

**ENTWICKLUNG UND PRÜFUNG NEUER VERBINDUNGSMITTEL AUS HARTHOLZ,  
PRESSSCHICHTHOLZ UND ÄHNLICHEN HOLZHALTIGEN WERKSTOFFEN  
FÜR TRAGENDE VERBINDUNGEN IM HOLZBAU**

**Teil 2: Tragfähigkeits- und Verformungsverhalten von Verbindungen**

**B: Kerbuntersuchungen an Platten aus Kunstharzpreßholz**

von

Jürgen Ehlbeck und Otto Eberhart

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abt. Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

Univ.-Professor Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1989

## VORWORT

Auf der Grundlage früherer Untersuchungen, nach denen Kunstharzpreßholz sehr kerbempfindlich schien, wurde systematisch der Kerbeinfluß auf zugbeanspruchte Plattenstreifen aus Kunstharzpreßholz untersucht. Dieses Forschungsprojekt hat gezeigt, daß die Theorien zur Beschreibung des Kerbeinflusses anwendbar sind, sofern die benötigten Materialkennwerte bekannt sind.

Diese Arbeit entstand mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Gesch.-Z. B I 6-80 01 86-7). Den Firmen Blomberger Holzindustrie B. Hausmann GmbH & Co. KG in Blomberg/Lippe, Otto Bosse GmbH & Co KG in Stadthagen, Röchling Haren KG in Haren/Ems und Rütgerswerke AG in Duisburg ist für die beratende Mitarbeit bei der Auswahl der untersuchten Platten aus Kunstharzpreßholz zu danken.

Die Untersuchungen wurden von Herrn Dipl.-Ing. O.Eberhart geleitet. Im Labor war für die Versuchsdurchführung und die Herstellung der Versuchskörper Herr G.Köhler verantwortlich. Bei den Auswertungen haben unsere Studenten, die Herren cand.ing. P.Schuler und cand.ing. A.Bißwurm tatkräftig mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Jürgen Ehlbeck

## INHALT

1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Der Einfluss von runden Löchern auf die Tragfähigkeit zugbeanspruchter Bauteile aus spröden Werkstoffen	3
2.1	Kerbwirkung bei Zugbeanspruchung - eine Einführung	3
2.2	Die rechnerische Ermittlung der Spannungsverteilung	10
2.3	Der Einfluss örtlich erhöhter Spannungen auf das Festigkeitsverhalten spröder Werkstoffe	14
2.4	Übertragbarkeit der Theorien auf Kunstharzpreßholz	17
2.5	Theoretische Spannungsverteilungen bei Zugkörpern	20
2.6	Zusammenfassung	22
3	Versuche zur Bestimmung des Kerbeinflusses	24
3.1	Allgemeines	24
3.2	Versuchsmaterial	25
3.3	Versuchsprogramm	27
3.4	Prüfkörper und Versuchsdurchführung	28
3.5	Zugfestigkeit	29
3.6	Kerbversuche	31
3.7	Zusammenfassung	34
4	Schrifttum	35

## 1 ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

Mit der Weiterentwicklung des Ingenieurholzbaues ist im allgemeinen auch die Neuentwicklung wirkungsvoller Verbindungsmittel verbunden. Dies liegt zum einen an dem Bestreben, die Anschlußflächen der Verbindungen möglichst klein zu halten, zum anderen aber auch an dem Wunsch nach einer möglichst wirtschaftlichen Herstellung der Verbindungen. Im Zuge dieser Entwicklung wurde im modernen Ingenieurholzbau zunächst vor allem die Verbindungstechnik unter Heranziehung von verschiedenartigen Verbindungsmitteln aus Metall (wie z.B. Nägel, Nagelplatten, Stahlbleche, Stahlblechformteile, Bolzen und Stabdübel) vorangetrieben. Damit sind zwangsläufig aber auch Fragen des Korrosionsschutzes, des Brandschutzes sowie der Ästhetik des Holzbaues verbunden, wodurch die Anwendung derartiger Verbindungstechniken, trotz aller statischen und konstruktiven Vorteile, oft beschränkt bleiben muß oder erst durch kostensteigernde Zusatzmaßnahmen (z.B. im Brandschutz) ermöglicht wird. Auch in den Fällen, in denen man den Einfluß der magnetischen Eigenschaften ausschließen oder die Konstruktion für magnetische Wellen "durchsichtig" machen will, ist die Verwendung von nichtmetallischen Verbindungsmitteln wünschenswert.

Da die Holzverarbeitende Industrie mit ursprünglich anderen Zielsetzungen hochwertige holzhaltige Werkstoffe entwickelt hat, die aber dennoch für tragende Verbindungen geeignet erscheinen, war es das Ziel dieses in mehreren Stufen durchzuführenden Forschungsvorhabens, bestehende holzhaltige und aus der Sicht der Tragfähigkeit und der Verformungskennwerte hochwertige Werkstoffe auf ihre Eignung als mechanische Verbindungsmittel zu untersuchen und aufgrund theoretischer und versuchstechnischer Arbeiten für die Bemessung und Ausführung derartiger Verbindungen entsprechende Grundlagen zu schaffen.

Im ersten Teil dieser Forschungsarbeiten [1] wurden die physikalischen, im besonderen die mechanischen Eigenschaften von geeignet erscheinendem Kunstharzpreßholz untersucht. Im zweiten Teil war das Trag- und Verformungsverhalten von mechanischen Verbindungen zu erforschen, bei denen die nichtmetallischen, holzhaltigen Werkstoffe als Stifte oder Stabdübel einerseits sowie als Laschen und Knotenplatten andererseits eingesetzt werden.

Ein Teilziel war es deshalb, auf der Grundlage der bekannten Tragfähigkeitshypothesen für Verbindungen mit metallischen Stiften eine Erweiterung der bestehenden Theorie auf Stifte aus Kunstharzpreßholz (KPH) vorzunehmen und diese Erweiterung durch systematische Versuche an ein- und mehrschnittigen Verbindungen zu überprüfen. Darüber wurde im Teil A des Forschungsberichtes berichtet.

Die Frage der Kerbempfindlichkeit zugbeanspruchter, plattenförmiger Bauteile konnte jedoch noch nicht geklärt werden. Ein weiteres Teilziel besteht also darin, durch systematische Versuche unter Variation der Parameter Plattenaufbau und Lochanteil am Bruttoquerschnitt für das Plattenmaterial Kerbfaktoren anzugeben, die beim Tragfähigkeitsnachweis von gelochten Platten aus KPH berücksichtigt werden müssen. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen weiteren Untersuchungen zur Kerbempfindlichkeit von Kunstharzpreßholz dienen. Hierüber wird im vorliegenden Teil B berichtet.

Die Untersuchung von Plattenmaterial aus KPH erstreckte sich im einzelnen auf die nachfolgenden Punkte:

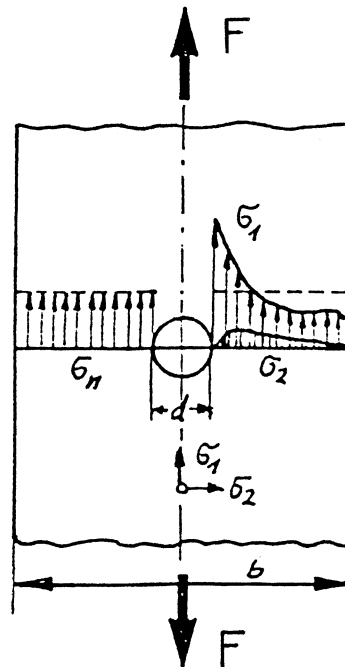
- Literaturdurchsicht und Sammlung bereits vorliegender Ergebnisse mit vergleichbaren Materialien,
- Ermittlung der Zugfestigkeit des Plattenmaterials,
- Ermittlung von Kerbfaktoren des Plattenmaterials und
- Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Lösungen der Kerbspannungstheorie und Diskussion der Anwendbarkeit der Theorie auf gekerbte Bauteile aus Kunstharzpreßholz.

## 2 DER EINFLUSS VON RUNDEN LÖCHERN AUF DIE TRAGFÄHIGKEIT ZUGBEANSPRUCHTER BAUTEILE AUS SPRÖDEN WERKSTOFFEN

### 2.1 KERBWIRKUNG BEI ZUGBEANSPRUCHUNG - EINE EINFÜHRUNG

#### 2.1.1 Kerbwirkung und Formzahlen

Wird ein gelochtes (gebohrtes, gekerbtes) Bauteil auf Zug beansprucht (einachsige Beanspruchung), entsteht in der Umgebung des Loches ein mehrachsiger Spannungszustand, der durch eine Behinderung der Querverformung hervorgerufen wird (vgl. BUCHMANN [2]). Betrachtet man den ebenen Fall (zweiachsiger Spannungszustand) so ergibt sich eine ungleichmäßig verteilte Spannung in Belastungsrichtung (Normalspannung  $\sigma_1$ ) und senkrecht zur Belastungsrichtung (Querspannung  $\sigma_2$ ). Die idealisierte Verteilung der Spannungen ist im untenstehenden Bild (nach SCHÄFER [3]) dargestellt.



- $\sigma_1$  = Normalspannung  
|| Krafrichtung
- $\sigma_2$  = Querspannung  
⊥ Krafrichtung
- $\sigma_n$  = Nennspannung
- $b$  = Stabbreite
- $d$  = Lochdurchmesser
- $F$  = Belastung

Spannungsverteilung in einem Zugstab (aus [3])

Die Normalspannung  $\sigma_1$  hat am Lochrand einen Maximalwert, der um ein mehrfaches größer ist als die Spannung, die an der gleichen Stelle ohne Loch bzw. Kerbe entstehen würde. Bewegt man sich vom Lochrand weg, so fällt die Spannung  $\sigma_1$  ab. Bei einer unendlich ausgedehnten Scheibe stellt sich in einem genügend großen Abstand vom Loch eine gleichmäßige, vom Loch unbeeinflusste Normalspannungsverteilung ein. Die Querspannung  $\sigma_2$  hat am Lochrand den Wert Null, erreicht in der Umgebung des Loches einen Höchstwert und ist am Stabrand gleich Null. Der Einfluß einer Kerbe auf die Spannungsverteilung wird Kerbwirkung genannt.

Als Maß für die Größe der Kerbwirkung verwendet man die **Formzahl K** (auch größte Spannungsziffer genannt). Sie ist das Verhältnis der größten Spannung  $\sigma_{\max}$  an der Kerbe zu der Spannung, die an der gleichen Stelle der Kerbe (im geschwächten Querschnitt), aber ohne Kerbwirkung herrschen würde, und die Nennspannung  $\sigma_n$  genannt wird (THUM, PETERSEN und SVENSON [4]).

$$\text{Formzahl} \quad K \quad = \quad \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

Die Formzahl K bezieht sich also auf den geschwächten Querschnitt.

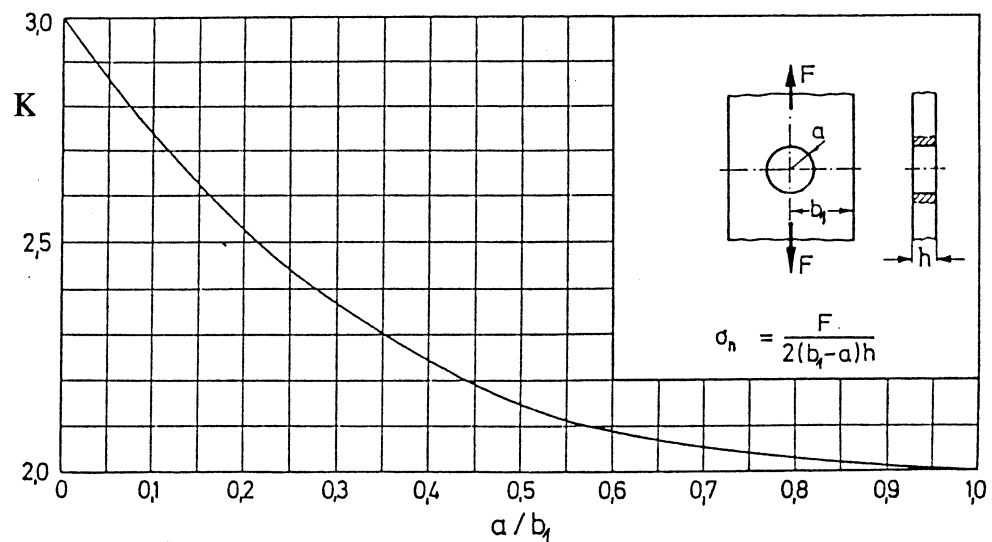
In einigen Veröffentlichungen wird auch eine Formzahl verwendet, die sich auf den ungeschwächten Querschnitt bezieht (nach THUM die **Grundformzahl**). Die Grundformzahl erfasst neben der eigentlichen Kerbwirkung auch den Einfluß der Querschnittsschwächung, die Formzahl K nur die reine Kerbwirkung. Da sich unterschiedliche Werte für Formzahl und Grundformzahl ergeben, ist auf die genaue Definition der Bezugsspannung zu achten.

Die Größe der Formzahl hängt nur von der Form des gelochten Bauteils und der Belastungsart ab. Sie läßt sich entweder durch Rechnung oder durch Versuche bestimmen. Ist für eine Lochform die Formzahl (bzw.

Grundformzahl) bekannt, so kann damit die maximale Spannung bei einer bestimmten Belastung berechnet werden.

Für ein kreisförmiges Loch in einer unendlich ausgedehnten, **isotropen** Scheibe ist die Formzahl immer gleich 3. Ist die Scheibe jedoch begrenzt und/oder ist sie mehrfach gelocht, so ändert sich die Formzahl mit der Scheibenbreite, der Anzahl der Löcher und der Lochanordnung.

Für einige solcher Fälle sind in der Literatur Formzahldiagramme angegeben. So findet man z.B. bei WELLINGER [5] und PETERSON [6] Formzahldiagramme für gelochte Flachstäbe oder Scheiben mit unendlichen Lochreihen. Bei der Anwendung von Formzahldiagrammen ist zu beachten, daß diese i.d.R. nur für isotrope Werkstoffe anwendbar sind. Aus dem Formzahldiagramm kann bei Kenntnis der Belastung (Kraft bzw. Nennspannung) und der Querschnittswerte leicht die Spannungserhöhung am Lochrand ermittelt werden. Im untenstehenden Bild ist ein Formzahldiagramm von Wellinger für einen gelochten Flachstab dargestellt.



Formzahlen für einen gelochten Flachstab unter Zugbeanspruchung



Es ist ersichtlich, daß die Formzahl mit wachsendem Lochradius bzw. mit abnehmender Stabbreite kleiner wird.

In der Literatur sind neben den Formzahldiagrammen auch Näherungsformeln zur Ermittlung der Formzahlen angegeben. Es handelt sich vor allem um Formeln für eine begrenzte Scheibe (Streifen) mit einem Kreisloch unter Zugbeanspruchung bei isotropen Werkstoffen.

Für einen Stab mit der Breite  $b$  und dem Lochdurchmesser  $d$  gilt nach LEHR [7]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{6k^3}{2k^3 + 2k^2 + k + 1}$$

mit

$$k = b/d$$

$$\sigma_{\max} = \text{Maximalspannung am Lochrand}$$

$$\sigma_n = \text{Spannung im Nettoquerschnitt ohne Kerbwirkung (sog. Nennspannung)}$$

Nach weiterer Vereinfachung erhält man die Gleichung:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{3k}{k + 1}$$

Nach LEHR [7] wurde durch Dehnungsmessungen und spannungsoptische Untersuchungen bestätigt, daß diese Formeln dem wirklichen Verhalten sehr nahe kommen.

### 2.1.2 Kerbwirkung und Verformungsbehinderung

Nach dem Hooke'schen Gesetz sind im elastischen Bereich Spannungen und Verformungen proportional, d.h. eine Erhöhung der Spannung bewirkt eine Erhöhung der Verformung und umgekehrt.

