 303 Teil 1 bzw. DIN 52 292 Teile 1 und 2 sowie Biegebruchversuchen an zweiseitig und vierseitig aufgelagerten Scheiben aus vorgespanntem und nicht vorgespanntem Spiegelglas (abkürzend als ESG bzw. Floatglas bezeichnet) werden zusammenfassend ausgewertet.

Der Modellvorstellung liegen dreiparametrische, nicht asymptotische Extremwertverteilungen für die Zufallsgröße "Bruchlast einer biegezugbeanspruchten Glasfläche bestimmter Größe" zugrunde, die sich aus der logarithmisch normalverteilt angenommenen Zufallsgröße "Biegefestigkeit des Materials Flachglas" in Abhängigkeit von der Flächengröße entwickeln lassen. Damit wurden über die Verteilungsfunktionen für die ermittelten Prüffestigkeiten die Verteilungsfunktionen der Bruchlasten großer Scheiben berechnet. Ihre befriedigend bis gute Annäherung an die Summenhäufigkeitslinien der Biegebruch-Versuchsergebnisse bestätigt diese Art der Übertragbarkeit von an kleinen Scheibenflächen mit konstanter Biegezugbeanspruchung bestimmten Bruchkennwerten auf die Bruchwahrscheinlichkeiten großer Glasscheiben.

Darauf basierend wird ein einfach handhabbares Verfahren zur Tragfähigkeitsbeurteilung vorgeschlagen, das - wie bei den gebräuchlichen Verfahren der klassischen Bauweisen - von dem Vergleich der maximalen Hauptzugspannung in einer Scheibe mit einem zulässigen Spannungswert ausgeht. Voraussetzung ist die Vorabrechnung von Sicherheitsfaktoren für die zu erwartenden Parameterkombinationen von Glas-, Belastungs- und Auflagerungsart sowie Scheibenabmessungen.

Abschließend werden vergleichende Hinweise gegeben zu einer Spannungs- und Verformungsanalyse für rechteckige Glasplatten bei großen Durchbiegungen [8: Barth, Kuns, Willms, 1986] und zu einer Betrachtung über die Flächenabhängigkeit der "Glasfestigkeit" [9: Blank, 1986].

Summary

Results of two research works on the strength of panes of glass in coaxial double ring bending test with small and large test area following to DIN 52 292 part 1 and 2 and in beam bending test on two supports conform to DIN 52 303 part 1 [1: Mellmann, Maultzsch, 1989] or loaded by uniform airpressure and supported on four or two edges [2: Brünner, 1989] are together analysed. The panes were made of float glass or of heat strengthened float glass.

Depending on the size of area exact distributions of extremes (with three parameters) of the random variable "fracture load of a glass area stressed by uniform bending stresses" are the statistical basis for analysing. These distributions are developed from the random variable "bending strength of glass material" which is supposed to be logarithmic normal distributed. The cumulative distribution function of the fracture load of large panes, supported on four or two edges were computed by means of the cumulative distribution function of the standard test

fracture load and then compared with cumulative failure probability of the large pane tests. The agreement is satisfactory up to very good so that by this way the failure probability of large panes of glass can be computed by the cumulative distribution function of fracture load from tests made with standard specimens.

Based on this result a simple method is proposed for judging the load bearing capacity of panes of glass by comparing the maximum bending stress in a pane with a safe value. For this purpose factors of safety have to compute for all relevant expected combinations of parameters such as kinds of glass, of load and of supporting as well as pane dimensions.

Finally comparing remarks are made to a stress and deformation analysis on panels of glass with large deflections [8 Barth, Kuns, Willms, 1986] and to a reflection on the area relation of the bending strength of glass [9 Blank, 1986].

Inhalt	Seite
1.0 Veranlassung und Zielsetzung	7
2.0 In die Untersuchung einbezogene Versuche	8
3.0 Modellvorstellung	9
3.1 Allgemeine Hinweise	9
3.2 Grenzwiderstand einer überall gleich biegebeanspruchten Glasfläche	10
3.3 Grenztragfähigkeit einer biegebelasteten Glasscheibe	13
4.0 Auswertung der Versuche zur Beurteilung der Materialfestigkeit (Prüffestigkeitsversuche)	15
4.1 Statistische Schätzung der Verteilungsparameter	15
4.2 Auswertung zur Prüffestigkeit (großer Doppelring) von Floatglas getrennt nach Hersteller, Luft- oder Badseite und Glasdicke	15
4.3 Verteilungsfunktion der Prüffestigkeit (großer Doppelring) von Floatglas bei Zugrundelegen eines signifikanten Unterschiedes zwischen Luft- und Badseite	18
4.4 Auswertung zur Prüffestigkeit von ESG 6 mm, Vergleich von großem Doppelring- und Balken-Biegeversuch	21
4.5 Auswertung zur Prüffestigkeit beim Balken-Biegeversuch von ESG (6 mm und 10 mm Dicke)	24
4.6 Die Erhöhung der Prüffestigkeit beim großen Doppelring-Biegeversuch durch den Vorspannprozeß	26
4.7 Vergleich der Prüffestigkeit von Floatglas bei kleinem und großem Doppelring-Biegeversuch	26
5.0 Auswertung der Versuche zur Grenztragfähigkeit biegebelasteter Glasscheiben	29
5.1 Ergänzung der Modellvorstellung	29
5.2 Berechnung des Spannungszustandes	29
5.2.1 Vierseitig aufgelagerte Scheiben	29
5.2.2 Zweiseitig aufgelagerte Scheiben	30
5.3 Grenztragfähigkeit von Scheiben aus Floatglas, basierend auf den Biegeversuchen mit großem Doppelring	31
5.4 Grenztragfähigkeit von Scheiben aus ESG, basierend auf den Balken-Biegeversuchen	33
6.0 Vorschlag für ein einfaches Verfahren zur Tragfähigkeitsbeurteilung einer biegebeanspruchten Glasscheibe	35
7.0 Hinweise zu den Untersuchungen [8] und [9]	37
Literatur	41
Anhang	
Auswertung der Prüffestigkeitsversuche nach den Abschnitten 3.2 und 4.1 Tabellen A1 bis A8	43
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1, Floatglas, Doppelring 600 Bilder A9 bis A18	47
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven, Luft- und Badseite nach Bild 1 zusammengefaßt, Mischverteilung aus Produktionslosen zugrunde gelegt Bild A19	52

Zum Vergleich von Doppelring- und Balkenbiegeversuchen an ESG Bilder A20 bis A23	53
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1, ESG, Balken Bilder A24 bis A32	55
Einfluß verschiedener Kombinationen von Materialelementanzahlen auf die errechnete Verteilungsfunktion der Scheibenbruchlast Bild A33	60
Zur Abschätzung der Zufälligkeit der Lage der Stichprobenergebnisse der Bruchlastversuche an den großen Scheiben Bilder A34 bis A38	61

Abkürzungen bei den Bildunterschriften:

Bild-Nr.:

00	Bild-Nr. im Textteil
A00	Seite im Anhang, entspricht Tabellen- oder Bildnummer

Glasart:

Float	Spiegelglas
ESG	thermisch vorgespanntes Spiegelglas (Einscheibensicherheitsglas)
A, B	Hersteller

Versuchsart:

Doppelring 600	Doppelring-Biegeversuch, 600 mm Lastringdurchmesser, mit Gasdruck
Doppelring 100	Doppelring-Biegeversuch, 100 mm Lastringdurchmesser
Balken	Balken-Biegeversuch
2 bzw. 4seitig, b x l	2 bzw. 4seitig aufgelagert, b = Nennbreite in m l = Nennstützweite bzw. Nennlänge in m

Glasdicke:

6, 10	Glas-Nenndicke in mm
-------	----------------------

biegezugbeanspruchte Seite:

Bad bzw. Luft: m; n	die während des Produktionsprozesses das Zinnbad berührende bzw. der Luft zugewandte Oberfläche der Scheibe m = Anzahl der Versuchsergebnisse n = Anzahl der Materialelemente bei der Auswertung der Prüffestigkeitsergebnisse
---------------------	---

1. Veranlassung und Zielsetzung

Flachglas wird zunehmend für Bauteile mit Sicherheitsrelevanz im bauaufsichtlichen Sinne, wie Fassadenbekleidungen oder andere großflächige Verglasungen in Bereichen, wo etwaige Schäden Gefahr für Leib und Leben bedeuten können, und absturzsichernde Bauteile, aber auch für Glastrennwände verwendet. Dieses erfordert schon aus wirtschaftlichen Gründen die Möglichkeit einer Sicherheitsbeurteilung ohne experimentelle Untersuchungen in jedem Einzelfall, wie sie auch bei anderen Bauweisen sich bewährt hat.

Der mit Hilfe von Modellvorstellungen der technischen Mechanik berechneten Beanspruchung eines Bauteils infolge der Belastung soll die Beanspruchbarkeit des Bauteils gegenübergestellt werden, die aus den allgemein für das Material gültigen, auf experimenteller Basis ermittelten Eigenschaften ebenfalls mit Hilfe von Modellvorstellungen möglichst ohne großen Aufwand für den betrachteten Anwendungsfall rechnerisch bestimmt wird. Die Baukonstruktionen der klassischen Bauweisen werden hinsichtlich ihrer mechanischen Beanspruchbarkeit mit Hilfe des Begriffes der Festigkeit ihres Baumaterials beurteilt.

Entsteht infolge einer bestimmten Belastungsart in einem Bauteil eine deutlich höchstbeanspruchte Stelle, dann versagt das Bauteil durch Bruch an dieser Stelle. Die Festigkeitsunterschiede innerhalb der Materialmenge, aus der das Bauteil besteht, sind in der Regel so gering, daß die Beanspruchung den Wert der Materialfestigkeit an den weniger hoch beanspruchten Stellen nicht erreicht. Maßgebend für die Versagenswahrscheinlichkeit einer Bauteilart gegenüber einer bestimmten Belastungsart ist dabei also die Wahrscheinlichkeit, mit der die Materialfestigkeit unter dem Zahlenwert der höchsten Beanspruchung im Bauteil liegt.

Die experimentelle Erfahrung hat gezeigt - und die in [2] beschriebenen Versuche haben es bestätigt -, daß diese Modellvorstellung für Bauteile aus Glas nicht zutrifft. Die Häufigkeit von Bruchausgangsstellen, die nicht am Ort der höchsten Beanspruchung liegen, ist so groß, daß man nicht mehr von Ausnahmefällen, verursacht durch außergewöhnliche experimentelle Detailbedingungen o. ä., sprechen kann. Die Unterschiede in der Materialfestigkeit innerhalb der Materialmenge einer Glasscheibe sind so groß, daß die Bruchfestigkeit an einer weniger hoch beanspruchten Stelle schon erreicht werden kann, bevor an der höchstbeanspruchten Stelle der dort zufällig höhere Bruchfestigkeitswert erreicht wird.

Die bei den Baukonstruktionen der klassischen Bauweisen angewandte Modellvorstellung muß hier also erweitert werden. Es war Ziel der durchgeführten Untersuchungen und Überlegungen, für diese Erweiterung Unterlagen zu schaffen und einen Weg aufzuzeigen, wie auf diesen Unterlagen basierend ein ohne größeren Aufwand handhabbares Beurteilungsverfahren für die Grenztragfähigkeit von Bauteilen aus Flachglas entwickelt werden kann.

2. In die Untersuchung einbezogene Versuche

Ausgangsdaten der hier dargelegten Überlegungen und Auswertungen lieferten die in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in den Jahren 1982 bis 1987 durchgeführten Versuche zur Ermittlung der Biegezug-Prüffestigkeit nach DIN 52 292 T2 (großer Doppelring-Biegeversuch) und nach DIN 52 303 T1 (Balken-Biegeversuch) sowie in Anlehnung an DIN 52 292 T1 (kleiner Doppelring-Biegeversuch) mit 100 mm Lastring- und 250 mm Stützringdurchmesser (300 mm Seitenlänge der Probe) und zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei gleichmäßig verteilter Flächenbelastung von großen Scheiben von bzw. aus Spiegelglas und Einscheibensicherheitsglas. Versuchsdurchführung und -ergebnisse sind in [1] und [2] im Detail beschrieben und dokumentiert.

Den dort verwendeten Bezeichnungen folgend wird auch hier für das Spiegelglas als nicht vorgespanntes Floatglas der Ausdruck "Floatglas" und für das Einscheibensicherheitsglas als thermisch vorgespanntes Floatglas die Abkürzung "ESG" benutzt.

Zur Verfügung standen die Ergebnisse von 227 Biegeversuchen an 6 mm und 10 mm dickem Floatglas, und von 123 Versuchen an 6 mm dickem ESG mit Hilfe des großen Doppelringes sowie von 321 Biegeversuchen an 6 mm und 10 mm dickem ESG an balkenförmigen Probekörpern und zusätzlich die Ergebnisse von 254 Biegeversuchen an 6 mm und 10 mm dickem Floatglas mit Hilfe des kleineren Doppelrings [1]. Außerdem konnten die Ergebnisse von Tragfähigkeitsversuchen an vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben und zweiseitig aufgelagerten ESG-Scheiben herangezogen werden [2], und zwar bei 6 mm dickem Floatglas je 10 Stück mit 1 m x 2 m und 2 m x 2 m Kantenlänge sowie bei 6 mm dickem ESG je 10 Stück bei 1 m und 1,5 m Stützweite (mit 1,5 m bzw. 1 m Breite) und bei 10 mm dickem ESG 5 Stück bei 2 m Stützweite und 1 m Breite.

3. Modellvorstellung

3.1 Allgemeine Hinweise

Die Ergebnisse der Bruchversuche zeigen, daß die Bruchausgangsstellen sehr oft nicht mit dem jeweiligen Ort höchster Hauptzugspannung zusammenfallen, [2, Tabellen 1, 2, 5 und 6]. Die Ursache ist in der großen Streuung der Materialfestigkeit in Verbindung mit einer geringen Autokorrelationslänge dieser Eigenschaft zu vermuten. Dabei wird hier unter Materialfestigkeit der als Biegezugfestigkeit definierte Grenzwiderstand eines zufällig "geschädigten" Glasscheibenelementes gegenüber einer über die ganze Fläche des Elementes konstanten Biegebeanspruchung verstanden. Die Größe eines solchen Scheibenelementes ist dadurch gegeben, daß innerhalb seiner Fläche die Materialfestigkeit an jeder Stelle als gleich anzusehen ist, und daß die Materialfestigkeitswerte benachbarter Scheibenelemente als Realisationen von Zufallsgrößen, die stochastisch unabhängig voneinander sind, angesehen werden können. Letzteres bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen eines bestimmten Wertes der Materialfestigkeit in einem Scheibenelement unabhängig davon ist, welche Materialfestigkeit im benachbarten Element vorhanden ist.

Entsprechend dieser Vorstellung ist der Grenzwiderstand einer bestimmten mit konstanter Biegezugspannung beanspruchten Glasscheibe, deren Flächengröße das n -fache der Fläche des für die Materialfestigkeit definierten Scheibenelementes beträgt, durch den kleinsten Wert der Grenzwiderstände der Scheibenelemente gegeben, aus der die betrachtete Scheibe sich zusammensetzt.

Auch der Grenzwiderstand von Glasscheibenflächen, die in Normprüfungen mit einer konstanten Biegezugspannung beansprucht werden, entspricht a priori nicht dem hier definierten Begriff der Materialfestigkeit, sondern der Grenztragfähigkeit einer Glasscheibenfläche unter konstanter Biegezugspannung, die sich aus n_0 Scheibenelementen zusammensetzt. Deswegen wird diese Größe hier auch nicht als Materialfestigkeit, sondern in Anlehnung an [3] als Prüffestigkeit bezeichnet.

Wird wie auch bei anderen Baustoffen davon ausgegangen, daß die in Wirklichkeit gegebenen Materialfestigkeitswerte Realisationen einer Zufallsgröße sind, deren Verteilungsfunktion durch die Summenhäufigkeitslinie einer großen Anzahl von Festigkeitswerten darstellbar ist, dann können die Prüffestigkeitswerte von Glasproben mit $n_0 \neq 1$ diese Verteilungsfunktion nicht wiedergeben. (Je Versuch wird ja nur die Festigkeit eines der n_0 Scheibenelemente bestimmt.) Man erhält vielmehr eine Verteilung der jeweils kleinsten von n_0 Werten (Extremwertverteilung). Je größer n_0 , desto größer ist die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Festigkeitswert und desto geringer sind die Streuungen im Vergleich zur Ausgangsverteilung der Materialfestigkeit.

Für die Ausgangsverteilung wird die gleiche Verteilungsform angenommen, die auch den Sicherheitsüberlegungen bei anderen Baustoffen zugrunde gelegt wird. Die Materialfestigkeitswerte seien Realisationen einer logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße. Damit wird der physikalischen Gegebenheit entsprochen, daß keine negativen Werte auftreten können. Andererseits wird ein unterer Grenzwert > 0 nicht in Betracht gezogen, da seine Bestimmung nicht eindeutig und ohne Ermessensentscheidung für den einzelnen Baustoff festlegbar ist.

Die Ergebnisse der Prüffestigkeitsversuche deuten darauf hin, daß die Grundgesamtheit der Zufallsgröße "Materialfestigkeit" sich aus den beiden Teilgrundgesamtheiten

- Festigkeit bei Zugbeanspruchung der Luftseite

- Festigkeit bei Zugbeanspruchung der Badseite

zusammensetzt, wobei hier mit Luftseite die beim Produktionsprozeß der Luft zugänglichen Scheibenoberfläche und mit Badseite die das Zinnbad berührende Oberfläche bezeichnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, daß im eingebauten Zustand die Zugbeanspruchung auf einer der beiden Seiten wirkt, muß für beide Seiten als gleich groß, also mit 0,5, angesetzt werden.

Jede der Teilgrundgesamtheiten ist als Mischverteilung zu betrachten, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, deren Mittelwerte um das Gesamtmittel der Teilgrundgesamtheit streuen. Die Streuung der Einzelwerte in einem Los wird bei allen Losen einer Teilgrundgesamtheit als gleich vorausgesetzt. Die Versuchsergebnisse sprechen nicht gegen diese vereinfachende Annahme.

Die Zufallsgröße "Grenztragfähigkeit einer auf Biegung beanspruchten Glasscheibenart" ist nach dem eingangs Gesagten im Prinzip nicht über den Begriff "zulässige Spannung" zu beurteilen. Zwar könnte ein solcher Zahlenwert rein formal wie bei anderen Baustoffen als Fraktile der Zufallsgröße "Materialfestigkeit" mit einer den Sicherheitsvereinbarungen entsprechenden Unterschreitungswahrscheinlichkeit definiert werden. Da jedoch der Ort der größten Hauptzugspannung und die Bruchausgangsstelle nicht ursächlich identisch sind, bringt eine solche Definition grundsätzlich vorerst keine Hilfe.

Die Fläche einer biegebelasteten Glasscheibe muß vielmehr in Zonen aufgeteilt werden, in deren Teilflächen jeweils eine quasi gleich hohe Biegezugspannung wirkt. Der Grenzwiderstand einer solchen Teilfläche ist die Realisation einer Zufallsgröße, deren Verteilungsfunktion sich als Extremwertverteilung aus der Ausgangsverteilung der Zufallsgröße "Materialfestigkeit" ergibt, in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Teilflächengröße zur Flächengröße des der Definition des Begriffs Materialfestigkeit zugrunde gelegten Scheibenelementes. Die Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Grenzwiderstände aller Teilflächen müssen dann zur Wahrscheinlichkeitsaussage über die Grenztragfähigkeit der Glasscheibenart in Form einer Verteilungsfunktion für die Zufallsgröße "Grenztragfähigkeit der bestimmten Glasscheibenart bei bestimmter Biegebeanspruchungsart" verknüpft werden.

Vermutlich wird es möglich sein, nach Vorliegen einer größeren Anzahl solcher Verteilungsfunktionen ein einfacheres Hilfsmittel zur Beurteilung biegebeanspruchter Glasscheiben zu erarbeiten.

3.2 Grenzwiderstand einer überall gleich biegebeanspruchten Glasfläche

Der Grenzwiderstand $r_{(1)}$ einer Glasfläche A , die überall mit gleicher Biegezugspannung beansprucht ist, wird als Realisation einer Zufallsgröße $R_{(1)}$ angesehen, deren Verteilungsfunktion $F_{R_{(1)}}(r)$ sich als Extremwertverteilung aus der Ausgangsverteilung $F_R(r)$ der Zufallsgröße R ergibt, deren Realisationen die Materialfestigkeitswerte zufällig geschädigter Glasflächenelemente von der Größe a sind.

Entsprechend der Definition einer Verteilungsfunktion gilt

$$w(R \leq r) = F_R(r) \tag{1}$$

und somit

$$w(R > r) = 1 - F_R(r) \tag{2}$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß n Realisationen $r_{(1)}, r_{(2)} \dots r_{(n)}$ von R größer als r

sind, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, daß die kleinste Realisation $r_{(1)}$ als Realisation einer Zufallsgröße $R_{(1)}$ größer als r ist. Da alle Realisationen von R als unabhängige Ereignisse betrachtet werden, ist

$$w(R_{(1)} > r) = (1 - F_R(r))^n \quad (3)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß mindestens eine der n Realisationen von R kleiner oder gleich r ist, ergibt sich

$$w(R_{(1)} \leq r) = 1 - (1 - F_R(r))^n = F_{R(1)}(r) \quad (4)$$

und mit $n = A/a$ ist damit die Beziehung zwischen den Verteilungsfunktionen der Zufallsgrößen "Grenzwiderstand der Glasfläche" und "Materialfestigkeit eines Glasflächenelementes" beschrieben.

Da R als logarithmisch normalverteilt vorausgesetzt wird, ist

$$X = \ln(R/b) \text{ mit } b = \text{Dimensionskonstante, z. B. } 1 \text{ N/mm}^2, \quad (5)$$

die auf Normalverteilung transformierte Zufallsgröße. Ihr Erwartungswert (Mittelwert) sei μ_X und ihre Standardabweichung σ_X . Dann ist durch

$$\xi = \Phi\left(\frac{x_\xi - \mu_X}{\sigma_X}\right) \quad \text{Verteilungsfunktion der (0;1)-NV} \quad (6)$$

die Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Zahlenwertes x_ξ beschrieben, d. h.

$$u_\xi = (x_\xi - \mu_X) / \sigma_X \quad (7)$$

soll das ξ -Fraktile der standardisierten Normalverteilung sein.

Bei einer monotonen Transformation transformieren sich die Fraktile in gleicher Weise, also

$$\xi = \Phi\left(\frac{x_\xi - \mu_X}{\sigma_X}\right) = F_R(r_\xi) \quad \text{mit } x_\xi = \ln(r_\xi/b) \quad (8)$$

und wegen

$$1 - \Phi\left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_X - x}{\sigma_X}\right) \quad (9)$$

läßt sich (4) umschreiben auf

$$F_{R(1)}(r_{(1)p}) = 1 - \left(\Phi\left(\frac{\mu_X - x_\xi}{\sigma_X}\right)\right)^n \quad (10)$$

$$\text{mit } x_\xi = \ln(r_{(1)p}/b)$$

Dabei bezeichnet p die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der extremwert-verteilten Zufallsgröße $R_{(1)}$ gegenüber dem Zahlenwert $r_{(1)p}$ und ξ die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der logarithmisch normalverteilten Zufallsgröße R . So ist (10) mit (9) auch gleichbedeutend

$$p = 1 - (1 - \xi)^n \quad \text{bzw.} \quad 1 - \xi = \sqrt[n]{1 - p} \quad (11)$$

Wegen (5), (7) und (11) ergibt sich ganz allgemein für das p -Fraktile des Grenzwiderstandes der Glasfläche $A = n \cdot a$

$$r_{(1)p} = b \exp(x_{(1)p}) = b \exp\left(\mu_X - u \sqrt[n]{1 - p} \cdot \sigma_X\right) \quad (12)$$

Dabei sind μ_X und σ_X die Parameter der transformierten Ausgangsverteilung der Materialfestigkeit, die zweckmäßigerweise durch Parameter der Extremwertverteilung ersetzt werden, die aus den Versuchsergebnissen ermittelt werden können.

Sind zwei bestimmte Fraktile $r_{(1)p_a}$ und $r_{(1)p_b}$ bekannt, können über (12) μ_X und σ_X ersetzt werden durch

$$\sigma_X = (x_{(1)p_b} - x_{(1)p_a}) / (u_{\sqrt[n]{1-p_b}} - u_{\sqrt[n]{1-p_a}}) \quad (13)$$

$$\mu_X = x_{(1)p_b} + u_{\sqrt[n]{1-p_b}} (x_{(1)p_b} - x_{(1)p_a}) / (u_{\sqrt[n]{1-p_a}} - u_{\sqrt[n]{1-p_b}}) \quad (14)$$

so daß sich für ein beliebiges p-Fraktile ergibt

$$x_{(1)p} = x_{(1)p_b} + u_{(1)p} \cdot \Delta x_{(1)b;a} \quad (15)$$

$$\text{mit } u_{(1)p|b;a} = (u_{\sqrt[n]{1-p_b}} - u_{\sqrt[n]{1-p}}) / (u_{\sqrt[n]{1-p_a}} - u_{\sqrt[n]{1-p_b}}) \quad (16)$$

$$\Delta x_{(1)b;a} = x_{(1)p_b} - x_{(1)p_a} \quad (17)$$

Mit der Wahl von $p_b = 0,5$ und

$$p_a = \Phi(-1) = 0,158655 \quad (18)$$

wird zum einen das anschauliche 50 %-Fraktile eingeführt und zum anderen wegen

$$\Delta x_{(1)0,5;\Phi(-1)} = \sigma_X \quad \text{für } n = 1 \quad (19)$$

der einfache Übergang zur Ausgangsverteilung gewahrt.

Außerdem gilt dann auch für alle n

$$u_{(1)p} = 0 \quad \text{für } p = 0,5 \quad (20)$$

$$u_{(1)p} = -1 \quad \text{für } p = \Phi(-1) \quad (21)$$

Damit gehen (15) bis (17) über in

$$x_{(1)p} = x_{(1)0,5} + u_{(1)p} \cdot \Delta x_{(1)} \quad (22)$$

$$\text{mit } u_{(1)p} = (u_{\sqrt[n]{0,5}} - u_{\sqrt[n]{1-p}}) / (u_{\sqrt[n]{0,841345}} - u_{\sqrt[n]{0,5}}) \quad (23)$$

$$\Delta x_{(1)} = x_{(1)0,5} - x_{(1)0,158655} \quad (24)$$

Zu beachten ist noch, daß

$$b \exp(x_{(1)0,5}) = r_{(1)0,5} \quad (25)$$

$$\exp(\Delta x_{(1)}) = r_{(1)0,5} / r_{(1)\Phi(-1)} \quad (26)$$

Die Verteilungsfunktion des Grenzwiderstandes der Glasfläche ergibt sich dann durch Einsetzen von

$$\mu_X = x_{(1)0,5} + u_{\sqrt[n]{0,5}} \cdot \Delta x_{(1)} / (u_{\sqrt[n]{0,841}} - u_{\sqrt[n]{0,5}}) \quad (27)$$

$$\sigma_X = \Delta x_{(1)} / (u_{\sqrt[n]{0,841}} - u_{\sqrt[n]{0,5}}) \quad (28)$$

in (10) zu

$$F_{R(1)}(r) = 1 - \left(\Phi \left(u_{n\sqrt{0,5}} - \frac{x - x(1)_{0,5}}{\Delta x(1)} \cdot \left(u_{n\sqrt{0,841}} - u_{n\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^n \quad (29)$$

wobei $n = A/a$ das Verhältnis der Größe der gleichmäßig biegezugbeanspruchten Glasfläche A zur Größe des Glasflächenelementes a und $x = \ln(r/b)$ bedeuten.

3.3 Grenztragfähigkeit einer biegebelasteten Glasscheibe

Anstelle der Materialfestigkeit ($n = 1$) können in genormten Biegeversuchen nur Prüffestigkeitswerte ermittelt werden mit

$n = n_0 = A_0/a \geq 1$. Mit ihrer Hilfe werden die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsgröße "Prüffestigkeit"

$$x(1)_{0,5;0} \text{ und } \Delta x(1);0$$

berechnet, s. Abschn. 4. Damit liegen die Parameter der Ausgangsverteilung der Materialfestigkeit entsprechend (27) und (28) mit $n=n_0$ fest, so daß sich die Verteilungsfunktion für den Grenzwiderstand einer Teilfläche A_i der biegebelasteten Glasscheibe mit konstanter Biegezugspannung σ_i ergibt

$$F_{R(1);i}(r) = 1 - \left(\Phi \left(u_{n_0\sqrt{0,5}} - \frac{x - x(1)_{0,5;0}}{\Delta x(1);0} \cdot \left(u_{n_0\sqrt{0,841}} - u_{n_0\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{n_i} \quad (30)$$

$$\text{wobei } n_i = (A_i/A_0) \cdot n_0 \quad (31)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß der Bruch einer Glasscheibe von der mit σ_i beanspruchten Teilfläche ausgeht, ist also

$$w(R(1);i \leq \sigma_i) = F_{R(1);i}(r = \sigma_i) \quad (32)$$

Die Biegezugspannung σ_i ist eine Funktion der Biegebelastung q

$$\sigma_i = \sigma_i(q) \quad (33)$$

Die Glasscheibe widersteht der Belastung q , solange der Grenzwiderstand $R(1);i$ jeder ihrer Teilflächen größer ist als die dort wirkende Beanspruchung σ_i . Die Wahrscheinlichkeit, daß die Scheibe nicht versagt, ist also gegeben durch

$$\begin{aligned} w(R(1);1 > \sigma_1 \wedge R(1);2 > \sigma_2 \wedge \dots \wedge R(1);m > \sigma_m) &= \\ &= (1 - F_{R(1);1}(\sigma_1)) \cdot (1 - F_{R(1);2}(\sigma_2)) \dots (1 - F_{R(1);m}(\sigma_m)) = \\ &= \prod_{i=1}^m (1 - F_{R(1);i}(\sigma_i)) = \\ &= \prod_{i=1}^m \left(\Phi \left(u_{n_0\sqrt{0,5}} - \frac{x - x(1)_{0,5;0}}{\Delta x(1);0} \cdot \left(u_{n_0\sqrt{0,841}} - u_{n_0\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{n_i} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{mit } x = \ln(\sigma_i(q)/b) \quad (35)$$

Entsprechend gilt für die Versagenswahrscheinlichkeit der Glasscheibe

$$w(R(1)(q) \leq q) = F_{R(1)}(q) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - F_{R(1);i}(\sigma_i)) \quad (36)$$

Hinweis:

Für $F_{R(1);i}(\sigma_i) \ll 1$ ist in 1. Näherung

$$F_{R(1)}(q) = \sum_{i=1}^m F_{R(1);i}(\sigma_i) \quad (37)$$

Der Bemessungswert für die Grenztragfähigkeit der Glasscheibenart (gleiche Abmessungen, Auflagerungs- und Belastungsart sowie Glasart) wäre dann entsprechend den Grundlagen für die Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen [4] derjenige Wert q_d , für den gilt

$$F_{R(1)}(q_d) = p_d = \Phi(-\alpha_R \cdot \beta) \quad (38)$$

4. Auswertung der Versuche zur Beurteilung der Materialfestigkeit (Prüffestigkeitsversuche)

4.1 Statistische Schätzung der Verteilungsparameter

Als aktuelle Information liegen die Versuchsergebnisse von Stichproben mit begrenztem Umfang vor. Die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsgröße "Prüffestigkeit" müssen statistisch geschätzt werden. Dazu wird hier die relative Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse als Näherung für die Verteilungsfunktion verwendet.

Aus den nach ihrer Größe geordneten Einzelergebnissen $r_{(1)j}$ errechnen sich die Realisationen

$$x_{(1)i} = \ln(r_{(1)j} / (1 \text{ N/mm}^2)), \quad j = 1 \dots m_\alpha \quad (39)$$

der auf Normalverteilung transformierten Zufallsgröße, wobei m_α die Anzahl der Einzelwerte je Stichprobe bezeichnet. Für die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p_j wird in 1. Näherung die "mittlere" relative Ordnungszahl angesetzt [5].

$$p_j \approx (j - 0,3) / (m_\alpha + 4) = \hat{p}_j \quad (40)$$

Für ein bestimmtes m_α ist \hat{p}_j für jedes j ein fester Wert, dem bei bekannter Verteilungsfunktion ein bestimmtes Argument x zugeordnet wäre. Von den aus den Versuchsergebnissen errechneten Werten $x_{(1)j}$ wird angenommen, daß sie zufällig von den richtigen aber unbekanntenen Werten x abweichen. Über eine Regressionsrechnung wird die Verteilungsfunktion so geschätzt, daß diese Abweichungen in ihrer Gesamtheit zum Minimum werden:

Dazu wird von (22) ausgegangen, in der $x_{(1)p}$ als lineare Funktion von $u_{(1)p}$ beschrieben ist

$$x_{(1)p} = A + B \cdot u_{(1)p} \quad (41)$$

Eine einfache lineare Regression liefert somit als statistische Schätzwerte für die Parameter der Verteilungsfunktion

$$\hat{x}_{(1)0,5} = A \text{ und } \Delta \hat{x}_{(1)} = B \quad (42)$$

Da über die Größe von n_0 in diesem Stadium der Auswertung keine Festlegung getroffen werden kann, sind alle Rechnungen mit

$n_0 = 1, 10, 100, 1.000$ und 10.000

durchgeführt worden.

4.2 Auswertung zur Prüffestigkeit (großer Doppelring) von Floatglas getrennt nach Hersteller, Luft- oder Badseite und Glasdicke

Die statistischen Schätzwerte der Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsgröße "Prüffestigkeit von Floatglas" sind in den Tabellen A1 und A2 für die einzelnen Stichproben zusammengestellt. Daneben sind auch die Schätzwerte der Parameter der diesen zuzuordnenden Ausgangsverteilungen für die Materialfestigkeit und ein Schätzwert für das 1 0/00-Fraktile der Prüffestigkeit zu finden. Die Einzelergebnisse der Versuche sind in Form von Summenhäufigkeiten zusammen mit den entsprechenden Ausgleichskurven in den Bildern A9 bis A16 dargestellt.

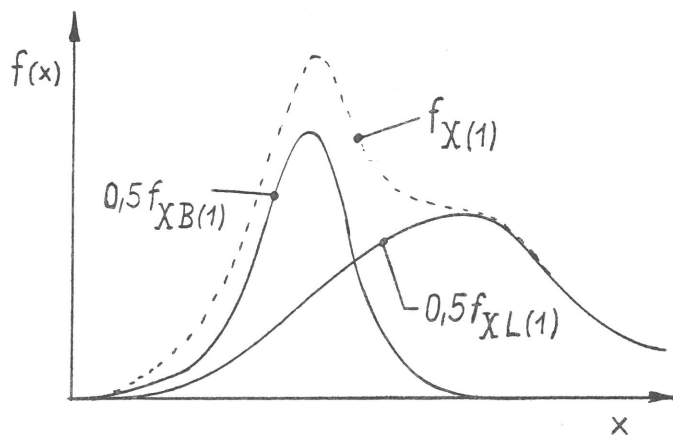
Während der Einfluß von n_0 auf das 50 %-Fraktile $\hat{r}_{(1)0,5}$ und die Streuungsgröße $\hat{r}_{(1)0,5}/\hat{r}_{(1)0,159}$ verhältnismäßig gering ist, hängt das 1 0/00-Fraktile beachtenswert von n_0 ab. Allgemein besteht ein merkbarer Unterschied zwischen den Ergebnissen mit zugbeanspruchter Luft- oder Badseite, der bei dem 10 mm dicken Floatglas auch nach dem Zusammenfassen der Ergebnisse beider Seiten und beider Hersteller nicht überdeckt wird, Bilder A17 und A18. Deswegen wird bei der Gesamtauswertung der Zufallsgröße "Prüffestigkeit" näherungsweise eine Mischverteilung, bestehend aus den Teilgrundgesamtheiten der Zufallsgrößen Prüffestigkeit bei Zugbeanspruchung der Luftseite Prüffestigkeit bei Zugbeanspruchung der Badseite, zugrunde gelegt.

Im strengen Sinne darf eine solche Luft- und Badseite gleichermaßen berücksichtigende Verteilung erst bei der Ermittlung der Verteilungsfunktion für die Bruchlast einer biegebelasteten Glasscheibe eingeführt werden, da nur für die eingebaute Scheibe die Wahrscheinlichkeit für Zugbeanspruchung auf der Luft- oder Badseite gleich ist, nicht aber für jedes Materialelement. Dabei ist statt mit (36) entsprechend Bild 1 mit

$$F_{R(1)}(q) = 0,5 \cdot F_{R(1)L}(q) + 0,5 \cdot F_{R(1)B}(q)$$

$$= 0,5 \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - F_{R(1)L;i}) \right) + 0,5 \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - F_{R(1)B;i}) \right) \quad (43)$$

zu rechnen, wobei die Indizes L und B die Luft- bzw. Badseite bezeichnen.



$$w(X_{L(1)} \leq x_{(1)p}) = p_L \quad w(X_{(1)} \in X_{L(1)}) = 0,5$$

$$w(X_{B(1)} \leq x_{(1)p}) = p_B \quad w(X_{(1)} \in X_{B(1)}) = 0,5$$

$$w((X_{(1)} \in X_{L(1)}) \cap (X_{L(1)} \leq x_{(1)p}) \cup (X_{(1)} \in X_{B(1)}) \cap (X_{B(1)} \leq x_{(1)p})) =$$

$$= 0,5 \cdot p_L + 0,5 \cdot p_B = p$$

Bild 1: Modellvorstellung von der Mischverteilung der Zufallsgröße "Bruchlast einer biegebeanspruchten Glasscheibe". $f_X(1)$ sowie $f_{XL(1)}$ oder $f_{XB(1)}$ bezeichnen die Verteilungsdichten der auf Normalverteilung transformierten der Zufallsgrößen "Bruchlast der Glasscheibe" sowie "Bruchlast der Glasscheibe bei Biegebeanspruchung auf der Luft- bzw. Badseite der Scheibe".

Mit (37) ergibt sich dann für kleine Unterschreitungswahrscheinlichkeiten

$$F_{R(1)}(q) \approx 0,5 \sum_{i=1}^m (F_{R(1)L;i} + F_{R(1)B;i}) \quad (44)$$

Zu derselben Näherungsformel gelangt man, wenn schon bei der Zufallsgröße "Prüffestigkeit" die differenzierenden Verteilungen der Luft- und Badseite zu gleichen An-

teilen berücksichtigt werden, indem "fälschlicherweise" schon für jede der Teilflächen i gesetzt wird

$$F_{R(1);i} = 0,5(F_{R(1)L;i} + F_{R(1)B;i}) \quad (45)$$

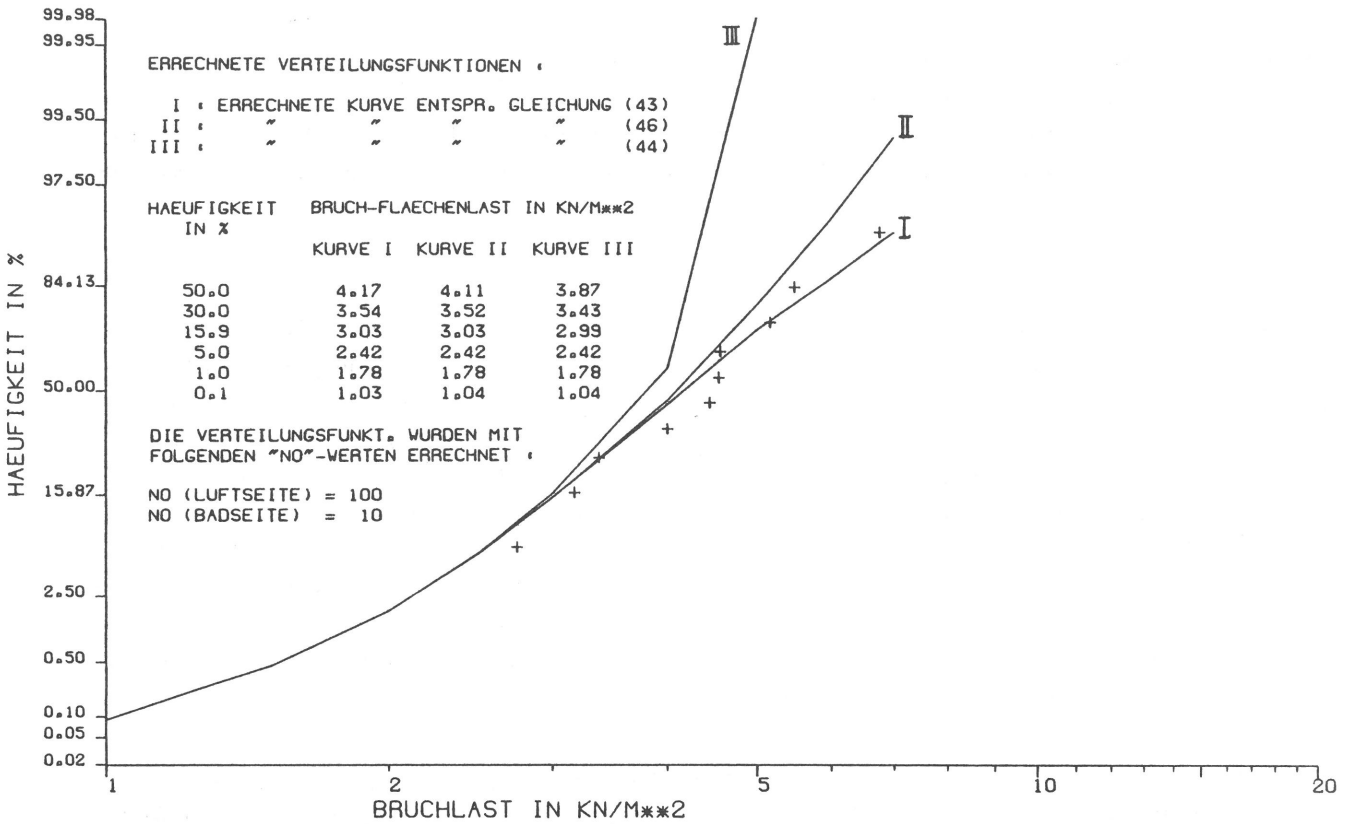


Bild 2a: Float / B / 4seitig, 2,0x2,0 / 6 / Bad: 5; 10 / Luft: 5; 100
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Doppelring 600) über (43) = I, (46) = II oder (44) = III errechnete Verteilungsfunktion für die Bruchlasten.

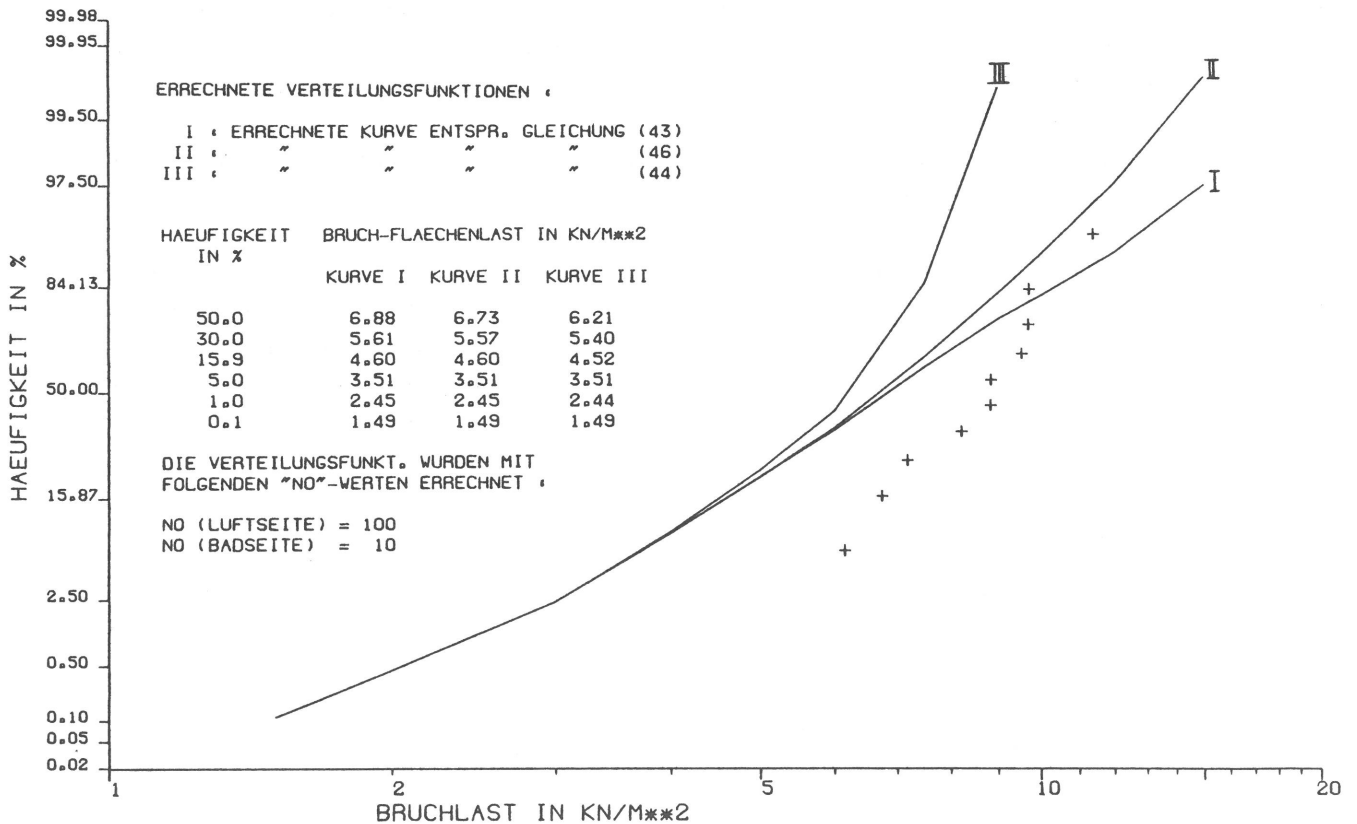


Bild 2b: Float / B / 4seitig, 1,0x2,0 / 6 / Bad: 7; 10 / Luft: 3; 100
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Doppelring 600) über (43) = I, (46) = II oder (44) = III errechnete Verteilungsfunktion für die Bruchlasten.

Damit wäre

$$F_{R(1)} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - 0,5(F_{R(1)L;i} + F_{R(1)B;i})) \quad (46)$$

was mit (37) ebenfalls zu der Näherungsformel (44) führt.

Die Abweichungen der Näherungen (44) und (45) von der exakten Formel (43) sind für zwei Beispiele auf Bild 2 dargestellt. Für die im Rahmen der Sicherheitsbeurteilung und der Überwachung interessierenden kleinen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (10 %, 5 % oder 1 ‰) ergeben sich die gleichen Zahlenwerte für die entsprechenden Fraktilen.

Bei einer Überprüfung der Modellvorstellung durch experimentelle Ergebnisse an großen biegebelasteten Glasscheiben ist es sinnvoll, die Verteilungsfunktion im gesamten Bereich der Bruchlasten exakt nach (43) zu bestimmen, da sonst noch weniger Versuchsergebnisse aus Bruchversuchen an großen Scheiben zum Vergleich zur Verfügung stehen. Zur Ermittlung von Fraktilen mit kleinen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten sind dagegen die Näherungsformeln ausreichend. Um bei Schlußfolgerungen über die Prüffestigkeit, ihre Beziehungen zueinander und ihren Einfluß auf die Grenztragfähigkeit von biegebelasteten Scheiben nicht immer mit zwei verschiedenen Verteilungsfunktionen (Luftseite und Badseite) arbeiten zu müssen, sind dafür Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeiten, Luft- und Badseite in gleichen Anteilen berücksichtigend, nach (46) bestimmt worden.

4.3 Verteilungsfunktion der Prüffestigkeit (großer Doppelring) von Floatglas bei Zugrundelegen eines signifikanten Unterschiedes zwischen Luft- und Badseite

Soll nach zugbeanspruchter Luft- und Badseite getrennt ausgewertet werden, ist (29) maßgebend, wobei auch die im folgenden näher erläuterten Überlegungen zu einer Mischverteilung, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, zu beachten sind. Die so als Ausgleichskurven ermittelten Verteilungsfunktionen sind auf dem Bild 3 dargestellt. Sie werden im Abschnitt 5 weiter verwendet.

Die die Luft- und Badseiten zusammenfassende Auswertung der Prüffestigkeiten ist wie folgt durchgeführt worden:

Die Wahrscheinlichkeit, daß die Luft- oder die Badseite zugbeansprucht ist, wird für beide Seiten mit 50 % als gleich groß angesetzt werden. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p eines bestimmten Wertes x setzt sich dann aus den Unterschreitungswahrscheinlichkeiten p_L und p_B der Teilgrundgesamtheiten "Luft (L)" und "Bad (B)" zusammen

$$p = 0,5 (p_L + p_B) \quad (47)$$

Daraus ergibt sich wegen

$$p = F_{R(1)}(r), \quad p_L = F_{R(1);L}(r), \quad p_B = F_{R(1);B}(r) \quad (48)$$

mit (29) die Verteilungsfunktion für diese Mischverteilung zu

$$F_{R(1)}(r) = 1 - 0,5 \cdot \left(\left(\Phi \left(u_{n\sqrt{0,5}} - \frac{x - x_{L(1)0,5}}{\Delta x_{L(1)}} \left(u_{n\sqrt{0,841}} - u_{n\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{n_0} + \left(\Phi \left(u_{n\sqrt{0,5}} - \frac{x - x_{B(1)0,5}}{\Delta x_{B(1)}} \left(u_{n\sqrt{0,841}} - u_{n\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{n_0} \right) \quad (49)$$

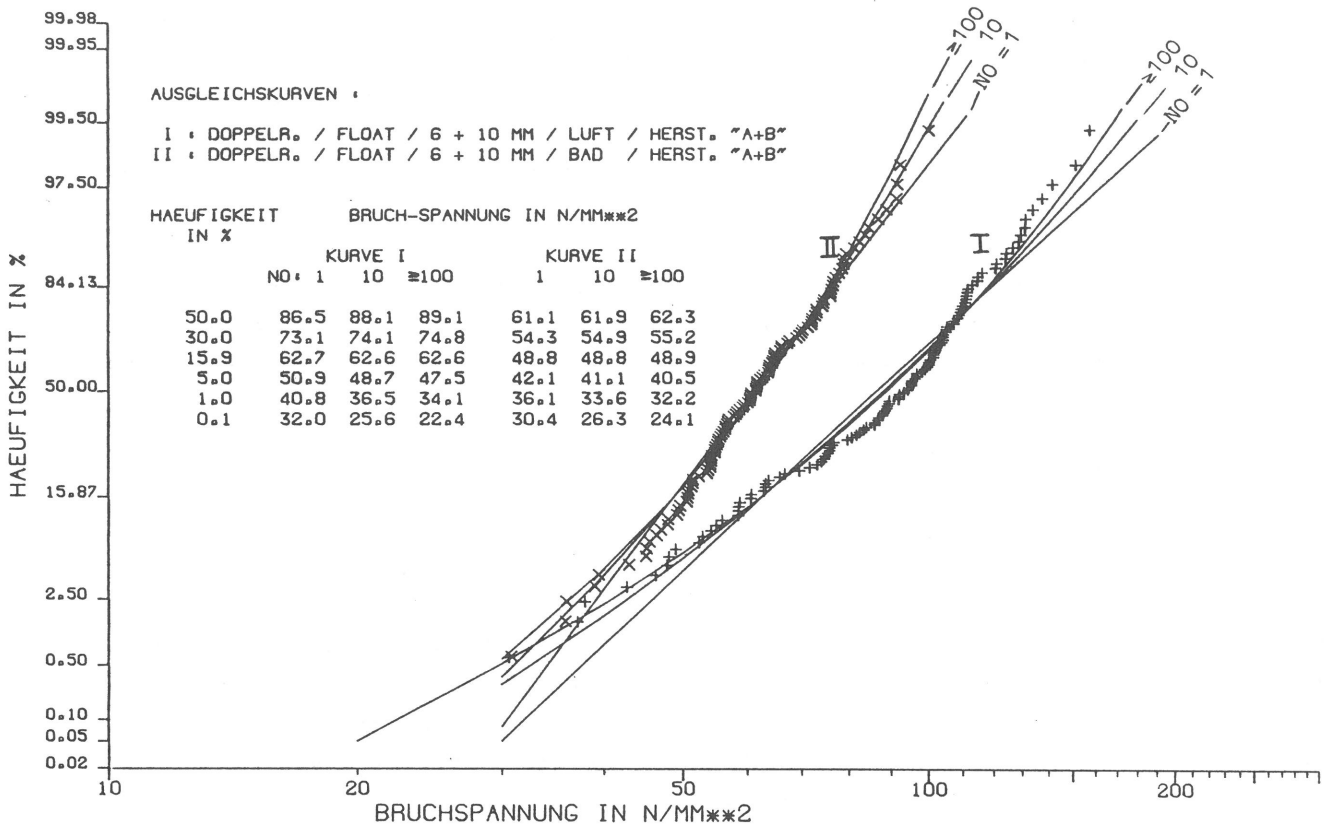


Bild 3: Float / A u. B / Doppelring 600 / 6 u. 10 / Bad: 113; 1 bis 100 / Luft: 114; 1 bis 100
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven für Luftseite (I) oder Badseite (II) biegezugbeansprucht. Den Ausgleichskurven wurde eine Mischverteilung, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, zugrunde gelegt.

mit $x = \ln(r/b)$

Die Verteilungsparameter der Teilgrundgesamtheiten sind aus den Versuchsergebnissen zu ermitteln. Dabei wird davon ausgegangen, daß jede der Teilgrundgesamtheiten wiederum als Mischverteilung zu betrachten ist, die sich aus sehr vielen Produktionslosen zusammensetzt, deren Mittelwerte μ_x der auf Normalverteilung transformierten Einzelwerte um den Mittelwert μ_{xL} bzw. μ_{xB} der Teilgrundgesamtheit mit der Standardabweichung σ_{xL} bzw. σ_{xB} normalverteilt streuen. Die Streuung σ_{xL} bzw. σ_{xB} der Einzelwerte in einem Los kann jedoch für alle Lose einer Teilgrundgesamtheit als gleich angesehen werden.

Aus jeder Teilgrundgesamtheit liegen 1 Stichproben, entnommen aus 1 Losen dergestalt vor, daß die Elemente einer Stichprobe jeweils nur aus einem Los stammen. Die Versuchsergebnisse der Stichprobe liefern als statistische Schätzwerte

$$\hat{x}_{L(1)0,5;\alpha} \text{ und } \hat{\Delta x}_{L(1);\alpha} \text{ sowie } \hat{x}_{B(1)0,5;\alpha} \text{ und } \hat{\Delta x}_{B(1);\alpha} \quad \alpha = 1 \dots l$$

Hätten alle Stichproben den gleichen Umfang $m_\alpha = m$ und wäre $n_0 = 1$, d. h. z. B. für "Luft"

$$x_{L(1)0,5} = \mu_{xL} \text{ und } (\Delta x_{L(1)})^2 = \sigma_{xL}^2,$$

so wären [6, Abschn. 7.1]

$$\bar{x}_{L(1)0,5} = \frac{1}{l} \sum_{\alpha=1}^l \hat{x}_{L(1)0,5;\alpha} \text{ und} \quad (50)$$

$$(\Delta \bar{x}_{L(1)})^2 = \frac{m-1}{m} \cdot \frac{1}{l} \sum_{\alpha=1}^l (\hat{\Delta x}_{L(1);\alpha})^2 + \frac{1}{l-1} \sum_{\alpha=1}^l (\hat{x}_{L(1)0,5;\alpha} - \bar{x}_{L(1)0,5})^2 \quad (51)$$

konsistente und erwartungstreue Schätzer für $x_{L(1)0,5}$ und $(\Delta x_{L(1)})^2$; analog auch für "Bad". Der Umfang der hier vorliegenden Stichproben differiert mit $m_\alpha = 26 \dots 30$ nur geringfügig, so daß mit einem mittleren Wert $m = 28$ gerechnet werden kann. Wie schon ausgeführt, ist der Einfluß der Größe von n_0 auf die Verteilungsfunktionen in ihren mittleren Bereichen, also auch auf betrachteten Verteilungsparameter, nur gering.

Deshalb wird es als vertretbar angesehen, die statistischen Schätzwerte für die Verteilungsparameter auch bei $n_0 \neq 1$ nach (50) und (51) zu berechnen. Somit ist die Verteilungsfunktion der Mischverteilung der Zufallsgröße "Prüffestigkeit" nach (49) berechenbar mit

$$x_{L(1)0,5} \approx \bar{x}_{L(1)0,5} \quad \text{bzw.} \quad x_{B(1)0,5} \approx \bar{x}_{B(1)0,5} \quad \text{und} \quad (52)$$

$$\Delta x_{L(1)} \approx \Delta \bar{x}_{L(1)} \quad \text{bzw.} \quad \Delta x_{B(1)} \approx \Delta \bar{x}_{B(1)} \quad (53)$$

entsprechend (50) und (51)

Diese Art der Zusammenfassung aller Ergebnisse für Floatglas ist auf Bild A19 dargestellt. Die Ausgleichskurven unterscheiden sich ab $n_0 = 100$ nicht mehr voneinander. Im Bereich höherer Bruchspannungen werden die Summenhäufigkeiten der Versuchsergebnisse durch $n_0 \geq 100$, im Bereich geringerer Bruchspannungen durch $n_0 < 100$ besser angeglichen, s. auch Bild 3. Die Annahme, daß auf der Luft- und der Badseite voneinander verschiedene Größen für die der Definition der Materialfestigkeit zugrunde gelegten Flächenelemente a zutreffend sind, ist nicht von der Hand zu weisen. (Festigkeitsmindernder Einbau von Zinn in die Glasstruktur der Badseiten-Oberfläche und festigkeitssteigernde "Beseitigung" von Mikrodefekten an der Luftseiten-Oberfläche durch die "Feuerpolitur".)

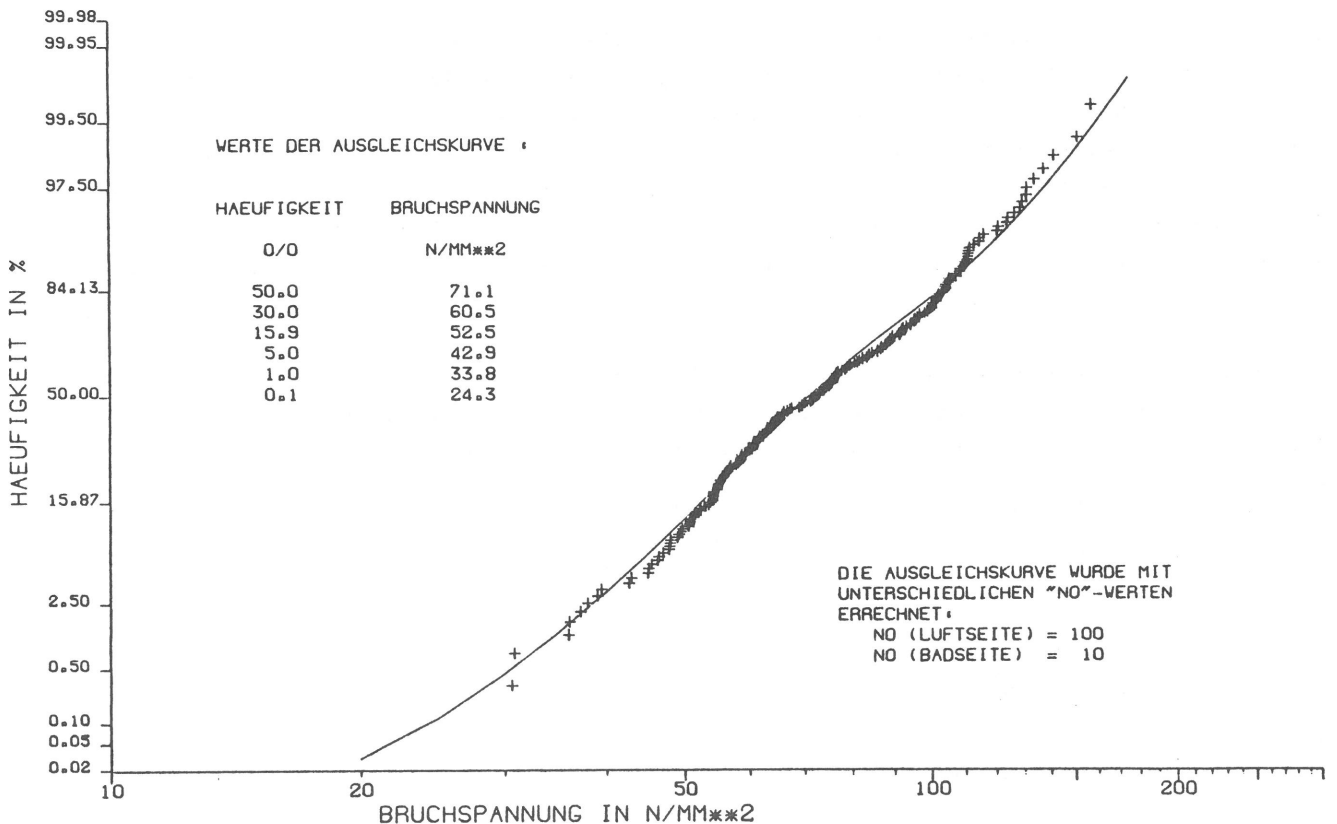


Bild 4: Float / A u. B / Doppelring 600 / 6 u. 10 / Bad: 113; 10 / Luft: 114; 100
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven, Bad- und Luftseite nach Bild 1 und mit unterschiedlicher Anzahl der Materialelemente für jede Seite zusammengefaßt. Den Ausgleichskurven wurde eine Mischverteilung, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, zugrunde gelegt.

Die Auswertung ist deswegen mit
 $n_0 = n_{B0} = 10$ auf der Badseite und
 $n_0 = n_{L0} = 100$ auf der Luftseite
wiederholt worden und auf Bild 4 dargestellt.

Die Anpassung an die Ergebnisse der Untersuchung wird damit als optimal angesehen. Die Verteilungsfunktion für die Zufallsgröße "Prüffestigkeit im Doppelring-Versuch von Floatglas" ergibt sich dann zu

$$F_{R(1)}(r) = 1 - 0,5 \left(\left(\Phi \left(\frac{u_{nL0} \sqrt{0,5} - \frac{x - x_{L(1)0,5;0}}{\Delta x_{L(1);0}} \left(\frac{u_{nL0} \sqrt{0,841} - u_{nL0} \sqrt{0,5}}{\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{nL0} + \left(\Phi \left(\frac{u_{nB0} \sqrt{0,5} - \frac{x - x_{B(1)0,5;0}}{\Delta x_{B(1);0}} \left(\frac{u_{nB0} \sqrt{0,841} - u_{nB0} \sqrt{0,5}}{\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{nB0} \right) \quad (54)$$

4.4 Auswertung zur Prüffestigkeit von ESG 6 mm Vergleich von großem Doppelring- und Balken-Biegeversuch

Die statistischen Schätzwerte der Verteilungsparameter der Zufallsgröße "Prüffestigkeit von ESG 6 mm beim Doppelring-Versuch" sind in Tabelle A3 und die entsprechenden Werte der Zufallsgröße "Prüffestigkeit von ESG 6 mm beim Balken-Versuch" in der Tabelle A4 für die einzelnen Stichproben analog zur Tabelle A1 aufgeführt. Obwohl auch hier ein systematischer Unterschied zwischen den Ergebnissen mit zugbeanspruchter Luft- oder Badseite nach den Zahlenwerten für die 50 %-Fraktile nicht auszuschließen ist, wird dieses vorerst nicht beachtet, zumal sich die Streuungsgrößen nicht systematisch zu unterscheiden scheinen.

Getrennt nach Hersteller und Prüfmethode sind die in Form von Summenhäufigkeiten dargestellten Einzelergebnisse der Versuche an 6 mm dickem Einscheiben-Sicherheitsglas zusammen mit den entsprechenden Ausgleichskurven entsprechend Abschn. 4.1 in den Bildern A20 bis A23 dargestellt. Gleichzeitig sind dort auch die Verteilungsparameter unter den in den Tabellen erläuterten Bezeichnungen angegeben.

Geht man davon aus, daß die Proben für beide Prüfmethoden aus derselben Grundgesamtheit stammten, müßten nach der Modellvorstellung die 50 %-Fraktile und die Streuungsgrößen der Doppelring-Ergebnisse kleiner sein als die entsprechenden Werte der Balken-Ergebnisse. Ein Vergleich der Bilder A20 mit A21 und A22 mit A23 zeigt, daß die erste Bedingung in der Tendenz erfüllt wird, während das gleiche für die zweite Bedingung nicht gesagt werden kann; und zwar gilt diese Aussage für beide Hersteller und für alle n_0 einschließlich aller möglichen Kombinationen. Im Rahmen der Modellvorstellung bedeutet dieses, daß die Proben für die verschiedenen Prüfmethoden nicht aus derselben Grundgesamtheit stammen können.

Für zwei Glasflächen verschiedener Größen A_1 und A_2 gilt nach (30) mit
 $n_1 = A_1/a$ und $n_2 = A_2/a$

$$F_{R(1);1}(r=r(1)0,5;1) = 0,5$$

$$F_{R(1);2}(r=r(1)0,5;1) = 1 - (0,5)^{n_2/n_1}$$

bzw.

$$F_{R(1);1}(r=r(1)0,5;2) = 1 - (0,5)^{n_1/n_2}$$

$$F_{R(1);2}(r=r(1)0,5;2) = 0,5$$

sofern sie von Flächenelementen gebildet werden, die Realisationen derselben Ausgangsverteilung sind.

Geht man von den Ergebnissen der Doppelring-Versuche "1" aus, Bild A20, erhält man mit $r_{(1)0,5;1} = 157 \text{ N/mm}^2$ für diesen Wert aus den Ergebnissen der Balken-Versuche "2", Bild A21, $F_{R(1);2}(157) = 8,97 \%$.

Damit errechnet sich

$$n_2/n_1 = 0,5 \lg(1-0,0897) = \ln(0,9103)/\ln(0,5) = 0,1356$$

$$n_1/n_2 = 7,4$$

Geht man dagegen von den Ergebnissen der Balken-Versuche aus, Bild A21, erhält man mit $r_{(1)0,5;2} = 174 \text{ N/mm}^2$ für diesen Wert aus den Ergebnissen der Doppelringversuche, Bild A20, $F_{R(1);2}(174) = 90,07 \%$.

Damit errechnet sich

$$n_1/n_2 = 0,5 \lg(1-0,9007) = \ln 0,0993/\ln 0,5 = 3,3$$

Entsprechende Rechnungen mit den Ergebnissen am Material von Hersteller B, Bilder A22 und A23, ergeben je nach Ausgleichskurve

$$n_1/n_2 = 40 \quad (n_0 = 100 \dots 10.000) \text{ oder}$$

$$n_1/n_2 = 57 \quad (n_0 = 10)$$

wenn man vom Doppelring-Versuch auf den Balken-Versuch schließt bzw. bei umgekehrtem Schluß

$$n_1/n_2 = 7,9 \quad (n_0 = 1000 \dots 10.000) \text{ oder}$$

$$n_1/n_2 = 6,1 \quad (n_0 = 10)$$

Betrachtet man die Flächen der Probekörper für Doppelring und für Balken, beträgt das Verhältnis

$$n_1/n_2 = (\pi \cdot 600^2/4)/(200 \cdot 360) = 282743/72000 = 3,93$$

Berücksichtigt man dagegen, daß bei den Balken-Versuchen die Bruchausgangsstelle fast immer nahe des freien Randes lag, müßte ein größeres Verhältnis gelten. Hätte diese Fläche nahe des freien Randes ca. 20 bis 30 mm Breite, ergäbe sich

$$n_1/n_2 = 282743/(2 \cdot 200 \cdot (20 \dots 30)) = 24 \dots 35$$

Das Fraktile $r_{(1)p;2}$ der Zufallsgröße "Grenzwiderstand einer Glasfläche von der Größe A_2 " ergibt sich aus der entsprechend aufgelösten Gleichung (30) in Abhängigkeit von den Verteilungsparametern der Zufallsgröße "Grenzwiderstand einer Glasfläche von der Größe A_1 " unter der Voraussetzung, daß die Flächen von Elementen gebildet werden, die Realisationen derselben Ausgangsverteilung sind, über

$$x_{(1)p;2} = x_{(1)0,5;1} + \frac{u_{n_1/\sqrt{0,5}} - u_{n_2/\sqrt{1-p}}}{u_{n_1/\sqrt{0,841}} - u_{n_1/\sqrt{0,5}}} \cdot \Delta x_{(1);1} \quad (55)$$

oder entsprechend (12) zu

$$r_{(1)p;2} = b \cdot \exp(x_{(1)p;2}) \quad (56)$$

Vergleicht man unter diesen Bedingungen die Doppelring- und Balken-Versuche, und zwar für das 50 %-Fraktile, also $p = 0,5$, ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengestellten Zahlenwerte.

Aus dem Vergleich der Spalte 7 mit Spalte 6 in Verbindung mit Spalte 5 geht hervor: Die Modellvorstellung gibt den Einfluß der Größe der mit gleicher Biegezug-

Tabelle 1: Berechnung des 50 %-Fraktils für die Prüffestigkeit nach Balken-Versuch aus den Ergebnissen der Prüffestigkeit beim Doppelring-Versuch und umgekehrt (r in N/mm²)

1: Doppelring

2: Balken

Her- steller	n ₁	$x^{(1)}_{0,5;1}$ ($r^{(1)}_{0,5;1}$)	$\Delta x^{(1)};1$	n ₁ /n ₂	$r^{(1)}_{0,5;2 1}$	$r^{(1)}_{0,5;2}$
A	100	5,056552 (157)	0,101750	3/1 4/1 8/1	173 177 189	174
	10000	5,059244 (157)	0,105970	3/1 4/1 8/1	172 177 188	175
B	100	4,977192 (145)	0,096549	3/1 4/1 8/1	159 162 173	171
	10000	4,979614 (145)	0,097655	3/1 4/1 8/1	158 162 171	171
1: Balken			2: Doppelring			
A	100	5,160539 (174)	0,076593	1/3 1/4 1/8	164 161 156	157
	10000	5,162491 (175)	0,077553	1/3 1/4 1/8	164 162 156	157
B	100	5,139283 (171)	0,069493	1/3 1/4 1/8	161 159 154	145
	10000	5,141085 (171)	0,070379	1/3 1/4 1/8	162 159 154	145

spannung beanspruchten Fläche auf das 50 %-Fraktile der Zufallsgröße "Grenzwiderstand der Fläche" in der Größenordnung richtig wieder, wenn ein entsprechendes Verhältnis der maßgebenden Flächengrößen zugrunde gelegt wird. Auch bei diesem Vergleich sind die Verhältniszahlen, die eine den Versuchsergebnissen optimal angeglichenen Umrechnung bewirken, bei dem Schluß vom Doppelring-Versuch auf den Balken-Versuch und umgekehrt nicht gleich. Die Ursache ist die schon eingangs erwähnte, der Modellvorstellung nicht entsprechende Tendenz der Streuungsänderung beim Übergang vom Doppelring- zum Balken-Versuch. Die Erklärung dazu, daß nämlich die Probekörper für die Versuchsreihen nicht derselben Ausgangsgrundgesamtheit zugerechnet werden können, wird durch die 50 %-Fraktile noch unterstützt. Das aus den Doppelring-Versuchen mit Probekörpern vom Hersteller B ermittelte 50 %-Fraktile liegt nämlich deutlich unter dem entsprechenden vom Hersteller A, während bei den aus Balken-Versuchen ermittelten Werten dieser Unterschied nur gering ist.