Betrachtet man aber Verformungen, deren Entstehung nicht unmittelbar mit dem Auftreten von Spannungen verknüpft ist, so zeigt sich, daß eine Verformungsbehinderung auch eine Spannungserhöhung hervorrufen kann. THUM [4] führt dazu das Beispiel der Wärmeausdehnung

eines Stabes an. Erwärmt sich ein in seiner Verformung nicht behinderter Stab gleichmäßig, so wird er länger, ohne daß sich Spannungen ausbilden. Wird die Verformung jedoch behindert (feste Einspannung an beiden Stabenden), so entstehen aufgrund dieser Verformungsbehinderung Druckspannungen. Eine Spannungserhöhung infolge Verformungsbehinderung tritt auch bei der Kerbwirkung auf.

Für den hier zu betrachtenden Fall eines gelochten Zugstabes ist dieser Sachverhalt insofern wichtig, als daß durch diese Verformungsbehinderung zusätzlich zu den Zugspannungen in Kraftrichtung (Längsspannungen) auch Querspannungen in Richtung der Stabbreite und in Richtung der Stabdicke auftreten. Es entsteht also aus einer "äußerlich einachsigen Anspannung" (vgl. BUCHMANN [2]) ein räumlicher Spannungszustand.

Dieser räumliche Spannungszustand beeinflußt neben der durch die Kerbe entstehenden Spannungserhöhung die Tragfähigkeit des Bauteils zusätzlich. Die Spannungsspitzen der Längsspannungen sind bei räumlichen Problemen höher als bei ebenen (die Spannungsspitze steigt mit der Stabdicke), bewirken also eine Tragfähigkeitsminderung. Eine überlagerte erhöhende Wirkung hat der aus der Kerbwirkung resultierende räumliche Spannungszustand insofern, als daß der Werkstoff durch die räumliche Anspannung am Fließen gehindert wird (Fließverzug infolge Stützwirkung, vgl. BUCHMANN [2]). Unter Umständen kann daher ein gekerbter Probekörper höhere Spannungen ertragen als ein vergleichbarer ungekerbter (vgl. SCHÄFER [3]).

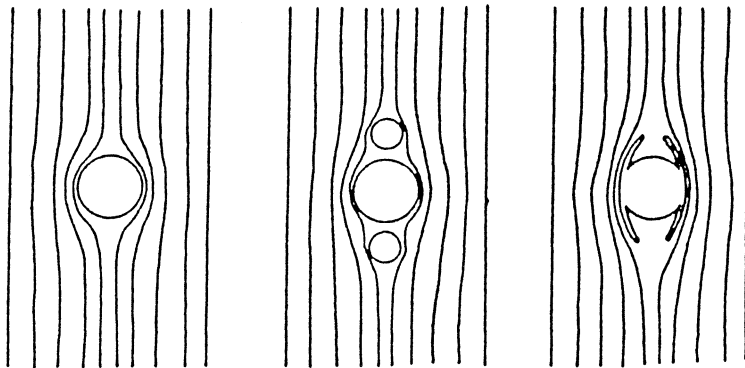
### 2.1.3 Mehrfache Kerbwirkung

Bei einer gelochten zugbeanspruchten Scheibe entsteht also ein inhomogener Spannungszustand. Bringt man nun neben oder hinter dem ersten Loch ein zweites Loch an, so wird die Spannungsverteilung, die durch das erste Loch entsteht, weiter gestört. Man spricht in einem solchen Fall von mehrfacher Kerbwirkung (allg.: Überlagerung von zwei oder mehr Störungen der Spannungsverteilung).

Die Auswirkung solcher Mehrfachkerben auf die Zugfestigkeit kann größer oder kleiner sein als die von Einzelkerben. THUM [8] nennt

Mehrfachkerben, die geringere Spannungsspitzen erzeugen als einzelne Kerben, Entlastungskerben und solche, die eine Erhöhung der Spannungsspitzen bewirken, Überlastungskerben.

Entlastungskerben entstehen z.B. bei hintereinanderliegenden Kerben. Anschaulich kann man die 'Entlastungswirkung' von hintereinander liegenden Kerben mit Hilfe des Kraftfluß-Begriffes erklären (vgl. THUM [4]). Nach der Kraftflußvorstellung ist die Kerbwirkung umso größer, je stärker der Kraftfluß durch die Kerbe umgelenkt und zusammenge-drängt wird. Zur Milderung der Kerbwirkung müssen die sog. Entlastungskerben daher so angebracht werden, daß die Umlenkung des Kraftflusses allmählich erfolgt (siehe Bild).



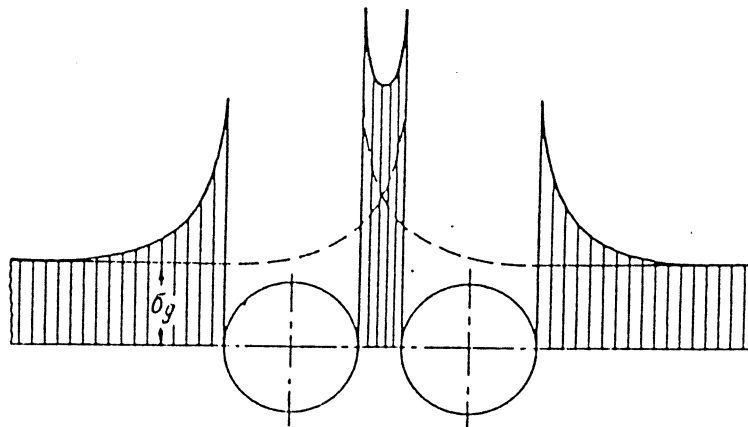
Glättung des Kraftflusses durch Entlastungsbohrungen oder Entlastungsschnitte (aus [4])

Die Richtigkeit der Kraftflußvorstellung wurde bereits mehrfach durch Versuchsergebnisse und Rechnungen bestätigt (vgl. z.B. Meßergebnisse von SIEBEL und KOPF [9] und/oder Rechenergebnisse von LIN und UENG [10] oder HOWLAND [11]).

Mit nicht zu dicht nebeneinanderliegenden Kerben (hier: Bohrungen) kann in manchen Fällen ebenfalls eine gewisse Entlastungswirkung erzielt werden. Voraussetzung ist hier allerdings, daß bei günstiger Gestalt und Lage der Zusatzkerben die Formzahl stärker abnimmt als der Querschnitt (vgl. [8]). Laut THUM kann die Querschnittsverminde-

rung durch zusätzliche Bohrungen sogar 20-30% betragen, ohne daß eine nennenswerte Vergrößerung der Beanspruchung im Vergleich zum einfach gekerbten Bauteil auftritt. Man muß dabei allerdings beachten, daß durch nebeneinander liegende Löcher keinesfalls der Betrag der auftretenden Kerbspannung vermindert wird, sondern nur die Auswirkungen des durch zusätzliche Kerben verursachten Querschnittsverlustes (d.h. größere Nennspannung bei mehreren Löchern, deshalb kleinere Formzahl  $K$ ; aber größere Spannungserhöhung im Kerbgrund, deshalb größere Grundformzahl).

Verringert man den Abstand zwischen den Löchern solange, bis sich nur noch ein dünner Steg zwischen den Löchern befindet (bei konstanter Anzahl der nebeneinanderliegenden Löcher), so entstehen im Steg große Spannungen durch Überlagerung der Kerbwirkung (vgl. Bild unten; die gestrichelte Linie zeigt die Spannungsverteilung bei einem Einelloch, die durchgezogene Linie die Überlagerung). Da aber der Effekt der Querschnittsminderung (s.o.) wegfällt und somit die Nennspannung gleich bleibt, ist auch die Spannungserhöhung (bezogen auf die Nennspannung), also die Formzahl, größer. Die Spannungserhöhung ist umso größer, je dichter die Löcher aneinander liegen. Rechnungen von LING [12] oder LIN und UENG [10] bestätigen diesen Sachverhalt.



Spannungserhöhung in einem dünnen Steg zwischen zwei benachbarten Bohrungen (aus [4])

## 2.2 DIE RECHNERISCHE ERMITTLUNG DER SPANNUNGSVERTEILUNG

Die rechnerische Ermittlung des Spannungszustandes in gekerbten Bauteilen läuft auf die Lösung sogenannter "Randwertaufgaben" hinaus. Man geht von den Grundgleichungen der ebenen Elastizitätstheorie (Kräftegleichgewichtsbedingungen, Randbedingungen, Verträglichkeitsbedingungen respektive Kompatibilitätsbedingungen, Stoffgesetze) aus und sucht eine Spannungsfunktion, die diese Grundgleichungen - insbesondere die Randbedingungen - erfüllt. Es ist dabei einleuchtend, daß die Lösung einer Randwertaufgabe umso schwieriger wird, je komplizierter sich die Randbedingungen (vorgegebene Kräfte oder Verschiebungen an bestimmten Punkten) formulieren lassen oder je umfangreicher die Beschreibung der Stoffeigenschaften (Hooke'sches Gesetz für isotrope bzw. anisotrope Stoffe) ist.

Aus den oben genannten Gründen ist es verständlich, daß in der Literatur vor allem Lösungen für einfache geometrische Formen (z. B. einzelne Löcher in unendlich ausgedehnten Scheiben) und isotrope Werkstoffe zu finden sind. Aufgrund einer umfangreichen Literaturdurchsicht können jedoch für folgende Fälle Lösungsmöglichkeiten bzw. Ergebnisse angegeben werden:

- kreisförmiges Loch in einer zugbeanspruchten orthotropen unendlichen Scheibe
- zwei kreisförmige Löcher in einer zugbeanspruchten orthotropen unendlichen Scheibe

Nachfolgend werden, soweit sinnvoll, für die genannten Fälle die Gleichungen zur Berechnung der Spannungskomponenten angegeben. Auf eine genaue Herleitung der Gleichungen wird verzichtet. Außerdem werden, soweit in den jeweiligen Veröffentlichungen vorhanden, bereits durchgerechnete Beispiele und Vergleiche mit anderen Methoden aufgeführt.

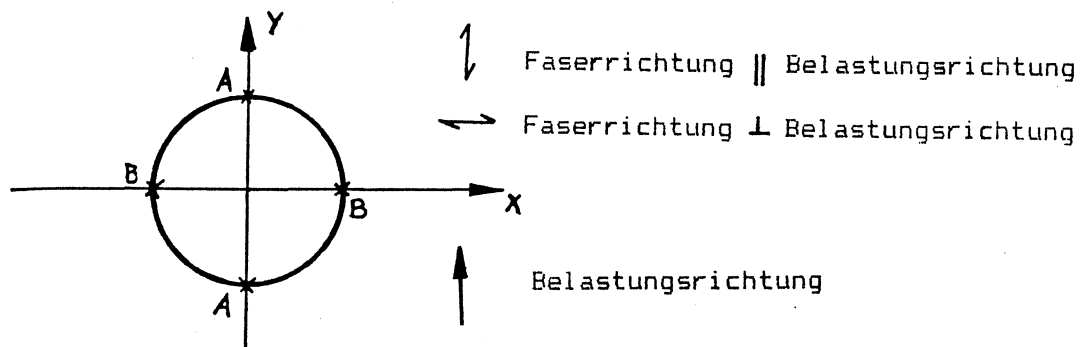
Die Anwendung dieser Gleichungen auf Kunstharzpreßholz wird in Abschnitt 2.4 dieses Berichtes diskutiert.

### 2.2.1 Spannungsverteilung in einer orthotropen Scheibe mit einem kreisförmigen Loch

Mit dem Einfluß der Anisotropie auf die Spannungsverteilung haben sich nur sehr wenige Autoren beschäftigt. Wie LICHA [13] 1982 in seiner Arbeit zeigt, liefert aber eine Nichtberücksichtigung der Anisotropie in der Spannungsanalyse nur unzureichende Ergebnisse und kann zu Fehlschlüssen führen. Am Beispiel eines kreisförmigen Tunnelprofils untersuchte LICHA den Fall einer orthotropen (=orthogonal anisotrop) unendlichen Scheibe mit einer kreisförmigen Öffnung und stellte fest, daß besonders bei hohen Orthotropiegraden starke Spannungsüberhöhungen und Verschiebungen der Zug- und Druckzonen im Vergleich zum isotropen Fall auftreten. Seine rechnerisch ermittelten Werte belegt er dabei durch spannungsoptische Untersuchungen an diskret-orthotropen Modellen.

SAWIN [14] hat 1956 ebenfalls den anisotropen Fall untersucht und dabei festgestellt, daß sich je nach Orthotropiegrad und Belastungsrichtung der Ort der absolut größten Spannungserhöhung ändert.

Bei isotropen Werkstoffen ist, bei Zug in y-Richtung, die absolut größte Spannungserhöhung am Lochrand auf der x-Achse. Die Spannungserhöhung entlang der y-Achse ist vom Betrag kleiner.



Bei einem stark anisotropen Werkstoff, wie z.B. Holz, und bei Belastung in den elastischen Symmetrieebenen (also Zug in oder rechtwinklig zur Faserrichtung) ändert sich der Betrag dieser Maximalspannungen je nachdem, ob in oder rechtwinklig zur Faserrichtung belastet wird. Verändert man die Belastungsrichtung, d.h. belastet man nicht in den

elastischen Symmetrieebenen, so ändern sich Ort und Betrag der maximalen Spannung. SAWIN hat rechnerisch gezeigt, daß bei einer Änderung des Winkels  $\delta$  zwischen Kraft- und Faserrichtung sich auch der Ort und die Größe der maximalen Spannungserhöhung ändert. Die Spannungserhöhung ist kleiner, wenn man nicht in Richtung des größten Elastizitätsmoduls belastet.

Eine Näherungsformel zur Berechnung der Spannungsverteilung bei orthotropen Körpern geben NUISMER und WHITNEY [15] (1975) an. Es gilt für die Normalspannung  $\sigma_y$  entlang der x-Achse (Zug in y-Richtung) im Bereich  $x > R$ :

$$\sigma_y(x, 0) = \frac{\bar{\sigma}}{2} \left\{ 2 + \left(\frac{R}{x}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{R}{x}\right)^4 - (K_T^\infty - 3) \cdot \left[ 5 \cdot \left(\frac{R}{x}\right)^6 - 7 \cdot \left(\frac{R}{x}\right)^8 \right] \right\}$$

$R$  ist der Lochradius,  $\bar{\sigma}$  die Nennspannung ( $\sigma_n$ ) und  $K_T^\infty$  ist ein sog. orthotroper Spannungskonzentrationsfaktor ("orthotropic stress concentration factor for an infinite width plate"), der sich aus der Scheibentheorie für Schichtwerkstoffe ("laminated plate theory") ableitet und sich aus den Elastizitätskonstanten folgendermaßen berechnet:

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{2 \cdot \left( \sqrt{\frac{\bar{E}_{11}}{\bar{E}_{22}}} - \nu_{12} \right) + \frac{\bar{E}_{11}}{\bar{G}_{12}}}$$

Dabei ist:

- $\bar{E}_{11}$  der Elastizitätsmodul parallel zur Krafrichtung (hier  $E_y$ ),
- $\bar{E}_{22}$  der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Krafrichtung (hier  $E_x$ ),
- $\bar{G}_{12}$  der mittlere Schubmodul (hier  $G_{xy}$ ) und
- $\nu_{12}$  die Querdehnzahl.

### 2.2.2 Spannungsverteilung in einer orthotropen unendlichen Scheibe mit zwei Löchern

Den Fall einer orthotropen Scheibe mit zwei identischen elliptischen Löchern haben LIN und UENG [10] 1987 untersucht. In ihren Ausführungen beschränken sie sich dabei auf orthotrope Materialien für deren Elastizitätseigenschaften folgender Zusammenhang gilt:

$$\left( \frac{E_1}{G} - 2\nu_1 \right)^2 > 4 \frac{E_1}{E_2}$$

$E_1$  und  $E_2$  sind die Elastizitätsmoduln in den zwei Hauptrichtungen der Orthotropie,  $G$  der Schubmodul und  $\nu_1$  die Poissonsche Querdehnzahl.