Nach der Modellvorstellung errechnet sich das Verhältnis der Streuungswerte für zwei verschieden große Glasflächen A₁ und A₂, deren Flächenelemente Realisationen derselben Ausgangsverteilung sind, wegen (28) zu

$$\frac{\Delta x^{(1)};2}{\Delta x^{(1)};1} = \frac{u_{n_2\sqrt{0,841}} - u_{n_2\sqrt{0,5}}}{u_{n_1\sqrt{0,841}} - u_{n_1\sqrt{0,5}}} \quad (57)$$

So müßte sich z. B. beim Material vom Hersteller A beim Vergleich der Ergebnisse aus den Balken-Versuchen "2" zu denen aus den Doppelring-Versuchen "1" ergeben

$$\Delta x_{(1);2} / \Delta x_{(1);1} = 1,17203 \text{ für } n_1/n_2 = 4 \text{ bei } n_1 = 100$$

und daraus

$$\Delta x_{(1);2|1} = 1,17203 \cdot 0,101750 = 0,119254$$

Mit diesem Wert und dem 50 %-Fraktil aus den Balken-Versuchen erhält man nach (55) und (56) für das 50 %-Fraktil der Doppelring-Versuche, errechnet aus den Balken-Versuchen,

$$r_{(1)0,5;1|2} = \exp(5,041532) = 155 \text{ N/mm}^2$$

Bei modellgerechtem Streuungsverhältnis wäre die Umrechnung der 50 %-Fraktilen von Doppelring-Versuchen auf die von Balken-Versuchen und umgekehrt beim gleichen Verhältnis n_1/n_2 der Wirklichkeit entsprechend möglich.

Das nicht modellgerechte Streuungsverhältnis hat sich bei beiden Herstellern in gleicher Tendenz und Größenordnung gezeigt. Damit drängt sich die Folgerung auf, daß beim Vorspannprozeß die Materialfestigkeit je nach Flächengröße und/oder -form der vorzuspannenden Scheibe verschieden beeinflußt werden kann.

Eine zur Wirklichkeit widerspruchsfreie Umrechnung der Prüffestigkeitsergebnisse bei Balken-Versuchen auf solche bei Doppelring-Versuchen ist dann bei ESG nicht möglich. Dieser Vergleich der beiden Prüfmethode erlaubt daher auch keine eindeutig zwingende Folgerung hinsichtlich der Größe a des bei der Definition der Materialfestigkeit zugrunde gelegten Flächenelementes.

4.5 Auswertung zur Prüffestigkeit beim Balken-Biegeversuch von ESG (6 mm und 10 mm Dicke)

Die Parameter der Verteilungsfunktionen der Zufallsgröße "Prüffestigkeit beim Balken-Versuch von ESG" sind für 6 mm und 10 mm Glasdicke, Zugbeanspruchung auf der Luft- oder Badseite, Probekörper von Hersteller A oder B in den Tabellen A4 und A5 zusammengestellt. Außerdem sind dort auch die Parameter der Ausgangsverteilungen und die 1 0/00-Fraktilen aufgeführt. Die Summenhäufigkeiten der Einzelwerte der Stichproben und die zugehörigen Ausgleichskurven stellen die Bilder A24 bis A31 dar.

Die Unterschiede bei den Ergebnissen der Versuche mit zugbeanspruchter Luft- oder Badseite sind so gering, daß von einer Darstellung analog dem Bild 3 abgesehen wird. Bei der Ermittlung der Verteilungsfunktion der Bruchlasten der großen biegebelasteten Scheiben in Abschnitt 5 sind sie aber berücksichtigt worden.

Bei der Luft- und Badseiten zusammenfassenden Auswertung wird auch hier die gemeinsame Auswertung aller Versuche nach der Modellvorstellung einer Mischverteilung entsprechend Abschn. 4.3 als sinnvoll angesehen. Die Versuchsergebnisse lassen einen systematischen Unterschied zwischen den Prüffestigkeiten von 6 mm und 10 mm dicken Glasscheiben nicht erkennen. Die Unterschiede zwischen den Streuungsmaßen sind dergestalt, daß sie als zufällige stichprobenbedingte Abweichungen von jeweils einer (Luft oder Bad) konstanten Streuung der Einzelwerte im Los angenommen werden können. Die Verteilungsfunktion der derart zusammengefaßten Grundgesamtheit der Prüffestigkeit von ESG zeigt Bild A32. Eine optimale Anpassung an die Summenhäufigkeiten der Versuche ist augenscheinlich durch

$$n_0 = n_{B0} = 2 \text{ auf der Badseite und}$$

$$n_0 = n_{L0} = 10 \text{ auf der Luftseite}$$

gegeben, Bild 5.

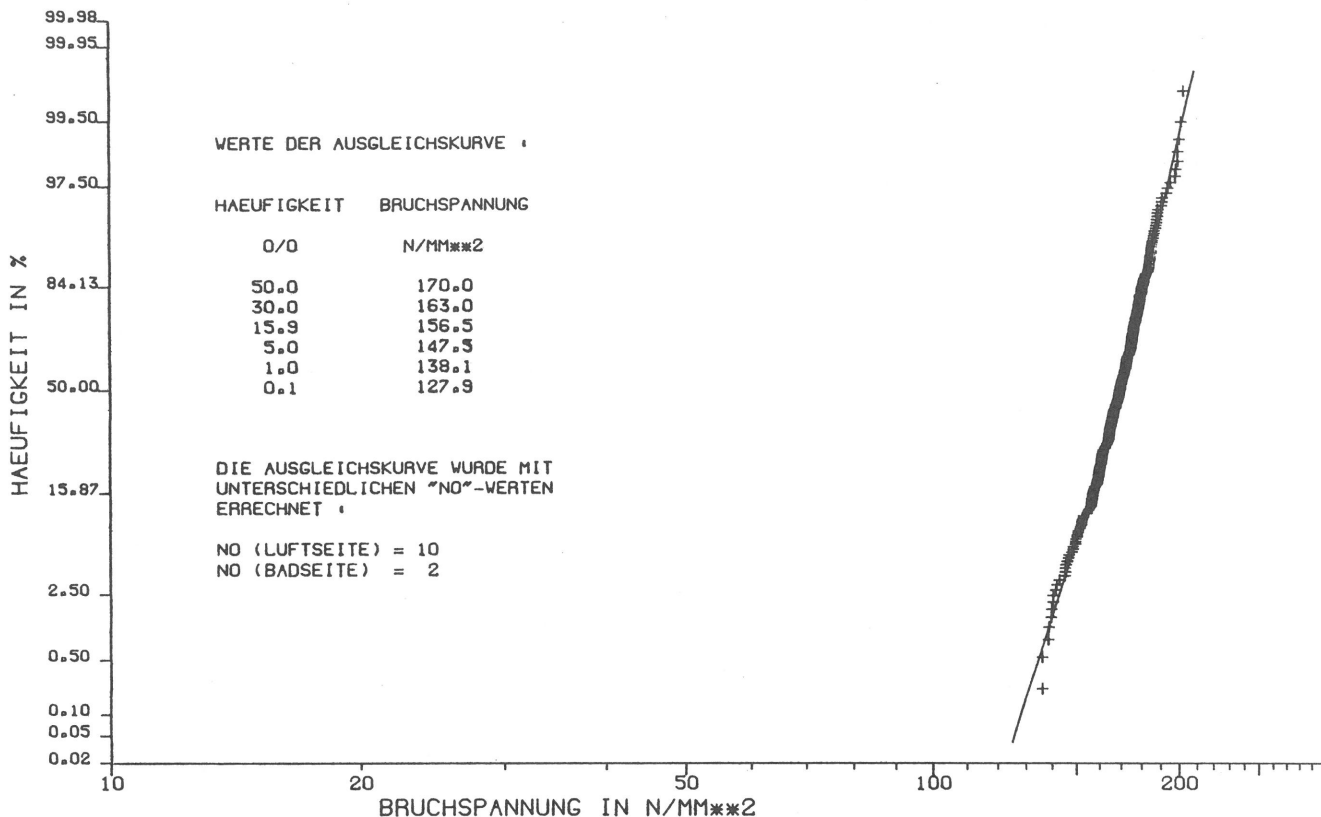


Bild 5: ESG / A u. B / Balken / 6 u. 10 / Bad: 162; 2 / Luft: 159; 10
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven, Bad- und Luftseite nach Bild 1 und mit unterschiedlicher Anzahl der Materialelemente für jede Seite zusammengefaßt. Den Ausgleichskurven wurde eine Mischverteilung, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, zugrunde gelegt.

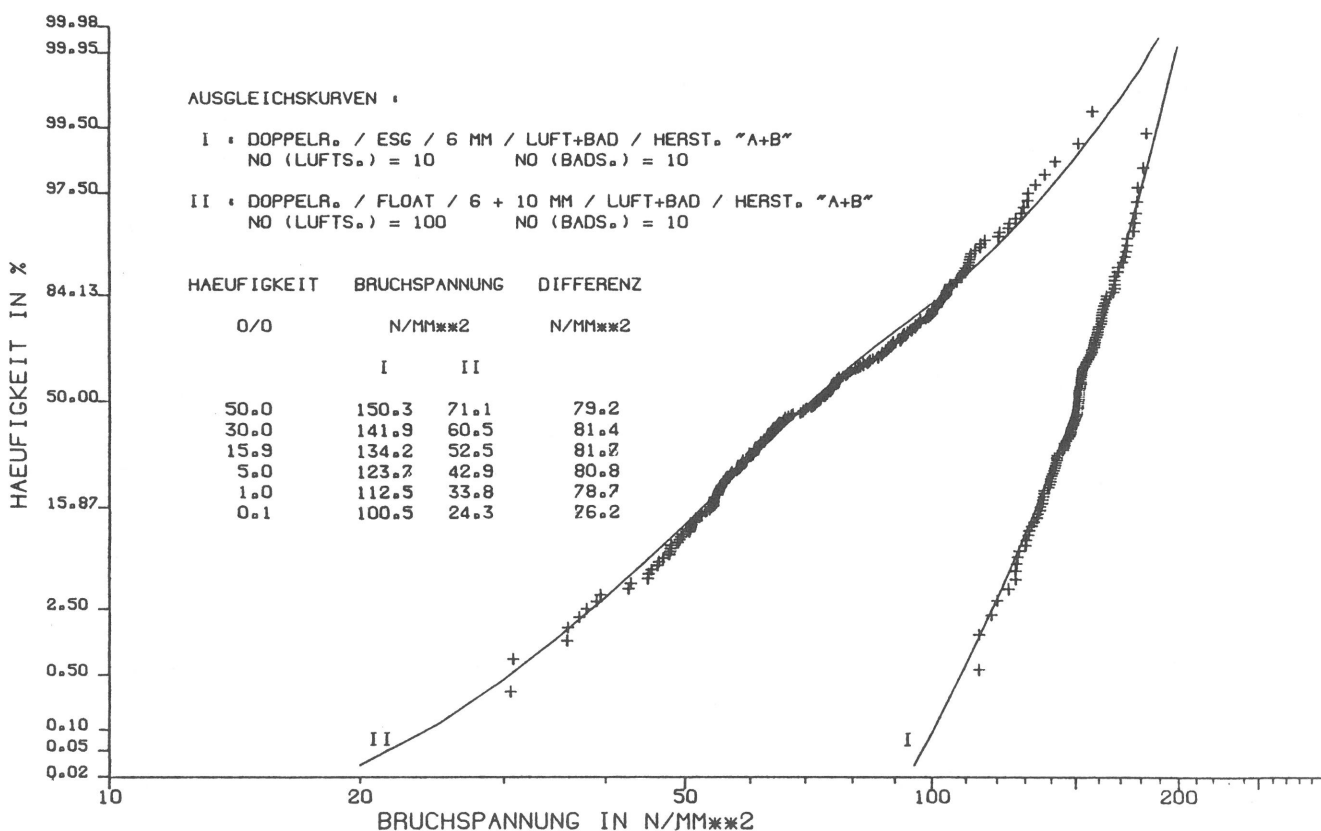


Bild 6: ESG / A u. B / Doppelpackung 600 / 6 / Bad: 60; 10 / Luft: 63; 10
Float / A u. B / Doppelpackung 600 / 6 u. 10 / Bad: 113; 10 / Luft: 114; 100
Erhöhung der Prüffestigkeit beim Doppelpackung-Biegeversuch mit 600 mm Lastringdurchmesser durch den Vorspannprozeß. Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven entsprechend bzw. von Bild 4.

4.6 Die Erhöhung der Prüffestigkeit beim großen Doppelring-Biegeversuch durch den Vorspannprozeß

Die Parameter der Verteilungsfunktionen der Zufallsgrößen "Prüffestigkeit beim Doppelring-Versuch" können für 6 mm dicke Scheiben aus Floatglas und ESG, Zugbeanspruchung auf der Luft- oder Badseite, Probekörper von Hersteller A oder B den Tabellen A1 und A3 entnommen werden. Die Summenhäufigkeiten der Einzelwerte und die zugehörigen Ausgleichskurven stellen die Bilder A9, A11, A13 und A15 sowie A20 und A22 dar. Die Zusammenfassungen für ESG nach der Modellvorstellung einer Mischverteilung entsprechend Abschn. 4.3 zeigt Bild 6. Dort ist ebenfalls die Verteilungsfunktion der Zufallsgröße "Prüffestigkeit beim Doppelring-Versuch von Floatglas" von Bild 4 eingezeichnet, und es sind auch die Differenzen zwischen den Zahlenwerten für gleiche Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Prüffestigkeiten von Floatglas und ESG im Doppelring-Biegeversuch aufgelistet.

Für Fraktilen mit Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von $\leq 0,5$ kann beim Doppelring-Biegeversuch näherungsweise mit einer Erhöhung der Prüffestigkeit von ca. 80 N/mm² durch den Vorspannprozeß ausgegangen werden, wenn auch die Zahlenwerte zu den kleineren Unterschreitungswahrscheinlichkeiten hin eine systematische Abnahme der Differenz nicht ausschließen.

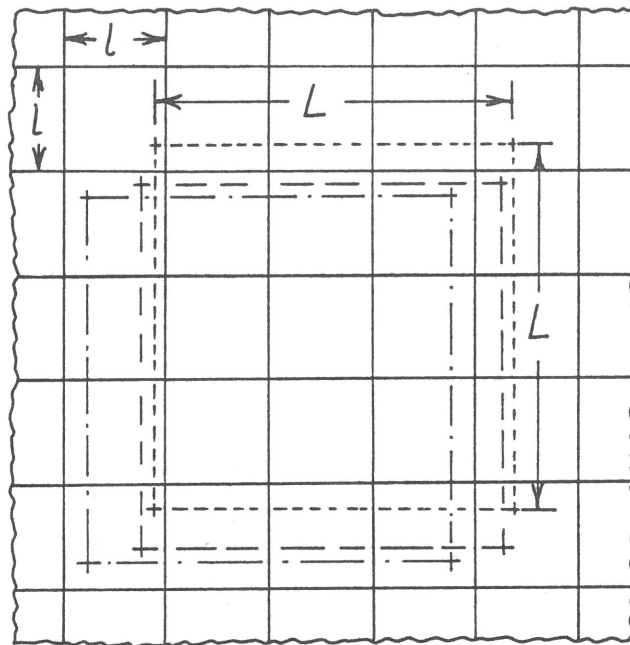
4.7 Vergleich der Prüffestigkeiten von Floatglas bei kleinem und großem Doppelring-Biegeversuch

Eine Vergleichsmöglichkeit hinsichtlich des Einflusses der Größe der Beanspruchungsfläche auf die Prüffestigkeit von Floatglas bietet sich zwischen den Ergebnissen der Doppelring-Biegeversuche mit kleinem ("K" $\hat{=}$ 100 mm) (in Vergleich zu DIN 52 292 Teil 1 und Teil 2 eigentlich "mittleren") und großem ("D" $\hat{=}$ 600 mm) Lastringdurchmesser an. Der Vergleich wird zur Überprüfung der Modellvorstellung herangezogen. Einer einfachen Überprüfung, die sich auf das Verhältnis der Flächen innerhalb der Lastringe bezieht, stehen jedoch zwei Tatsachen entgegen:

- Trotz größten versuchstechnischen Bemühens sind die Flächen innerhalb der Lastringe nur näherungsweise gleichmäßig homogen zugbeansprucht. Für den großen Doppelring-Biegeversuch mit Gasdruck zeigen dieses die Hauptspannungsverteilungen [1, Anlagen 39 und 40]. In DIN 52 292 Teil 2 sind deswegen als quasi-gleichmäßig beanspruchte Fläche nur 0,24 m² statt $\pi \cdot 0,6^2 / 4 = 0,28 \text{ m}^2$ festgelegt. Für den kleinen Doppelring-Biegeversuch ist die Abweichung von Annahme der Gleichmäßigkeit bei hoher Beanspruchung noch größer [7].
- Die Anzahl n der Materialelemente a, die die Fläche A gleichmäßig homogener Zugbeanspruchung beinhaltet oder anschneidet, ist für eine gegebene Größe von A nicht eine bestimmte Zahl. Vielmehr sind n verschiedene Zahlen zuzuordnen, die mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zutreffen können, je nachdem wie A zum "Mosaik" der die Glasscheibe bildenden Elemente a liegt. Ein vereinfachendes Beispiel mit quadratischer Form für A und a sowie seitenparalleler Überdeckung zeigt Bild 7.

So ist beim kleinen Doppelring-Biegeversuch (ohne Gasdruck) mit einem Lastringdurchmesser von 100 mm und bei 6 mm oder 10 mm Glasdicke eine als näherungsweise gleichmäßig homogen ansprechbare Zugbeanspruchung nur bis zu einer rechnerischen Biegespannung von ca. 100 N/mm² bzw. ca. 200 N/mm² zu erwarten [7, Tabelle 1]. Während bei den entsprechenden Versuchen mit 10 mm dickem Floatglas [1, Anlagen 23 und 24 sowie 27 und 28] die Biegespannungen diesen Grenzwert kaum überschritten, lagen die Ergebnisse der Versuche mit 6 mm Glasdicke [1, Anlagen 21 und 22 sowie 25 und 26] zum großen Teil merklich über 100 N/mm², mehrmals sogar über 200 N/mm². Dem entspricht ein Verhältnis der Spannung am Lastring zu der im Zentrum von ca.

Materialmosaik



Beispiel:
 $i = 3$
 $\epsilon = 0,5$
 $\min n = 16$
 $\max n = 25$

$L/l = i + \epsilon$, wobei $i = \text{ganze Zahl}$, $0 < \epsilon \leq 1$
 für $i < L/l \leq i + 1$ gilt:

Anzahl der beanspruchten Elemente	Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen						
	$\epsilon = 0,1$	$0,3$	$0,5$	$0,7$	$0,9$	$1,0$	
n							
$(i+1)^2$	$(1-\epsilon)^2 = 0,98$	$0,49$	$0,25$	$0,09$	$0,01$	0	
$(i+1)(i+2)$	$2(1-\epsilon) \cdot \epsilon = 0,18$	$0,42$	$0,50$	$0,42$	$0,18$	0	
$(i+2)^2$	$\epsilon^2 = 0,01$	$0,09$	$0,25$	$0,49$	$0,98$	1	

Voraussetzung: Wahrscheinlichkeit für die Ecklage von A sei für alle Punkte des Materialmosaiks gleich

Bild 7: Beispiel für Anzahl sowie Wahrscheinlichkeit für deren Zutreffen der von einer Fläche der Größe $A = L^2$ beanspruchten Materialelemente der Größe $a = l^2$ bei seitenparalleler Überdeckung (Hinweis von Dr. Gerisch, BAM, Januar 1989)

1,5:1 [7, Bild 4b]. Wenn die Versuchsergebnisse trotzdem hier verwendet werden, muß diese Abweichung von den zugrunde gelegten Annahmen einschränkend mit in Betracht gezogen werden.

Die Doppelring-Biegeversuche mit kleinem Lastring sind wie die anderen (Abschn. 4.2) ausgewertet und die Ergebnisse der Auswertung in den Tabellen A6 und A7 nach Stichproben geordnet zusammengestellt. Eine zusammenfassende, nur noch nach "Luft- oder Badseite zugbeansprucht" getrennte Auswertung ist auf Tabelle A8 den entsprechenden Werten aus den Doppelring-Biegeversuchen mit großem Lastring gegenübergestellt. Nach der Modellvorstellung müssen sich für die Parameter μ_x und σ_x der Ausgangsverteilung bei beiden Versuchsarten dieselben Werte ergeben, und das mit (12) errechenbare Verhältnis der 50 %-Fraktile, s. auch (79), muß mit dem sich aus den Versuchen ergebenden Verhältnis übereinstimmen. Zu den Kombinationen von n_D und n_K , für die dieses zutrifft, sind in Tabelle 2 die zugehörigen Zahlenwerte zusammengestellt.

Wird dazu die grob vereinfachende Vorstellung von Bild 7 zugrunde gelegt, ergeben sich Abschätzungen für A/a entsprechend Tabelle 3.

Damit ergibt sich für das Verhältnis der Beanspruchungsflächen schätzungsweise

Luftseite zugbeansprucht: $9 > A_D/A_K \geq 5$

Badseite zugbeansprucht: $25 > A_D/A_K \geq 6$

Das Verhältnis der Anzahlen n_D und n_K der betroffenen Materialelemente bei den zwei verschieden großen Beanspruchungsflächen A_D und A_K kann also von dem Verhält-

Tabelle 2: Kombinationen von Materialelement-Anzahlen, bei denen die Voraussetzungen der Modellvorstellung erfüllt sind:

$$\sigma_{XD} = \sigma_{XK}, \mu_{XD} = \mu_{XK}, r(1)_{0,5K}/r(1)_{0,5D} = \text{Zahlenwert nach (79)}$$

Zugbeanspruchte Seite	großer Doppelring (D)				kleiner Doppelring (K)				$r(1)_{0,5K}$
	n	$r(1)_{0,5}$ 1)	σ_X 1)	μ_X 1)	n	$r(1)_{0,5}$ 1)	σ_X 1)	μ_X 1)	$r(1)_{0,5D}$ nach (79)
Luft	100	89,6	0,751	6,343	23	139	0,752	6,340	1,55
Bad	36	62,4	0,451	5,055	5	95,5	0,452	5,065	1,53

1) Die nicht in der Tabelle A8 aufgeführten Zahlenwerte wurden durch Interpolation über lg n ermittelt.

Tabelle 3: Grobe Schätzung des Verhältnisses der Beanspruchungsfläche A zur Fläche a des Materialelementes auf der Grundlage von Bild 7

n aus Tab. 2	i	mögliches $L/l=i+\epsilon$ wahrscheinliche Werte für n			wahrscheinliche Werte für L/l und A/a	
		$\epsilon \ll 1$	$\epsilon=0,5$	$\epsilon \approx 1$	L/l	A/a
100	8	81	≈ 90	100	≈ 9	≈ 81
	9	100	≈ 110	121		
23	3	16	≈ 20	25	$3 < L/l \leq 4$	$9 < A/a \leq 16$
36	4	25	≈ 30	36	≈ 5	≈ 25
	5	36	≈ 42	49		
5	1	4	≈ 6	9	$1 < L/l \leq 2$	$1 < A/a \leq 4$

nis der innerhalb der Lastringe liegenden Flächen abweichen. Es ist auch nicht eine notwendige Voraussetzung für die Verwendung der Modellvorstellung als Arbeitshypothese, daß der Zahlenwert von n_D/n_K bei den Versuchen mit zugebeanspruchter Luftseite gleich dem bei zugbeanspruchter Badseite ist. Die Modellvorstellung steht also nicht im Widerspruch zu den Versuchsergebnissen, vielmehr ist eine Interpretation der Ergebnisse der Doppelringversuche mit verschiedenem Lastringdurchmesser grundsätzlich möglich. Die erwähnte Einschränkung hinsichtlich der nicht gleichmäßigen Spannungsverteilung sollte aber davon abhalten, die in Tabelle 2 aufgeführte Kombination von Materialelement-Anzahlen beim großen Doppelring-Biegeversuch bzgl. Luft- und Badseite der im Abschnitt 4.3 erkannten vorzuziehen.

Wird eine asymptotische Extremwertverteilung vom Typ Weibull in ihrer zweiparametrischen Form (66) zugrunde gelegt, siehe Abschnitt 7, gilt entsprechend (78) für das Verhältnis der Fraktilen mit beliebiger aber gleicher Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die Grenzwiderstände der beiden verschiedenen großen Glasflächen

$$r(1)_{K}/r(1)_{D} = (A_D/A_K)^{1/\bar{b}}$$

Wegen der vorstehend hervorgehobenen Nichterfüllung der zugrundeliegenden Annahme einer über die ganze jeweilige Fläche gleichmäßigen Beanspruchung ist mit $A_D = 2400 \text{ cm}^2$ und $A_K < 78,5 \text{ cm}^2$ zu rechnen, so daß sich für $\bar{b} = 10$, siehe Abschnitt 7, der mit der letzten Spalte der Tabelle 2 vergleichbare Wert zu $r(1)_{K}/r(1)_{D} > 1,41$ ergibt. Aus gleichem Grund müßten auch für die Grenzwiderstände beim Biegeversuch mit kleinem Doppelring kleinere Zahlenwerte eingesetzt werden. Das würde in der Tabelle 2 zu Verhältniswerten $r(1)_{0,5K}/r(1)_{0,5D} < 1,5$ führen.

(Weiteres zum Verhältnis von Fraktilen der Grenzwiderstände verschieden großer Glasflächen siehe auch Tabelle 6 in Abschnitt 7.)

5. Auswertung der Versuche zur Grenztragfähigkeit biegebelasteter Glasscheiben

5.1 Ergänzung der Modellvorstellung

Wegen der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Erkenntnis hinsichtlich einer optimalen Anpassung der Verteilungsfunktion für die Zufallsgröße "Prüffestigkeit im Doppelring-Versuch von Floatglas", (54), wird im Rahmen der Modellvorstellung für die Grenztragfähigkeit einer biegebelasteten Glasscheibe mit verschiedenen Elementanzahlen n_L und n_B für die Luft- bzw. Badseite gerechnet. Die Ausdrücke für die Verteilungsfunktionen des Grenzwiderstandes einer Teilfläche A_i in (43) lauten demnach

$$1 - F_{R(1);i}(\sigma_i) = \left(\Phi \left(u_{n_0/\sqrt{0,5}} - \frac{x-x(1)0,5;0}{\Delta x(1);0} \left(u_{n_0/\sqrt{0,841}} - u_{n_0/\sqrt{0,5}} \right) \right) \right)^{n_i} \quad (58)$$

mit $x = \ln(\sigma_i(q)/b)$

wobei für die Luftseite

$$\begin{aligned} n_0 = n_{L0} = A_0/a_L &= 100 \text{ bei Floatglas bzw.} \\ &= 10 \text{ bei ESG} \end{aligned} \quad (59)$$

$$\text{und } n_i = n_{Li} = A_i/a_L = \frac{A_i}{A_0} \cdot n_{L0}$$

sowie für die Badseite

$$\begin{aligned} n_0 = n_{B0} = A_0/a_B &= 10 \text{ bei Floatglas bzw.} \\ &= 2 \text{ bei ESG} \end{aligned} \quad (60)$$

$$\text{und } n_i = n_{Bi} = A_i/a_B = \frac{A_i}{A_0} \cdot n_{B0}$$

zugrunde gelegt wurden.

5.2 Berechnung des Spannungszustandes

5.2.1 Vierseitig aufgelagerte Scheiben

Bei der Berechnung der Verteilungsfunktion der Grenztragfähigkeit einer biegebelasteten Scheibe nach (36) müssen die Hauptzugspannungen auf der gesamten Scheibenoberfläche bekannt sein, um die Faktoren von (36) entsprechend (58) für alle Teilflächen A_i bilden zu können. Für die vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben wurden die Spannungen mit Hilfe der Differenzenrechnung bestimmt.

Wie in [2, Abschn. 3.3] ausgeführt, wurde für die Berechnung von Spannungen und Verformungen der vierseitig aufgelagerten Glasscheiben ein Rechenprogramm verwendet, das in Anlehnung an die von K. Egner aufgezeigte "Berechnung mit Hilfe der Differenzenrechnung" entwickelt worden war. Dabei werden für die Kreuzungspunkte eines über die Scheibe gelegten Liniennetzes die aus den Differentialgleichungen für Platten mit großen Durchbiegungen (v. Karman) abgeleiteten Differenzgleichungen aufgestellt und iterativ gelöst.

Die Maschenweite des Liniennetzes betrug im vorliegenden Fall in x- und y-Richtung jeweils rd. 5 cm, so daß für die 1 m x 2 m große Scheibe 861 und für die 2 m x 2 m große Scheibe 1681 Spannungswerte zur Verfügung standen.

Unter der vereinfachenden Annahme, daß diese Spannungswerte jeweils für den ganzen, auf den betreffenden Kreuzungspunkt des Liniennetzes entfallenden Flächenanteil gelten, kann A_i für eine Spannung σ_i näherungsweise ermittelt werden, indem für alle Spannungswerte, die in dem Intervall von $\sigma_i - \Delta\sigma$ bis $\sigma_i + \Delta\sigma$ liegen, die

Flächenanteile summiert werden. Bei den vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben wurde ein $\Delta\sigma$ von $2,5 \text{ N/mm}^2$, d. h. eine Intervallgröße von 5 N/mm^2 , gewählt.

Die Übereinstimmung von gemessenen und gerechneten Spannungen wurde bei den $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ großen Scheiben an 25 verschiedenen Stellen der Oberfläche ("Zugseite") überprüft. Die errechneten Spannungen waren in allen Fällen dem Betrag nach kleiner (max. 8 %, i. M. rd. 5 %) als die bei den Bruchversuchen mittels DMS ermittelten Spannungen.

Bei den Bruchversuchen an $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ großen Scheiben wurden nur die Hauptspannungen auf der Zugseite der Scheibenmitte (H00) und die Hauptdehnung in einem Punkt in unmittelbarer Nähe der fixierten Scheibenecken (G99C) mittels DMS bestimmt [2, Abschn. 5.1]. Die errechnete Hauptspannung für die Scheibenmitte war um rd. 9 % kleiner als die Werte der Versuche. Die errechnete Hauptdehnung für den Eckbereich stimmte dagegen sehr genau mit der gemessenen überein.

Es ist somit zu vermuten, daß auch bei den $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ großen Scheiben die mit einem E-Modul für Floatglas von 74000 N/mm^2 und einer Querszahl $\mu = 0,25$ nach dem Differenzenverfahren errechneten Spannungen i. M. kleiner sind als die tatsächlich vorhandenen, und daß die Unterschiede etwa von der gleichen Größe wie bei den $1 \times 2 \text{ m}$ großen Scheiben sind.

Für die Berechnung der Verteilungsfunktion der Grenztragfähigkeit der vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben von $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ und $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ Größe wurden daher mit Rücksicht auf diese Unterschiede die Spannungen aus der Differenzenrechnung mit einem Aufschlag von 5 % versehen.

5.2.2 Zweiseitig aufgelagerte Scheiben

Die Spannungen in zweiseitig aufgelagerten Scheiben können normalerweise mit guter Näherung wie bei einem Balken auf zwei Stützen berechnet werden. Bei der stets senkrecht zur Scheibe wirkenden Belastung und den großen Durchbiegungen sind die einfachen Balkenformeln jedoch zu ungenau, und auch erweiterte Formeln, die diese Besonderheiten berücksichtigen, liefern von den Messungen abweichende Ergebnisse, weil die Reibungsverhältnisse im Auflagerbereich der auf Gummi oder Gummi und Teflon gelagerten, extrem stark durchgebogenen ESG-Scheiben großen Einfluß haben, rechnerisch aber kaum erfaßbar sind.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben sind bei den zweiseitig aufgelagerten ESG-Scheiben nur wenige Spannungsuntersuchungen durchgeführt worden. DMS waren außer an den Bruchstellen der vorangegangenen Versuche [2, Abschn. 5.4] nur im Bereich der höchsten Beanspruchung (Mitte zwischen den Auflagern) angeordnet.

Die zur Berechnung der Verteilungsfunktion der Grenztragfähigkeit erforderlichen Spannungen und deren Verteilung auf der Scheibe mußten daher abgeschätzt werden. Das geschah in der Weise, daß für jede Höhe der Flächenbelastung die Spannungen mit "Ersatzbelastungen" nach den einfachen Balkenformeln bestimmt wurden. Die Ersatzbelastungen waren dabei so gewählt, daß in Scheibenmitte (Mitte zwischen den Auflagern) die errechneten und gemessenen Spannungen übereinstimmten.

Die Unterschiede zwischen den Versuchs-Flächenlasten und den "Ersatzbelastungen" waren von der Größe der Belastung bzw. Durchbiegung abhängig. Bei allen drei Versuchsreihen mit großen zweiseitig gestützten ESG-Scheiben wurden die auf die Versuchsbelastungen bezogenen Unterschiede in den für die Berechnung wichtigen Berei-

chen mit wachsender Belastung bzw. Durchbiegung größer, jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen. So waren bei den auf Gummi gelagerten 1,5 m x 1 m großen ESG-Scheiben (lange Seiten unterstützt, d. h. relativ kleine Stützweiten) die Ersatzbelastungen um i. M. 3,5 % kleiner als die Versuchslasten. Bei den 1 m x 1,5 m und 1 m x 2 m großen ESG-Scheiben (kurze Seiten unterstützt, d. h. relativ große Stützweiten), die wegen der Teflonfolien zwischen Glas und Gummi sehr leicht auf dem Auflager gleiten konnten, waren die Ersatzlasten dagegen i. M. 4,6 % und 5,1 % größer als die entsprechenden Versuchsbelastungen.

Die Ermittlung der Teilflächen A_i erfolgte hier für Spannungsintervalle von 10 N/mm², da bei den Scheiben aus ESG wesentlich höhere Spannungen auftreten.

5.3 Grenztragfähigkeit von Scheiben aus Floatglas, basierend auf den Biegeversuchen mit großem Doppelring

Die Verteilungsfunktionen für die Zufallsgrößen "Grenztragfähigkeit biegebelasteter Scheiben" wurden mit den entspr. 5.2 ermittelten Spannungen punktweise nach (58) und (43) für verschiedene Belastungshöhen berechnet. Sie sind in den Bildern als gebrochene Linienzüge eingetragen. Die außerdem dort angegebenen Fraktile für bestimmte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten wurden aus diesen diskreten Kurvenpunkten mit Hilfe der von Lagrange angegebenen Interpolationsformel bestimmt.

Für die (2 m x 2 m)-Scheiben und die (1 m x 2 m)-Scheiben aus Floatglas sind auf den Bildern 8 und 9 die Verteilungsfunktionen der Grenztragfähigkeiten den Summenhäufigkeiten der Versuchsergebnisse gegenübergestellt.

Bei einem Vergleich ist zu bedenken, daß nur eine sehr geringe Anzahl von Grenztragfähigkeitsversuchen durchgeführt werden konnte. Trotzdem ergab sich für die vierseitig aufgelagerte quadratische Scheibe mit ca. 2 m Kantenlänge eine (überraschend) gute Annäherung der aus den Prüffestigkeiten berechneten Verteilungsfunktion der Zufallsgröße "Grenztragfähigkeit (Bruchlast) der Glasscheibe" mit den Summenhäufigkeiten der Grenztragfähigkeits-Versuchsergebnisse, Bild 8. Dagegen kann bei der vierseitig aufgelagerten Rechteckscheibe mit ca. 1 m und 2 m Kantenlänge von solcher guten Annäherung nicht gesprochen werden, Bild 9. Auch die Verwendung anderer Zahlenwerte für n_{GL} und n_{GB} bringt keine bessere Anpassung, Bild A33. Die errechnete Verteilungsfunktion weist größere Versagenswahrscheinlichkeiten aus, als die Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse bei gleichem Zahlenwert der Belastung vermuten läßt.

Um einen Eindruck zu gewinnen, inwieweit die geringe Anzahl der Grenztragfähigkeitsversuche die Zufälligkeit der Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse bedingen kann, wurden die Lage der Summenhäufigkeitslinie der Versuchsergebnisse durch eine Regressionsgerade gekennzeichnet und die zufällige Lage dieser Geraden durch ihre entsprechenden Vertrauensbereiche angedeutet (Bilder A34 und A35). Der mittlere Teil der Summenhäufigkeitslinie der Bruchlasten aller denkbaren Scheiben der hier betrachteten Art liegt also mit einer Wahrscheinlichkeit W innerhalb der so gekennzeichneten Grenzen.

Die Differenz zwischen Summenhäufigkeit der in Versuchen ermittelten Bruchlasten und der aus der Verteilungsfunktion für die Prüffestigkeiten berechneten Verteilungsfunktion der Bruchlasten kann bei der vierseitig aufgelagerten Rechteckscheibe mit 1 m und 2 m Kantenlänge nicht mehr als Folge der zufallsbedingten Versuchsergebnisse einer geringen Anzahl von Stichprobenelementen gedeutet werden. Eine Erklärung für diese im Vergleich zu den Verhältnissen bei der quadratischen Scheibe

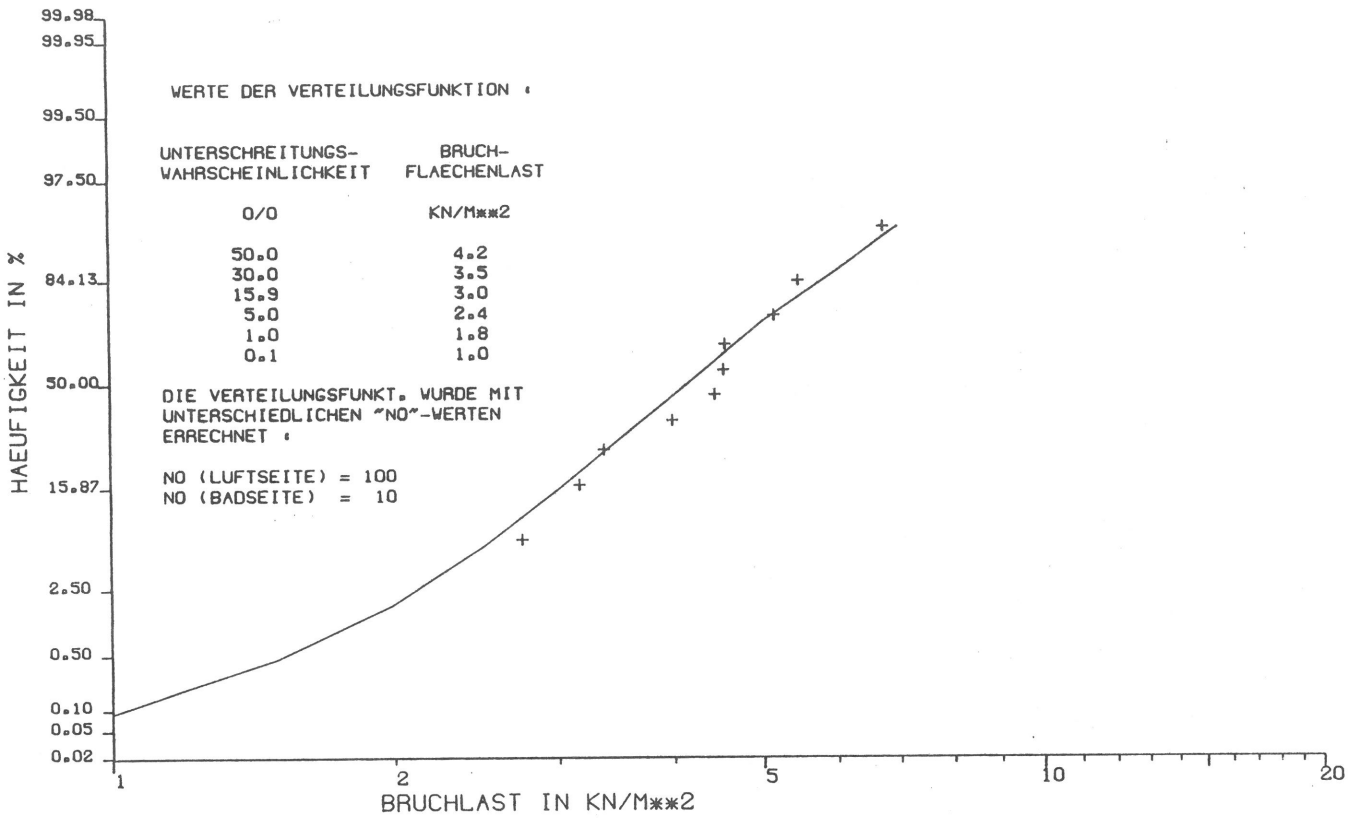


Bild 8: Float / B / 4seitig, 2,0x2,0 / 6 / Bad: 5; 10 / Luft: 5; 100
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktion der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusammen-
engesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luft-
seite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Doppelring 600, Bild 3) errechnet wurden.

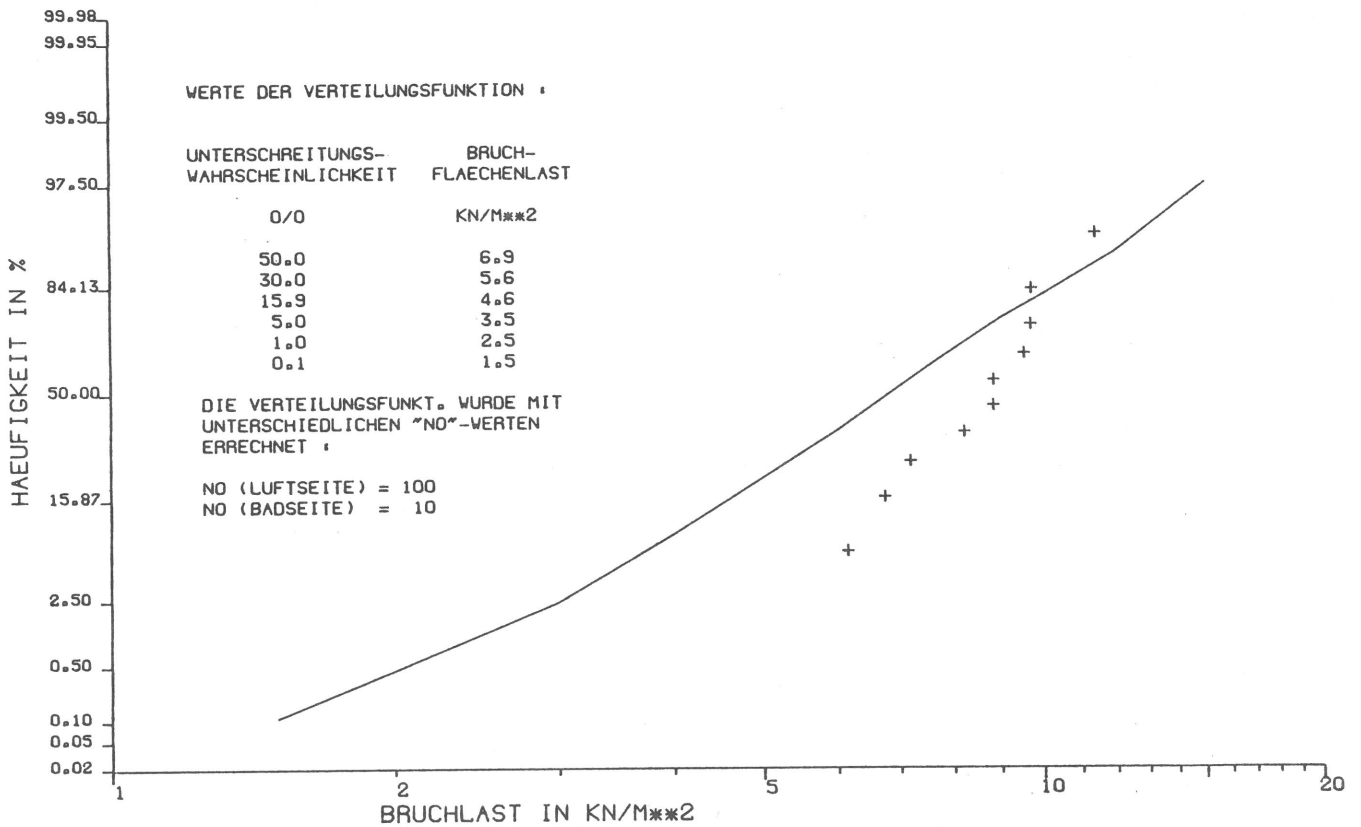


Bild 9: Float / B / 4seitig, 1,0x2,0 / 6 / Bad: 7; 10 / Luft: 3; 100
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktion der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusam-
engesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luft-
seite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Doppelring 600, Bild 3) errechnet wurden.

mit 2 m Kantenlänge große Differenz konnte nicht gefunden werden. Es kann nur vermutet werden, daß es sich bei den 1 m x 2 m-Scheiben um keine repräsentative Stichprobe handelt. Bemerkenswert ist, daß in beiden Fällen die errechneten Werte gegenüber den Versuchswerten auf der sicheren Seite liegen.

5.4 Grenztragfähigkeit von Scheiben aus ESG, basierend auf den Balken-Biegeversuchen

Die mit (58) nach (43) berechneten Verteilungsfunktionen für die Zufallsgrößen "Grenztragfähigkeit biegebelasteter Scheiben aus ESG" sind analog Abschnitt 5.3 für die Scheiben mit

1,5 m Breite und 1 m Stützweite auf Bild 10

1 m Breite und 1,5 m Stützweite auf Bild 11

1 m Breite und 2 m Stützweite auf Bild 12

den Summenhäufigkeiten der Versuchsergebnisse gegenübergestellt.

Auch hier ist die leider nur geringe Anzahl der Grenztragfähigkeitsversuche bei einem Vergleich zu beachten.

Trotzdem ist die Annäherung der aus den Prüffestigkeiten errechneten Verteilungsfunktion an die Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse befriedigend bis gut. Die Differenzen könnten noch als zufallsbedingt gedeutet werden, Bilder A36 bis A38. Allerdings spricht dagegen, daß auch hier die errechneten Versagenswahrscheinlichkeiten größer sind, als nach der Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse im Mittel zu vermuten ist. Die Rechnung liefert also einen auf der sicheren Seite liegenden Zahlenwert für ein gesuchtes Fraktil.

Um Mißverständnisse zu vermeiden, wird darauf hingewiesen, daß hier bei dem Einscheiben-Sicherheitsglas als Prüffestigkeit die im Balken-Versuch bestimmten Werte, Bild 5, zugrunde gelegt wurden.

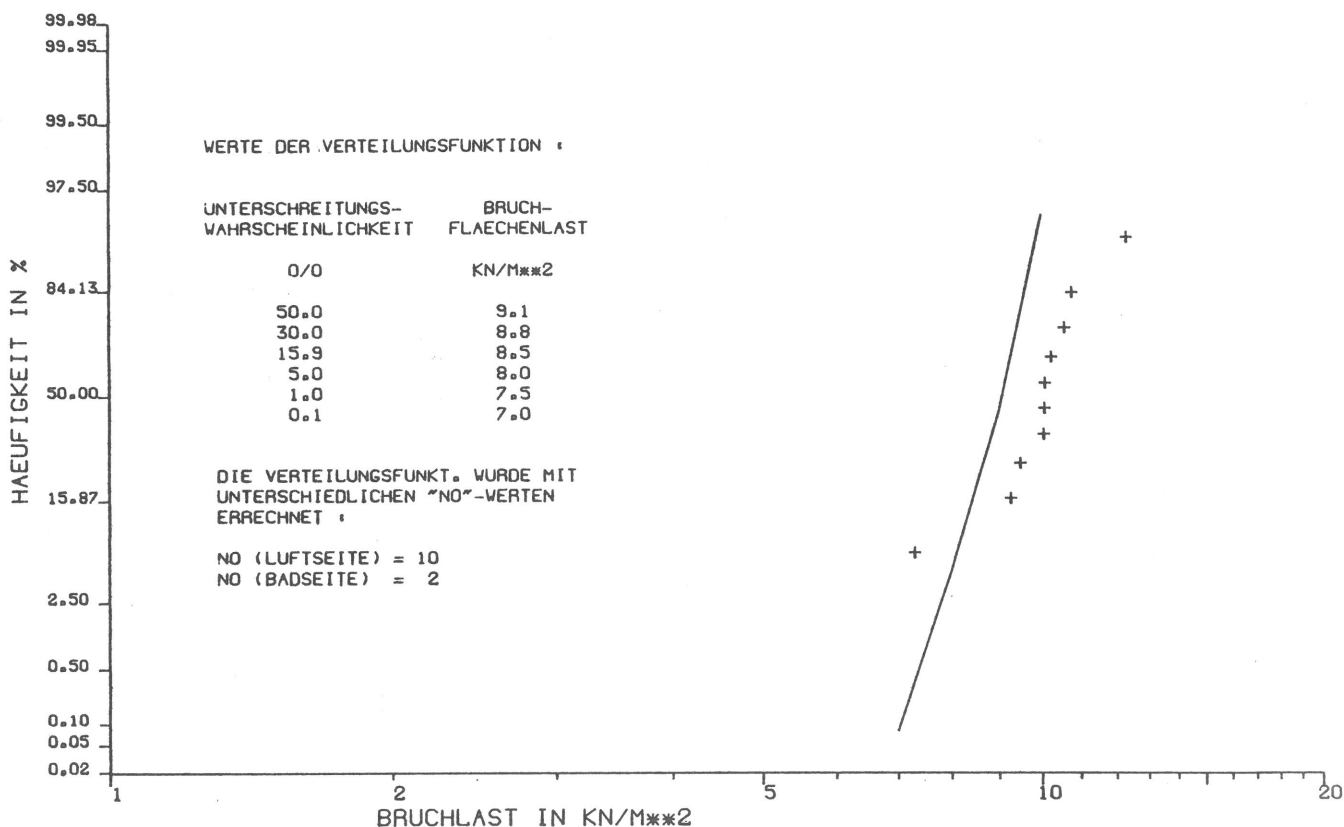


Bild 10: ESG / A / 2seitig, 1,5x1,0 / 6 / Bad: 5; 2 / Luft: 5; 10
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktion der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusammengesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luftseite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Balken, Abschn. 4.5) errechnet wurden.

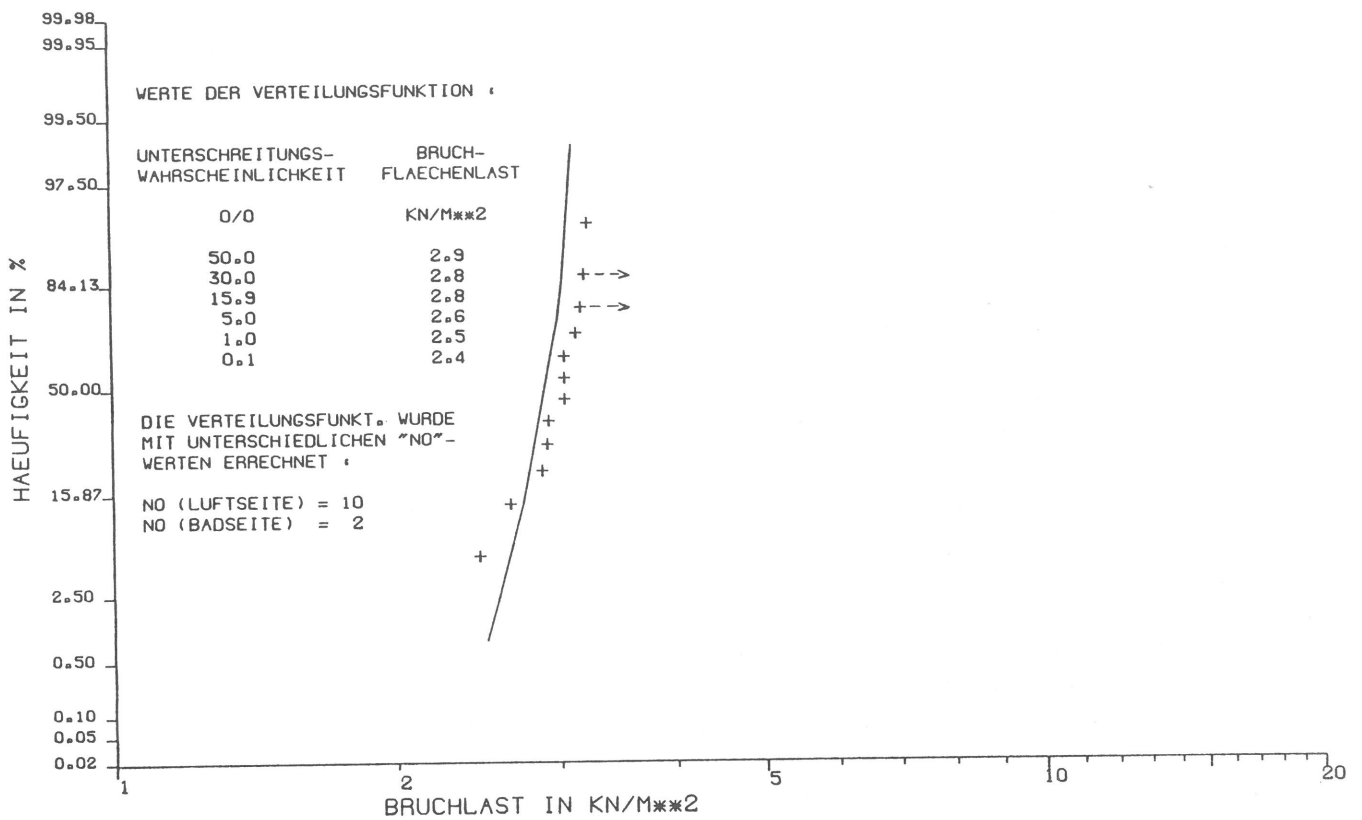


Bild 11: ESG / B / 2seitig, 1,0x1,5 / 6 / Bad: 7; 2 / Luft: 5; 10
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktion der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusammengesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luftseite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Balken, Abschn. 4.5) errechnet wurden.

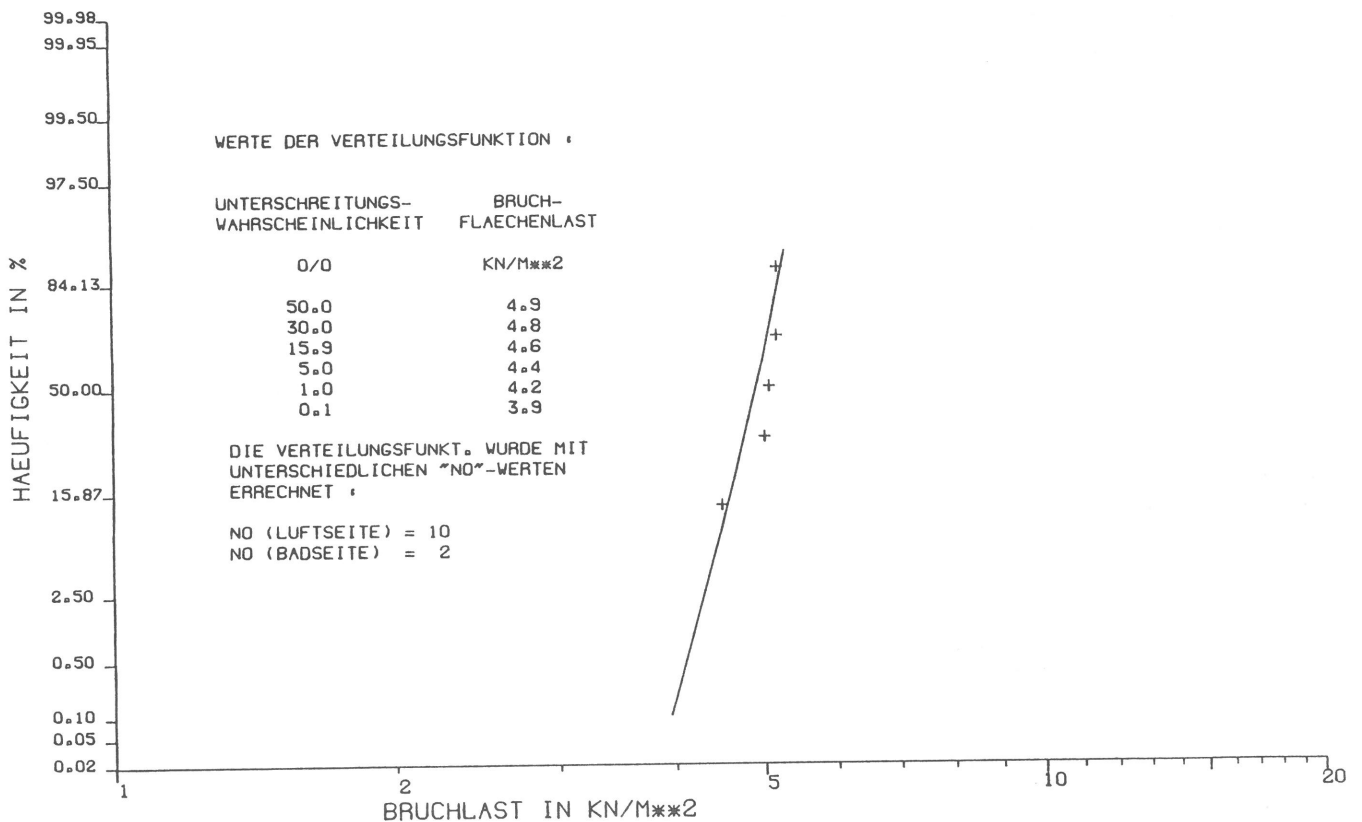


Bild 12: ESG / A / 2seitig, 1,0x2,0 / 10 / Bad: 5; 2 / Luft: 0; 10
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktion der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusammengesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luftseite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Balken, Abschn. 4.5) errechnet wurden.

6. Vorschlag für ein einfaches Verfahren zur Tragfähigkeitsbeurteilung einer biegebeanspruchten Glasscheibe

Im Rahmen des Sicherheitskonzeptes auf probabilistischer Grundlage, wie es in [4] niedergelegt ist, wird dem Bemessungswert der Einwirkung S der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes R gegenübergestellt. Einwirkung und Widerstand werden als Zufallsgrößen aufgefaßt, und die Bemessungswerte sind Zahlenwerte, die mit festzulegenden Wahrscheinlichkeiten von den Realisationen der Zufallsgrößen unterschritten werden. Auf der Widerstandsseite muß diese Unterschreitungswahrscheinlichkeit klein sein. Der entsprechende Bemessungswert wird als Bemessungsfraktil r_d und seine Unterschreitungswahrscheinlichkeit mit p_d bezeichnet.

Maßgebend für die Festlegung von p_d ist der Sicherheitsindex β , der bei der Beurteilung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in Verbindung mit Gefahr für Menschenleben für eine Bezugszeitspanne von einem Jahr mit $\text{erf } \beta = 4,7$ festgelegt wurde. Damit wird eine jährliche Versagensrate von $V_1 = 1,3 \cdot 10^{-6}$ akzeptiert. Wird der Bemessung eine Bezugszeitspanne von $t_B = 50$ Jahren zugrunde gelegt, dann ergibt sich eine Versagensrate von

$$V_{tB} = 1 - (1 - V_1)^{t_B} \approx t_B \cdot V_1 = 65 \cdot 10^{-6} \quad (61)$$

Diese entspricht einem Sicherheitsindex für die planende Bemessung von $\text{erf } \beta = 3,8$.

Weiterhin ist p_d abhängig von dem Faktor α_R , der die Streuungseinflüsse von Widerstand und Einwirkung wichtet. Er kann im Regelfall mit $\alpha_R = 0,8$ angenommen werden. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für den Bemessungswert des Bauteilwiderstandes beträgt dann

$$p_d = \Phi(-\alpha_R \cdot \beta) = \Phi(-0,8 \cdot 3,8) = 1,2 \cdot 10^{-3} \approx 1 \text{ o/oo} , \quad (62)$$

d. h. als Bemessungswert ist das 1 o/oo-Fraktile der Zufallsgröße "Grenztragfähigkeit der biegebelasteten Glasscheibe" anzusetzen.

Bei einer Baukonstruktion der klassischen Bauweisen und unter der Voraussetzung, daß außer der Materialfestigkeit keine anderen Einflußfaktoren auf die Grenztragfähigkeit als wesentliche Zufallsgrößen anzusetzen sind, würde in die Berechnung der Tragfähigkeit das 1 o/oo-Fraktile der Materialfestigkeit an der höchstbeanspruchten Stelle eingesetzt und so das Bemessungsfraktile der Grenztragfähigkeit erhalten werden.

Um dieses gebräuchliche Verfahren beizubehalten, wird die Belastung q_0 der Scheibe bestimmt, bei der für die rechnerische Spannung an der entsprechend der verwendeten mechanischen Modellvorstellung höchstbeanspruchten Stelle sich gerade der Wert des 1 o/oo-Fraktiles der Prüffestigkeit, ermittelt im entsprechenden Normversuch, also Doppelring- oder Balkenbiegeversuch, ergibt. Die Abweichung des 1 o/oo-Fraktiles q_d der tatsächlichen Bruchlast von dem fiktiven Wert q_0 wird durch den Teilsicherheitsfaktor $\gamma = q_0/q_d$ erfaßt, der von den Scheibenabmessungen, der Auflagerungs- und der Belastungsart abhängt.

Werden die γ -Werte durch Stufungen auf eine aus der Sicht von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit vertretbare Mindestanzahl eingeschränkt, lassen sie sich in einem anwenderfreundlichen Tabellenwerk zusammenstellen. Der Anwender kann dann den Bemessungswert für die biegebelastete Glasscheibe bestimmen, indem er die Belastung berechnet, bei der die rechnerische maximale Spannung in der Scheibe den Wert $\max \sigma = \sigma_0/\gamma$ annimmt.

Als Beispiel wird dieses hier für 8 Scheibenarten mit Abmessungen wie sie bei den Versuchen vorlagen ausgeführt:

Als mechanische Modellvorstellung über die Abhängigkeit zwischen Belastung, maximaler Beanspruchung in der Scheibe und Scheibenabmessungen werden für die vierseitig aufgelagerten Scheiben die in [8, Bild 2.2.5] wiedergegebenen Beziehungen und für die zweiseitig aufgelagerten Scheiben die Balkenformel verwendet. In diesem Rahmen besteht die Beziehung

$$q = \frac{\max \sigma}{a} \cdot \left(\frac{h}{1/2}\right)^2 \quad (63)$$

- mit q = gleichmäßig verteilte Flächenlast
 h = Plattendicke
 l = Länge der kleineren Seite bzw. Stützweite
 $\max \sigma$ = maximale Biegespannung
 a = σ^*/p^* nach Bild 2.2.5 in [8] bei vierseitig aufgelagerten Scheiben mit $\sigma^* = \max \sigma / (E(h/(1/2))^2)$ bzw.
 a = 3 bei zweiseitig aufgelagerten Scheiben

Mit dem 1⁰/oo-Fraktile der Prüffestigkeit im Doppelring-Biegeversuch von 24,3 N/mm² für Floatglas, Bild 4, und dem 1⁰/oo-Fraktile der Prüffestigkeit im Balken-Biegeversuch von 128 N/mm² für ESG, Bild 5, berechnen sich die in Tabelle 4 zusammengestellten Belastungswerte q_0 . Sie sind dort den 1⁰/oo-Fraktile q_d der Bruchlasten gegenübergestellt, die sich aus mit der Verteilungsfunktion der entsprechenden Prüffestigkeit, Bild 4 bzw. 5, berechneten Verteilungsfunktionen der Grenztragfähigkeit ergeben. (Die rechnerischen Spannungen sind dabei nicht wie in den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 korrigiert worden, da nicht wie dort Versuchsergebnisse mit errechneten Werten verglichen werden.)

Tabelle 4: Beispiele für die Ermittlung des Teilsicherheitsfaktors γ^* , der die Abweichung der näherungsweise ($\max \sigma = 1$ 0/oo-Fraktile der Prüffestigkeit) berechneten Bemessungslast q_0 von dem 1⁰/oo-Fraktile q_d der Verteilungsfunktion der Scheibenbruchlast, berechnet aus der Verteilungsfunktion der Prüffestigkeit (Doppelring- bzw. Balken-Biegeversuch), zahlenmäßig wiedergibt.

Glasart	Auflagerung	Scheibendicke h	größere Seitenlänge bzw. Breite	kleinere Seitenlänge bzw. Stützweite l	σ^*/p^* a	q_0 bei $\max \sigma = 24,3$ N/mm ² bzw. 128 N/mm ²	q_d	$\gamma^* = q_0/q_d$
-	-	mm	m	m	-	kN/m ²	kN/m ²	-
Floatglas ($E = 74000$ N/mm ²)	vierseitig	5,9	2,015	1,015	2,43/1,2	1,62	1,57	1,03
		5,9	2,015	2,015	9,58/12,7	1,11	1,13	0,98
		10,05	2,015	1,015	0,84/0,35	3,98	4,05	0,98
		10,05	2,015	2,015	3,30/3,4	2,49	2,41	1,03
ESG ($E = 71000$ N/mm ²)	zweiseitig	5,85	1,570	0,918	3	6,93	6,86	1,01
		5,85	0,943	1,515		2,54	2,50	1,02
		10,05	0,943	1,515		7,51	7,41	1,01
		10,05	0,943	2,015		4,25	4,15	1,02

$$\sigma^* = \max \sigma \left(\frac{1/2}{h}\right)^2 / E, \quad p^* = p^*(\sigma^* | \lambda) \text{ aus [8, Bild 2.2.5]}$$

$$q_0 = \frac{\max \sigma}{\sigma^*/p^*} \left(\frac{h}{1/2}\right)^2 \text{ bzw. } q_0 = \frac{\max \sigma}{3} \cdot \left(\frac{h}{1/2}\right)^2$$

Die Ergebnisse dieses beispielhaften Vergleiches lassen erwarten, daß mit einer für die Anwendung vertretbaren Anzahl dieser Teilsicherheitsfaktoren auszukommen ist.

7. Hinweise zu den Untersuchungen [8] und [9].

Die Beanspruchung in einer biegebeanspruchten Scheibe bei auch großen Verformungen werden in [8] mittels einer Schalentheorie numerisch mit einem Finite-Elemente-Verfahren bestimmt, und zwar unter den Voraussetzungen

- Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen am verformten Körper
- linearer Spannungsverlauf über die Plattendicke
- Membran- und Biegespannungskomponenten in den Gleichgewichtsbedingungen gekoppelt
- Verformungen aufgrund von Schubspannungen senkrecht zur Mittel-
fläche der Scheibe näherungsweise nach Reissner berücksichtigt
- und bei vierseitig aufgelagerten Platten
- Drehung um die Plattenkante unbehindert
- Bewegung in Richtung der Plattenebene unbehindert
- Kein Abheben von den Rändern in Richtung der Plattennormalen.

Durch Vergleichsrechnung ist überprüft worden, daß eine dimensionslose Darstellung in der Form

$$\sigma^* = \sigma \cdot \left(\frac{1/2}{h}\right)^2 \cdot \frac{1}{E} \quad (64)$$

$$p^* = p \cdot \left(\frac{1/2}{h}\right)^4 \cdot \frac{1}{E} \quad (65)$$

auch für die Schalenrechnung zulässig ist,

wobei l = Länge der kürzeren Seite

h = Plattendicke

E = Elastizitätsmodul

bedeuten.

Für eine mit konstanter Zugspannung σ_v beanspruchte Fläche A_0 wird als Verteilungsfunktion ihres Widerstandes gegenüber Bruch eine asymptotische Extremwertverteilung vom Typ Weibull in der Form

$$w_{A_0}(R_{(1)} \leq r) = w_{A_0}(\Sigma_v \leq \sigma_v) = 1 - \exp(-(\sigma_v/\sigma_0)^{\bar{b}}) = F_{A_0}(\sigma_v) \quad (66)$$

zugrunde gelegt. Die Parameter σ_0 und \bar{b} sind aus der Summenhäufigkeitslinie einer Großzahl von Versuchsergebnissen zu bestimmen.

Für eine mit konstanter Zugspannung σ_v beanspruchte Fläche von der Größe A_i ergibt sich dann über

$$w_{A_0}(R_{(1)} > r) = 1 - w_{A_0}(R_{(1)} \leq r) = \exp(-(\sigma_v/\sigma_0)^{\bar{b}}) \quad (67)$$

$$w_{A_i}(R_{(1)} > r) = (1 - w_{A_0}(R_{(1)} \leq r))^{A_i/A_0} = \exp(-\frac{A_i}{A_0}(\frac{\sigma_v}{\sigma_0})^{\bar{b}}) = 1 - F_{A_i}(\sigma_v) \quad (68)$$

als Verteilungsfunktion des Bruchwiderstandes

$$F_{A_i}(\sigma_v) = 1 - \exp(-\frac{A_i}{A_0}(\frac{\sigma_v}{\sigma_0})^{\bar{b}}) \quad (69)$$

Besteht eine Fläche A aus m Teilflächen A_i ($i = 1 \dots m$), die jeweils mit konstanter Zugspannung σ_{vi} beansprucht sind, dann gilt [10] wegen

$$w_A(R_{(1)} > r) = \prod_{i=1}^m \exp(-\frac{A_i}{A_0}(\frac{\sigma_{vi}}{\sigma_0})^{\bar{b}}) \quad (70)$$

$$\ln(w_A(R_{(1)} > r)) = \sum_{i=1}^m (-\frac{A_i}{A_0}(\frac{\sigma_{vi}}{\sigma_0})^{\bar{b}}) \quad (71)$$

und mit $A_i \rightarrow dx \cdot dy$, $\sigma_{vi} \rightarrow \sigma(x,y)$

$$w_A(R_{(1)} > r) = \exp\left(-\frac{1}{A_0 \cdot \sigma_0^{\bar{b}}} \cdot \int_A (\sigma(x,y))^{\bar{b}} dx \cdot dy\right) \quad (72)$$

Es wurde eine Vergleichsspannung

$$\sigma_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{A} \cdot \int_A (\sigma(x,y))^{\bar{b}} dx \cdot dy\right)^{1/\bar{b}} \quad (73)$$

definiert, die konstant in der Fläche A wirkt und für die die gleichen Bruchwahrscheinlichkeiten gelten wie für den Spannungszustand $\sigma(x,y)$. Damit ergibt sich die Verteilungsfunktion für die Vergleichsbruchspannung einer mit dem Spannungszustand $\sigma(x,y)$ beanspruchten Scheibe zu

$$F_A(\sigma_{\text{eff,Bruch}}) = 1 - \exp\left(-\frac{A}{A_0} \left(\frac{\sigma_{\text{eff,Bruch}}}{\sigma_0}\right)^{\bar{b}}\right) \quad (74)$$

Auf entsprechende Weise kann auch eine wirksame Fläche

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{(\max \sigma)^{\bar{b}}} \int_A (\sigma(x,y))^{\bar{b}} dx \cdot dy \quad (75)$$

definiert werden [9], die konstant mit $\max \sigma$ als den maximalen Wert von $\sigma(x,y)$ beansprucht wird und für die die gleichen Bruchwahrscheinlichkeiten gelten wie für die mit $\sigma(x,y)$ beanspruchten Fläche A. Als Verteilungsfunktion für die maximale Spannung bei Bruch einer mit $\sigma(x,y)$ beanspruchten Scheibe gilt dann

$$F_A(\max \sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{A_{\text{eff}}}{A_0} \left(\frac{\max \sigma}{\sigma_0}\right)^{\bar{b}}\right) \quad (76)$$

Somit besteht auch die Beziehung

$$A \cdot (\sigma_{\text{eff}})^{\bar{b}} = A_{\text{eff}} \cdot (\max \sigma)^{\bar{b}} \quad (77)$$

wenn (66) zugrunde gelegt wird.

Die Beziehung zwischen p-Fraktile der Bruchspannungen von zwei Flächen A_1 und A_2 mit jeweils konstanter Biegezugbeanspruchung ergibt sich bei Zugrundelegen der Verteilungsfunktion nach Weibull (69) über

$$p = F_{A_i}(\sigma_{v_i}) = F_{A_j}(\sigma_{v_j}) \text{ d. h.}$$

$$\exp\left(-\frac{A_i}{A_0} \left(\frac{\sigma_{v_i}}{\sigma_0}\right)^{\bar{b}}\right) = \exp\left(-\frac{A_j}{A_0} \left(\frac{\sigma_{v_j}}{\sigma_0}\right)^{\bar{b}}\right)$$

zu

$$\sigma_{v_i}/\sigma_{v_j} = (A_j/A_i)^{1/\bar{b}} \quad (78)$$

Für die beiden untersuchten Arten der vierseitig aufgelagerten Floatglasscheiben, Bilder 8 und 9, wurden mit Hilfe von (64), (65) und [8, Bilder 3.1 bis 3.4] die Bruchlasten bestimmt, die einem σ_{eff} nach (73) entsprechen, das mit dem 1⁰/oo-Fraktile der Prüffestigkeit im Doppelring-Biegeversuch, also mit 24,3 N/mm², Bild 4, berechnet werden kann. Dabei ist der Einfluß der FLächengröße entsprechend (78) berücksichtigt

$$\sigma_{\text{eff}} = 24,3 \cdot \left(\frac{0,24 \text{ m}^2}{A \text{ m}^2}\right)^{1/\bar{b}} \text{ N/mm}^2$$

wobei die wirksame Fläche für den Doppelringversuch mit dem in DIN 52 292 Teil 2 festgelegten Wert von 2400 cm² angesetzt wurde.