LIN und UENG geben eine Lösung für den Fall zweier benachbarter identischer elliptischer Löcher in Form von Reihen an, die es ermöglicht, die Spannungsverteilung am Lochrand numerisch zu ermitteln. Weiterhin haben sie für zwei orthotrope Materialien sowie für isotropes Material diese Spannungsverteilung berechnet und mit Werten für die Spannungsverteilung am Rande von einzelnen Löchern (Lochabstand unendlich groß) verglichen. Als Maß für den Unterschied zwischen dem Fall eines einzelnen Loches und dem Fall zweier benachbarter Löcher wurde dabei der folgende Zusammenhang definiert:

$$K_{p,q} = \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_{\theta, L=\infty}}{\sigma_{\theta, L=\infty}} \right)_{p,q}$$

$\sigma_\theta$  ist dabei die Spannung am Lochrand für den Fall zweier Löcher,  $\sigma_{\theta, L=\infty}$  die Spannung für den Fall nur eines Loches (bzw. für Lochabstand  $L = \infty$ ),  $p$  und  $q$  kennzeichnen die Belastungen ( $p$  für hintereinanderliegende Löcher,  $q$  für nebeneinanderliegende Löcher).

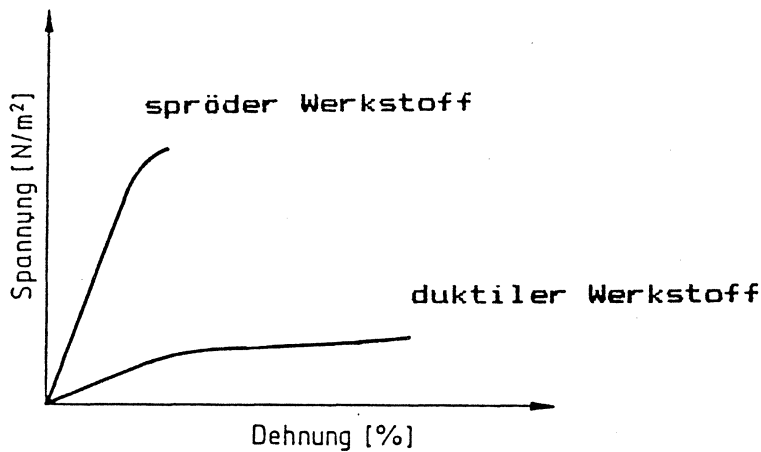
Eine Auswertung dieser Gleichungen zeigt, daß sich wie bei isotropen Werkstoffen die Löcher mit zunehmendem Lochabstand immer weniger beeinflussen ( $K_{p,q}$  geht gegen Null). Es zeigt sich weiter, daß sich die elastischen Eigenschaften des Werkstoffs bei hintereinander liegenden Löchern weniger auswirken als bei nebeneinander liegenden.



## 2.3 DER EINFLUSS ÖRTLICH ERHÖHTER SPANNUNGEN AUF DAS FESTIGKEITSVERHALTEN SPRÖDER WERKSTOFFE

### 2.3.1 Allgemeines

Ein Werkstoff wird als spröde bezeichnet, wenn bei Belastung bis zum Bruch keine nennenswerten plastischen Verformungen auftreten. Der Bruch spröder Werkstoffe erfolgt direkt nach dem elastischen Stadium der Formänderung. Ein duktiler Werkstoff dagegen zeigt vor dem Bruch plastische Verformungen, durch die Spannungsspitzen abgebaut werden können (vgl. ONDRACEK [16] 1986, S.175).



Geht man davon aus, daß bei spröden Werkstoffen unter einachsiger Zugbeanspruchung die Normalspannungshypothese gilt (d.h. der Bruch tritt ein, wenn die im Bauteil auftretende Normalspannung die Bruchfestigkeit des Werkstoffes erreicht hat), so kann man daraus folgern, daß die im Kerbgrund auftretende Spannungsspitze  $\sigma_{\max}$  für das Versagen gekerbter Bauteile aus spröden Werkstoffen maßgebend ist.

Anhand von Zugversuchen konnte gezeigt werden, daß der Bruch in gelochten, zugbeanspruchten Bauteilen tatsächlich vom Kerbgrund ausgeht, die Spannung im Kerbgrund also in erster Linie für das Versagen des Bauteils maßgebend ist. Die rechnerisch ermittelte Spannungserhöhung am Lochrand konnte jedoch durch vergleichende Zugversuche an gelochten und ungelochten Bauteilen nicht verifiziert werden (vgl. z.B. LEHR [7] (1934), SCHÄFER [17] (1953) oder KOLLMANN [18] (1952)). Die Zugversuche an gelochten Bauteilen ergaben immer eine höhere Belastbarkeit als sie aufgrund der berechneten Spannungsspitze bei Gültigkeit der Normalspannungshypothese zu erwarten gewesen wäre. WELLINGER schließt daraus, daß selbst bei spröden Werkstoffen (z.B. Grauguß) plastische Verformungen, wenn auch nur in geringem Ausmaß, möglich sind.

Es ist folglich davon auszugehen, daß die Spannungserhöhung am Lochrand bei zugbeanspruchten Bauteilen zwar eine Festigkeitsminderung bewirkt, der rechnerisch ermittelte Wert für die Maximalspannung am Lochrand aber selbst bei spröden Werkstoffen nicht gleich der Bruchspannung aus dem Zugversuch ist.

Wird bei der Festlegung der zulässigen Spannung bei gelochten zugbeanspruchten Bauteilen aus spröden Werkstoffen also die rechnerisch ermittelte Maximalspannung am Lochrand zugrunde gelegt, so liegt man damit zwar auf der sicheren Seite, nutzt aber das wirkliche Verhalten des Werkstoffes (Abbau von Spannungsspitzen durch plastische Verformungen im Kerbgrund und deshalb nicht die volle Wirksamkeit der Spannungsspitze) nicht aus, was unter Umständen zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann.

### 2.3.2 Versagenskriterien für orthotrope Materialien

Da man davon ausgehen kann, daß es sich bei Kunstharzpreßholz im allgemeinen um einen orthotropen Werkstoff handelt (Kunstharzpreßsperrholz und Kunstharzpreßschichtholz), ist es notwendig, zur Beurteilung des Festigkeitsverhaltens auch Bruch- oder Festigkeitshypothese-

sen anzuwenden, die speziell für orthotrope Materialien entwickelt wurden.

EDLUND [19] hat 1982 einige solcher Bruchhypothesen für orthotrope Materialien wie Holz oder faserverstärkte Kunststoffe untersucht und zusammengestellt. Die dort angegebenen Hypothesen berücksichtigen einen mehrachsigen Spannungszustand im kritischen Bereich des beanspruchten Bauteils. Da aber in dem hier zu untersuchenden Fall die im Kerbgrund auftretende Spannungsspitze für das Versagen maßgebend ist und im höchstbeanspruchten Punkt (am Lochrand) im ebenen Fall ein rein einachsiger Beanspruchungszustand entsteht, erscheint eine Anwendung dieser Hypothesen nicht sinnvoll.

NUISMER und WHITNEY [15] dagegen haben sich mit Versagenskriterien beschäftigt, die speziell auf das zu untersuchende Kerbspannungsproblem bei orthotropen Schichtwerkstoffen ausgelegt sind. Es wird dabei von der bekannten Spannungsverteilung (Normalspannung in Krafrichtung) bei zugbeanspruchten Bauteilen aus orthotropem Material ausgegangen und die für das Versagen maßgebende Spannung bestimmt.

Das erste Kriterium ("point stress criterion") besagt, daß der Werkstoff versagt, sobald die Normalspannung  $\sigma_y$  (bei Zug in y-Richtung) in einem bestimmten Abstand  $d_0$  vom Loch die Zugfestigkeit  $\beta_z$  des ungelochten Werkstoffes erreicht hat.

Das zweite Kriterium ("average stress criterion") besagt, daß der Werkstoff versagt, sobald der Durchschnittswert ("average value") von  $\sigma_y$  in einem bestimmten Abstand  $a_0$  vom Loch die Zugfestigkeit  $\beta_z$  des ungelochten Bauteils erreicht hat.

Untersuchungen an orthotropen Werkstoffen (vor allem an faserverstärkten Kunststoffen) unter Anwendung der oben genannten Versagenskriterien findet man z.B. bei NUISMER/WHITNEY [15], TSANGARAKIS [20] (1984) oder LAGACE [21] (1986). Eine Anwendung dieser Kriterien auf Kunstharzpreßholz erscheint sinnvoll und realisierbar, sofern die dazu notwendigen Werkstoffkennwerte (Elastizitätsmoduln, Schubmodul und Querdehnzahl) verfügbar sind.

## 2.4 ÜBERTRAGBARKEIT DER THEORIEN AUF KUNSTHARZPRESSHOLZ

### 2.4.1 Kriterien für die Übertragbarkeit der Gleichungen aus der Elastizitätstheorie auf Kunstharzpreßholz

Eine wichtige Grundlage zur Herleitung der Gleichungen zur Berechnung des Spannungszustandes in einem Werkstoff ist die Formulierung der Stoffeigenschaften. Es ergeben sich daraus einige Kriterien bzw. Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Gleichungen auf die verschiedenen Werkstoffe, die nachfolgend beschrieben werden:

#### Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes

Da die angegebenen Gleichungen zur Spannungsermittlung aus der Elastizitätstheorie abgeleitet sind, wird folglich auch von dem Werkstoff, auf den die Gleichungen angewendet werden sollen, ein elastisches Verhalten gefordert. Das elastische Verhalten eines Werkstoffes wird durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben, das den linearen Zusammenhang zwischen dem Spannungs- und dem Dehnungstensor darstellt (vgl. LICHA [13]). Ist dieser lineare Zusammenhang (zumindest näherungsweise in bestimmten Spannungs- bzw. Dehnungsbereichen) gegeben, so kann die Spannungsermittlung mit den Gleichungen aus der Elastizitätstheorie erfolgen und nur dann erhält man (theoretisch) genaue Werte für die Spannungsverteilung. Die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes ist also die werkstoffabhängige Grundlage zur elastizitätstheoretischen Ermittlung des Spannungszustandes in einem Werkstoff.

#### Homogenität des Werkstoffes

Bei einem homogenen Werkstoff sind die Werkstoffeigenschaften an jedem Punkt im Werkstoff gleich, ein inhomogener Werkstoff zeigt in verschiedenen Punkten ein unterschiedliches Verhalten. Die Gleichungen der Elastizitätstheorie erfordern eine genaue Beschreibung der Werkstoffeigenschaften. Den Lösungen ist ein homogenes Werkstoffverhalten zugrundegelegt, es wird für jeden

Punkt im Werkstoff dasselbe Werkstoffverhalten vorausgesetzt. Die Genauigkeit, mit der die Spannungen ermittelt werden können, hängt also davon ab, inwieweit für den zu untersuchenden Werkstoff ein solches homogenes Verhalten zutreffend ist.

#### Isotropie bzw. Anisotropie des Werkstoffes

Bei einem isotropen Werkstoff sind die Werkstoffeigenschaften in jeder Richtung gleich, der Werkstoff zeigt in jede Richtung dasselbe elastische Verhalten. Ein anisotroper Werkstoff dagegen zeigt in verschiedenen Richtungen ein unterschiedliches Verhalten, das sich auch auf die Spannungsverteilung im Werkstoff auswirkt (zur Anisotropie von Holz bzw. von Verbundwerkstoffen s.z.B. KEYLWERTH [22] (1951), LISCHKE [23] (1985) oder BODIG und JAYNE [24] (1982)). Das isotrope bzw. anisotrope Verhalten eines Werkstoffes wird in der Elastizitätstheorie durch die Formulierung des Hooke'schen Gesetzes berücksichtigt. Es ergibt sich, je nachdem ob und in welche Richtungen der Werkstoff anisotrop ist, eine unterschiedliche Anzahl verschiedener elastischer Konstanten, die zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens und somit auch zur Spannungsermittlung notwendig sind. Die in diesem Bericht vorgestellten Gleichungen zur Spannungsermittlung setzen ein isotropes bzw. orthogonal anisotropes Verhalten des Werkstoffes voraus. Die Anwendbarkeit der Gleichungen hängt also davon ab, inwieweit sich der zu untersuchende Werkstoff in die Bereiche "isotroper Werkstoff" oder "orthogonal anisotroper Werkstoff" einordnen läßt.

#### Folgerungen

Aus den Annahmen, die zur Herleitung der Gleichungen zur Spannungsermittlung in gelochten Bauteilen getroffen wurden, folgt, daß die Gleichungen nur auf den Fall eines ideal elastischen, homogenen und isotropen bzw. orthotropen Werkstoffes anwendbar sind. Ein solcher 'idealer Werkstoff' existiert jedoch nicht.

Wendet man die Gleichungen jedoch auf Werkstoffe an, die diesen Idealvorstellungen nicht entsprechen, ergibt sich daraus ein 'Fehler' bei der Spannungsermittlung, der vom Unterschied zwischen dem 'wirklichen Werkstoffverhalten' und dem 'idealen Werkstoffverhalten' abhängt.

#### 2.4.2 Zusammenfassung

Die Gleichungen aus der Elastizitätstheorie sind streng genommen nur auf linear elastische, homogene und isotrope bzw. orthotrope Werkstoffe anwendbar. Das zu untersuchende Kunstharzpreßholz kann diese Forderungen zumindest näherungsweise erfüllen, sofern die Dehnungen genügend klein sind. Die Gleichungen aus der Elastizitätstheorie sind also für eine näherungsweise Ermittlung der Spannungsverteilung auf Kunstharzpreßholz anwendbar.

Da es sich bei Kunstharzpreßholz im allgemeinen um einen in Plattenebene orthotropen Werkstoff handelt, müssen zur Berechnung des Spannungszustandes die entsprechenden Formeln für orthotrope Werkstoffe benutzt werden. Dazu ist aber die Kenntnis verschiedener Werkstoffkennwerte erforderlich, nämlich der Elastizitätsmoduln in und rechtwinklig zur Krafrichtung, des Schubmoduls und der Querdehnzahl. Da teilweise die entsprechenden Werkstoffkennwerte nicht bekannt sind, ist es wünschenswert, diese in weiteren Untersuchungen zu ermitteln.

## 2.5 THEORETISCHE SPANNUNGSVERTEILUNGEN BEI ZUGKÖRPERN

SCHOLL [25] hat 1988 in einer Arbeit den Einfluß verschiedener Parameter auf die Formzahlen untersucht und dabei die Parameter in Grenzen variiert, wie sie für Kunstharzpreßholz zutreffen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefaßt.

### 2.5.1 Der Einfluß von Stabbreite und Lochdurchmesser

- Bezieht man die Maximalspannung am Lochrand auf die Spannung im Nettoquerschnitt (d.h. auf die Nennspannung im geschwächten Querschnitt), so wird die Spannungserhöhung (Formzahl) mit dem Lochgrößenverhältnis <sup>1)</sup> kleiner.
- Die Gleichungen für die Spannungsverteilung bei einer **isotropen** unbegrenzten Scheibe sind für eine begrenzte Scheibe bis zu einem Lochgrößenverhältnis von 0,2 anwendbar (Genauigkeit von 6%).

### 2.5.2 Der Einfluß hintereinander oder nebeneinander liegender Löcher

- Hintereinander liegende Löcher in **isotropen** Werkstoffen bewirken eine geringere Spannungserhöhung (Spannung in Kraftrichtung) als einzelne Löcher. Je weiter die Löcher auseinander liegen, desto weniger beeinflussen diese sich gegenseitig, die Formzahl steigt an und nähert sich dem Wert drei (unendlicher Lochabstand = einzelnes Loch).
- Bei nebeneinander liegenden Löchern in isotropen Werkstoffen ist die Spannungserhöhung größer als beim Einelloch. Je weiter die Löcher auseinander liegen, desto geringer wird die Spannungserhöhung, für unendlich weit auseinander liegende Löcher ist sie gleich drei.