Bei der Auswertung von Doppelring-Biegeversuchen ergaben sich nach [9] für den Parameter \bar{b} Werte um 10. Deshalb sind in der Tabelle 5 entsprechende Werte berücksichtigt.

Tabelle 5: Näherungswerte für das 1 0/00-Fraktile der Bruchlasten vierseitig aufgelagerter Scheiben aus 5,9 mm dickem Floatglas unter gleichmäßig verteilter Flächenbelastung für $E = 74000 \text{ N/mm}^2$ und mit $\sigma_{\text{Bruch},10/00} = 24,3 \text{ N/mm}^2$ für $0,24 \text{ m}^2$ wirksame Fläche

Scheiben- abmessungen m x m	λ -	\bar{b} -	σ_{eff} N/mm ²	* σ_{eff} -	p^* -	p kN/m ²
2,015 x 1,015	≈ 2	5	15,8	1,58	0,9	1,22
		10	19,6	1,96	1,1	1,49
		20	21,8	2,18	1,3	1,76
2,015 x 2,015	1	5	13,8	5,44	11,1	0,97
		10	18,3	7,22	15,4	1,34
		20	21,1	8,32	16,8	1,46

Die in Tabelle 5 angegebenen Werte für p sind mit den Werten $q_d = 1,6 \text{ kN/m}^2$ bzw. $1,1 \text{ kN/m}^2$, Tabelle 4, für die 1 0/00-Fraktilen der Scheibenbruchlasten zu vergleichen, wie sie sich aus den entsprechenden Verteilungsfunktionen ergeben, die mit Hilfe der Verteilungsfunktion für die Prüffestigkeit im Doppelring-Biegeversuch errechnet wurden. Während bei $\bar{b} = 10$ sich für die $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -Scheibe nur eine geringe Abweichung zeigt, ist bei der $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ -Scheibe der Unterschied zu beachten. Aufgrund der Versuchsergebnisse an den $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -Scheiben, Bild 9, könnte noch Unsicherheit bestehen, ob nicht die berechnete Verteilungsfunktion zu sehr auf der sicheren Seite liegt. Die Versuchsergebnisse an den $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ -Scheiben dagegen, Bild 8, lassen in dem Falle einen solchen Zweifel nicht zu. Es ist also nicht auszuschließen, daß bei Zugrundelegen der asymptotischen Extremwertverteilung vom Typ Weibull in der Form entsprechend (66) als kleine Fraktilen Bruchlasten errechnet werden, die größer sind als die für die entsprechenden Bruchwahrscheinlichkeiten zu erwartenden Bruchlasten.

Der Einfluß der Flächengröße wird mit (78) nur in erster Näherung erfaßt, weil, wie in [9] ausgeführt, "sich die Meßreihen in der Regel nur bereichsweise durch Weibull-Geraden wiedergeben lassen". Nach der hier verwendeten Modellvorstellung bestimmt sich die entsprechende Beziehung über (12)

$$r(1)p, n_1 = b \exp(\mu_X - u_{n_1} \sqrt{1-p} \cdot \sigma_X)$$

$$r(1)p, n_2 = b \exp(\mu_X - u_{n_2} \sqrt{1-p} \cdot \sigma_X)$$

zu

$$\frac{r(1)p, n_2}{r(1)p, n_1} = \exp((+u_{n_1} \sqrt{1-p} - u_{n_2} \sqrt{1-p}) \cdot \sigma_X) = \left(\frac{\exp(u_{n_1} \sqrt{1-p})}{\exp(u_{n_2} \sqrt{1-p})} \right) \sigma_X \quad (79)$$

$$\text{mit } n_1 = A_1/a \text{ und } n_2 = A_2/a = \frac{A_2}{A_1} \cdot n_1$$

$$\sigma_X = \frac{\Delta^x(1), n_1}{u_{n_1} \sqrt{0,841} - u_{n_1} \sqrt{0,5}} = \frac{\Delta^x(1), n_2}{u_{n_2} \sqrt{0,841} - u_{n_2} \sqrt{0,5}} \quad (80)$$

oder

$$\sigma_X = \sqrt{\ln(1+(\sigma_R/\mu_R)^2)} \quad (81)$$

Es besteht also nicht nur eine Abhängigkeit vom Streuungsmaß, hier vom Variationskoeffizienten $v_R = \sigma_R/\mu_R$ der Materialfestigkeit R (nicht der Prüffestigkeit $R(1)$),

und dem Flächenverhältnis, sondern auch vom Zahlenwert p der Unterschreitungswahrscheinlichkeit und von der tatsächlichen Größe einer der betrachteten Flächen oder, eindeutiger ausgedrückt, von dem Verhältnis der Größe einer der betrachteten Flächen zur Größe des Flächenelementes a , für das die Materialfestigkeit definiert ist.

Diese in [9] als "Flächenfaktor" bezeichnete Beziehung wird somit auch davon beeinflusst, ob die Luft- oder die Badseite zugbeansprucht ist.

Den folgenden Zahlenbeispielen, Tabelle 6, liegt zugrunde:

- Das Flächenverhältnis $A_1/A_2 = 1/4$, wie es in etwa auch bei den Probekörpern für den Balken- und Doppelring-Biegeversuch besteht;
- für n_1 die Zahlenwerte
 - $n_0 = 2$, das entspricht ESG, Badseite zugbeansprucht beim Balken-Biegeversuch
 - $n_0 = 10$, das entspricht ESG, Luftseite zugbeansprucht beim Balken-Biegeversuch oder Floatglas, Badseite zugbeansprucht beim Doppelring-Biegeversuch
 - $n_0 = 100$, das entspricht Floatglas, Luftseite zugbeansprucht beim Doppelring-Biegeversuch
- für σ_χ als Streuungsmaß für die Materialfestigkeit (nicht für die Prüffestigkeit)
 - $\sigma_\chi = 0,10$ nach Tabellen A4 und A5 für ESG, Bad- oder Luftseite zugbeansprucht, also $n_0 = 2$ bzw. 10 , das entspricht einem Variationsquotienten der Materialfestigkeit von $v_R = 0,10$
 - $\sigma_\chi = 0,35$ nach Tabellen A1 und A2 für Floatglas, Badseite zugbeansprucht, also $n_0 = 10$, das entspricht $v_R = 0,36$
 - $\sigma_\chi = 0,70$ nach Tabellen A1 und A2 für Floatglas, Luftseite zugbeansprucht, also $n_0 = 100$, das entspricht $v_R = 0,79$

Tabelle 6: Nach (79) berechnete Verhältnisse der p -Fraktilen nicht asymptotischer Extremwertverteilungen der Bruchwiderstände von gleichmäßig biegezugbeanspruchten Glasflächen mit den Flächengrößen $A_1 = n_1 \cdot a$ und $A_2 = n_2 \cdot a$ in Abhängigkeit von der Unterschreitungswahrscheinlichkeit p und dem Variationskoeffizienten v_R der log.-normalverteilten Materialfestigkeit. Vergleich mit den nach (78) berechneten Verhältniszahlen, die sich unter Zugrundelegen von zweiparametrischen asymptotischen Extremwertverteilungen vom Typ Weibull ergeben.

p	n ₁ n ₂	u _n $\sqrt{1-p}$	$r^{(1)p,2}/r^{(1)p,1}$		
			$v_R = 0,10$	$v_R = 0,36$	$v_R = 0,79$
0,001	2	3,290456	0,96	0,88	0,77
	8	3,662148			
0,5	2	0,544952	0,92	0,74	0,55
	8	1,385198			
0,001	10	3,718903	0,97	0,89	0,79
	40	4,055513			
0,5	10	1,498761	0,94	0,81	0,65
	40	2,115835			
0,001	100	4,264779	0,97	0,90	0,81
	400	4,564687			
0,5	100	2,462038	0,95	0,85	0,72
	400	2,923362			
$\frac{A_1}{A_2} = 0,25$		$\bar{b} =$	40	10	5
		$\sigma_{v2}/\sigma_{v1} =$	0,97	0,87	0,76

Die berechneten Werte verdeutlichen, daß der "Flächenfaktor" nicht nur stark von der Streuung der Materialfestigkeit, sondern auch beachtlich von der Größe der Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Fraktilen abhängt. Für das Verhältnis der 50 %-Fraktilen der Bruchspannungen zweier verschieden großer, gleichmäßig biegebeanspruchter Glasflächen gelten merkbar andere Werte als für das entsprechende Verhältnis bei den 1 0/00-Fraktilen. Außerdem ergeben sich bei größeren Streuungen, wie sie bei Floatglas zugrunde gelegt werden müssen, auch deutliche Unterschiede je nachdem, ob die verglichenen Flächen geringe oder größere Anzahlen von Flächenelementen enthalten. Die an den Ergebnissen der Großzahl-Versuche [1] kalibrierte Modellvorstellung bestätigt also die in [9] geäußerte experimentelle Erfahrung, daß bei Zugrundelegen einer zweiparametrischen asymptotischen Extremwertverteilung vom Typ Weibull die Abhängigkeit des Bruchwiderstandes von der Flächengröße vom Ansatz her nur näherungsweise erfaßt werden kann.

Literatur

- [1] Mellmann, G., Maultzsch, M.: Untersuchungen zur Biegefestigkeit von Flachglas.
BAM-Forschungsbericht 161, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
- [2] Brünner, W.: Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben.
BAM-Forschungsbericht 162, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
- [3] Exner, G.: Abschätzung der erlaubten Biegespannung in vorgespannten Glasbauteilen.
Glastechnische Berichte 59 (1986), S. 259/271
- [4] Normenausschuß Bauwesen im DIN, Arbeitsausschuß II 12 "Sicherheit von Bauwerken": Grundlagen für die Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, 1. Auflage 1981.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH, 1981
- [5] Mc Cormick, N.J.: Reliability and Risk Analysis.
Academic Press, New York·London·Toronto·San Francisco 1981 (s. S. 58 ff)
- [6] Stange, K., Henning, H.-J.: Graf/Henning/Stange. Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik.
2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1966
- [7] Woelk, H., Elsenheimer, K.: Biegebruchspannung von Floatglas und thermisch vorgespanntem Floatglas.
Glastechnische Berichte 52 (1979), Nr. 1, S. 14/24
- [8] Barth, H., Kuns, J., Willms, W.: Spannungs- und Verformungsanalyse für rechteckige Glasplatten bei großen Durchbiegungen.
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 5704. Institut für Technische Mechanik der RWTH Aachen (Direktor: Prof. Dr. rer.nat. Georg Rieder), Aachen, April 1986
- [9] Blank, K.: Zur Frage der Flächenabhängigkeit der Glasfestigkeit.
Anwendung des Abschlußberichtes zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 5704.
Aachen, Haselsteig 13, 16.6.1986.
- [10] Hinweise von Blank, K. vom 30.1.1989

Auswertung der Prüffestigkeitsversuche nach den Abschnitten 3.2 und 4.1

Tabelle A1: Auswertung der Prüffestigkeitsversuche nach den Abschnitten 3.2 und 4.1. Doppelring 600 (D); Floatglas (F); Glasdicke 6 mm (06); Luft (L)- oder Bad (B)-Seite zugbeansprucht; Hersteller A (A) oder B (B); $n_0 = 1 (0), 2 (Z), 10 (1), 100 (2), 1000 (3), 10\ 000 (4)$

IDENT	NV	A	EXP(A)	B	EXP(B)	X1P	EXP(X1P)	R**2	MX	EXP(MX)	SX	VR
DF06LA0	29	4.445059	85.2	0.231859	1.261	3.728472	41.6	0.870	4.445059	85.2	0.231866	0.24
DF06LA1	29	4.459535	86.4	0.251067	1.285	3.558287	35.1	0.910	5.068102	158.9	0.405964	0.42
DF06LA2	29	4.467930	87.2	0.260356	1.297	3.452812	31.6	0.927	5.855042	349.0	0.563303	0.61
DF06LA3	29	4.472143	87.5	0.264268	1.302	3.394787	29.8	0.935	6.690942	805.1	0.693841	0.79
DF06LA4	29	4.474435	87.7	0.265874	1.305	3.383472	29.5	0.938	7.541043	1883.8	0.804744	0.95
DF06BA0	29	4.179626	65.3	0.221712	1.248	3.494399	32.9	0.964	4.179626	65.3	0.221719	0.22
DF06BA1	29	4.193264	66.2	0.236534	1.267	3.344187	28.3	0.979	4.766603	117.5	0.382464	0.40
DF06BA2	29	4.200997	66.8	0.243277	1.275	3.252471	25.9	0.982	5.497114	244.0	0.526350	0.57
DF06BA3	29	4.204831	67.0	0.245939	1.279	3.202197	24.6	0.981	6.269742	528.3	0.645718	0.72
DF06BA4	29	4.206907	67.1	0.246911	1.280	3.193755	24.4	0.981	7.054795	1158.4	0.747347	0.86
DF06LB0	28	4.268765	71.4	0.317562	1.374	3.287303	26.8	0.903	4.268765	71.4	0.317571	0.33
DF06LB1	28	4.288505	72.9	0.343507	1.410	3.055430	21.2	0.942	5.121138	167.5	0.555435	0.60
DF06LB2	28	4.299939	73.7	0.356085	1.428	2.911579	18.4	0.959	6.197068	491.3	0.770420	0.90
DF06LB3	28	4.305661	74.1	0.361456	1.435	2.832091	17.0	0.967	7.340460	1541.4	0.949012	1.21
DF06LB4	28	4.308722	74.3	0.363999	1.439	2.815120	16.7	0.970	8.507113	4949.9	1.101748	1.54
DF06BB0	28	4.245963	69.8	0.177201	1.194	3.698303	40.4	0.975	4.245963	69.8	0.177206	0.18
DF06BB1	28	4.256686	70.6	0.186600	1.205	3.586855	36.1	0.964	4.708988	110.9	0.301723	0.31
DF06BB2	28	4.262637	71.0	0.190472	1.210	3.519995	33.8	0.952	5.277423	195.9	0.412102	0.43
DF06BB3	28	4.265543	71.2	0.191825	1.211	3.483520	32.6	0.944	5.876111	356.4	0.503641	0.54
DF06BB4	28	4.267077	71.3	0.192350	1.212	3.477806	32.4	0.939	6.485652	655.7	0.582202	0.64

$$\begin{aligned}
 NV &= m_{\alpha} & A &= \hat{x}(1)_{0,5} & B &= \Delta \hat{x}(1) & X1P &= \hat{x}(1)_{0,001} & R &= & MX &= \hat{\mu}_X & SX &= \hat{\sigma}_X \\
 \exp(A) &= \hat{f}(1)_{0,5} & \exp(B) &= \frac{\hat{f}(1)_{0,5}}{\hat{F}(1)_{0,159}} & \exp(X1P) &= \hat{f}(1)_{0,001} & \text{Korre-} & & \text{lations-} & \exp(MX) &= \hat{f}_{0,5} & VR &= \frac{\hat{\sigma}_R / \hat{\mu}_R}{(\sqrt{\exp(\hat{\sigma}_X^2) - 1})} \\
 & & & & & & \text{zahl} & & \text{zahl} & & & & &
 \end{aligned}$$

Tabelle A2: Auswertung der Prüffestigkeitsversuche nach den Abschnitten 3.2 und 4.1. Doppelring 600 (D); Floatglas (F); Glasdicke 10 mm (10); Luft (L)- oder Bad (B)-Seite zugbeansprucht; Hersteller A (A) oder B (B); $n_0 = 1 (0), 2 (Z), 10 (1), 100 (2), 1000 (3), 10\ 000 (4)$

IDENT	NV	A	EXP(A)	B	EXP(B)	X1P	EXP(X1P)	R**2	MX	EXP(MX)	SX	VR
DF10LA0	29	4.625221	102.0	0.298205	1.347	3.703582	40.6	0.874	4.625221	102.0	0.298214	0.30
DF10LA1	29	4.643845	103.9	0.323007	1.381	3.484357	32.6	0.915	5.426788	227.4	0.522288	0.56
DF10LA2	29	4.654655	105.1	0.335066	1.398	3.348248	28.5	0.933	6.439800	626.3	0.724944	0.83
DF10LA3	29	4.660086	105.6	0.340192	1.405	3.273206	26.4	0.941	7.516345	1837.8	0.893181	1.10
DF10LA4	29	4.663046	106.0	0.342337	1.408	3.258330	26.0	0.945	8.611586	5495.0	1.036182	1.39
DF10BA0	30	4.022081	55.8	0.146067	1.157	3.570645	35.5	0.980	4.022081	55.8	0.146071	0.15
DF10BA1	30	4.031044	56.3	0.154959	1.168	3.474792	32.3	0.984	4.406652	82.0	0.250562	0.25
DF10BA2	30	4.036082	56.6	0.158880	1.172	3.416615	30.5	0.981	4.882555	132.0	0.343751	0.35
DF10BA3	30	4.038568	56.7	0.160387	1.174	3.384710	29.5	0.978	5.385182	218.1	0.421100	0.44
DF10BA4	30	4.039897	56.8	0.160993	1.175	3.379294	29.4	0.976	5.896799	363.9	0.487291	0.52
DF10LB0	28	4.503144	90.3	0.310791	1.365	3.542608	34.6	0.924	4.503144	90.3	0.310800	0.32
DF10LB1	28	4.522375	92.1	0.334657	1.397	3.321067	27.7	0.956	5.333557	207.2	0.541125	0.58
DF10LB2	28	4.533441	93.1	0.346080	1.414	3.184091	24.1	0.969	6.377265	588.3	0.748773	0.87
DF10LB3	28	4.538964	93.6	0.350916	1.420	3.108365	22.4	0.974	7.485264	1781.6	0.921338	1.16
DF10LB4	28	4.541914	93.9	0.353195	1.424	3.092644	22.0	0.976	8.615692	5517.6	1.069047	1.46
DF10BB0	26	4.005023	54.9	0.229705	1.258	3.295091	27.0	0.935	4.005023	54.9	0.229712	0.23
DF10BB1	26	4.019072	55.6	0.246299	1.279	3.134942	23.0	0.958	4.616081	101.1	0.398254	0.41
DF10BB2	26	4.027106	56.1	0.254137	1.289	3.036238	20.8	0.966	5.381081	217.3	0.549846	0.59
DF10BB3	26	4.031106	56.3	0.257407	1.294	2.981718	19.7	0.969	6.192306	489.0	0.675829	0.76
DF10BB4	26	4.033283	56.4	0.258809	1.295	2.971309	19.5	0.970	7.018403	1117.0	0.783360	0.92

$$\begin{aligned}
 NV &= m_{\alpha} & A &= \hat{x}(1)_{0,5} & B &= \Delta \hat{x}(1) & X1P &= \hat{x}(1)_{0,001} & R &= & MX &= \hat{\mu}_X & SX &= \hat{\sigma}_X \\
 \exp(A) &= \hat{f}(1)_{0,5} & \exp(B) &= \frac{\hat{f}(1)_{0,5}}{\hat{F}(1)_{0,159}} & \exp(X1P) &= \hat{f}(1)_{0,001} & \text{Korre-} & & \text{lations-} & \exp(MX) &= \hat{f}_{0,5} & VR &= \frac{\hat{\sigma}_R / \hat{\mu}_R}{(\sqrt{\exp(\hat{\sigma}_X^2) - 1})} \\
 & & & & & & \text{zahl} & & \text{zahl} & & & & &
 \end{aligned}$$

Tabelle A7: Auswertung der Prüffestigkeitsversuche nach den Abschnitten 3.2 und 4.1. Doppelring 100 (K); Floatglas (F); Glasdicke 10 mm (10); Luft (L)- oder Bad (B)-Seite zugbeansprucht; Hersteller A (A) oder B (B); n₀ = 1 (0), 2 (Z), 10 (1), 100 (2), 1000 (3), 10 000 (4)

IDENT	NV	A	EXP(A)	B	EXP(B)	X1P	EXP(X1P)	R**2	MX	EXP(MX)	SX	VR
KF10LA0	31	4.698042	109.7	0.319596	1.377	3.710293	40.9	0.961	4.698042	109.7	0.319606	0.33
KF10LA1	31	4.717689	111.9	0.338680	1.403	3.501942	33.2	0.963	5.538622	254.3	0.547630	0.59
KF10LA2	31	4.728704	113.1	0.346889	1.415	3.376199	29.3	0.958	6.576840	718.3	0.750524	0.87
KF10LA3	31	4.734125	113.8	0.349884	1.419	3.307733	27.3	0.954	7.671759	2146.9	0.918628	1.15
KF10LA4	31	4.737048	114.1	0.351002	1.420	3.296778	27.0	0.951	8.785527	6538.9	1.062408	1.45
KF10BA0	30	4.448868	85.5	0.337386	1.401	3.406135	30.1	0.970	4.448868	85.5	0.337397	0.35
KF10BA1	30	4.469636	87.3	0.359084	1.432	3.180646	24.1	0.980	5.340026	208.5	0.580622	0.63
KF10BA2	30	4.481364	88.4	0.368752	1.446	3.043615	21.0	0.980	6.445982	630.2	0.797827	0.94
KF10BA3	30	4.487158	88.9	0.372476	1.451	2.968663	19.5	0.979	7.614479	2027.3	0.977944	1.27
KF10BA4	30	4.490253	89.1	0.373959	1.453	2.955782	19.2	0.977	8.803523	6657.7	1.131895	1.61
KF10LB0	35	4.976934	145.0	0.339951	1.405	3.926275	50.7	0.854	4.976934	145.0	0.339961	0.35
KF10LB1	35	4.998607	148.2	0.369776	1.447	3.671234	39.3	0.902	5.894915	363.2	0.597911	0.66
KF10LB2	35	5.011268	150.1	0.384385	1.469	3.512568	33.5	0.925	7.059171	1163.5	0.831649	1.00
KF10LB3	35	5.017639	151.1	0.390676	1.478	3.424946	30.7	0.936	8.297768	4014.9	1.025729	1.37
KF10LB4	35	5.021031	151.6	0.393828	1.483	3.405030	30.1	0.941	9.563477	*****	1.192035	1.77
KF10BB0	35	4.623233	101.8	0.265853	1.305	3.801582	44.8	0.955	4.623233	101.8	0.265861	0.27
KF10BB1	35	4.639913	103.5	0.284580	1.329	3.618365	37.3	0.977	5.329712	206.4	0.460153	0.49
KF10BB2	35	4.649417	104.5	0.293142	1.341	3.506470	33.3	0.984	6.211201	498.3	0.634237	0.70
KF10BB3	35	4.654131	105.0	0.296556	1.345	3.445145	31.3	0.986	7.144023	1266.5	0.778614	0.91
KF10BB4	35	4.656629	105.3	0.298244	1.347	3.432839	31.0	0.986	8.096601	3283.3	0.902723	1.12

$NV = m_{\alpha}$ $A = \hat{x}(1)_{0,5}$ $B = \hat{\Delta x}(1)$ $X1P = \hat{x}(1)_{0,001}$ $R =$ $MX = \hat{\mu}_X$ $SX = \hat{\sigma}_X$
 $\exp(A) = \hat{F}(1)_{0,5}$ $\exp(B) = \frac{\hat{F}(1)_{0,5}}{\hat{F}(1)_{0,159}}$ $\exp(X1P) = \hat{F}(1)_{0,001}$ Korrektionszahl $\exp(MX) = \hat{F}_{0,5}$ $VR = \frac{\hat{\sigma}_R / \hat{\mu}_R}{(\sqrt{\exp(\hat{\sigma}_X^2) - 1})}$

Tabelle A8: Zusammenfassende Auswertung aller Einzelergebnisse der Doppelring-Biegeversuche an Floatglas (F) nach den Abschnitten 3.2 und 4.1, nur noch gegliedert entsprechend dem Lastringdurchmesser 600 mm (D) oder 100 mm (K) und danach, ob Zugbeanspruchung auf der Luft- (L) oder der Bad (B)-Seite. Glasdicke 6 mm und 10 mm (SS), Hersteller A und B (S)

IDENT	NV	A	EXP(A)	B	EXP(B)	X1P	EXP(X1P)	R**2	MX	EXP(MX)	SX	VR
KFSSLS0	128	4.904223	134.9	0.382641	1.466	3.721624	41.3	0.970	4.904223	134.9	0.382653	0.40
KFSSLS1	128	4.929673	138.3	0.407297	1.503	3.467612	32.1	0.986	5.916929	371.3	0.658581	0.74
KFSSLS2	128	4.944015	140.3	0.417429	1.518	3.316478	27.6	0.988	7.167969	1297.2	0.903143	1.12
KFSSLS3	128	4.951053	141.3	0.420905	1.523	3.235126	25.4	0.987	8.484982	4841.5	1.105095	1.55
KFSSLS4	128	4.954876	141.9	0.421694	1.525	3.224531	25.1	0.985	9.818731	*****	1.276380	2.02
KFSSBS0	126	4.544562	94.1	0.300128	1.350	3.616981	37.2	0.986	4.544562	94.1	0.300137	0.31
KFSSBS1	126	4.564400	96.0	0.317635	1.374	3.424198	30.7	0.991	5.334321	207.3	0.513601	0.55
KFSSBS2	126	4.575478	97.1	0.324476	1.383	3.310360	27.4	0.987	6.304204	546.9	0.702032	0.80
KFSSBS3	126	4.580899	97.6	0.326565	1.386	3.249573	25.8	0.982	7.322749	1514.4	0.857404	1.04
KFSSBS4	126	4.583835	97.9	0.326859	1.387	3.242630	25.6	0.979	8.353849	4246.5	0.989333	1.29
DFSSLS0	114	4.461856	86.6	0.314524	1.370	3.489781	32.8	0.949	4.461856	86.6	0.314534	0.32
DFSSLS1	114	4.482849	88.5	0.337102	1.401	3.272765	26.4	0.977	5.299958	200.3	0.545079	0.59
DFSSLS2	114	4.494814	89.6	0.346932	1.415	3.142141	23.2	0.987	6.343179	568.6	0.750617	0.87
DFSSLS3	114	4.500742	90.1	0.350560	1.420	3.071593	21.6	0.990	7.444055	1709.7	0.920403	1.15
DFSSLS4	114	4.503993	90.4	0.351615	1.421	3.061205	21.4	0.991	8.559548	5216.3	1.064265	1.45
DFSSBS0	113	4.114063	61.2	0.216235	1.241	3.445763	31.4	0.986	4.114063	61.2	0.216242	0.22
DFSSBS1	113	4.128311	62.1	0.228847	1.257	3.306826	27.3	0.991	4.683018	108.1	0.370035	0.38
DFSSBS2	113	4.136274	62.6	0.233859	1.263	3.224468	25.1	0.987	5.382215	217.5	0.505974	0.54
DFSSBS3	113	4.140175	62.8	0.235481	1.266	3.180174	24.1	0.983	6.117285	453.6	0.618262	0.68
DFSSBS4	113	4.142311	62.9	0.235665	1.266	3.175302	23.9	0.980	6.860493	953.8	0.713310	0.81

$NV = m_{\alpha}$ $A = \hat{x}(1)_{0,5}$ $B = \hat{x}(1)$ $X1P = \hat{x}(1)_{0,001}$ $R =$ $MX = \hat{\mu}_X$ $SX = \hat{\sigma}_X$
 $\exp(A) = \hat{F}(1)_{0,5}$ $\exp(B) = \frac{\hat{F}(1)_{0,5}}{\hat{F}(1)_{0,159}}$ $\exp(X1P) = \hat{F}(1)_{0,001}$ Korrektionszahl $\exp(MX) = \hat{F}_{0,5}$ $VR = \frac{\hat{\sigma}_R / \hat{\mu}_R}{(\sqrt{\exp(\hat{\sigma}_X^2) - 1})}$

Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1, Floatglas, Doppelring 600

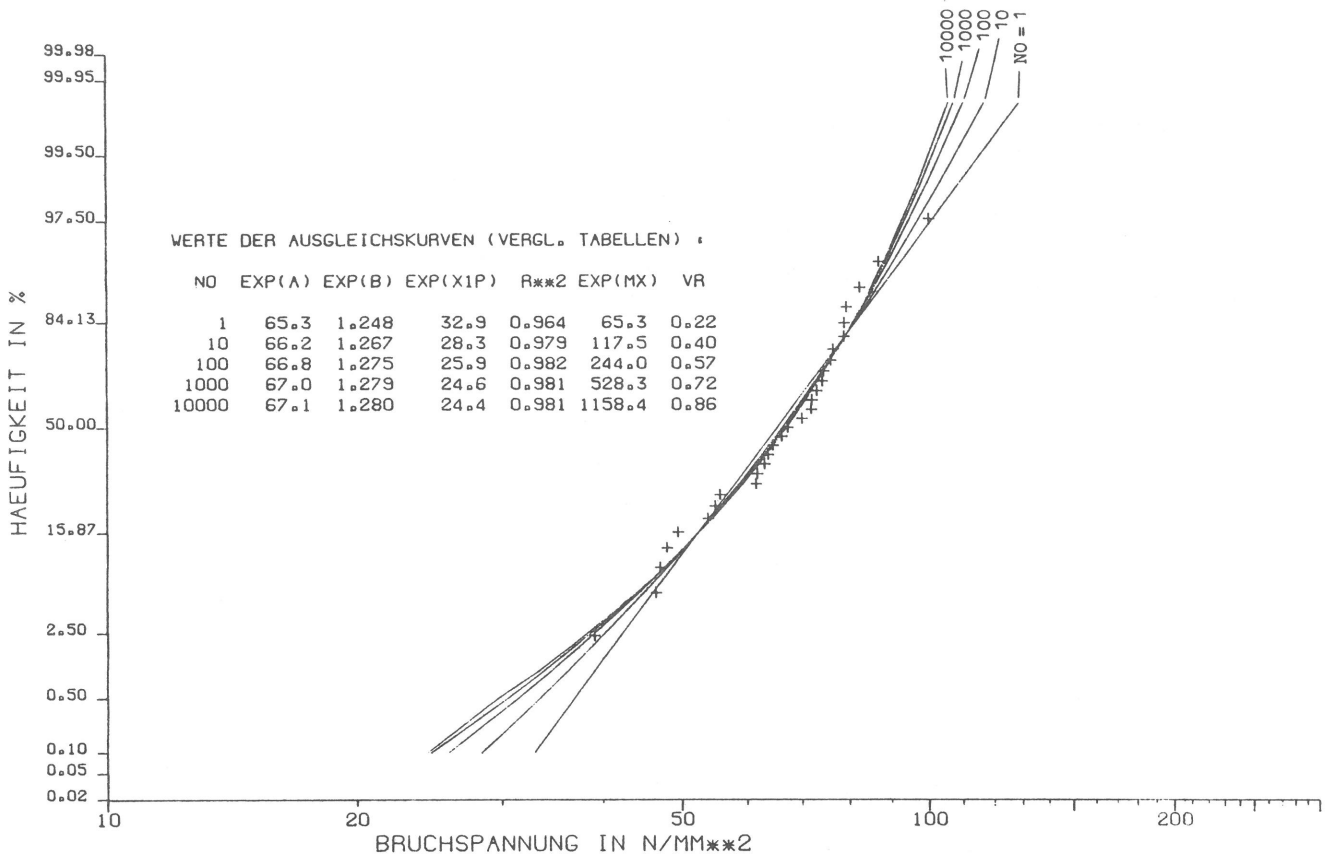


Bild A9: Float / A / Doppelring 600 / 6 / Bad: 29; 10⁰ bis 10⁴
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

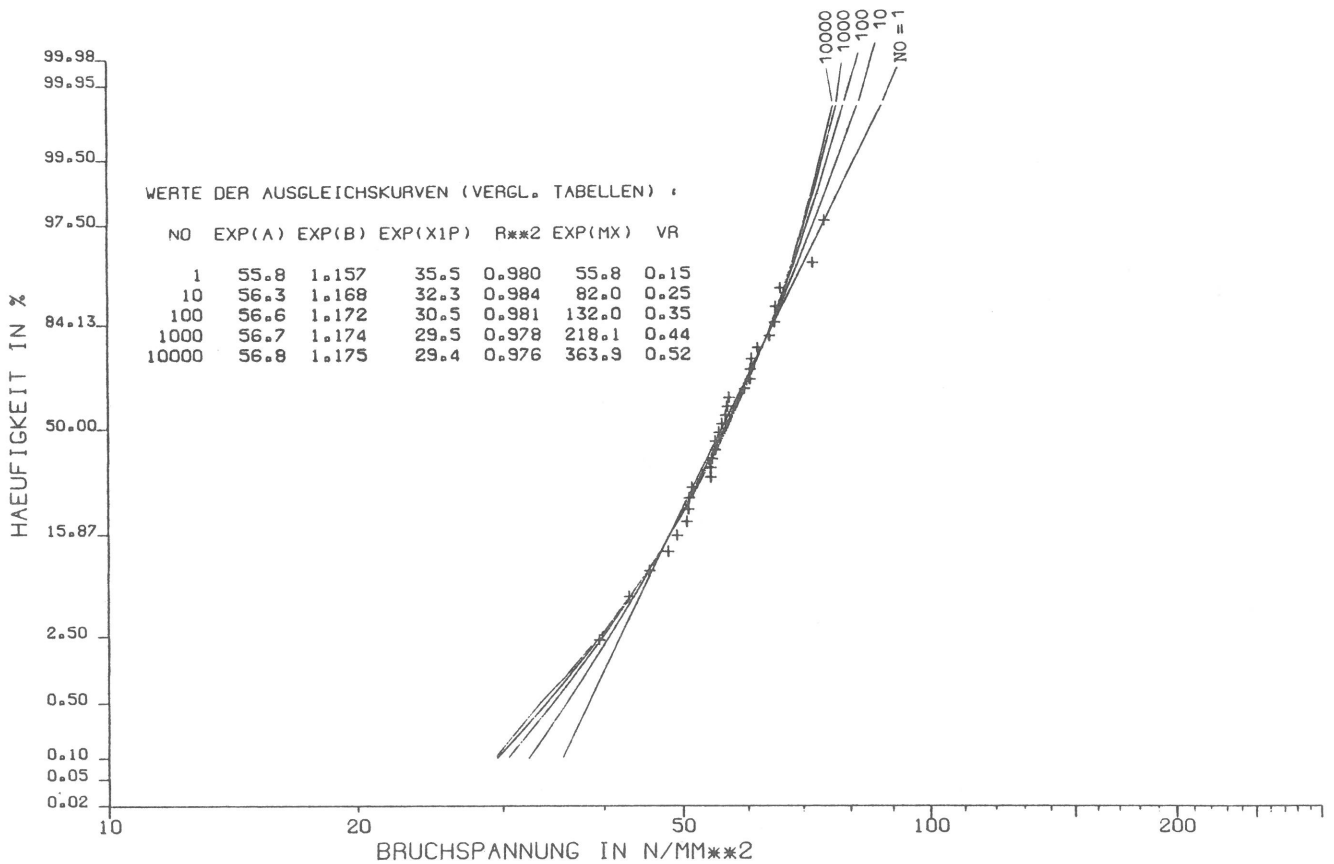


Bild A10: Float / A / Doppelring 600 / 10 / Bad: 30; 10⁰ bis 10⁴
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

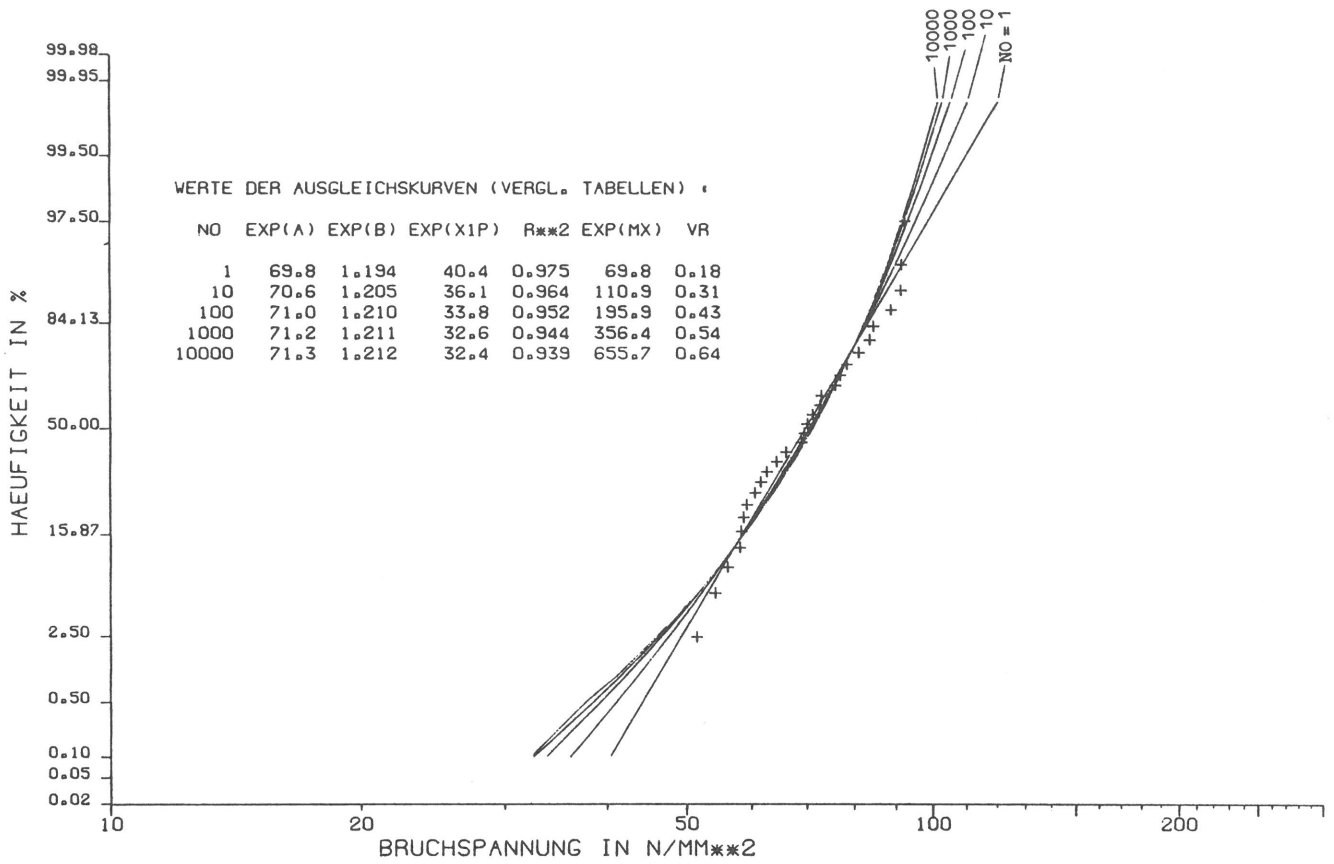


Bild A11: Float / B / Doppelring 600 / 6 / Bad: 28; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

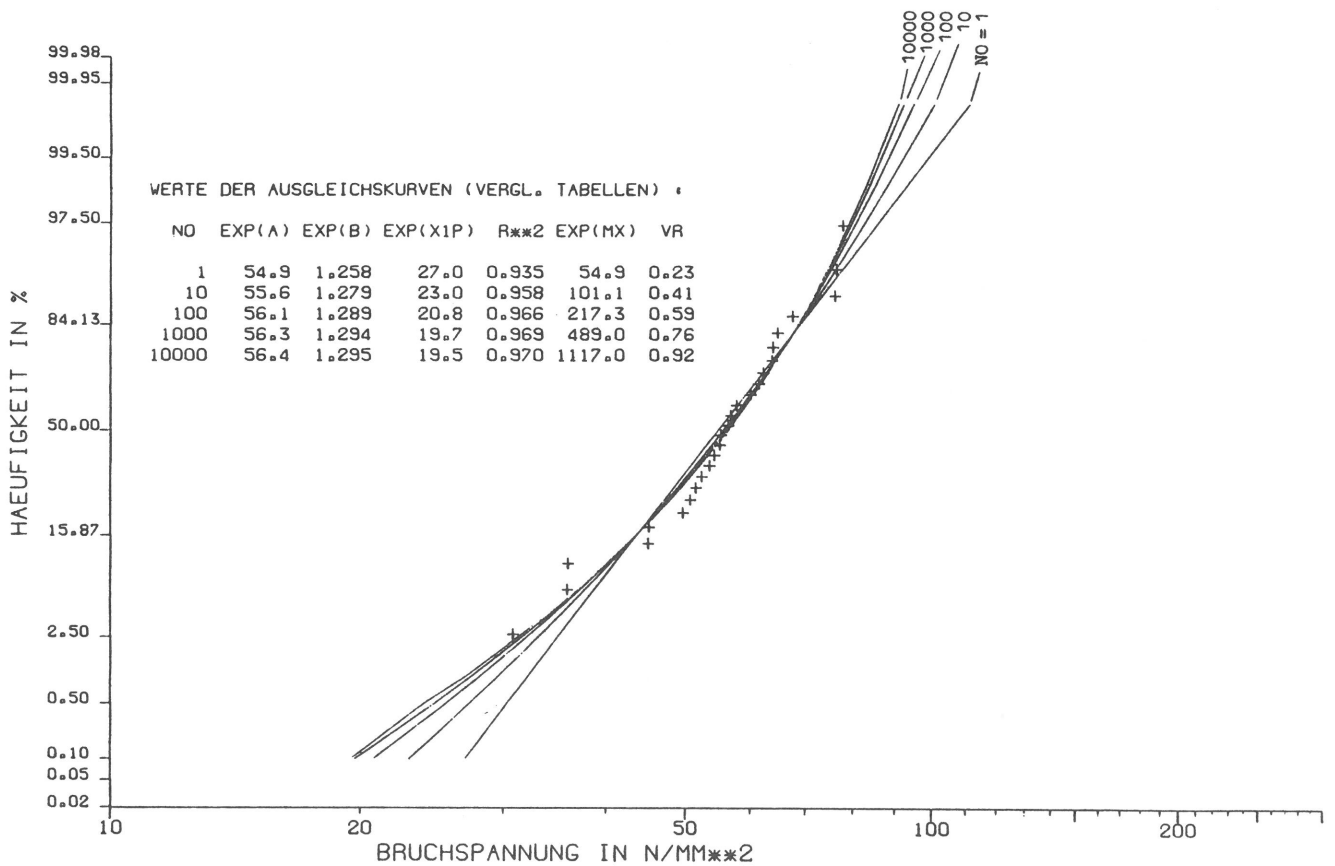


Bild A12: Float / B / Doppelring 600 / 10 / Bad: 26; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

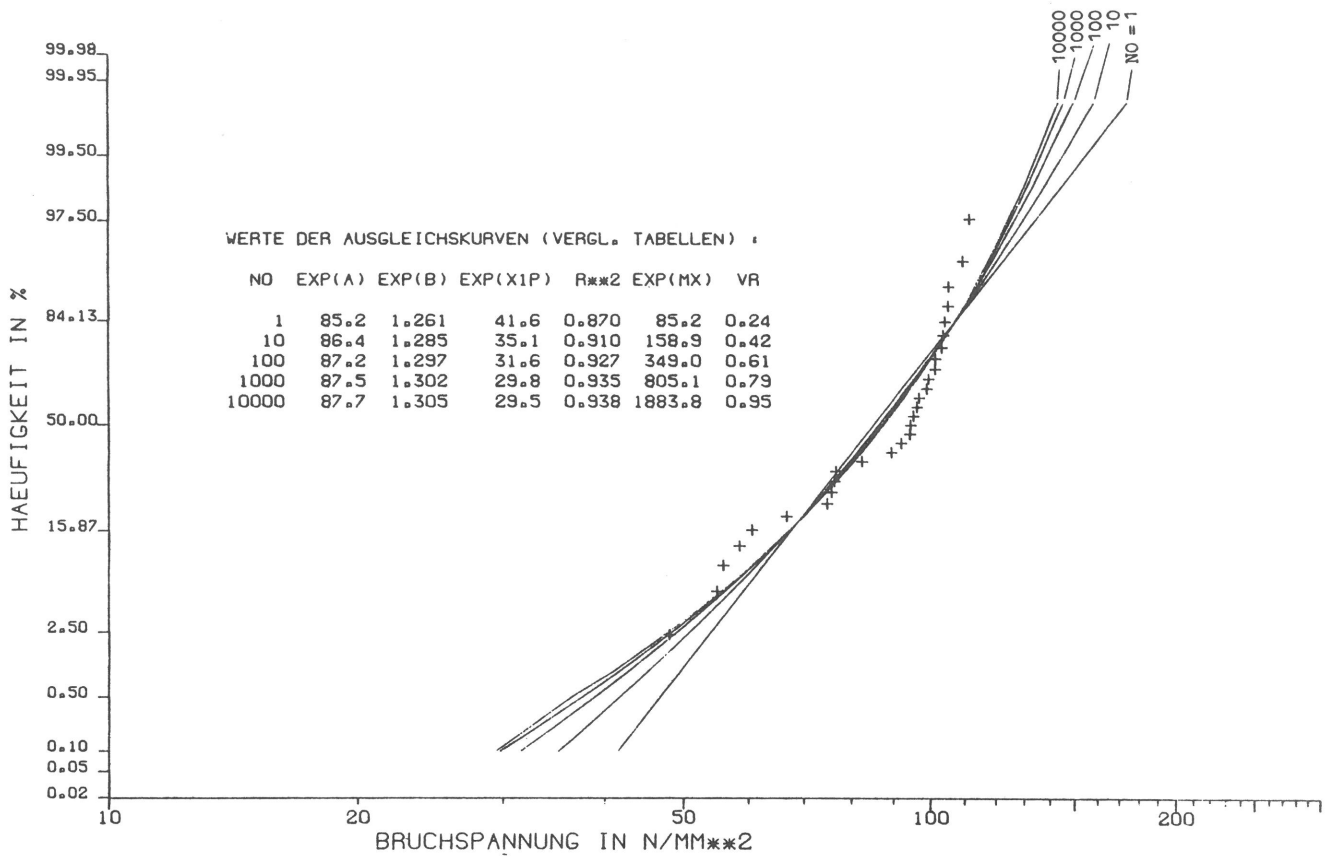


Bild A13: Float / A / Doppelring 600 / 6 / Luft: 29; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

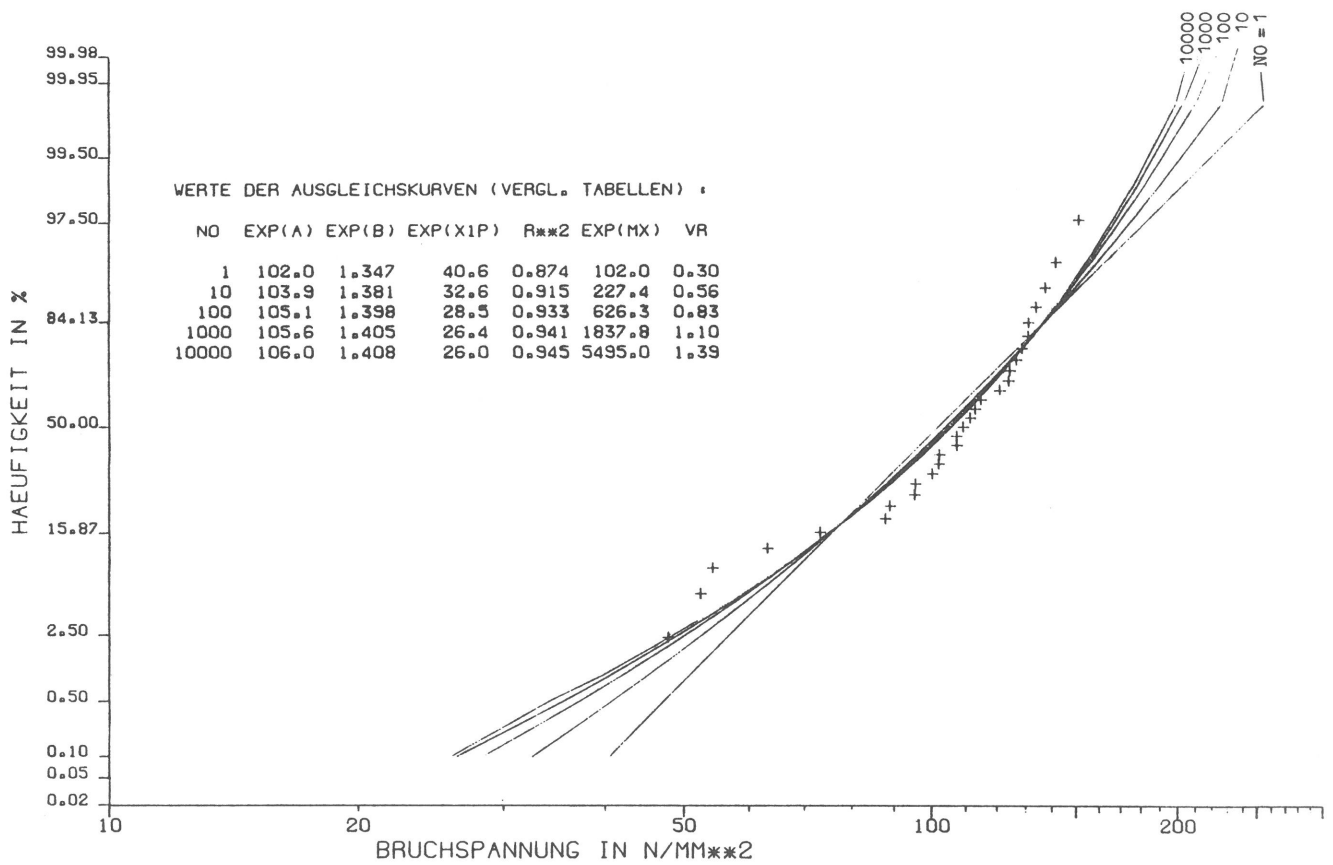


Bild A14: Float / A / Doppelring 600 / 10 / Luft: 29; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

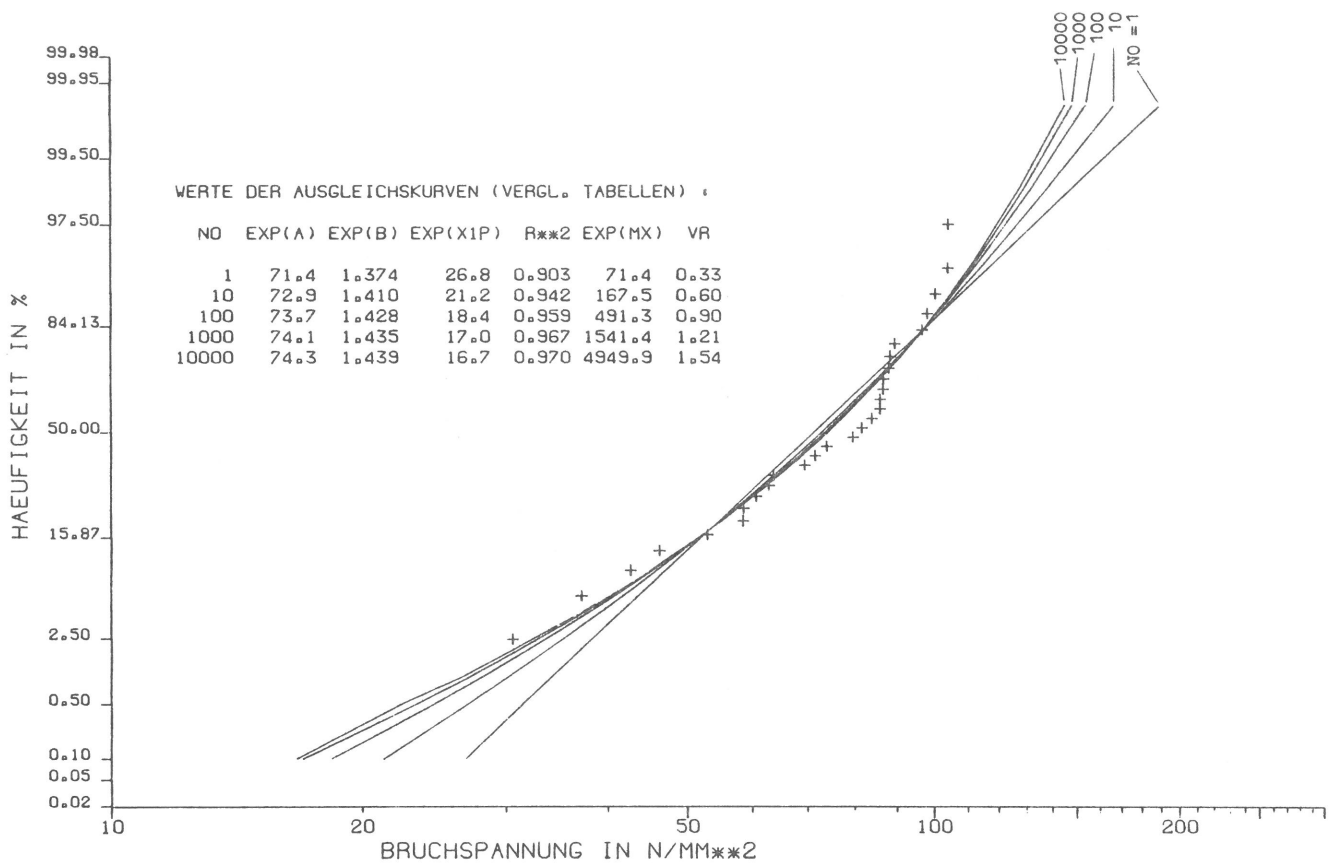


Bild A15: Float / B / Doppelring 600 / 6 / Luft: 28; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

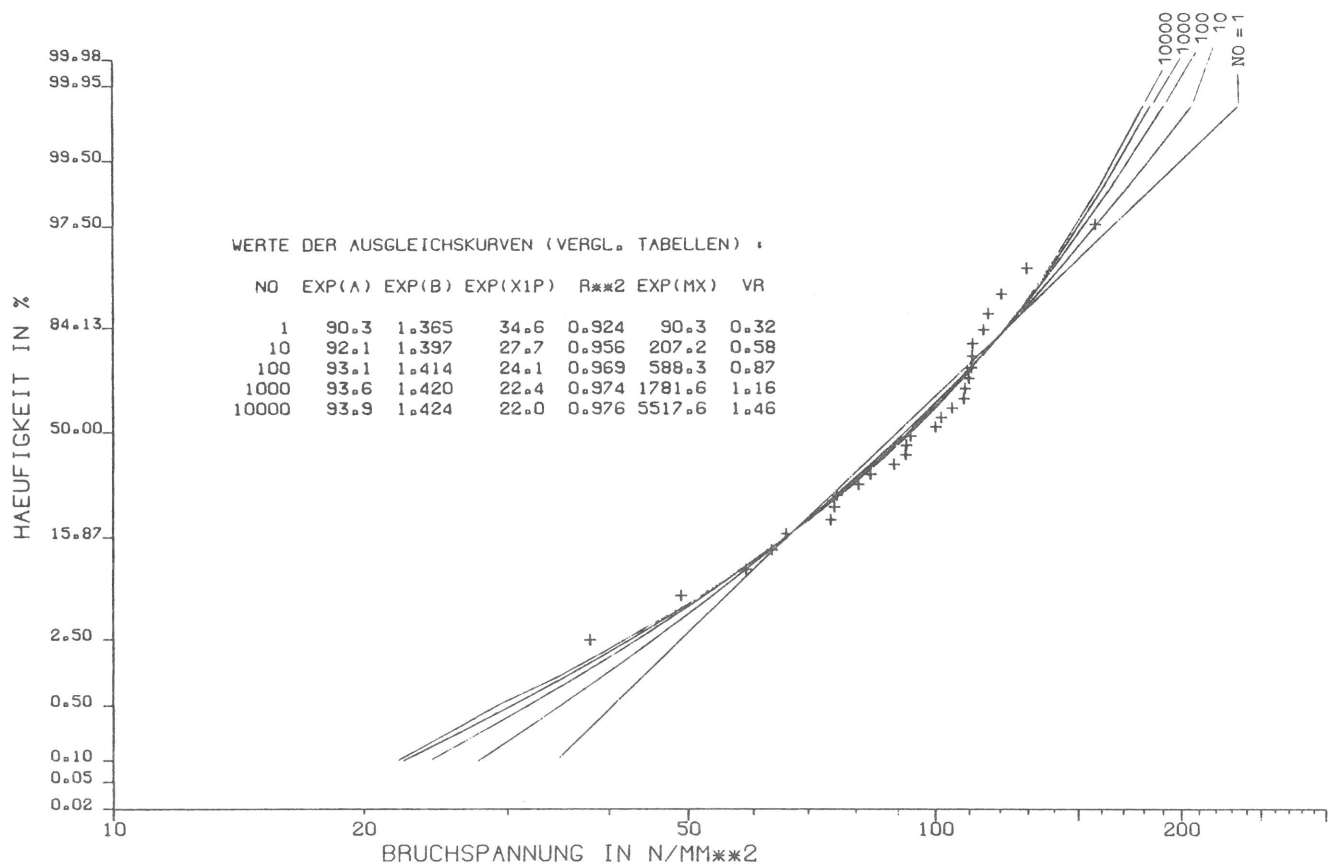


Bild A16: Float / B / Doppelring 600 / 10 / Luft: 28; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

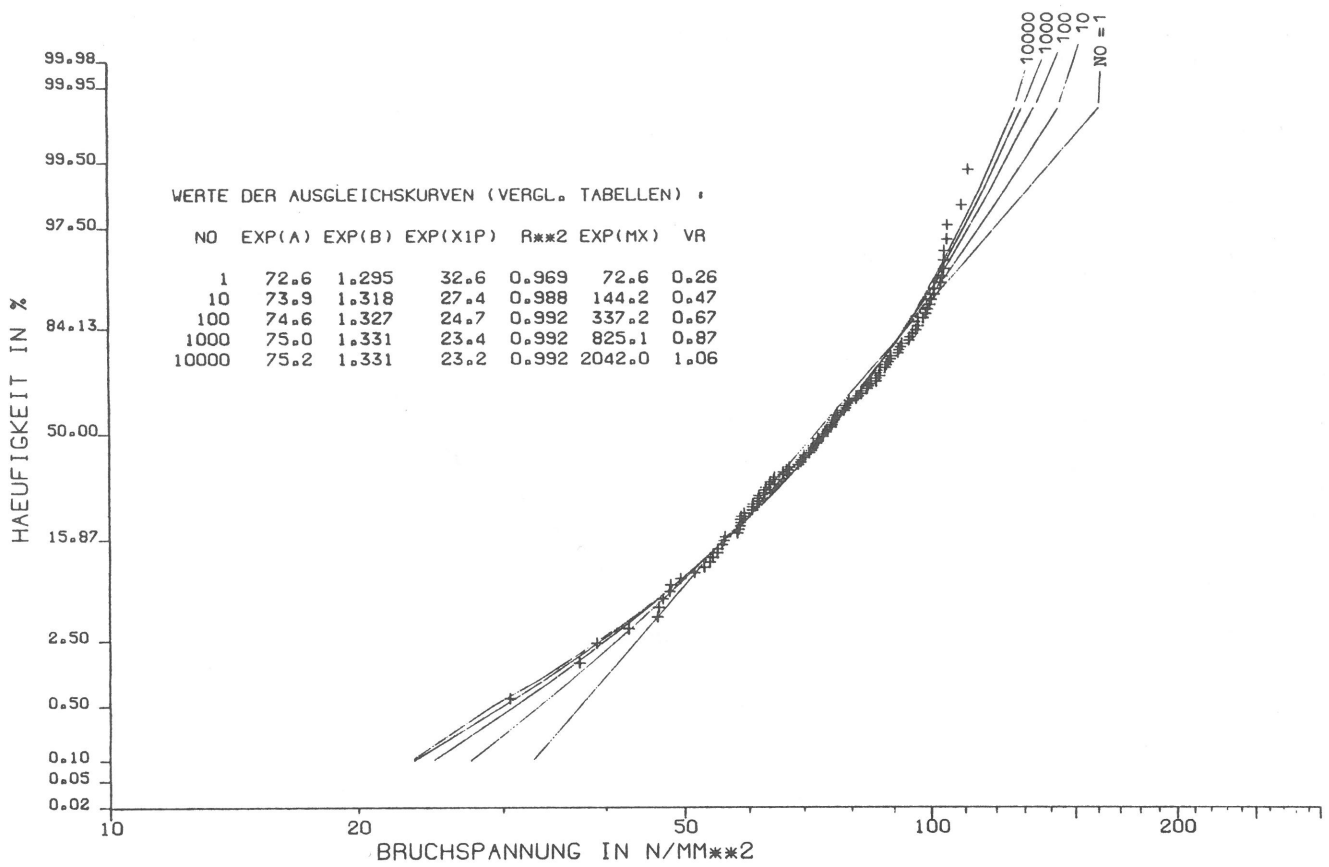


Bild A17: Float / A u. B / Doppelring 600 / 6 / Bad: 57; 10^0 bis 10^4 / Luft: 57; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 6 mm dicken Scheiben ermittelten Einzelergebnisse

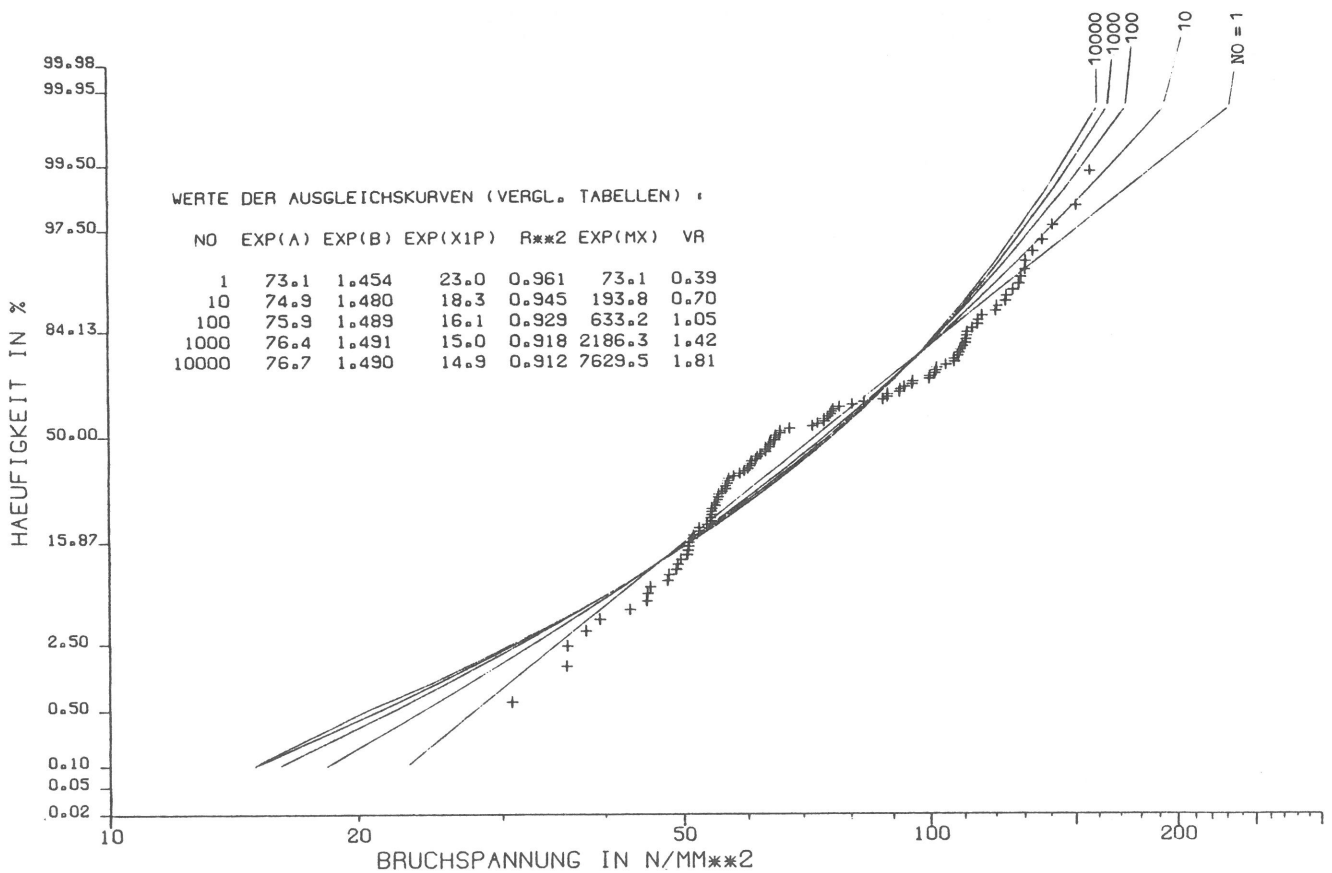


Bild A18: Float / A u. B / Doppelring 600 / 10 / Bad: 56; 10^0 bis 10^4 / Luft: 57; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 10 mm dicken Scheiben ermittelten Einzelergebnisse

Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichkurven, Luft- und Badseite nach Bild 1 zusammengefaßt, Mischverteilung aus Produktionslosen zugrunde gelegt

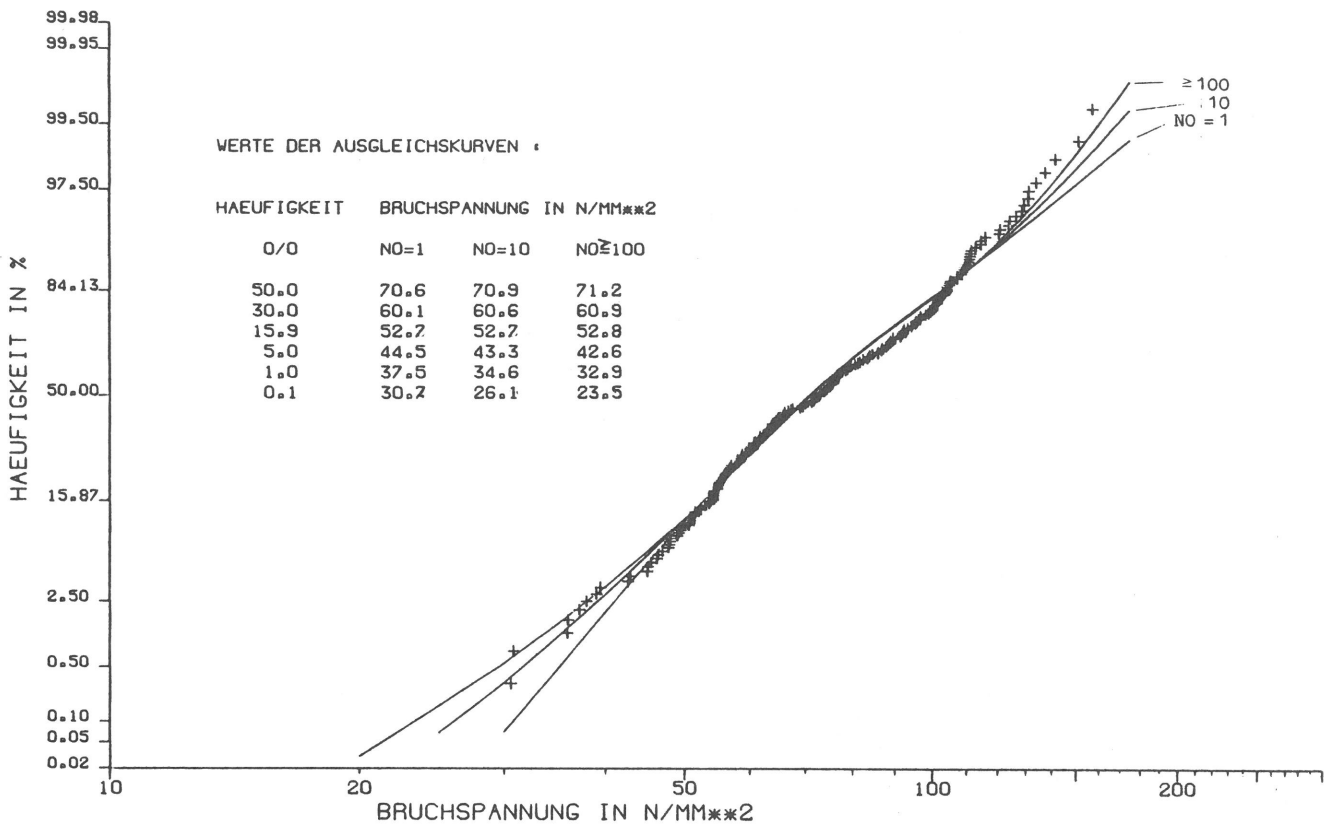


Bild A19: Float / A u. B. / Doppelring 600 / 6 u. 10 / Bad: 113; 10⁰ bis 10⁴ / Luft: 114; 10⁰ bis 10⁴
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichkurven, Bad- und Luftseite nach Bild 1 und mit gleicher Anzahl der Materialelemente für jede Seite nach Abschnitt 4.3 zusammengefaßt. Den Ausgleichkurven wurde eine Mischverteilung, die sich aus Produktionslosen zusammensetzt, zugrunde gelegt.