---

<sup>1)</sup> als Lochgrößenverhältnis wird das Verhältnis von Lochdurchmesser zu Streifenbreite verstanden

- Läßt man einen Fehler bis zu 6% zu, dann kann die Spannungserhöhung am Rande von mehreren Löchern ab einem Achsabstand von  $3d$  wie bei nur einem Loch ermittelt werden.
- Bei anisotropen bzw. orthotropen Werkstoffen hängt die Spannungserhöhung am Lochrand nicht nur von dem Abstand der Löcher voneinander ab, sondern auch von den elastischen Eigenschaften des Werkstoffs. Wie beim isotropen Fall bewirken hintereinander liegende Löcher im Vergleich zu Einzellöchern eine geringere und nebeneinander liegende Löcher eine größere Spannungserhöhung am Lochrand. Die Anisotropie des Werkstoffes bewirkt eine zusätzliche Veränderung der Spannungserhöhung im Vergleich zu isotropen Werkstoffen, wobei die Wirkung der Anisotropie bei hintereinander liegenden Löchern stärker ist als bei nebeneinander liegenden Löchern. Bei hintereinander liegenden Löchern erhält man günstigere Werte als bei isotropen Werkstoffen sofern der anisotrope Werkstoff in Richtung des kleineren Elastizitätsmoduls beansprucht wird.

### 2.5.3 Der Einfluß der Anisotropie

Es zeigte sich, daß die Näherungsformel nach NUISMER/WHITNEY [15] (s.S. 12) zumindest für die Spannungserhöhung am Lochrand recht genaue Werte liefert.

Es liegt deshalb nahe, den Einfluß der Werkstoffkennwerte  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  und  $\nu$  mit Hilfe der von NUISMER/WHITNEY verwendeten Formel zu untersuchen. Man kann anhand dieser Gleichung den Einfluß von  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  und  $\nu$  auf die Spannungserhöhung am Lochrand erkennen:

- je größer der Elastizitätsmodul in Kraftrichtung, desto größer die Spannungserhöhung
- je größer der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Kraftrichtung, desto kleiner die Spannungserhöhung
- je größer der Schubmodul desto kleiner die Spannungserhöhung
- je größer die Querdehnzahl desto kleiner die Spannungserhöhung



## 2.6 ZUSAMMENFASSUNG

Runde Löcher (Kerben) bewirken in zugbeanspruchten Bauteilen eine ungleichmäßige Spannungsverteilung. Das Tragverhalten und die Tragfähigkeit des Bauteils wird insbesondere bei spröden Werkstoffen durch diese ungleichmäßige Spannungsverteilung beeinflusst.

In einer unendlich ausgedehnten, mit einem Loch versehenen Scheibe aus einem isotropen Werkstoff tritt die maximale Spannungserhöhung am Lochrand in einem Schnitt quer zur Krafrichtung durch die Lochmitte auf und hat den Wert drei. Verändert man die Anzahl der Löcher, die Lochanordnung, den Lochabstand, die Scheibenbreite oder wählt man einen anisotropen Werkstoff, so ändern sich die Spannungsverteilung sowie der Betrag und der Ort der maximalen Spannungserhöhung:

- In Krafrichtung hintereinander liegende Löcher bewirken eine geringere Spannungserhöhung am Lochrand als nebeneinander liegende oder einzelne Löcher. Vergrößert man den Abstand der Löcher zueinander, so ergibt sich bei hintereinander liegenden Löchern mit steigendem Lochabstand eine Erhöhung der Spannung am Lochrand, bei nebeneinander liegenden Löchern hingegen eine Verminderung.
- Vergrößert man bei seitlich begrenzten Scheiben den Lochdurchmesser bei konstanter Scheibenbreite, so wird die Spannungserhöhung (Formzahl) mit steigendem Lochdurchmesser kleiner.
- Die Anisotropie des Werkstoffes hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluß auf die Spannungsverteilung bei zugbeanspruchten gelochten Bauteilen. Von einer für isotrope Werkstoffe ermittelten Spannungsverteilung kann nicht unbedingt auf die Spannungsverteilung bei anisotropen Werkstoffen geschlossen werden. Es ergibt sich bei anisotropen Werkstoffen unter Umständen eine erheblich größere Spannungserhöhung am Lochrand als bei iso-

tropen Werkstoffen; auch der Ort und die Richtung der auftretenden Maximalspannung kann sich durch den Einfluß der Anisotropie ändern.

- Die rechnerische Erfassung der Spannungsverteilung bei anisotropen Werkstoffen ist wesentlich schwieriger als bei isotropen Werkstoffen. Lösungen bzw. Lösungsansätze sind nur für den Fall orthotroper (orthogonal anisotroper) Werkstoffe bekannt. Eine Auswertung dieser Lösungen mit den für Kunstharzpreßholz in Frage kommenden Werkstoff-Kennwert-Kombinationen ergab eine Vergrößerung der Spannungserhöhung am Lochrand mit steigendem Elastizitätsmodul in Krafrichtung. Eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Krafrichtung, des Schubmoduls oder der Querdehnzahl dagegen haben eine Verminderung der Spannungserhöhung am Lochrand zur Folge. Die Tragweite dieser Einflüsse, insbesondere auf das Festigkeitsverhalten, ist noch zu untersuchen. Weiterhin sind die zur rechnerischen Ermittlung der Spannungsverteilung notwendigen Werkstoffkennwerte zu ermitteln, da hierfür teilweise keine oder nur unzureichende Daten vorliegen.

### 3 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DES KERBEINFLUSSES

#### 3.1 ALLGEMEINES

Im Abschlußbericht des ersten Teils dieser Forschungsarbeiten [1] wurde darauf hingewiesen, daß die Kerbempfindlichkeit bei Zugbeanspruchung von plattenförmigem Kunstharzpreßholz (KPH) noch zu untersuchen ist, da einige Tastversuche sowie frühere Arbeiten einen deutlichen Kerbeinfluß erwarten ließen.

Durch systematische Versuche mit auf dem Markt befindlichem Plattenmaterial aus KPH sollte deshalb geklärt werden, wie groß dieser Einfluß ist.

Zur Bestimmung dieses Einflusses wurden Versuche unter Variation der Parameter Plattentyp, Plattendicke  $t$ , Lochdurchmesser  $d$ , Verhältnis Lochdurchmesser/Stabbreite  $d/b$  und Lage der Deckfurniere bezüglich der Krafrichtung durchgeführt.

Neben der Angabe von Kerbfaktoren für das geprüfte Material dienen die Versuche auch der Prüfung, in wieweit die Theorie der Kerbspannungslehre auf Plattenmaterial aus KPH angewendet werden kann. Darauf aufbauend erscheint es möglich, erforderlichenfalls gezielt Verbesserungen (Veränderungen) des Plattenaufbaues vorzunehmen.

Da in den Arbeiten zu der Thematik der Kerbwirkung unterschiedliche Definitionen für den Kerbeinfluß benutzt werden, wird in diesem Bericht der Begriff des Kerbfaktors folgendermaßen definiert:

Der Kerbfaktor  $\alpha_k$  ist das Verhältnis der Bruchspannung  $\sigma_k$  eines gekerbten Zugstabes zur Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Materials.

$$\alpha_k = \sigma_k / \beta_z$$

mit  $\sigma_k =$  Bruchlast/Nettoquerschnitt

$\beta_z =$  Zugfestigkeit des Materials.

$\sigma_k$  ist also die Nennspannung  $\sigma_n$  im Augenblick des Bruches.

### 3.2 VERSUCHSMATERIAL

Für die Versuche mit KPH mußte eine Auswahl aus der Vielzahl verschiedener KPH-Typen getroffen werden. Folgende Kriterien waren für diese Auswahl ausschlaggebend:

a Finanzieller Rahmen

Versuche mit einer Vielzahl unterschiedlicher Plattenmaterialien von unterschiedlichen Herstellern hätten den finanziellen Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Der Versuchsumfang beschränkte sich daher auf einen möglichst repräsentativen Querschnitt.

b Anzahl der Versuche jeder Versuchsreihe

Durch den homogenen Aufbau von KPH und aufgrund der Ergebnisse aus [1] war eine geringe Streuung der Materialeigenschaften zu erwarten. Daher wurde die Probenanzahl je Versuchsreihe auf drei begrenzt.

c Verwendung der Ergebnisse aus [1]

Aus Kostengründen wurde, von einer Ausnahme abgesehen, Plattenmaterial verwendet, dessen mechanische Eigenschaften bereits in [1] ermittelt worden waren.

d Schichtaufbau

KPH wird prinzipiell auf drei verschiedene Arten (Plattentyp) geschichtet:

als Kunstharz-Preßschichtholz (KPSCH):

Die Faserrichtungen der einzelnen Furnierschichten verlaufen parallel zueinander. Dabei kann die Faserrichtung von bis zu 15 % der Furniere aus herstellungstechnischen Gründen auch rechtwinklig zur eigentlichen Faserhaupttrichtung verlaufen.

als Kunstharz-Preßsperrholz (KPSP):

Die Faserrichtungen der benachbarten Furniere sind um 90° gegeneinander verdreht.

als Kunstharz-Preßsternholz (KPSN):

Die Faserrichtungen der benachbarten Furniere sind in Winkeln von 15° bis 75° gegeneinander gekreuzt.

Unter den vorgenannten Auswahlkriterien wurden schließlich Platten von vier Herstellerfirmen ausgewählt. Mit ausschlaggebend waren dabei auch die Kosten des Materials.

Tabelle 1 (Anlage 1) enthält eine Zusammenstellung des verwendeten Versuchsmaterials. Die Tabelle enthält Angaben über den Hersteller, den Plattentyp, die Plattendicke und die Furnierdicken der verdichteten Furniere. Das Plattenmaterial erhielt die internen Herstellerbezeichnungen A bis D.

### 3.3 VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm wurde so aufgestellt, daß ein eventuell vorhandener Einfluß der Parameter

- Plattentyp,
- Plattendicke  $t$ ,
- Lochdurchmesser  $d$ ,
- Verhältnis Lochdurchmesser/Stabbreite  $d/b$  und
- Lage der Deckfurniere zur Belastungsrichtung

auf die Kerbempfindlichkeit des Plattenmaterials festgestellt werden konnte.

Bei einer Gesamtanzahl von 910 Versuchen wurden die Parameter im einzelnen wie folgt variiert:

Plattentyp:

Insgesamt wurden 284 Probekörper aus KPSCH, 530 Probekörper aus KPSP und 96 Probekörper aus KPSN geprüft.

Plattendicke  $t$ :

Das für die Untersuchungen verwendete Plattenmaterial hatte die Nenndicken 6, 8, 12 und 20 mm.

Lochdurchmesser  $d$ :

Von jeder Versuchsplatte wurden Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit hergestellt. Je nach der Menge des zur Verfügung stehenden Materials wurden außerdem Probekörper mit Lochdurchmessern von 8, 10, 12, 16, 20, 24 und 30 mm geprüft.

Lage der Deckfurniere zur Belastungsrichtung:

Zur Bestimmung des Einflusses des Winkels zwischen Belastungsrichtung und Orientierung der Deckfurniere wurden abhängig von der Menge des zur Verfügung stehenden Materials Probekörper mit den Winkeln  $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  und  $90^\circ$  hergestellt.

In Tabelle 2 (Anlage 2) ist das gesamte Versuchsprogramm mit jeweils drei Versuchen je Versuchsreihe zusammengestellt.

### 3.4 PRÜFKÖRPER UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit des ungeschwächten Plattenmaterials entsprachen den Angaben in Bild 1 (Anlage 3).

Bild 2 (Anlage 3) zeigt die einheitliche Prüfkörperform der gelochten Zugstäbe.

Die Prüfkörper waren zum Zeitpunkt der Prüfung normalklimatisiert. Alle Versuche wurden mit einer weggesteuerten Zug-Prüfmaschine (maximale Last = 100 kN) durchgeführt.

Die Vorschubgeschwindigkeit des Querhauptes wurde so gewählt, daß der Bruch des Prüfkörpers nach 1 bis 2 Minuten eintrat und betrug einheitlich 0,5 mm/min.

Bei den Versuchen mit ungeschwächtem Plattenmaterial zur Bestimmung der Zugfestigkeit wurde teilweise eine induktive Wegmeßvorrichtung eingesetzt, um stichprobenartig den Zug-Elastizitätsmodul bestimmen und mit den Ergebnissen aus [1] vergleichen zu können. Dieser Vergleich zeigte eine gute Übereinstimmung der ermittelten Elastizitätsmoduln.

## 3.5 ZUGFESTIGKEIT

### 3.5.1 Allgemeines

Aufgrund der aus [1] bekannten Ergebnisse sowie vorangegangener Tastversuche wurden je Versuchsreihe nur drei Versuche durchgeführt. Die geringen Streuungen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen erlauben es, die folgenden Auswertungen mit den Mittelwerten jeder Versuchsreihe durchzuführen.

Bild 3 (Anlage 4) zeigt ein Histogramm, in dem die relative Häufigkeit in % über das Verhältnis der Einzelwerte zum entsprechenden Mittelwert aufgetragen ist.

### 3.5.2 Versuchsergebnisse

Neben den ermittelten Zugfestigkeiten sind in den nachfolgenden Tabellen auch die Ergebnisse aus [1] sowie die Herstellerangaben enthalten.

Die Versuche ergaben nachfolgende Ergebnisse:

#### Kunstharz-Preßschichtholz (KPSCH)

In den Bildern 4 bis 6 (Anlagen 5 und 6) sind die Mittelwerte der ermittelten Zugfestigkeiten für jede Platte aus KPSCH, getrennt nach den Herstellern, über den Winkel  $\gamma$  grafisch dargestellt. Tabelle 3 (Anlage 7) enthält die tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse. Bei allen Platten aus KPSCH war schon bei einem Winkel von  $\gamma = 30^\circ$  zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere eine deutlich geringere Zugfestigkeit festzustellen. Bei Winkeln zwischen  $\gamma = 30^\circ$  und  $\gamma = 90^\circ$  wurde keine signifikante Änderung der Zugfestigkeit festgestellt.



#### Kunstharz-Preßsperrholz (KPSP)

In den Bildern 7 bis 10 (Anlagen 8 und 9) sind die Mittelwerte der ermittelten Zugfestigkeiten für jede Platte aus KPSP, getrennt nach den Herstellern, über den Winkel  $\gamma$  grafisch dargestellt. Tabelle 4 (Anlage 10) enthält die tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse. Bei den Platten aus KPSP war je nach Hersteller eine unterschiedlich große Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Winkel zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere festzustellen. Bei den Prüfplatten der Hersteller A, B und C wurde die ermittelte Zugfestigkeit mit zunehmendem Winkel kleiner und erreichte bei einem Winkel  $\gamma = 45^\circ$  einen Kleinstwert. Dies ist besonders bei den Prüfplatten des Herstellers B deutlich. Bei Winkeln  $\gamma > 45^\circ$  stieg die Zugfestigkeit wieder an. Bei den Versuchen mit Material des Herstellers D konnte dagegen keine Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Winkel festgestellt werden.

#### Kunstharz-Preßsternholz (KPSN)

In Bild 11 (Anlage 11) sind die Mittelwerte der ermittelten Zugfestigkeiten für die Platten aus KPSN des Herstellers C über den Winkel  $\gamma$  grafisch dargestellt. Tabelle 5 (Anlage 11) enthält die tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse. Bei den Platten aus KPSN war nur eine geringe Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Winkel zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere festzustellen. Es deutete sich lediglich ein geringer linearer Abfall der Zugfestigkeit mit größer werdendem Winkel an.