Zum Vergleich von Doppelring- und Balkenbiegeversuchen an ESG

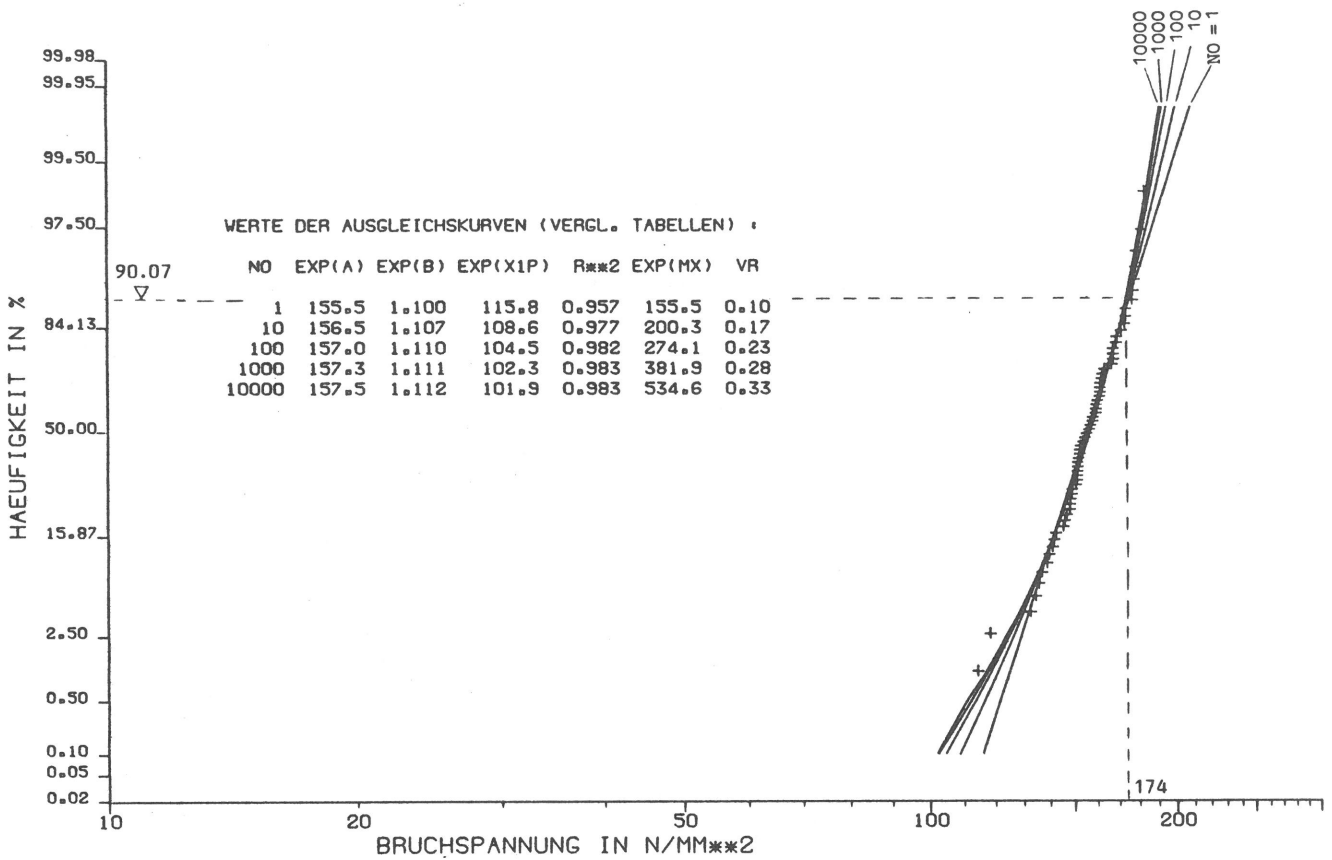


Bild A20: ESG / A / Doppelring 600 / 6 / Bad: 31; 10^0 bis 10^4 / Luft: 33; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 6 mm dicken Scheiben des Herstellers A ermittelten Einzelergebnisse zum Vergleich mit Balken-Biegeversuchen

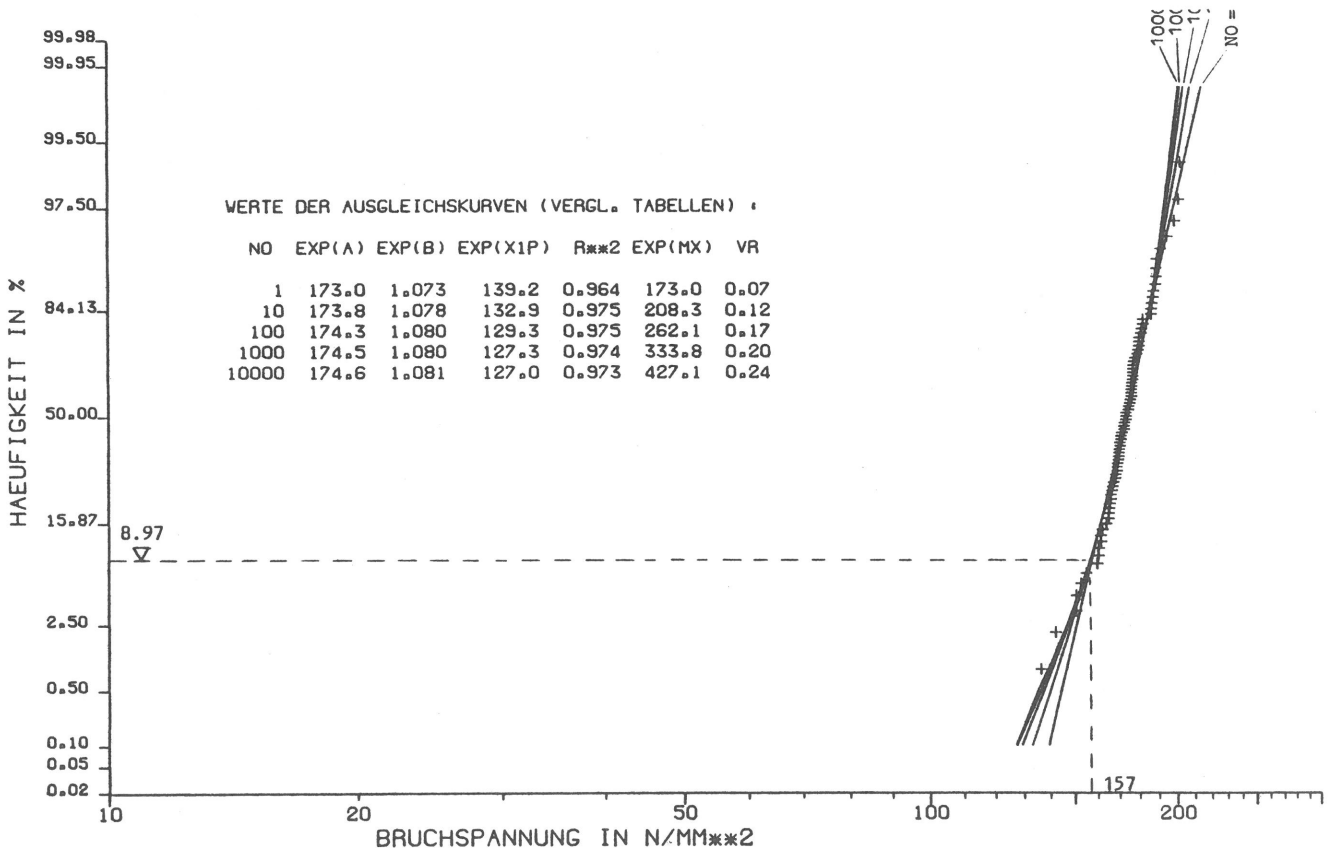


Bild A21: ESG / A / Balken / 6 / Bad: 41; 10^0 bis 10^4 / Luft: 40; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 6 mm dicken Scheiben des Herstellers A ermittelten Einzelergebnisse zum Vergleich mit Doppelring-Biegeversuchen

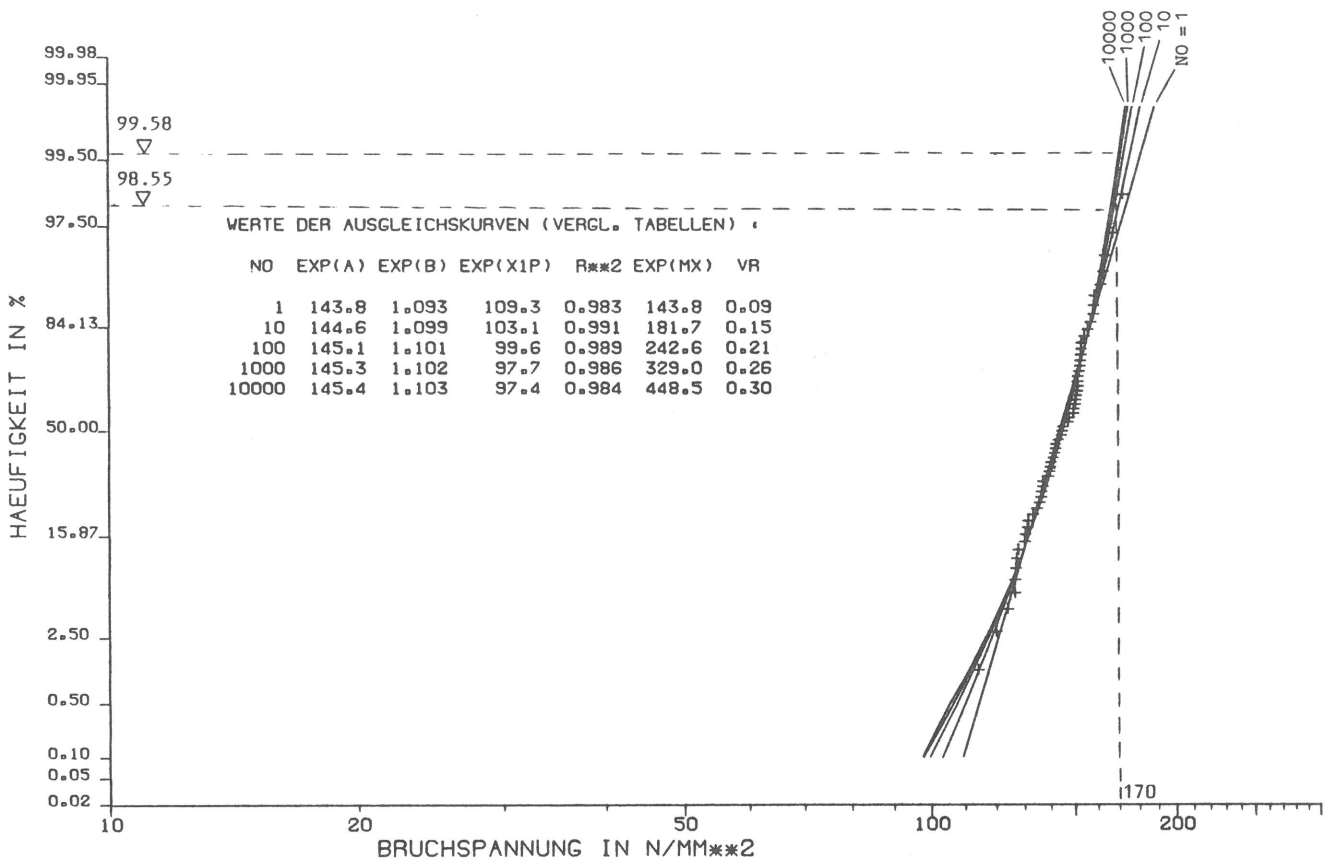


Bild A22: ESG / B / Doppelring 600 / 6 / Bad: 29; 10^0 bis 10^4 / Luft: 30; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 6 mm
 dicken Scheiben des Herstellers B ermittelten Einzelergebnisse zum Vergleich mit Balken-Biegeversuchen

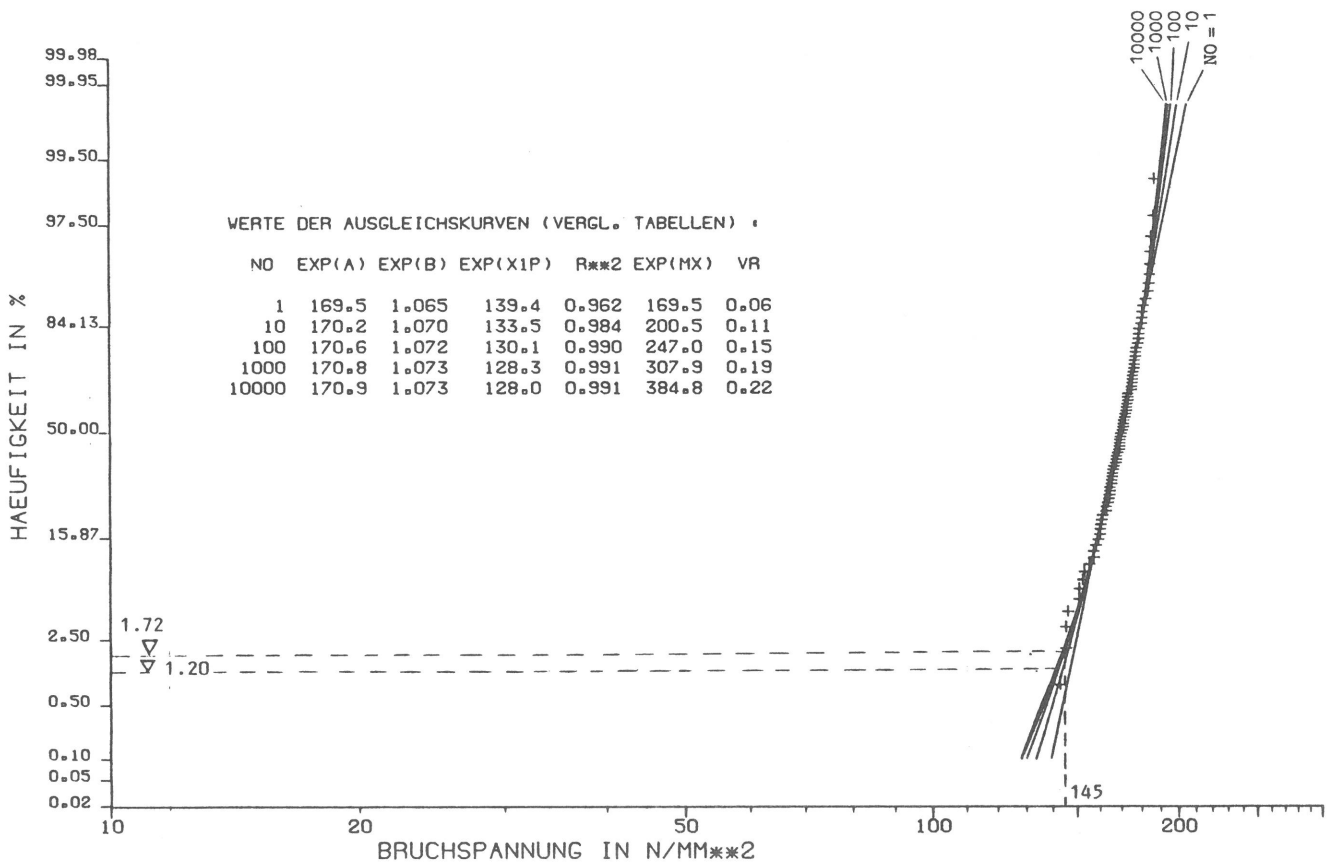


Bild A23: ESG / B / Balken / 6 / Bad: 41; 10^0 bis 10^4 / Luft: 41; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an 6 mm
 dicken Scheiben des Herstellers B ermittelten Einzelergebnisse zum Vergleich mit Doppelring-Biegeversuchen

Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1, ESG, Balken

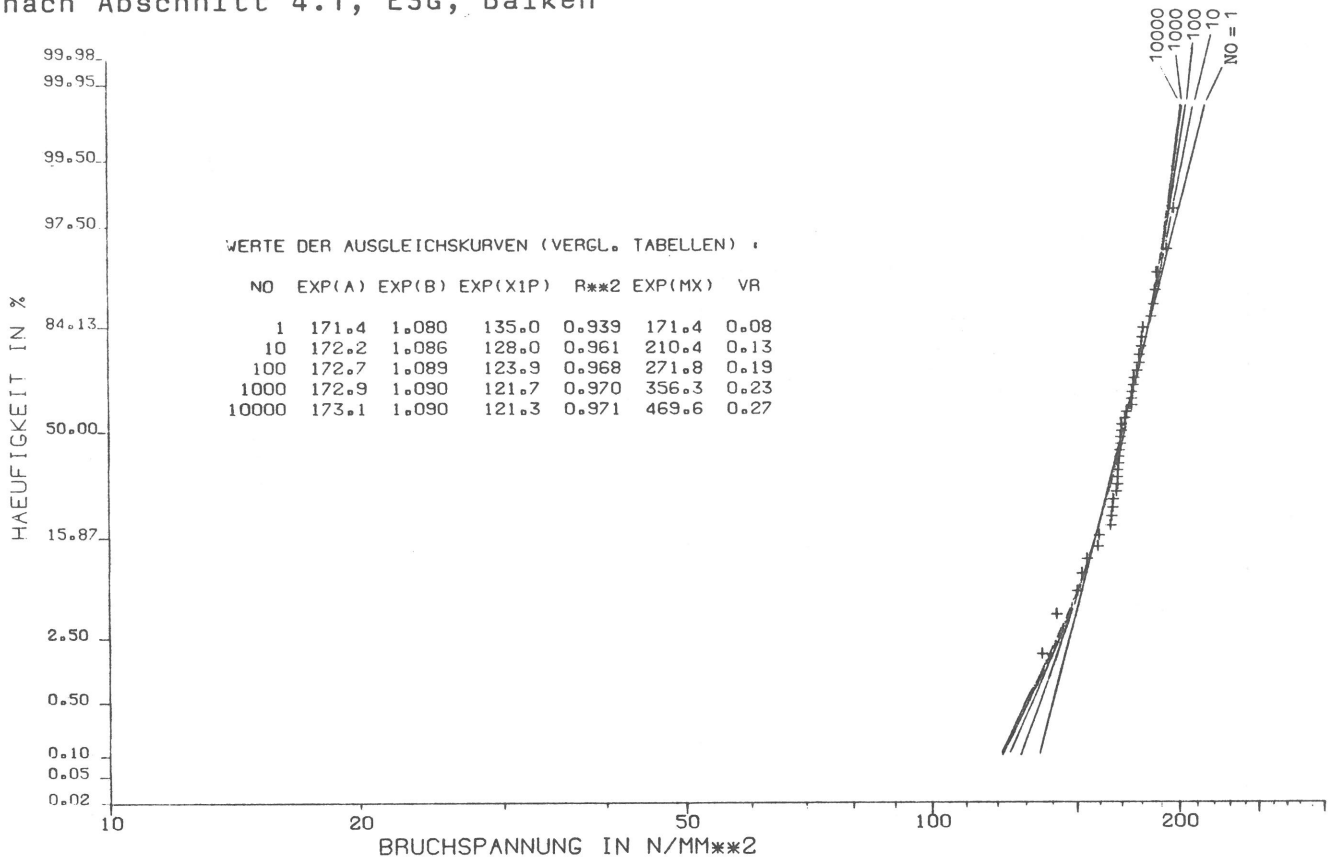


Bild A24: ESG / A / Balken / 6 / Bad: 41; 10^0 bis 10^4
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

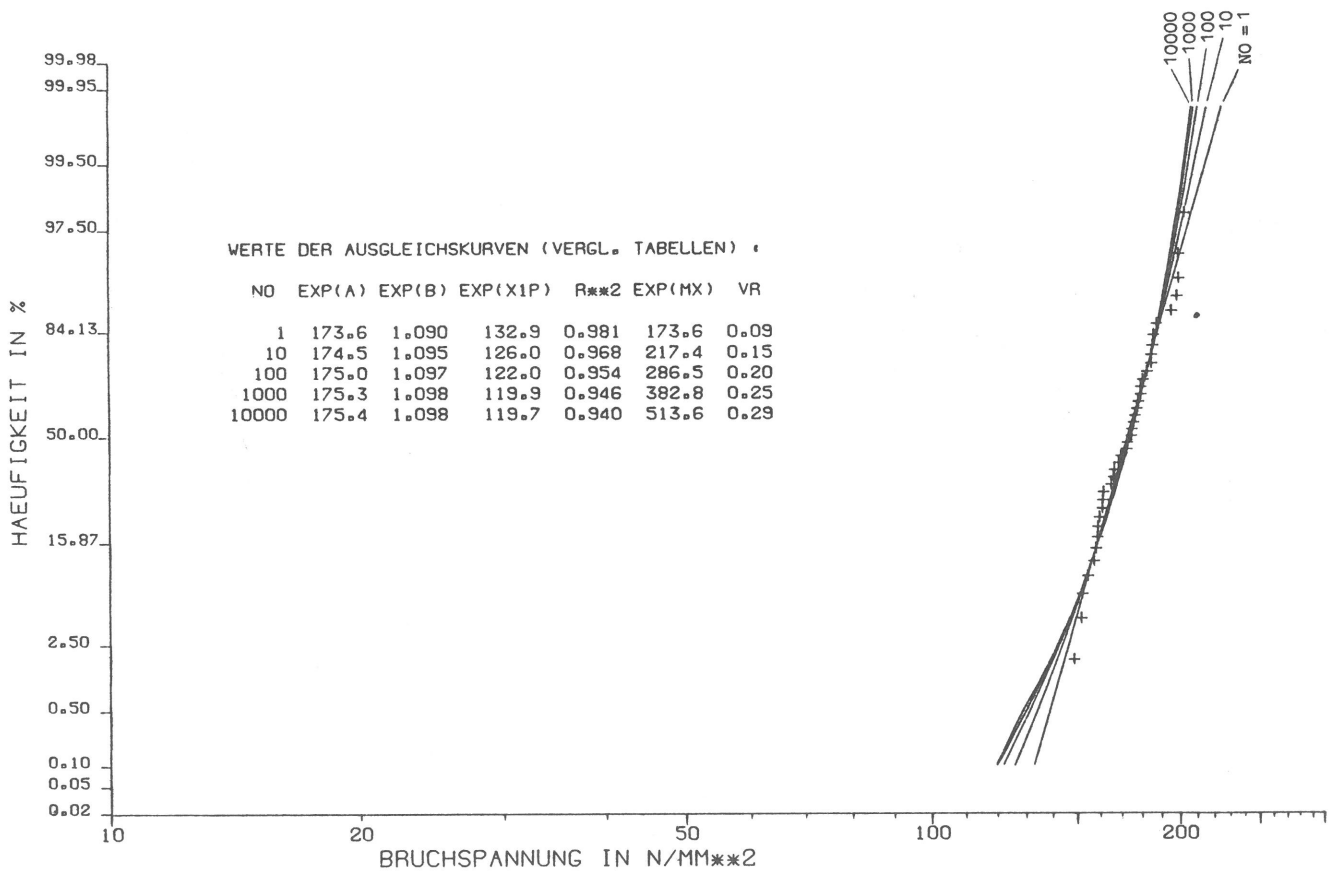


Bild A25: ESG / A / Balken / 10 / Bad: 39; 10^0 bis 10^4
Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

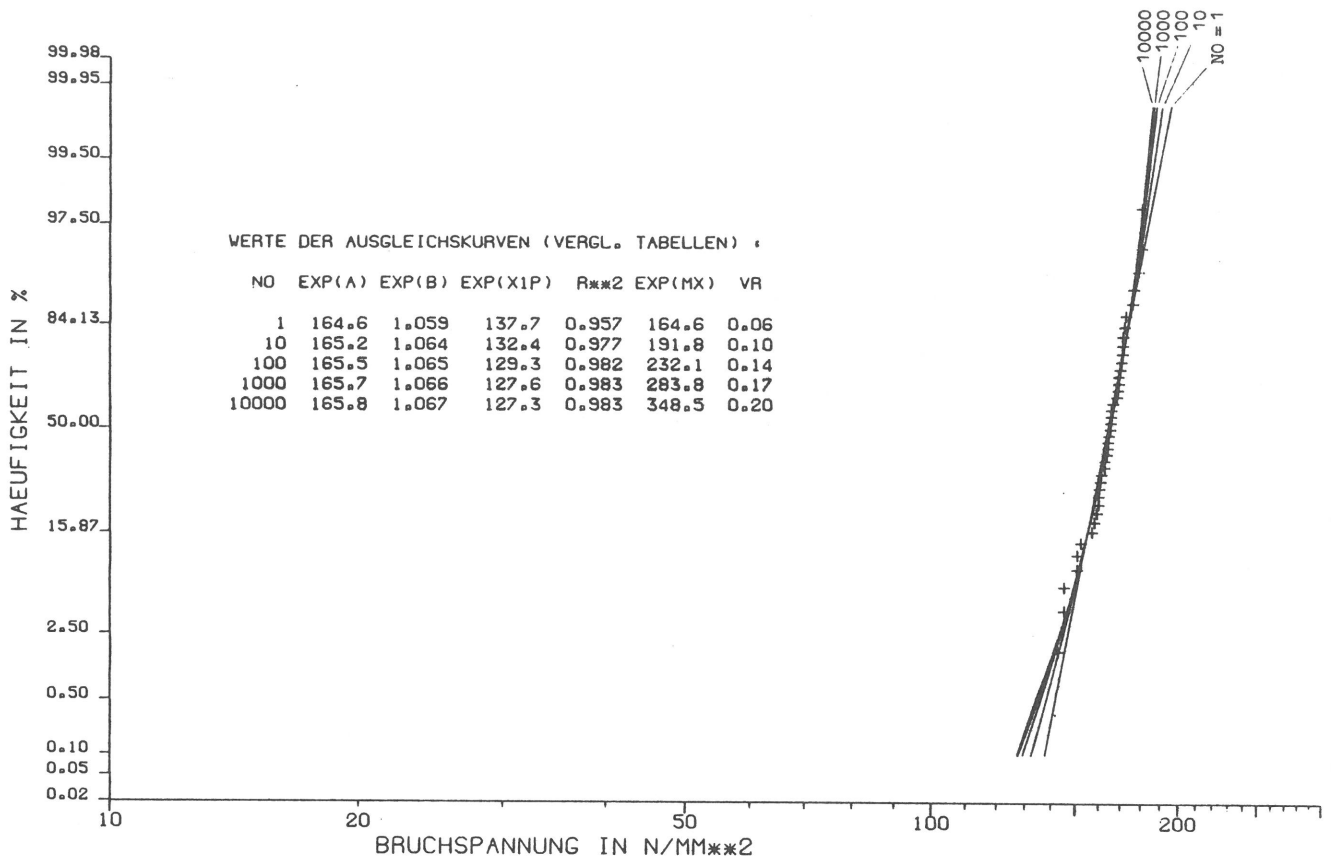


Bild A26: ESG / B / Balken / 6 / Bad: 41; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

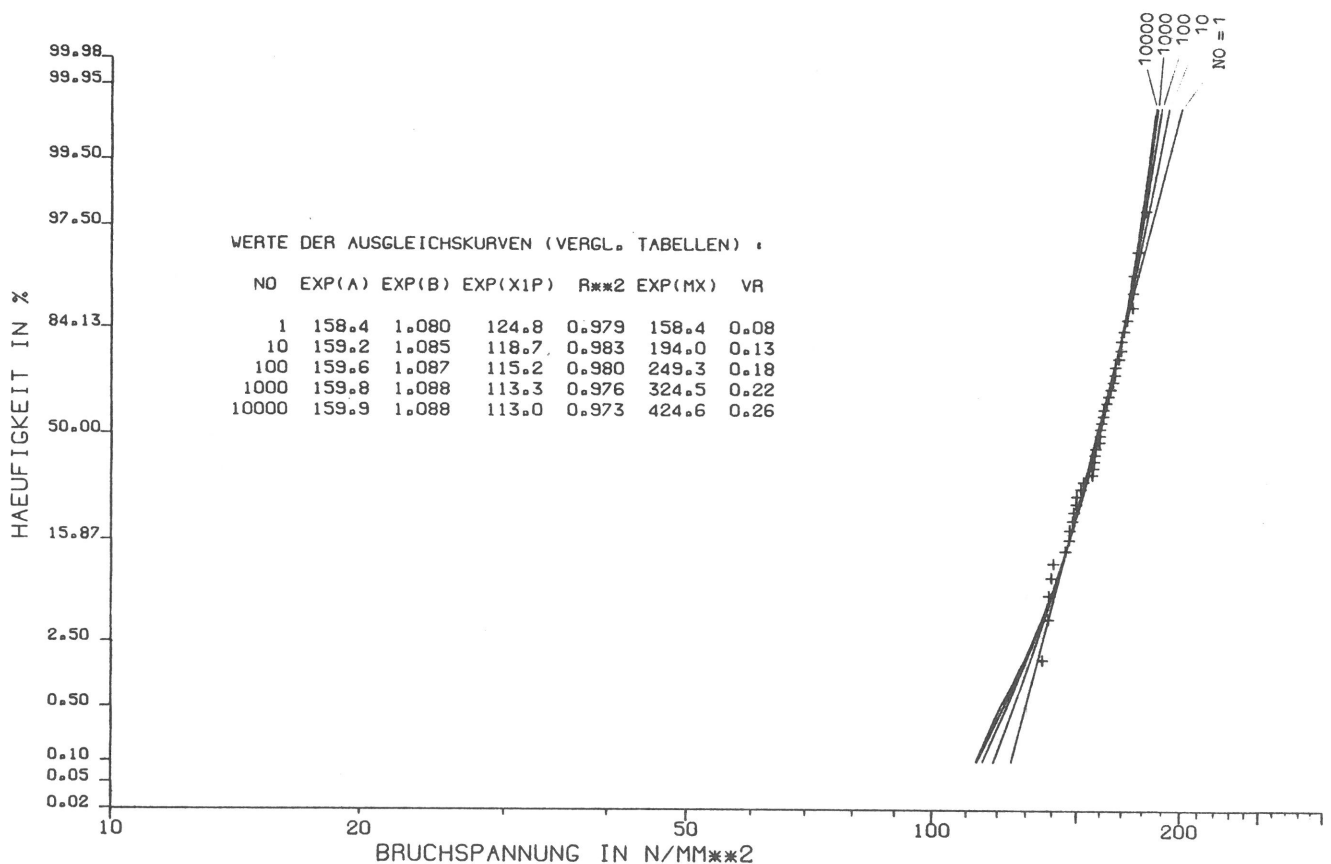


Bild A27: ESG / B / Balken / 10 / Bad: 41; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

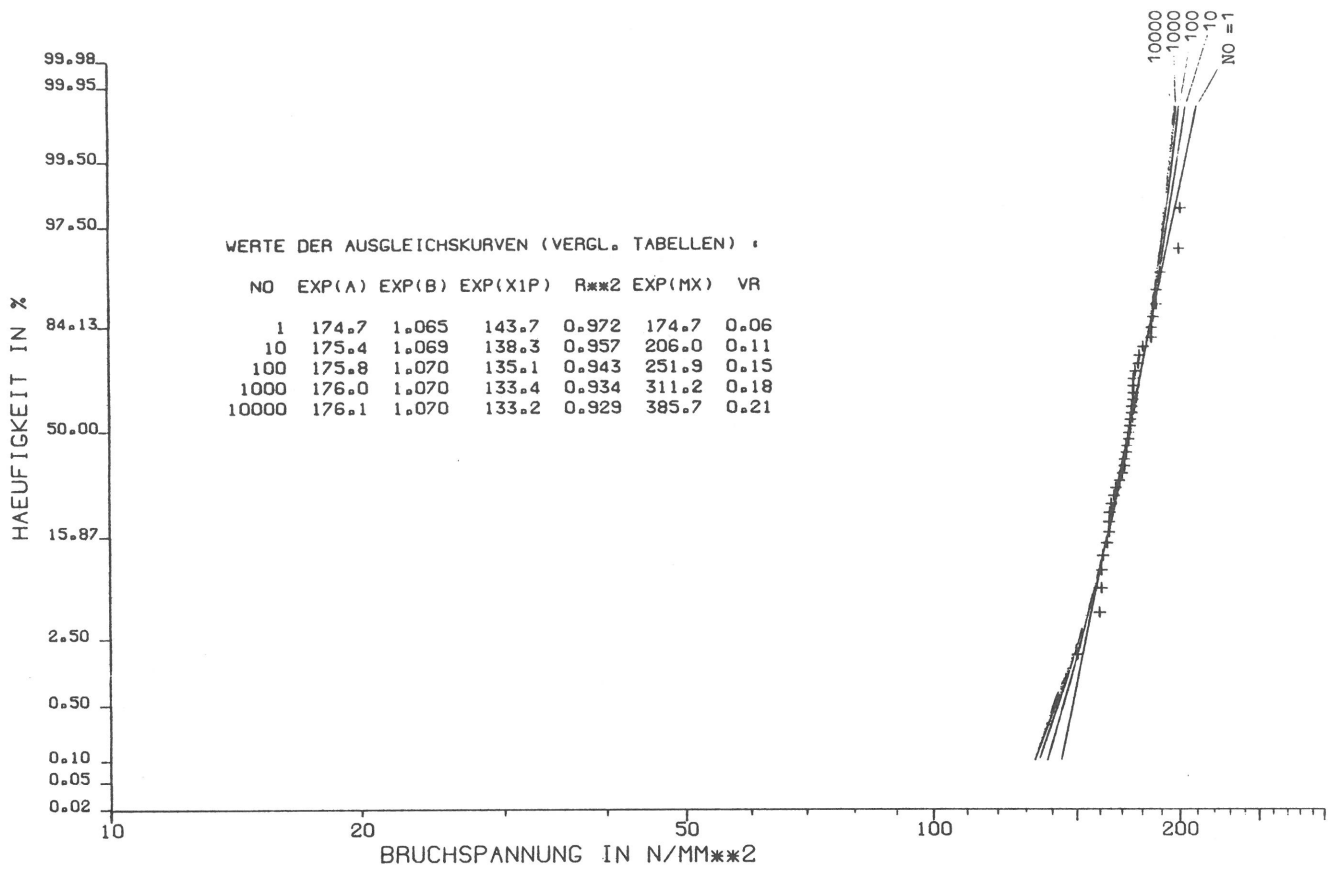


Bild A28: ESG / A / Balken / 6 / Luft: 40; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

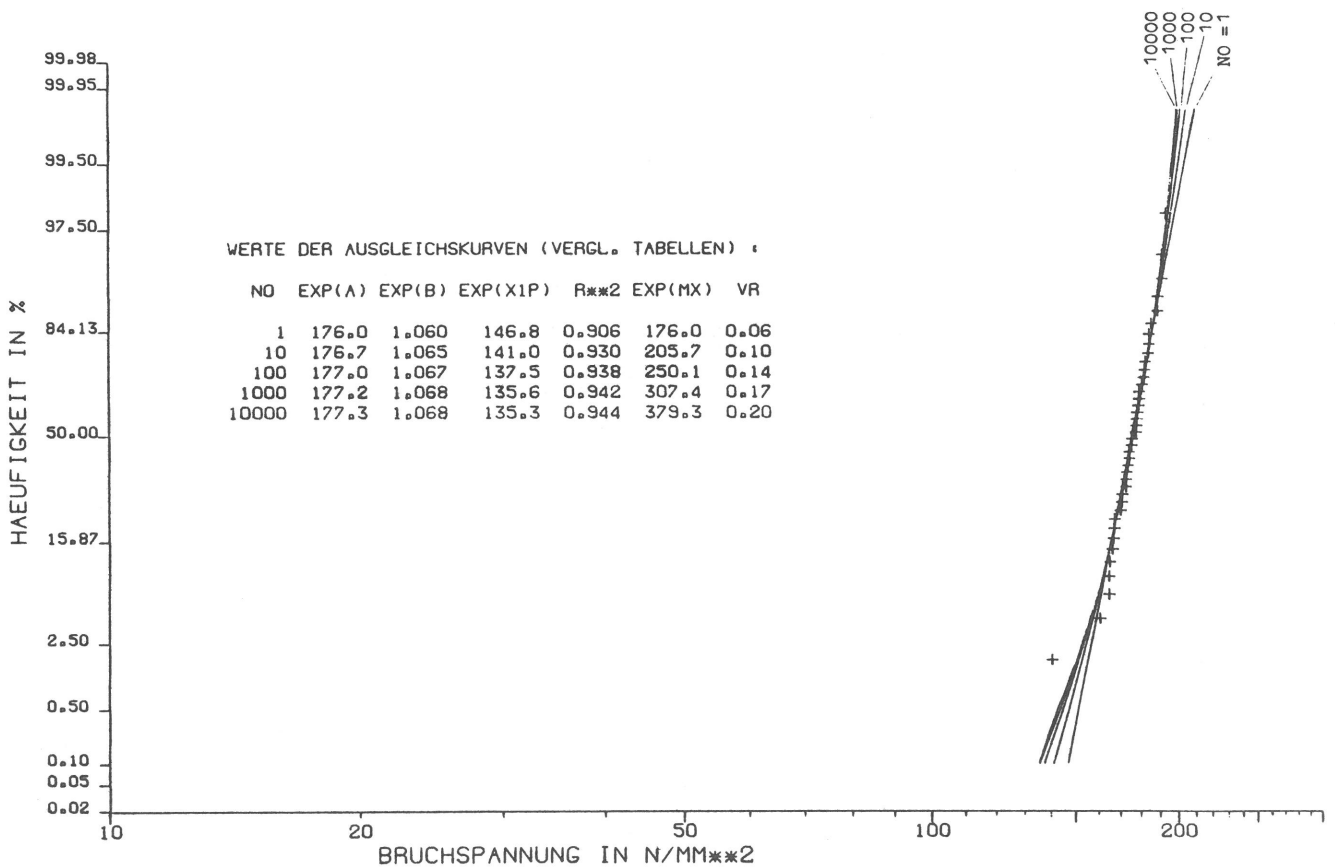


Bild A29: ESG / A / Balken / 10 / Luft: 40; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

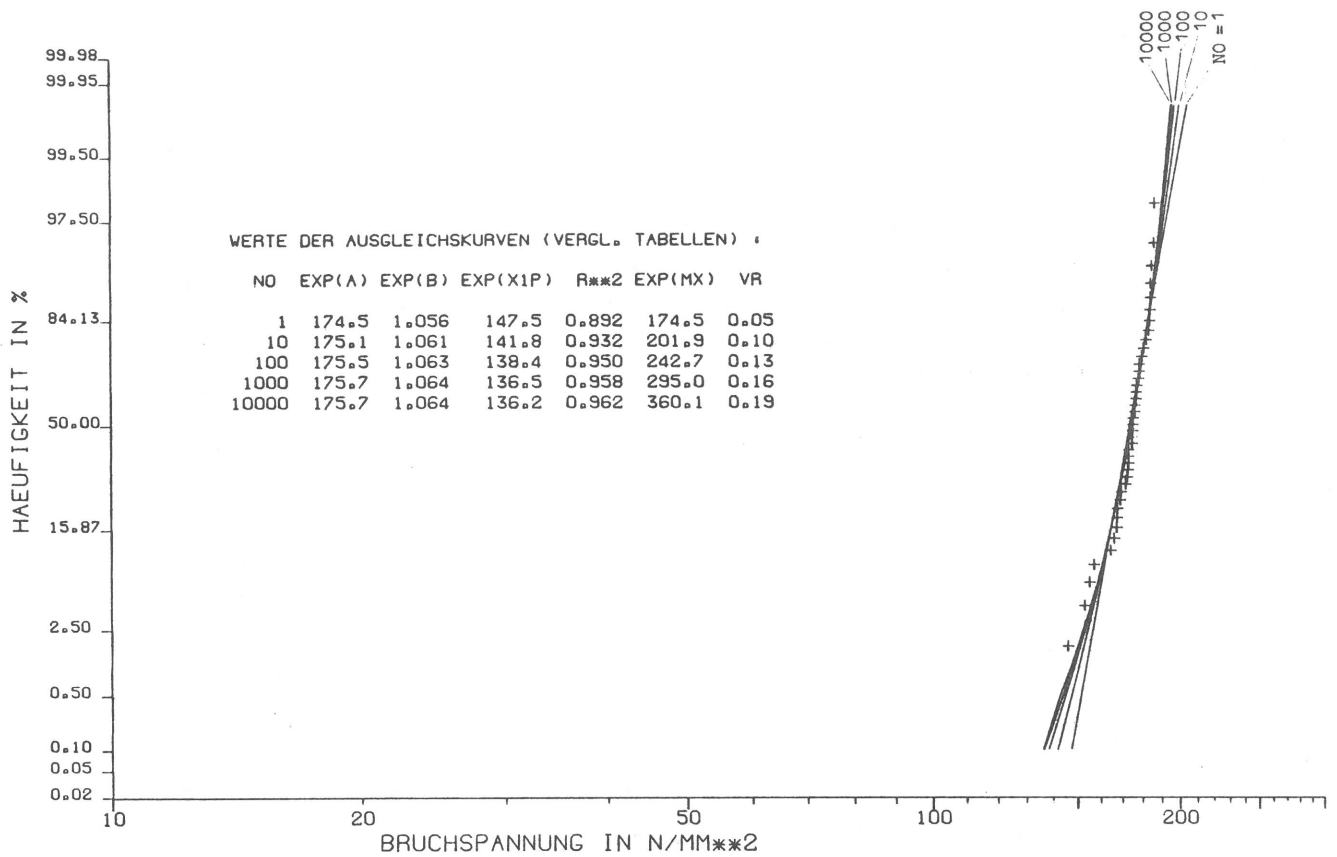


Bild A30: ESG / B / Balken / 6 / Luft: 41; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

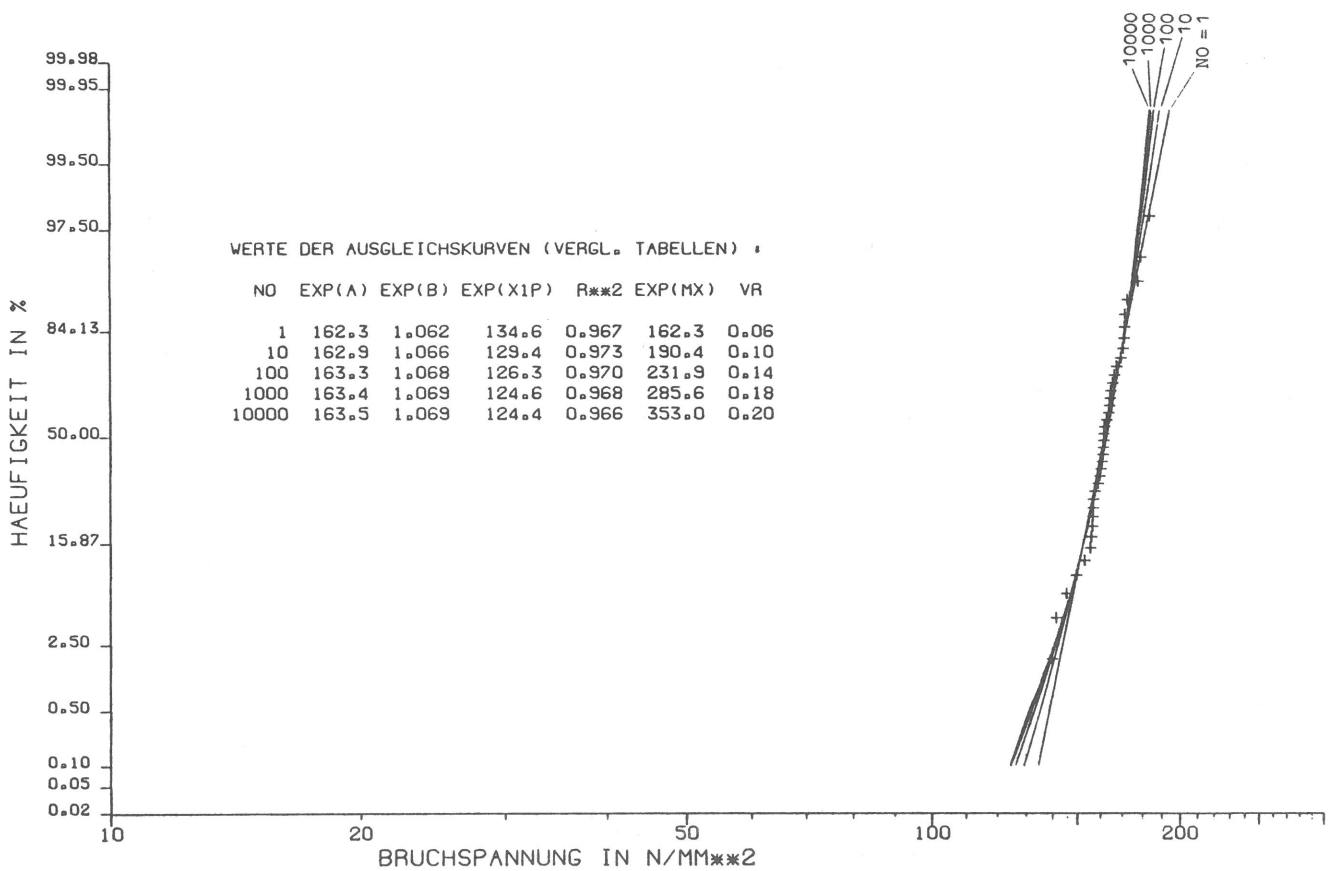


Bild A31: ESG / B / Balken / 10 / Luft: 38; 10^0 bis 10^4
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1

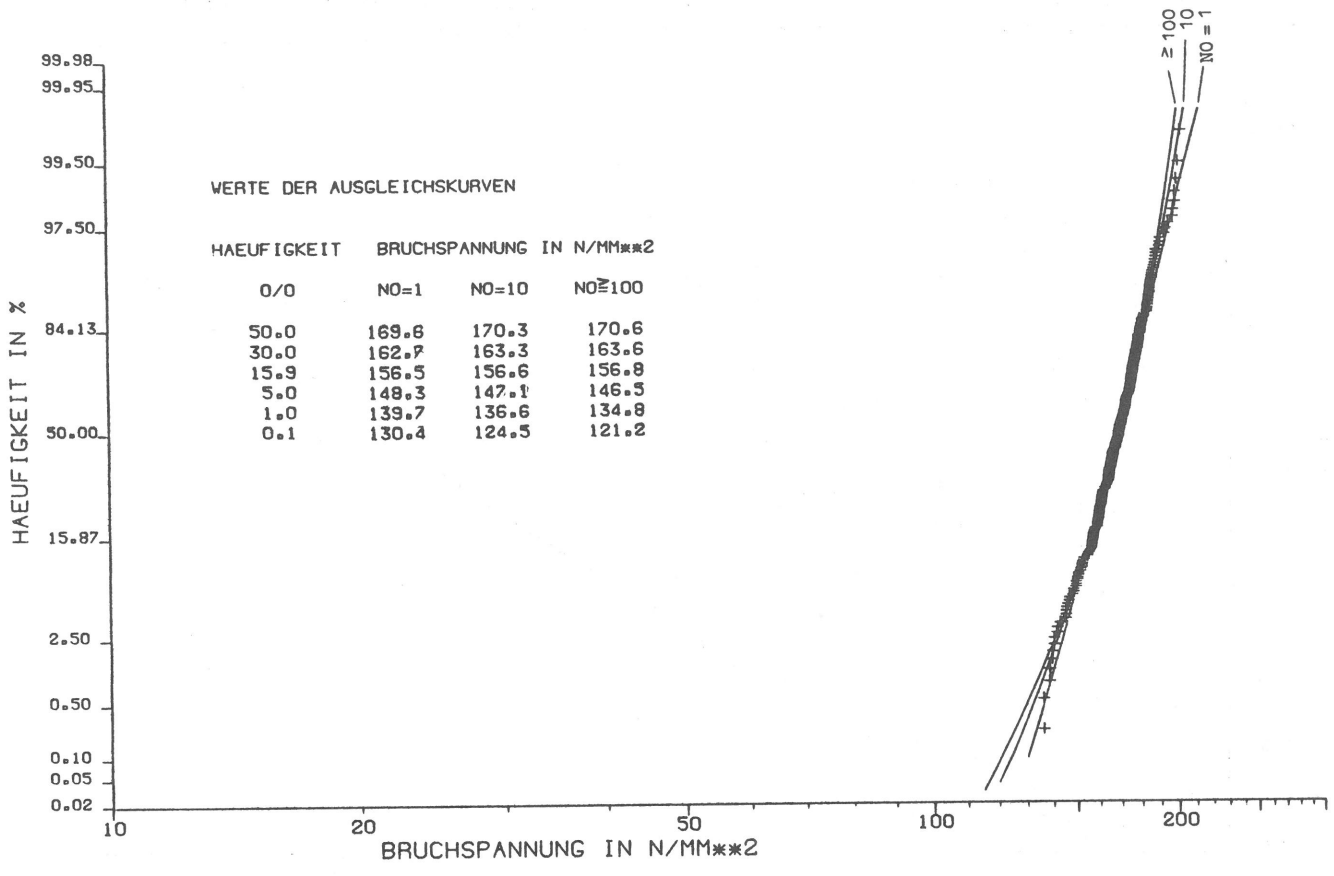


Bild A32: ESG / A u. B / Balken / 6 u. 10 / Bad: 162; 10⁰ bis 10⁴ / Luft: 159; 10⁰ bis 10⁴
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Ausgleichskurven nach Abschnitt 4.1. Zusammenfassung aller an ESG
 beim Balken-Biegeversuch ermittelten Einzelergebnisse

Einfluß verschiedener Kombinationen von Materialelementanzahlen auf die errechnete Verteilungsfunktion der Scheibenbruchlast

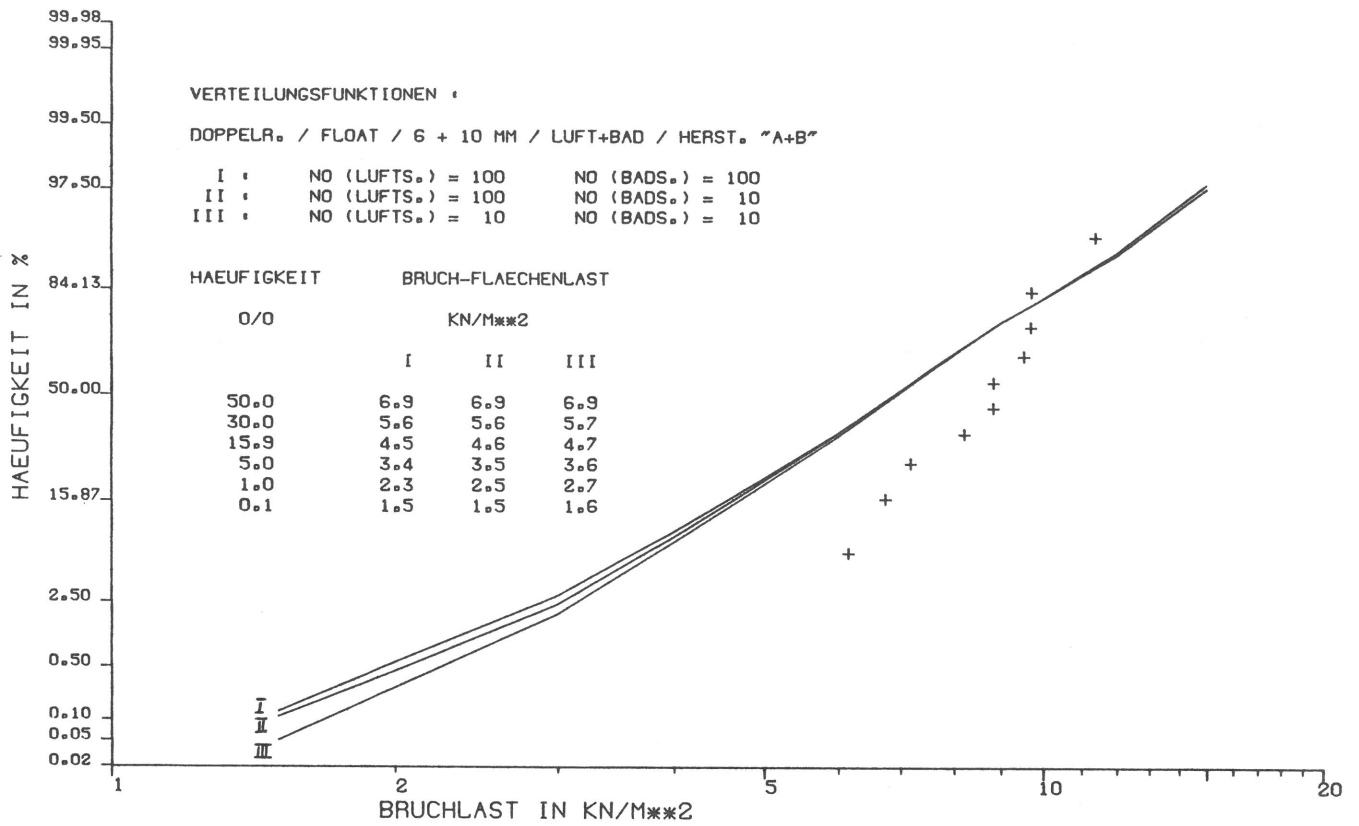


Bild A33: Float / B / 4seitig, 1,0x2,0 / 6 / Bad: 7; 10 oder 100 / Luft: 3; 10 oder 100
 Beispiel für den Einfluß verschiedener Kombinationen von Materialelementanzahlen auf die errechnete Verteilungsfunktion der Scheibenbruchlast. Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse und Verteilungsfunktionen der Bruchlasten. Letztere nach Bild 1 zusammengesetzt aus den Verteilungsfunktionen der Bruchlasten bei Biegezugbeanspruchung auf der Bad- oder Luftseite, die mit den Verteilungsfunktionen der Prüffestigkeit (Doppelring 600) errechnet wurden; Kurve I mit Bild A19 $N_0 = 100$, Kurve II mit Bild 3, Kurve III mit Bild A19 $N_0 = 10$.

Zur Abschätzung der Zufälligkeit der Lage der Stichprobenergebnisse der Bruchlastversuche an den großen Scheiben

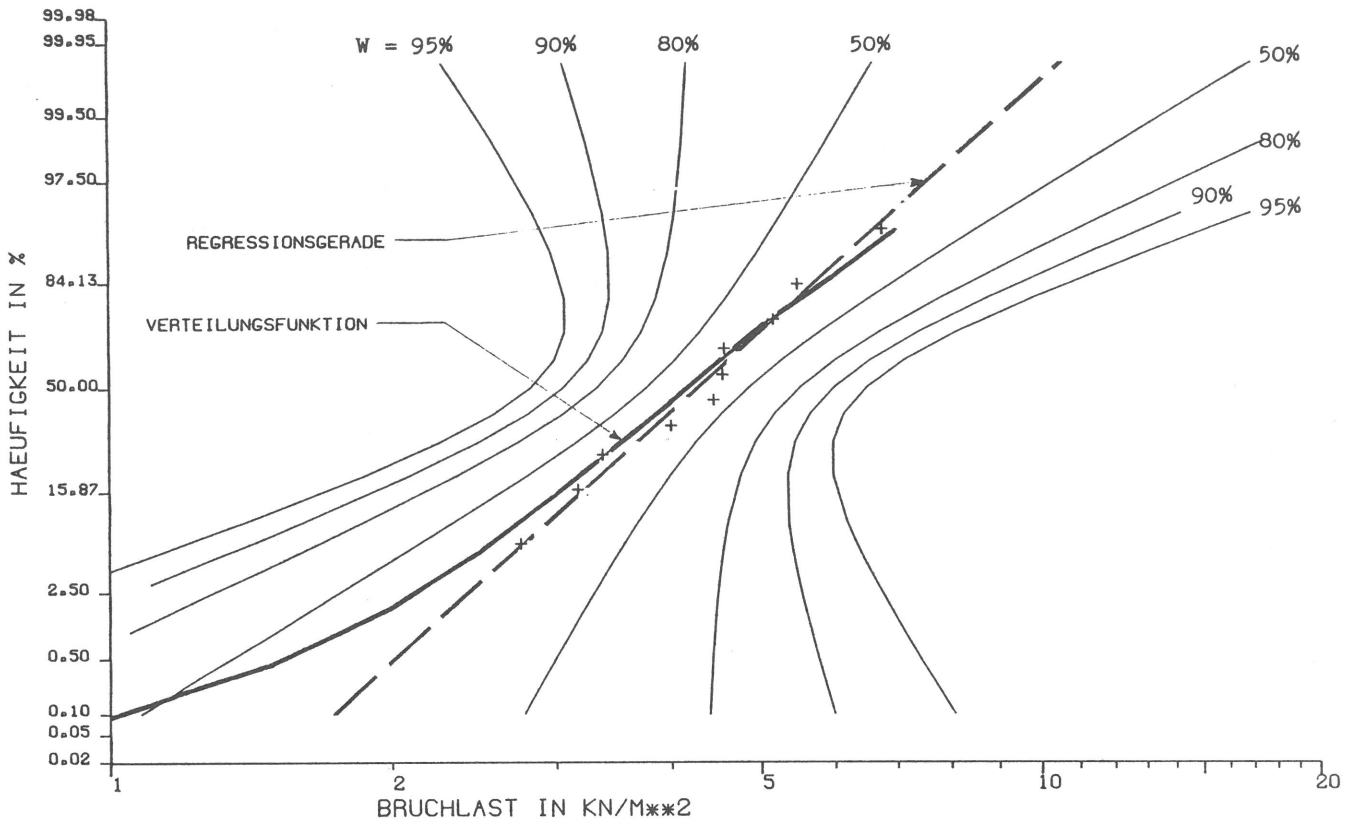


Bild A34: Float / B / 4seitig, 2,0x2,0 / 6 / Bad: 5 / Luft: 5
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse, Regressionsgerade mit Vertrauensgrenzen für die Lage der Geraden und Verteilungsfunktion entsprechend Bild 8

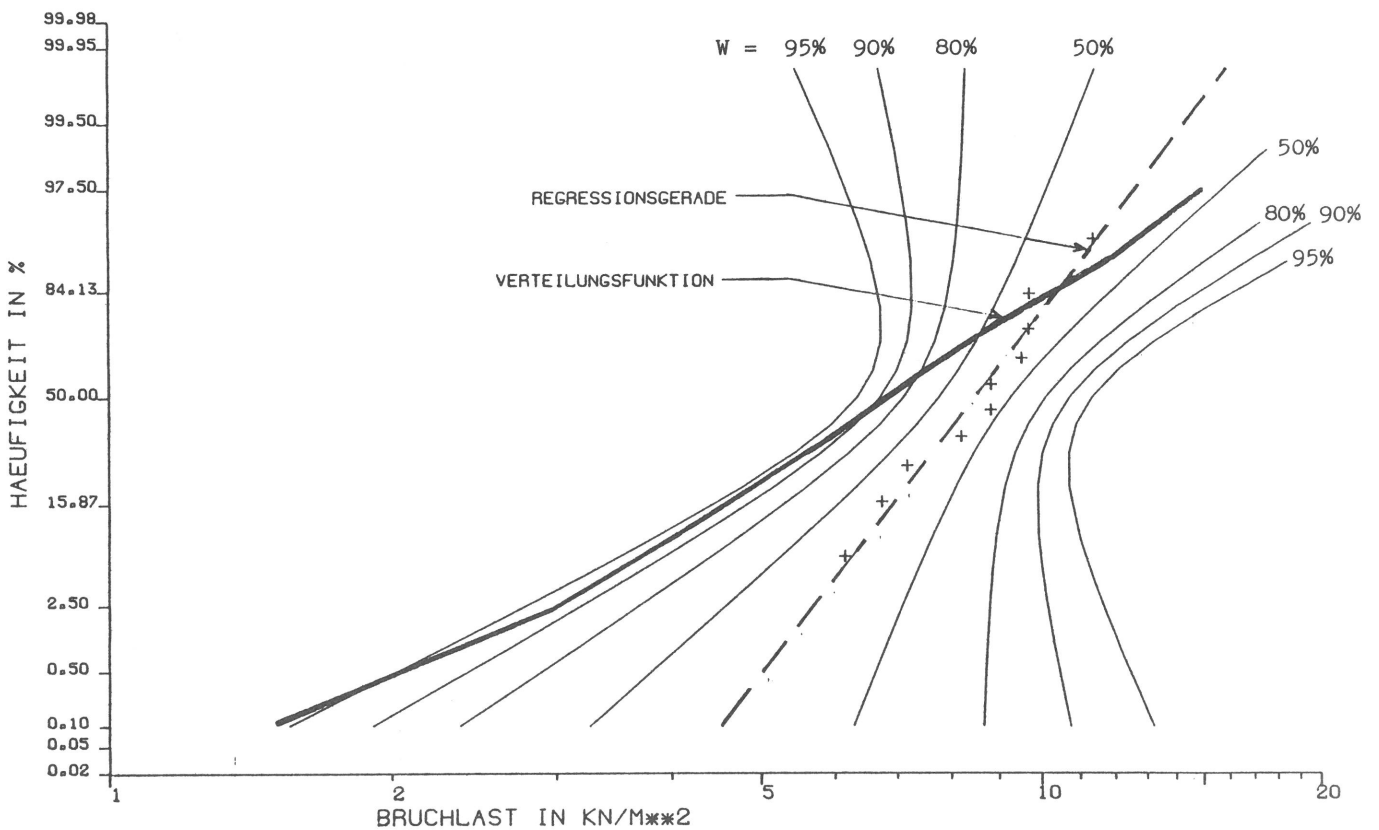


Bild A35: Float / B / 4seitig, 1,0x2,0 / 6 / Bad: 7 / Luft: 3
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse, Regressionsgerade mit Vertrauensgrenzen für die Lage der Geraden und Verteilungsfunktion entsprechend Bild 9

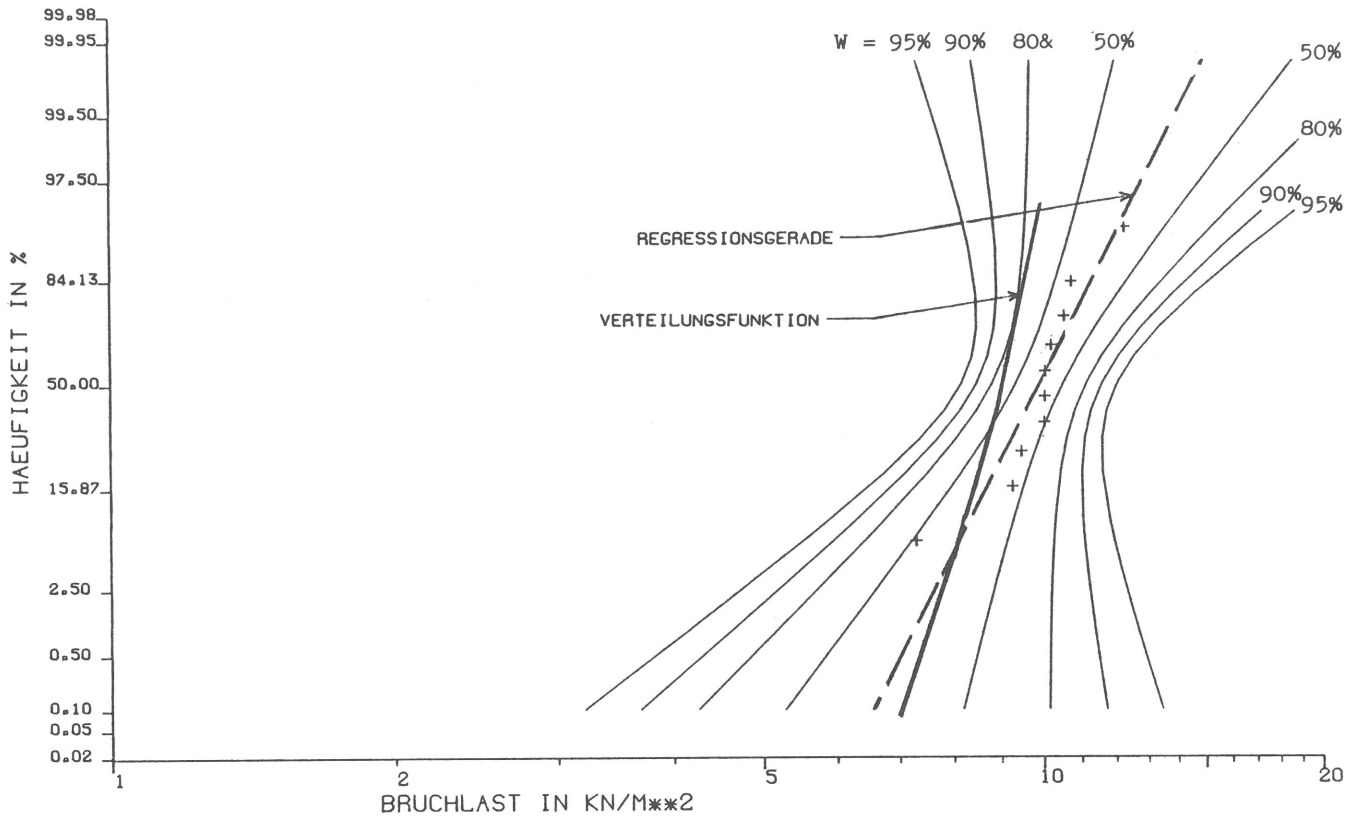


Bild A36: ESG / A / 2seitig, 1,5x1,0 / 6 / Bad: 5 / Luft: 5
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse, Regressionsgerade mit Vertrauensgrenzen für die Lage der Geraden und Verteilungsfunktion entsprechend Bild 10

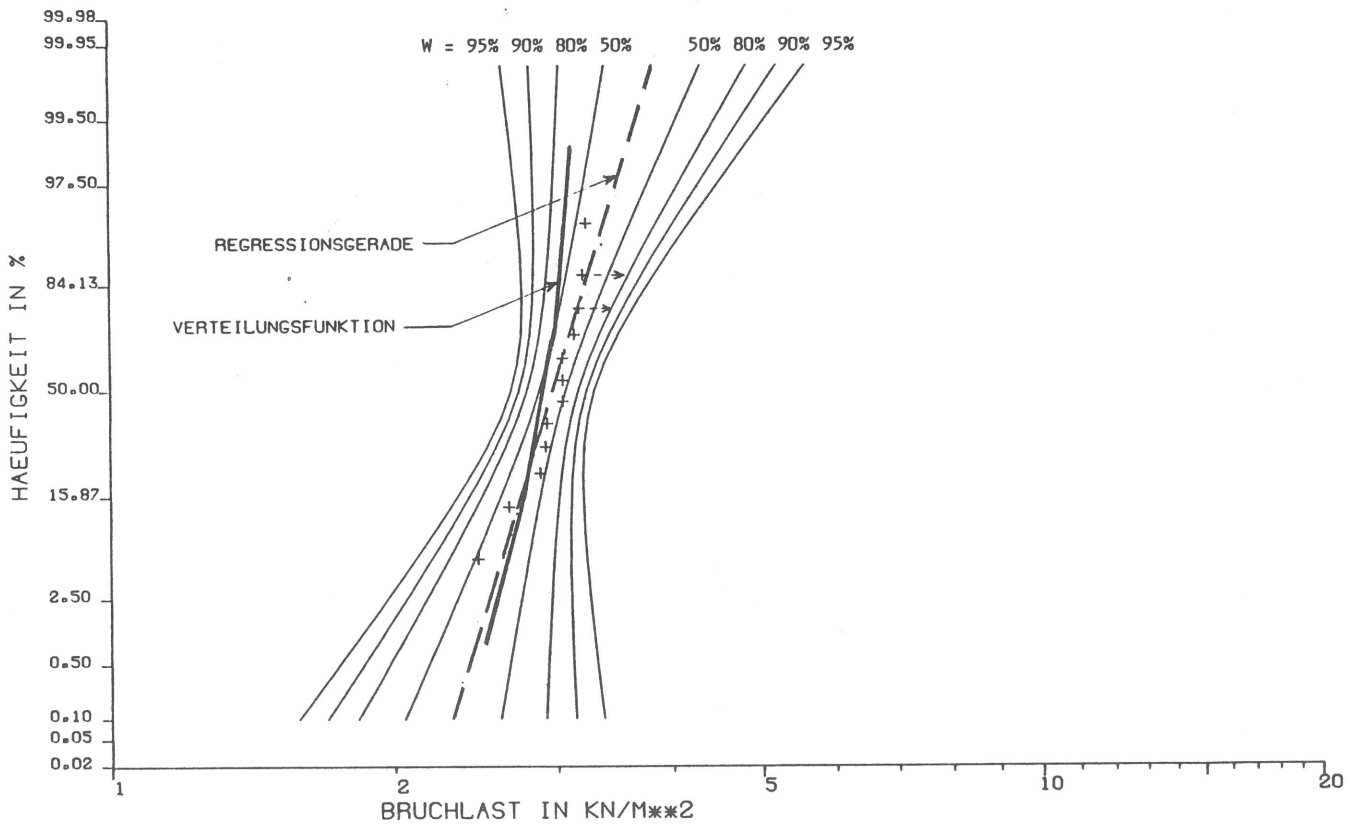


Bild A37: ESG / B / 2seitig, 1,0x1,5 / 6 / Bad: 7 / Luft: 5
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse, Regressionsgerade mit Vertrauensgrenzen für die Lage der Geraden und Verteilungsfunktion entsprechend Bild 11

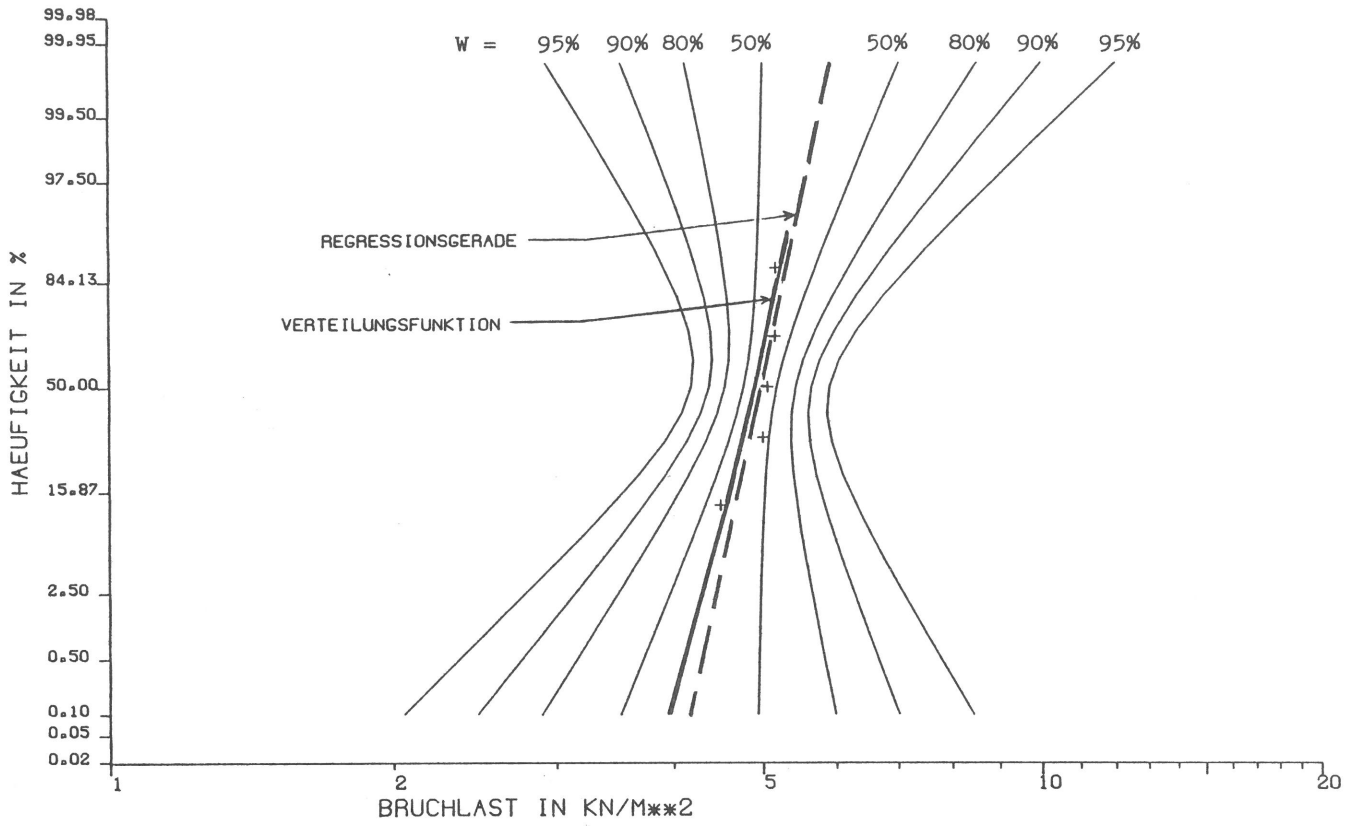


Bild A38: ESG / A / 2seitig, 1,0x2,0 / 10 / Bad: 5 / Luft: 0
 Summenhäufigkeit der Versuchsergebnisse, Regressionsgerade mit Vertrauensgrenzen für die Lage der Geraden und Verteilungsfunktion entsprechend Bild 12

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/September 1968
Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae
- Nr. 3/September 1970 (vergriffen)
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungssellen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester
- Nr. 5/März 1971
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner
- Nr. 6/April 1971
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider
- Nr. 7/Juli 1971
Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnenschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz
- Nr. 8/November 1971
Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith
- Nr. 9/November 1971
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller
- Nr. 10/Januar 1972
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin
- Nr. 11/Februar 1972
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause
- Nr. 12/Mai 1972
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg
- Nr. 13/Juni 1972
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer
- Nr. 14/Juli 1972
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer
- Nr. 15/August 1972
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl
- Nr. 16/August 1972
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch
- Nr. 17/August 1972
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers
- Nr. 18/Januar 1973
Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 19/Januar 1973
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos
- Nr. 20/April 1973
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 21/Juli 1973
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig
- Nr. 22/Juli 1973
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 23/November 1973
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske
- Nr. 24/November 1973
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 25/Dezember 1973
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 26/August 1974
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise
- Nr. 27/August 1974
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg
- Nr. 28/August 1974
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 29/August 1974
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider
- Nr. 30/September 1974 (vergriffen)
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon
- Nr. 31/August 1975
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann
- Nr. 32/September 1975
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher
- Nr. 33/November 1975
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe
- Nr. 35/Januar 1976
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Oktober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Oktober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Oktober 1976
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehrrichtiger Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Oktober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlhöner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Oktober 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

- Nr. 54/Okttober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetspulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbenseystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitskapseln (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwelensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß,
Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feine
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung
— Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing
— Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
— Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985
Zur Wirkung der Schruppbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985
Über den Einfluß der Infiltration auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützow
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Oktober 1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Oktober 1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Oktober 1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organischemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/November 1986
Einfache Abschätzung der Durchblegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/November 1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/Januar 1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/Januar 1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/Februar 1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götz Andree und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/April 1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/Mai 1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/Mai 1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchhardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/Juni 1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/Juni 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/Oktober 1987
Zum Einfluß der Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Oktober 1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrdzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/November 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/November 1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/November 1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/Dezember 1987
Lösung dynamischer Belege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/Mai 1988
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/Mai 1988
Bestimmung baugrunddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner

- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/Mai 1988
VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
 von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/Juni 1988
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
 von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/Juli 1988
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
 von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrmann
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/Juli 1988
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
 von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/Okttober 1988
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
 von Dr. rer. nat. Konrad Breitreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/Okttober 1988
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
 von Dr.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/April 1989
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
 von Dr.-Ing. Günter Klamrowski, Dipl.-Ing. Paul Neustupny, Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe, Ing. Klaus Schmidt und Dr.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/April 1989
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
 von Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dr.-Ing. Klaus Brandes
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/April 1989
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht —
 von Dr.-Ing. Rolf Wäsche und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/Mai 1989
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
 von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/Juli 1989
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
 von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/Juli 1989
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
 von Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/Juli 1989
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
 von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/Juli 1989
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
 von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner, Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Werner Struck