Die Versuche ergaben bei allen drei Plattentypen, daß die Plattendicke  $t$  keinen Einfluß auf die Zugfestigkeit hat.

### 3.6 KERBVERSUCHE

#### 3.6.1 Allgemeines

Die Versuche zur Bestimmung des Kerbeinflusses wurden mit der in Bild 2 dargestellten Prüfkörperform durchgeführt.

Auch bei den Kerbversuchen erlauben es die geringen Streuungen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen, die Auswertungen mit den Mittelwerten jeder Versuchsreihe durchzuführen. In den nachfolgenden Tabellen sind deshalb nur die Mittelwerte der ermittelten Bruchspannungen sowie die Kerbfaktoren jeder Prüfkombination (Platte - Winkel  $\gamma$  zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere - Lochanteil  $a_n$  am Gesamtquerschnitt) aufgeführt. Nachfolgend werden die verwendeten Bezeichnungen nochmals erläutert:

- $\beta_z$  = Zugfestigkeit des Materials,
- $\sigma_k$  = Bruchspannung = Bruchlast/Nettoquerschnitt,
- $\alpha_k$  = Kerbfaktor =  $\sigma_k / \beta_z$ ,
- $a_n$  = Lochanteil am Gesamtquerschnitt in % und
- $\gamma$  = Winkel zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere.

Die Ergebnisse der Kerbversuche zeigten, daß die Plattendicke  $t$  keinen signifikanten Einfluß auf die Bruchspannungen bzw. den Kerbfaktor hat. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden deshalb die Mittelwerte jeder Prüfplatte nochmals über die jeweiligen Plattendicken gemittelt. Diese Mittelwerte eines Plattentyps sind zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung und dem Variationskoeffizienten ebenfalls in den Tabellen angegeben. In die Diagramme sind diese Mittelwerte eingezeichnet.

### 3.6.2 Versuchsergebnisse

Die Versuche ergaben nachfolgende Ergebnisse:

#### Kunstharz-Preßschichtholz (KPSCH)

Tabelle 6 (Anlage 12) enthält die tabellarische Zusammenstellung der ermittelten Bruchspannungen. In Tabelle 7 (Anlage 12) sind die aus den Mittelwerten der Bruchspannungen ermittelten Kerbfaktoren zusammengestellt. In den Bildern 12 bis 14 (Anlagen 13 und 14) sind die Mittelwerte der ermittelten Bruchspannungen für jede Platte aus KPSCH, getrennt nach den Herstellern, bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Lochanteil  $a_n$  grafisch dargestellt. Bei allen Platten aus KPSCH war nur bei einem Winkel  $\gamma = 0^\circ$  ein deutlicher Einfluß des Lochanteils  $a_n$  festzustellen. Bei einem Abfall der Zugfestigkeit um bis zu 90% bei Winkeln  $\gamma > 0^\circ$  hat eine zusätzliche Querschnittsschwächung keinen signifikanten Einfluß auf die Bruchspannung. In Bild 15 (Anlage 14) sind die Kerbfaktoren des untersuchten KPSCH in Abhängigkeit vom Lochanteil deshalb nur für einen Winkel  $\gamma = 0^\circ$  dargestellt. Dieser Kerbfaktor kann für Platten der Hersteller C und D mit 0,5, für die Platten des Herstellers B mit 0,8 angegeben werden (siehe auch Tabelle 7).

#### Kunstharz-Preßsperrholz (KPSP)

Tabelle 8 (Anlage 15) enthält die tabellarische Zusammenstellung der ermittelten Bruchspannungen. In Tabelle 9 (Anlage 16) sind die aus den Mittelwerten der Bruchspannungen ermittelten Kerbfaktoren zusammengestellt. In den Bildern 16, 18, 20, 22 und 24 (Anlagen 17 bis 21) sind die Mittelwerte der ermittelten Bruchspannungen für jede Platte aus KPSP, getrennt nach den Herstellern, bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Lochanteil  $a_n$  grafisch dargestellt. Bei den Platten der Hersteller A, B und C zeigte sich eine Abhängigkeit der Bruchspannung sowohl vom Winkel  $\gamma$  als auch vom Lochanteil  $a_n$ . Dagegen war bei der Platte des Herstellers D eine Abhängigkeit der Bruch-

spannung vom Winkel  $\gamma$  nicht zu erkennen. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Versuche zur Bestimmung der Zugfestigkeit überein. In den Bildern 17, 19, 21, 23 und 25 (Anlagen 17 bis 21) sind die Mittelwerte der ermittelten Kerbfaktoren bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Lochanteil  $a_n$  grafisch dargestellt. Die Diagramme der Hersteller A, B und C zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Kerbfaktors vom Winkel  $\gamma$ . Bei Winkeln  $\gamma = 0^\circ$  und  $90^\circ$  (hohe Zugfestigkeit) ist  $\alpha_k$  deutlich geringer als bei  $\gamma = 45^\circ$  (geringste Zugfestigkeit). Beim Hersteller D, wo die Zugfestigkeit unabhängig vom Winkel  $\gamma$  ist, ergibt sich auch keine Abhängigkeit des Kerbfaktors vom Winkel.

Die Ergebnisse deuten außerdem darauf hin, daß die Zugfestigkeiten und die Bruchspannungen, und damit auch die Kerbfaktoren, auch abhängig von der Dicke der Einzelfurniere der Platten sind. Dies wird bei den zwei unterschiedlichen Platten des Herstellers B deutlich, wo die Furnierdicken 1,0 mm (B1, B2 und B3) und 0,5 mm (B4, B5 und B6) betragen.

#### Kunstharz-Preßsternholz (KPSN)

Tabelle 10 (Anlage 22) enthält die tabellarische Zusammenstellung der ermittelten Bruchspannungen. In Tabelle 11 (Anlage 22) sind die aus den Mittelwerten der Bruchspannungen ermittelten Kerbfaktoren zusammengestellt. In Bild 26 (Anlage 23) sind die Mittelwerte der ermittelten Bruchspannungen für die Platte aus KPSN des Herstellers C bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Lochanteil  $a_n$  grafisch dargestellt. In Bild 27 (Anlage 23) sind die Mittelwerte der ermittelten Kerbfaktoren bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Lochanteil  $a_n$  grafisch dargestellt. Das Diagramm zeigt, daß der Kerbfaktor weder vom Winkel  $\gamma$  noch vom Lochanteil  $a_n$  abhängig ist. Unabhängig vom Winkel und vom Lochanteil kann der Kerbfaktor für die geprüfte Platte genügend genau mit 0,6 angegeben werden.

### 3.7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Versuche zur Ermittlung des Kerbeinflusses bei Platten aus Kunstharzpreßholz wurden mit Kunstharz-Preßschichtholz (KPSCH), Kunstharz-Preßsperrholz (KPSP) und Kunstharz-Preßsternholz (KPSN) verschiedener Hersteller durchgeführt. Dazu wurden die Parameter Plattentyp, Plattendicke  $t$ , Lochdurchmesser  $d$ , Verhältnis Lochdurchmesser/Stabbreite  $d/b$  und Lage der Deckfurniere zur Belastungsrichtung variiert.

Die Untersuchungen brachten folgende Erkenntnisse:

- Ein Einfluß der Plattendicke  $t$  auf den Kerbfaktor konnte nicht festgestellt werden.
- Ein Einfluß des Verhältnisses Lochdurchmesser/Stabbreite  $d/b$  ist bei allen drei Plattentypen (KPSCH, KPSP und KPSN) vernachlässigbar.
- Bei Platten mit einer vom Winkel  $\gamma$  zwischen Belastungsrichtung und Richtung der Deckfurniere abhängigen Zugfestigkeit  $\beta_z$  (z.B. bei KPSCH für  $\gamma > 0^\circ$  und KPSP für  $\gamma = 45^\circ$ ) ist der Kerbfaktor umso größer, je geringer der Absolutwert der Zugfestigkeit ist.
- Ein Einfluß der Dicke der verdichteten Furniere auf den Kerbfaktor scheint vorhanden. Dieser Einfluß war allerdings nicht genau feststellbar, was unter anderem auch durch die unterschiedlichen Produktionsverfahren der Plattentypen bedingt sein wird.
- Für eine praktische Anwendung und Berechnung von gelochten Platten aus Kunstharzpreßholz ist es erforderlich, daß die Materialeigenschaften (insbesondere die Elastizitätsmoduln parallel und rechtwinklig zur Richtung der Deckfurniere und der Schubmodul) bekannt und genau definiert sind.

Die ermittelten Versuchsdaten sind für die Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für tragende Lochstäbe aus Kunstharzpreßholz von großer Bedeutung und können in Form von rechnerisch reduzierten, fiktiven Festigkeiten des Materials Berücksichtigung finden.

#### 4      **SCHRIFTTUM**

- [1] EHLBECK,J.;FREISEIS,R.;HÄTTICH,R. (1985)  
Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Preßschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau. 1.Abschnitt: Mechanische und physikalische Eigenschaften von ausgewählten holzhaltigen Werkstoffen / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen. Karlsruhe: Universität (TH), 1985. -Forschungsbericht
- [2] BUCHMANN, W. (1934)  
Die Kerbempfindlichkeit der Werkstoffe. In: Forschung im Ingenieurwesen 5 (1934), Heft 1, S.36-48
- [3] SCHÄFER, W. (1952):  
Die Wirkung von Kerben bei statischer Zugbeanspruchung. In: Konstruktion 4 (1952), Heft 3, S.71-77
- [4] THUM, A.; PETERSEN, C.; SVENSON, O. (1960)  
Verformung, Spannung und Kerbwirkung - Eine Einführung -. Düsseldorf: VDI, 1960
- [5] WELLINGER, K. (1969)  
Festigkeitsberechnung, Grundlagen und technische Anwendung. Stuttgart: A. Kröner, 1969
- [6] PETERSON, R.E. (1974)  
Stress Concentration Factors. New York/London/Sydney/Toronto: J. Wiley & Sons, 1974
- [7] LEHR, E. (1934)  
Spannungsverteilung in Konstruktionselementen. Berlin: VDI, 1934
- [8] THUM, A.; SVENSON, O. (1950)  
Mehrfache Kerbwirkung. Entlastungskerb - Überlastungskerb. In: VDI-Zeitschrift 92 (1950), Heft 10

- [9] SIEBEL, E.; KOPF, E. (1934)  
Beanspruchung in gelochten Platten. In: Forschungsheft 369. Berlin: VDI, 1934
- [10] LIN, J.-K.; UENG, CH.E.S. (1987)  
Stresses in a laminated composite with two elliptical holes. In: Composite Structures 7 (1987)
- [11] HOWLAND, R.C.J. (1930)  
On the stresses in the neighbourhood of a circular hole under tension. Phil. Trans. Roy. Soc.. London, A, CCXXIX, 1930
- [12] LING, C.-B. (1948)  
On the stresses in a plate containing two circular holes. In: J.App.Phys. 19 (1948), Heft 1
- [13] LICHA, O. (1982)  
Unterschiede zwischen isotropen und anisotropen Spannungszuständen am Beispiel eines kreisförmigen Tunnelprofils. In: Ing.Arch. 52 (1982), S.77-89
- [14] SAWIN, G.N. (1956)  
Spannungserhöhung am Rande von Löchern. Berlin: VEB - Verlag Technik, 1956
- [15] NUISMER, R.J.; WHITNEY, J.M. (1974)  
Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations. In: Fracture mechanics of composite, Special Technical Publication 593, ASTM, 1974
- [16] ONDRACEK, G. (1986)  
Werkstoffkunde: Aufbau, Eigenschaften, Technologie, Prüfung. 2. Auflage. Sindelfingen: expert, 1986
- [17] SCHÄFER, W. (1953)  
Einfluß von Kerben auf die Zugfestigkeit nichtmetallischer Werkstoffe. In: Holz als Roh- und Werkstoff 11 (1953), Heft 3

- [18] KOLLMANN, F. (1952)  
Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. In: Holz als Roh- und Werkstoff 10 (1952), Heft 5/6
- [19] EDLUND, B. (1982)  
Bruchhypothesen für orthotropes Material. In: Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. Karlsruhe: Bruderverlag, 1982
- [20] TSANGARAKIS, D. (1984)  
Fatigue failure of an orthotropic plate with a circular hole. In: Composite Materials 18 (1984)
- [21] LAGACE, P.A. (1986)  
Notch sensitivity and stacking sequence of laminated composites. In: Composite Materials: Testing and design. Special Technical Publication 893, ASTM, 1986
- [22] KEYLWERTH, R. (1951)  
Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. In: VDI-Forschungsheft 430, Ausg. B, Band 17, 1951.
- [23] LISCHKE, N. (1985)  
Zur Anisotropie von Verbundwerkstoffen am Beispiel von Brettlagenholz. In: Forschungsberichte VDI, Reihe 5, Nr. 98. Düsseldorf: VDI, 1985
- [24] BODIG, J.; JAYNE, B. (1982)  
Mechanics of wood and wood composites. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982
- [25] SCHOLL, M. (1988)  
Der Einfluß von runden Löchern auf die Tragfähigkeit zugbeanspruchter Bauteile aus Kunstharzpreßholz / Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen. Karlsruhe: Universität (TH), 1988. - Vertieferarbeit, unveröffentlicht



Tabelle 1: Versuchsmaterial

Hersteller	Plattentyp	interne Firmenbezeichnung	Plattendicke [mm]	Furnierdicken (verdichtet) [mm]	Plattenbezeichnung
A	KPSP	-	6 12 20	0,5	A1 A2 A3
B	KPSP	B15	8 12 20	1,0	B1 B2 B3
	KPSP	B25	8 12 20	0,5	B4 B5 B6
	KPSCH	A15	8 12 20	1,0	B7 B8 B9
C	KPSP	8225	8 12 20	0,3	C1 C2 C3
	KPSCH	8121	8 12 20	0,3	C4 C5 C6
	KPSN	8321	8 12 20	0,3	C7 C8 C9
D	KPSP	HII/2/30	12	2,5	D1
	KPSCH	HI/2/30	12	2,5	D2

Tabelle 2:

Versuchsprogramm zur Bestimmung des Kerbeinflusses  
(3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Platte	Loch- durch- messer	Winkel $\gamma = 0^\circ$	Winkel $\gamma = 30^\circ$	Winkel $\gamma = 45^\circ$	Winkel $\gamma = 60^\circ$	Winkel $\gamma = 90^\circ$
A1	d=	8,12,16	-	-	8,12,16	8,12,16
A2	d=	8,12,16	-	-	8,12,16	8,12,16
A3	d=	8,12,16	-	-	8,12,16	8,12,16
B1	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B2	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B3	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B4	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B5	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B6	d=	8,12,16	-	8,12,16	-	8,12,16
B7	d=	8,12	-	8,16	-	8,12,16
B8	d=	8,12,16	-	-	8,12,16	8,12,16
B9	d=	-	-	-	8,12,16	8,12,16
C1	d=	8,12,16	-	8,16	-	8,12,16
C2	d=	8,12,16	8,16	-	-	8,12,16
C3	d=	8,12,16	-	-	8,16	8,12,16
C4	d=	8,12,16	-	8,16	-	8,12,16
C5	d=	8,12,16	8,16	-	-	8,12,16
C6	d=	8,12,16	-	-	8,16	8,12,16
C7	d=	8,12,16	-	8,16	-	8,12,16
C8	d=	8,12,16	16	-	-	8,12,16
C9	d=	8,12,16	-	-	8,16	8,12,16
D1	d=	8,10,12,16 20,24,30	8,10,12,16	8,10,12,16 20,24,30	8,10,12,16 20,24,30	8,10,12,16 20,24,30
D2	d=	8,10,12,16 20,24,30	-	8,10,12,16 20,24,30	8,10,12,16 20,24,30	8,10,12,16 20,24,30

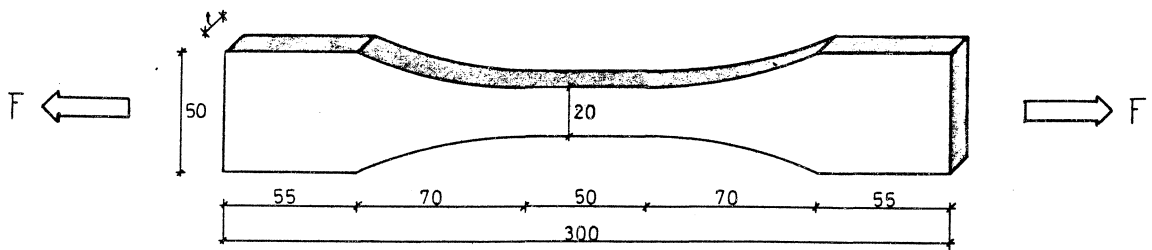


Bild 1: Form und Maße der Zugkörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit

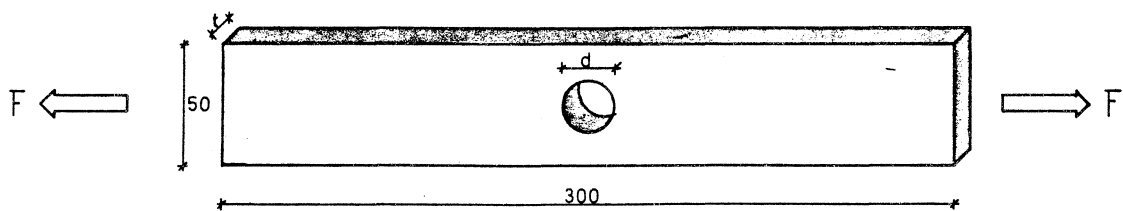


Bild 2: Form und Maße der gelochten Prüfkörper

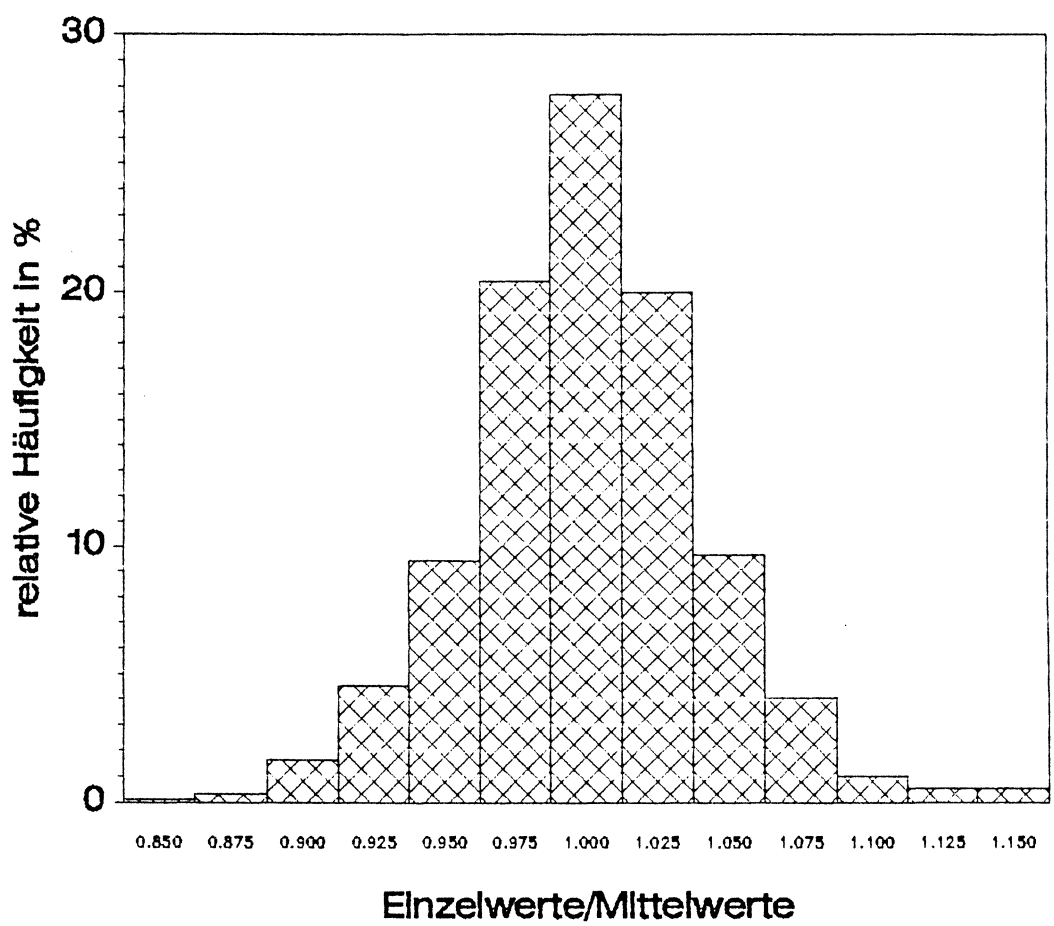


Bild 3:

Histogramm mit den Verhältnissen der Einzelwerte zum Mittelwert jeder Versuchsreihe

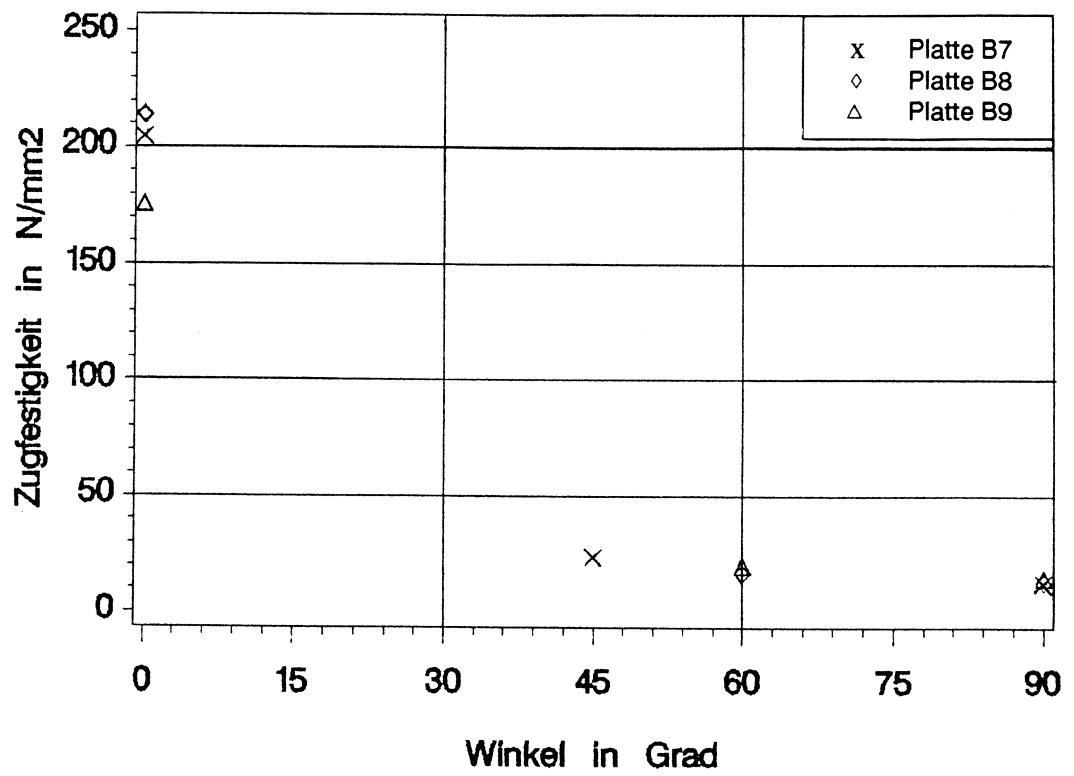


Bild 4:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSCH des Herstellers B

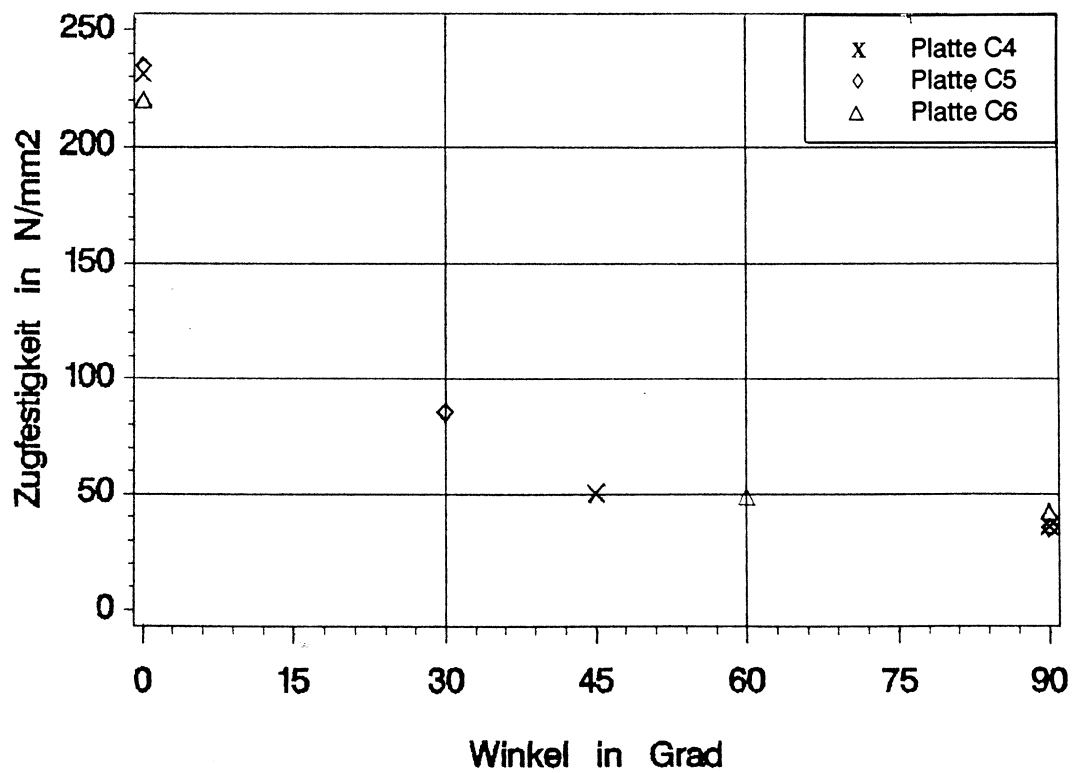


Bild 5:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSCH des Herstellers C

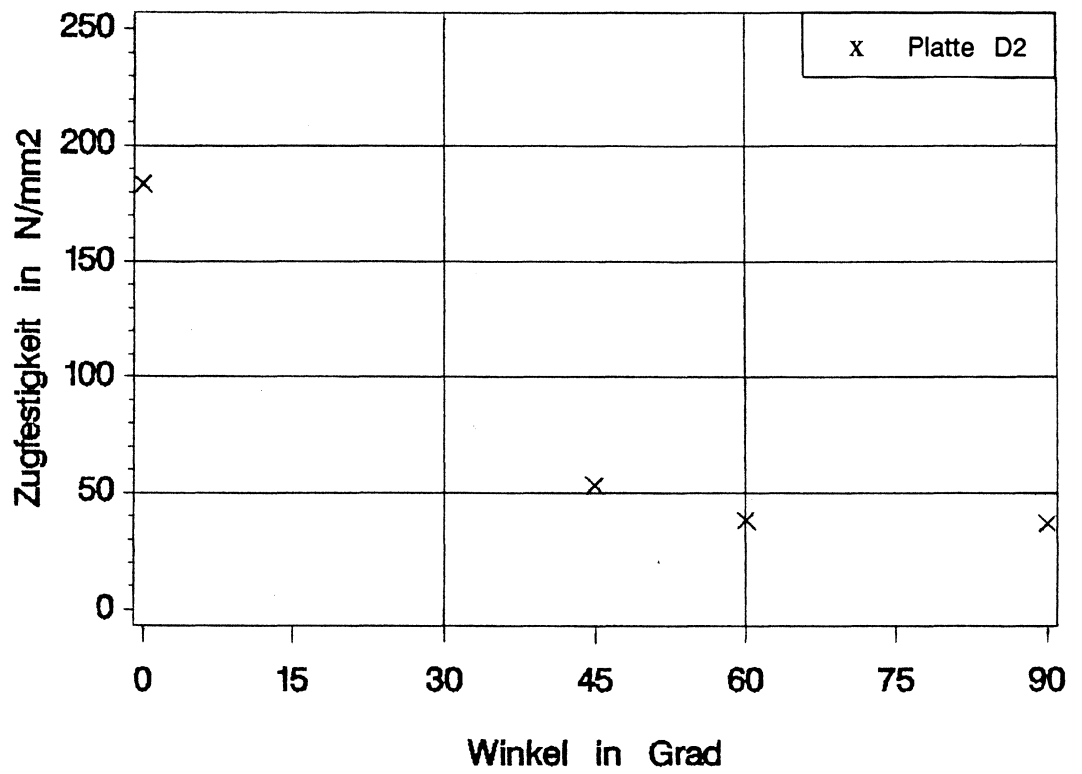


Bild 6:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSCH des Herstellers D

Tabelle 3: Zugfestigkeiten der Platten aus KPSCH bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  und Vergleich mit den Ergebnissen aus [ 1 ] und den Herstellerangaben (3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Platte	Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach [1] [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach Herstellerangabe [N/mm <sup>2</sup> ]
B7	0	204	n.g.	250
	45	23	n.g.	k.A.
	90	12	n.g.	20
B8	0	214	n.g.	250
	30	17	n.g.	k.A.
	90	13	n.g.	20
B9	0	176	n.g.	250
	60	20	n.g.	k.A.
	90	15	n.g.	20
C4	0	231	n.g.	210
	45	51	n.g.	k.A.
	90	35	n.g.	k.A.
C5	0	235	220	210
	30	85	n.g.	k.A.
	90	36	29	k.A.
C6	0	220	n.g.	210
	60	49	n.g.	k.A.
	90	42	n.g.	k.A.
D2	0	183	148	190
	45	53	n.g.	k.A.
	60	38	n.g.	k.A.
	90	37	29	k.A.

n.g. : nicht geprüft  
k.A. : keine Angaben

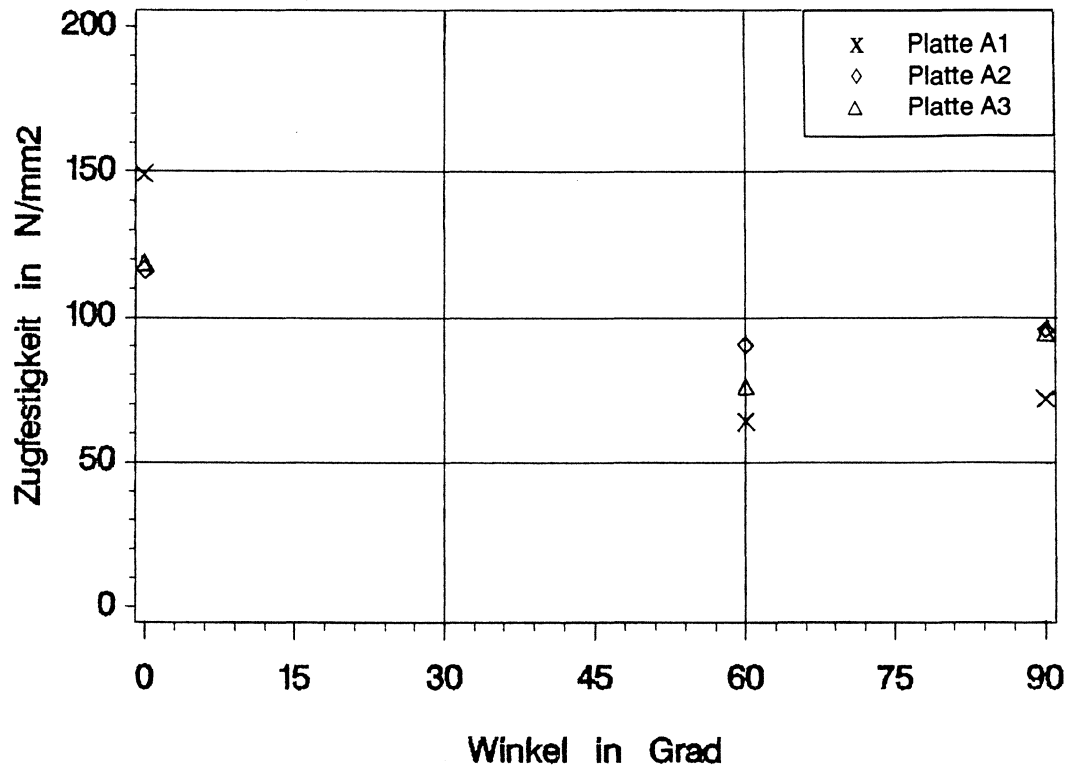


Bild 7: Zugfestigkeiten der Platten aus KPSP des Herstellers A

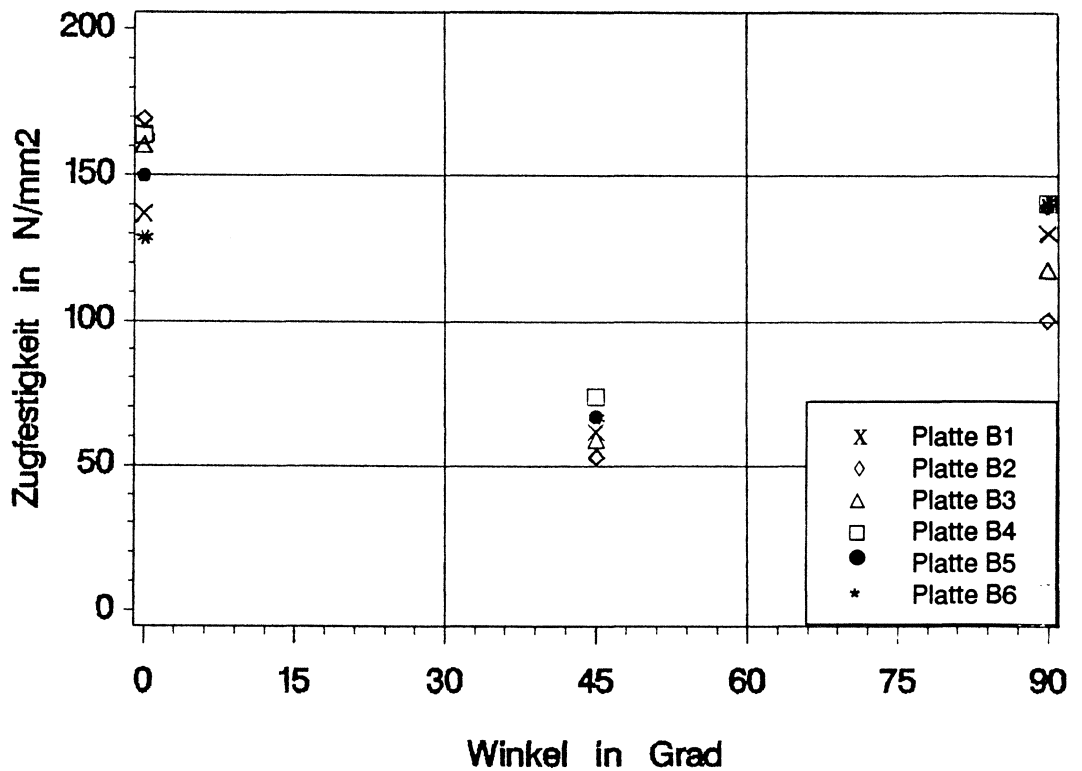


Bild 8: Zugfestigkeiten der Platten aus KPSP des Herstellers B



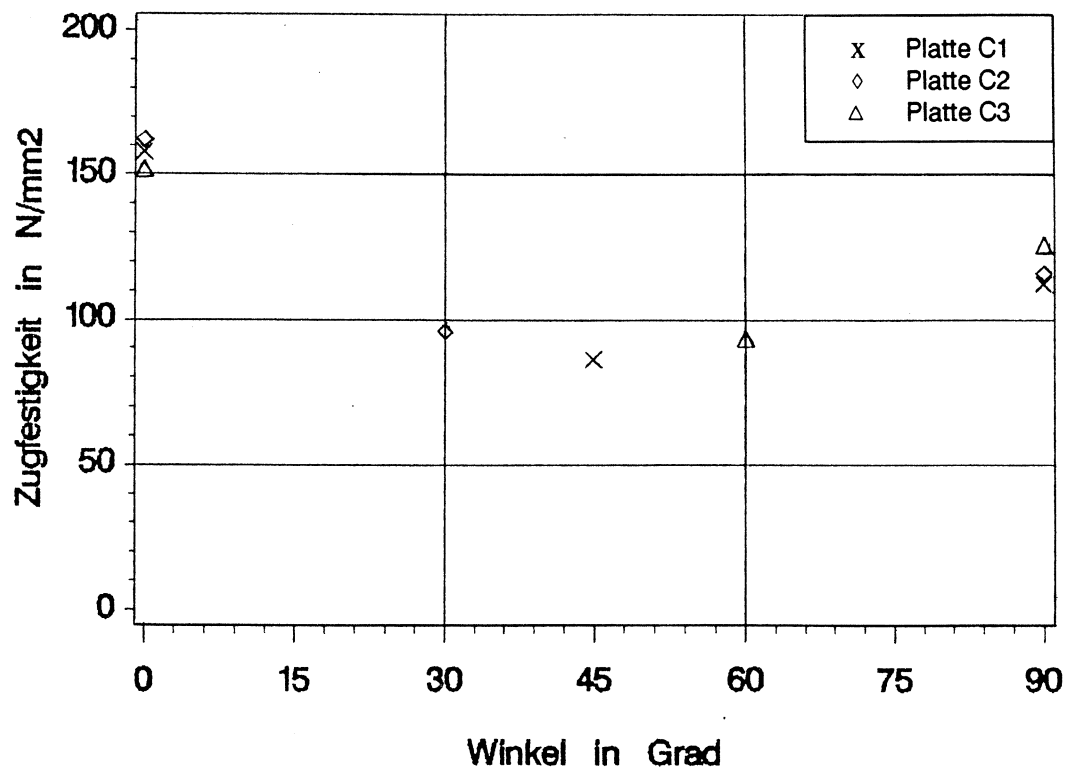


Bild 9:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSP des Herstellers C

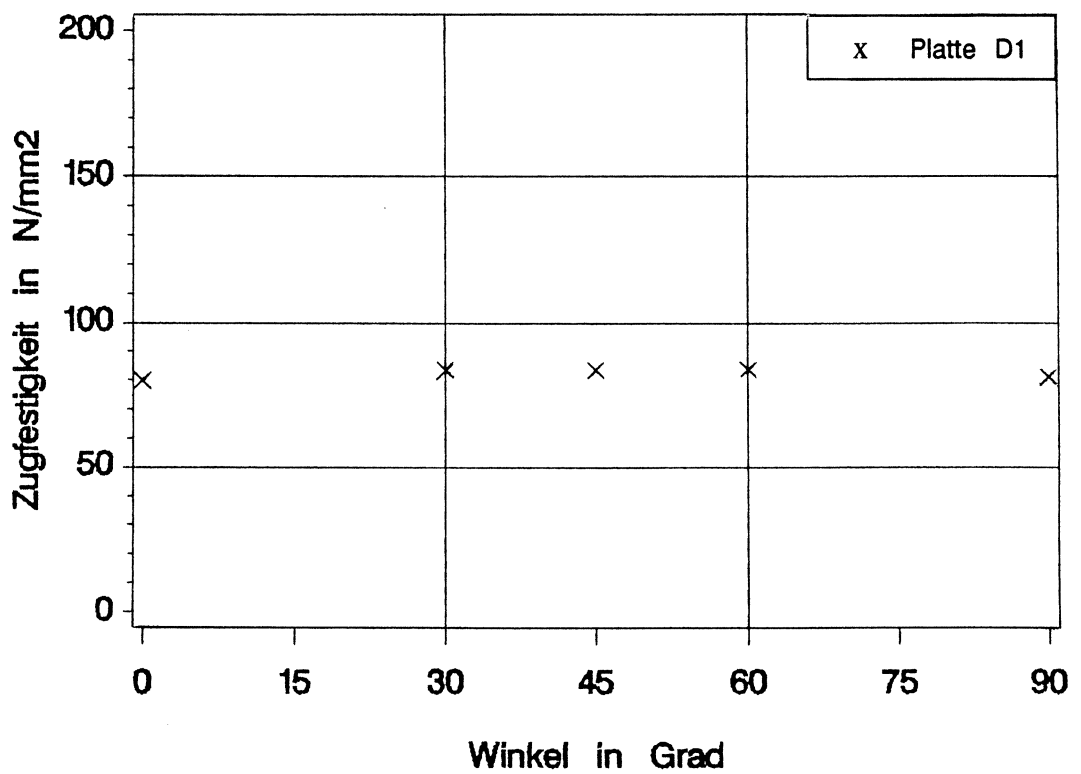


Bild 10:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSP des Herstellers D

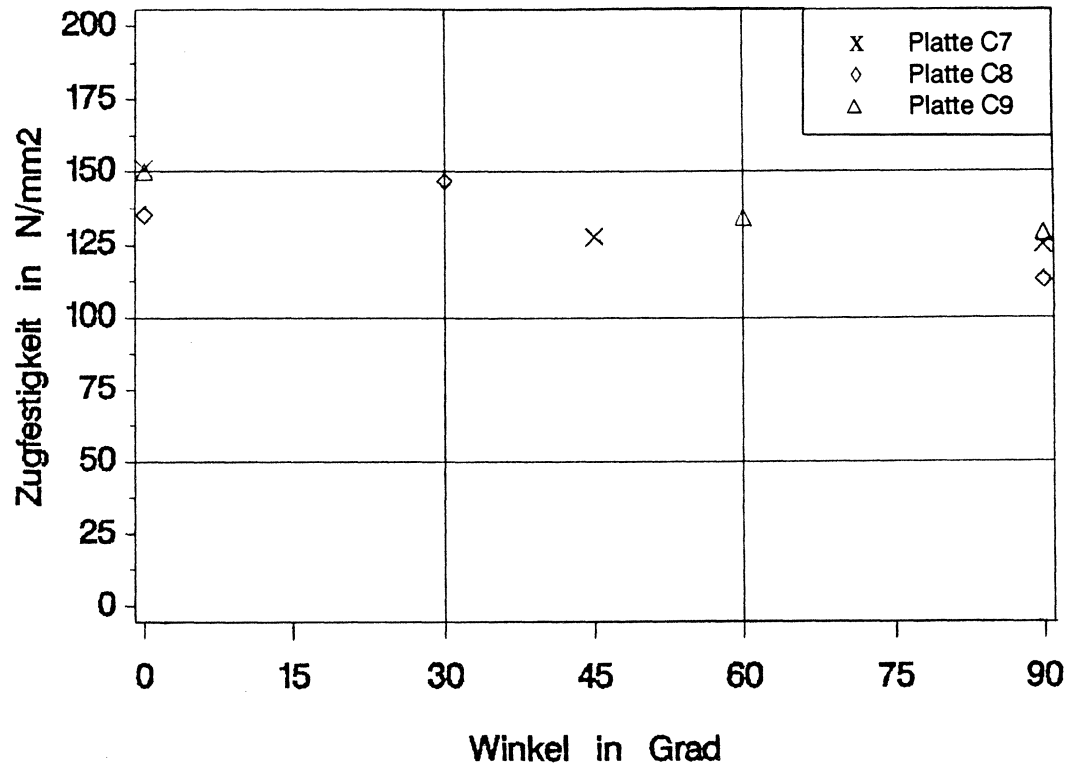
Tabelle 4:

Zugfestigkeiten der Platten aus KPSP bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$   
 und Vergleich mit den Ergebnissen aus [ 1 ] und den Herstellerangaben  
 (3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Platte	Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach [1] [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach Herstellerangabe [N/mm <sup>2</sup> ]
A1	0	149	n.g.	k.A.
	60	64	n.g.	k.A.
	90	72	n.g.	k.A.
A2	0	116	108	k.A.
	60	91	n.g.	k.A.
	90	96	n.g.	k.A.
A3	0	119	91	k.A.
	60	76	n.g.	k.A.
	90	95	n.g.	k.A.
B1	0	137	n.g.	125
	45	62	n.g.	k.A.
	90	130	n.g.	k.A.
B2	0	169	n.g.	125
	45	53	n.g.	k.A.
	90	101	n.g.	k.A.
B3	0	161	n.g.	125
	45	59	n.g.	k.A.
	90	118	n.g.	k.A.
B4	0	164	n.g.	130
	45	74	n.g.	k.A.
	90	141	n.g.	k.A.
B5	0	150	n.g.	130
	45	67	n.g.	k.A.
	90	139	n.g.	k.A.
B6	0	129	n.g.	130
	45	66	n.g.	k.A.
	90	141	n.g.	k.A.
C1	0	158	n.g.	130
	45	86	n.g.	k.A.
	90	112	n.g.	k.A.
C2	0	162	182	130
	30	96	n.g.	k.A.
	90	116	n.g.	k.A.
C3	0	152	156	130
	60	94	n.g.	k.A.
	90	126	n.g.	k.A.
D1	0	80	82	65
	30	84	n.g.	k.A.
	45	84	n.g.	k.A.
	60	83	n.g.	k.A.
	90	81	n.g.	k.A.

n.g. : nicht geprüft

k.A. : keine Angaben



**Bild 11:** Zugfestigkeiten der Platten aus KPSN bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$

**Tabelle 4:** Zugfestigkeiten der Platten aus KPSN bei unterschiedlichem Winkel  $\gamma$  und Vergleich mit den Ergebnissen aus [ 1 ] und den Herstellerangaben (3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Platte	Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach [1] [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit nach Herstellerangabe [N/mm <sup>2</sup> ]
C7	0	151	n.g.	130
	45	128	n.g.	k.A.
	90	125	n.g.	k.A.
C8	0	135	n.g.	130
	30	147	n.g.	k.A.
	90	113	n.g.	k.A.
C9	0	150	n.g.	130
	60	134	n.g.	k.A.
	90	129	n.g.	k.A.

n.g. : nicht geprüft  
k.A. : keine Angaben

Tabelle 6:

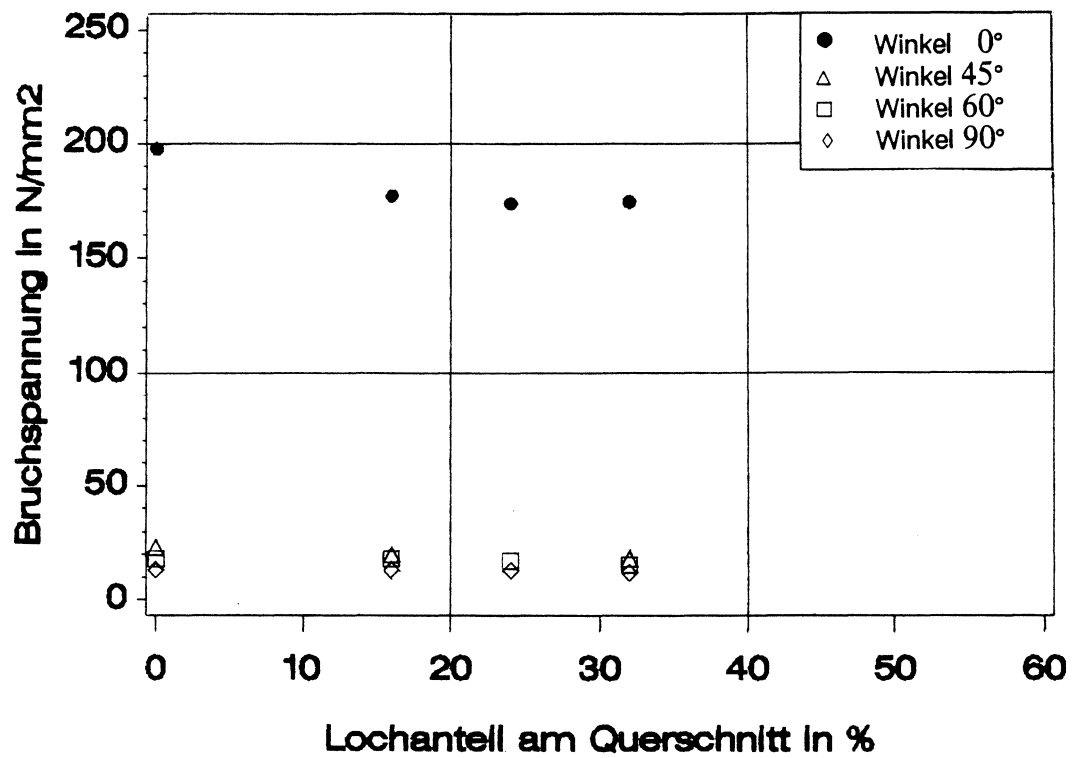
 Bruchspannungen der Platten aus KPSCH  
 (3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Lochanteil am Gesamtquerschnitt $a_n$ [%]		16	24	32	40	48	60
Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Platte	Bruchspannungen $\sigma_k$ in [N/mm <sup>2</sup> ]					
		0 Mittelwert	B7 B8	175 179 177	155 192 174	- 174 174	- - -
45	B7	20	-	18	-	-	-
60 Mittelwert	B8 B9	19 18 19	18 17 18	15 16 16	- - -	- - -	- - -
90 Mittelwert	B7 B8 B9	12 15 13 13	12 14 13 13	12 12 12 12	- - - -	- - - -	- - - -
0 Mittelwert	C4 C5 C6	141 121 119 127	125 109 111 115	117 115 112 115	- - - -	- - - -	- - - -
30	C5	63	-	58	-	-	-
45	C4	43	-	44	-	-	-
60	C6	40	-	38	-	-	-
90 Mittelwert	C4 C5 C6	31 33 36 33	30 33 32 32	28 30 33 30	- - - -	- - - -	- - - -
0 45 60 90	D2 D2 D2 D2	94 37 29 26	94 36 27 26	96 37 25 22	99 36 28 25	101 38 27 23	99 36 25 25

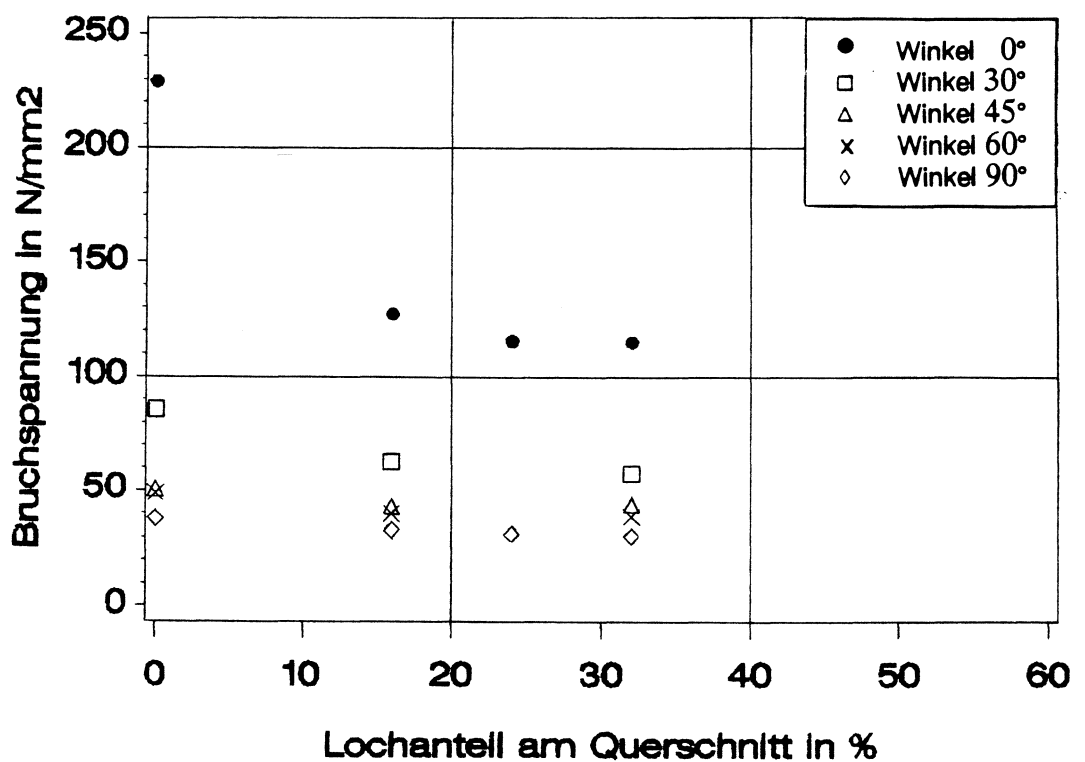
Tabelle 7:

## Gemittelte Kerbfaktoren der Platten aus KPSCH;(3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Lochanteil am Gesamtquerschnitt $a_n$ [%]		16	24	32	40	48	60
Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Platte	Kerbfaktoren $\alpha_k = \sigma_k / \beta_z$					
		0 45 60 90	B	0,85 0,85 1,00 1,02	0,83 - 0,96 0,98	0,82 0,78 0,85 0,92	- - - -
0 30 45 60 90	C	0,56 0,73 0,85 0,82 0,88	0,50 - - 0,84	0,50 0,67 0,87 0,79 0,81	- - - -	- - - -	- - - -
0 45 60 90	D	0,51 0,70 0,76 0,72	0,51 0,68 0,71 0,70	0,53 0,70 0,66 0,60	0,54 0,68 0,75 0,69	0,55 0,71 0,71 0,63	0,54 0,68 0,66 0,68



**Bild 12:** Bruchspannungen der Platten aus KPSCH des Herstellers B  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten B7, B8 und B9)



**Bild 13:** Bruchspannungen der Platten aus KPSCH des Herstellers C  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten C4, C5 und C6)

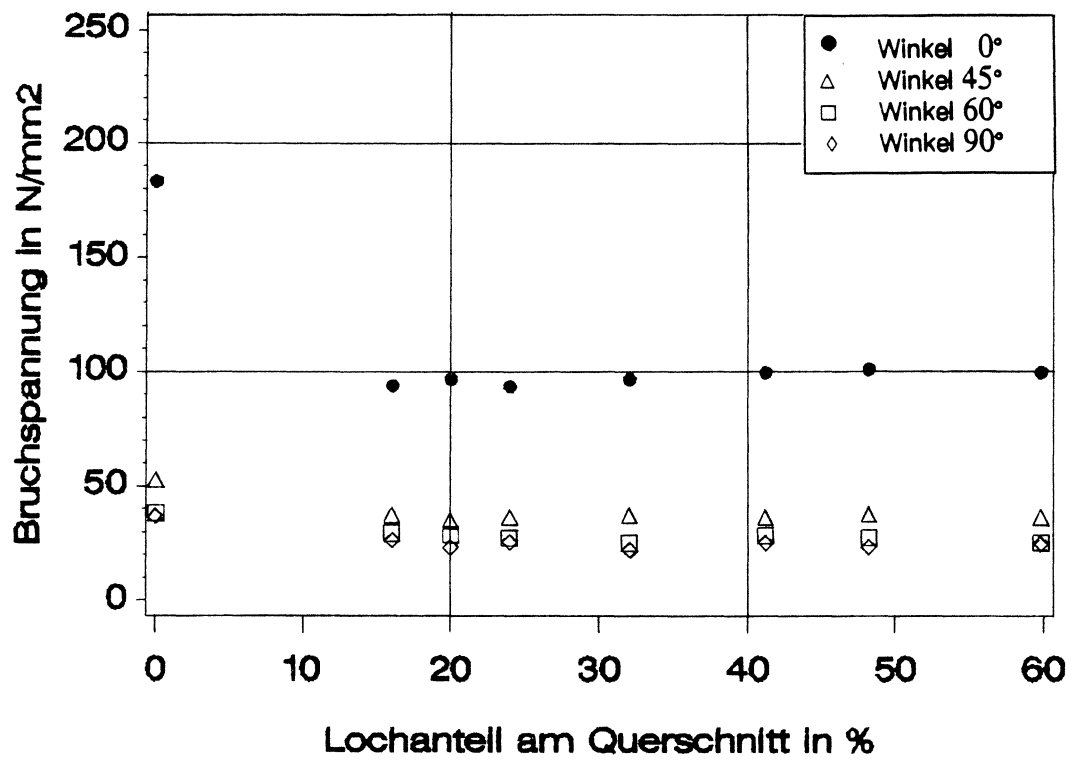


Bild 14:

Bruchspannungen der Platte aus KPSCH des Herstellers D  
(Prüfplatte D2)

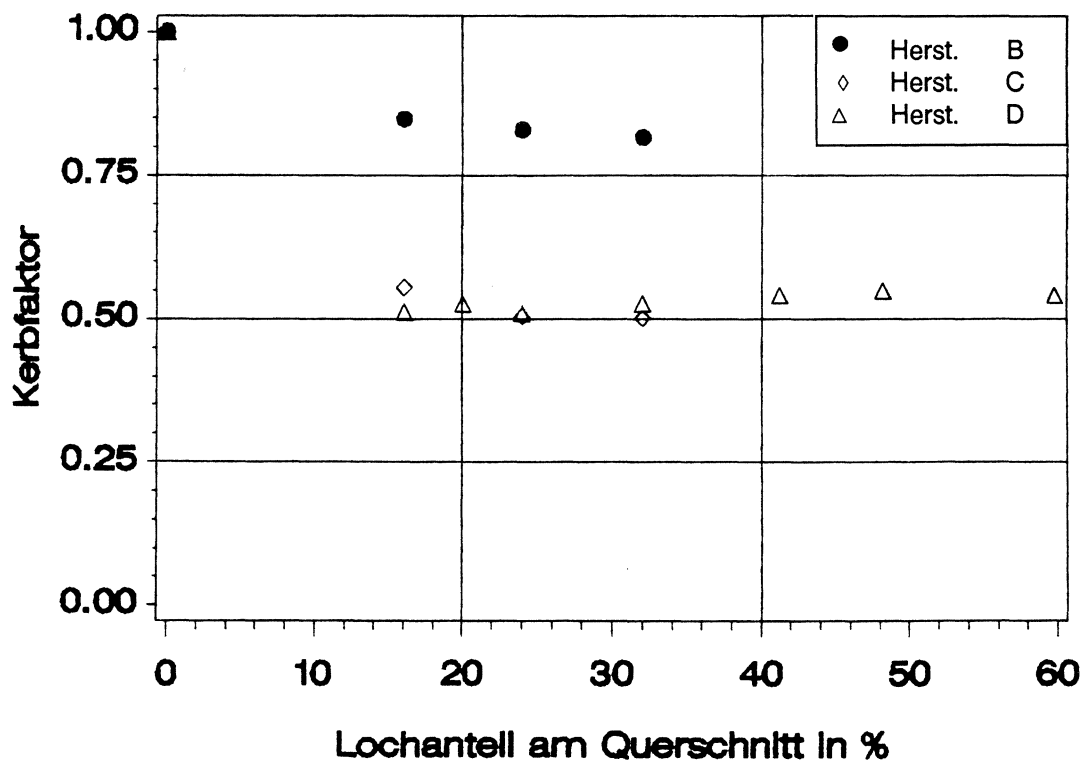


Bild 15:

Kerbfaktoren der Platten aus KPSCH der Hersteller B, C und D  
bei einem Winkel  $\gamma = 0^\circ$

Tabelle 8: Bruchspannungen der Platten aus KPSP; (3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Lochanteil am Gesamtquerschnitt $a_n$ [%]		16	24	32	40	48	60
Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Platte	Bruchspannungen $\sigma_k$ in [N/mm <sup>2</sup> ]					
0	A1	81	72	66	-	-	-
	A2	73	61	59	-	-	-
	A3	67	54	53	-	-	-
	Mittelwert	74	62	59	-	-	-
60	A1	65	64	56	-	-	-
	A2	72	68	67	-	-	-
	A3	62	60	58	-	-	-
	Mittelwert	66	64	60	-	-	-
90	A1	52	42	44	-	-	-
	A2	58	46	43	-	-	-
	A3	52	43	38	-	-	-
	Mittelwert	54	44	42	-	-	-
0	B1	99	96	94	-	-	-
	B2	122	113	112	-	-	-
	B3	109	106	103	-	-	-
	Mittelwert	110	105	103	-	-	-
45	B1	66	60	59	-	-	-
	B2	62	58	56	-	-	-
	B3	67	63	62	-	-	-
	Mittelwert	65	60	59	-	-	-
90	B1	92	95	89	-	-	-
	B2	88	86	90	-	-	-
	B3	87	87	80	-	-	-
	Mittelwert	89	89	86	-	-	-
0	B4	108	97	94	-	-	-
	B5	97	83	83	-	-	-
	B6	76	69	65	-	-	-
	Mittelwert	94	83	81	-	-	-
45	B4	76	73	72	-	-	-
	B5	70	67	69	-	-	-
	B6	66	66	65	-	-	-
	Mittelwert	71	69	69	-	-	-
90	B4	91	85	83	-	-	-
	B5	83	73	74	-	-	-
	B6	93	82	81	-	-	-
	Mittelwert	89	80	79	-	-	-
0	C1	84	85	82	-	-	-
	C2	76	77	74	-	-	-
	C3	74	72	70	-	-	-
	Mittelwert	78	78	75	-	-	-
30	C2	90	-	86	-	-	-
45	C1	77	-	80	-	-	-
60	C3	74	-	67	-	-	-
90	C1	73	66	68	-	-	-
	C2	76	66	66	-	-	-
	C3	68	64	64	-	-	-
	Mittelwert	72	65	66	-	-	-
0	D1	61	52	53	50	46	62
30		67	61	63	-	-	-
45		57	58	52	50	47	40
60		64	56	54	51	47	44
90		63	55	50	50	47	56

Tabelle 9: Gemittelte Kerbfaktoren der Platten aus KPSP  
(3 Prüfkörper je Versuchsreihe)

Lochanteil am Gesamtquerschnitt $a_n$ [%]		16	24	32	40	48	60
Winkel zwischen Belastungsrichtung und Furnierrichtung $\gamma$ [°]	Platte	Kerbfaktoren $\alpha_k = \sigma_k / \beta_z$					
0 60 90	A	0,58 0,87 0,62	0,49 0,85 0,51	0,46 0,79 0,49			
0 45 90	B1-B3	0,71 1,13 0,77	0,68 1,04 0,77	0,66 1,02 0,75			
0 45 90	B4-B6	0,63 1,03 0,63	0,56 1,00 0,57	0,54 1,00 0,56			
0 30 45 60 90	C	0,65 0,94 0,89 0,79 0,61	0,66	0,63 0,89 0,93 0,72 0,56			
0 30 45 60 90	D	0,76 0,80 0,68 0,77 0,77	0,66 0,73 0,70 0,68 0,67	0,66 0,75 0,63 0,65 0,62	0,62 0,60 0,61 0,62	0,58 0,57 0,57 0,57	0,77 0,48 0,53 0,69



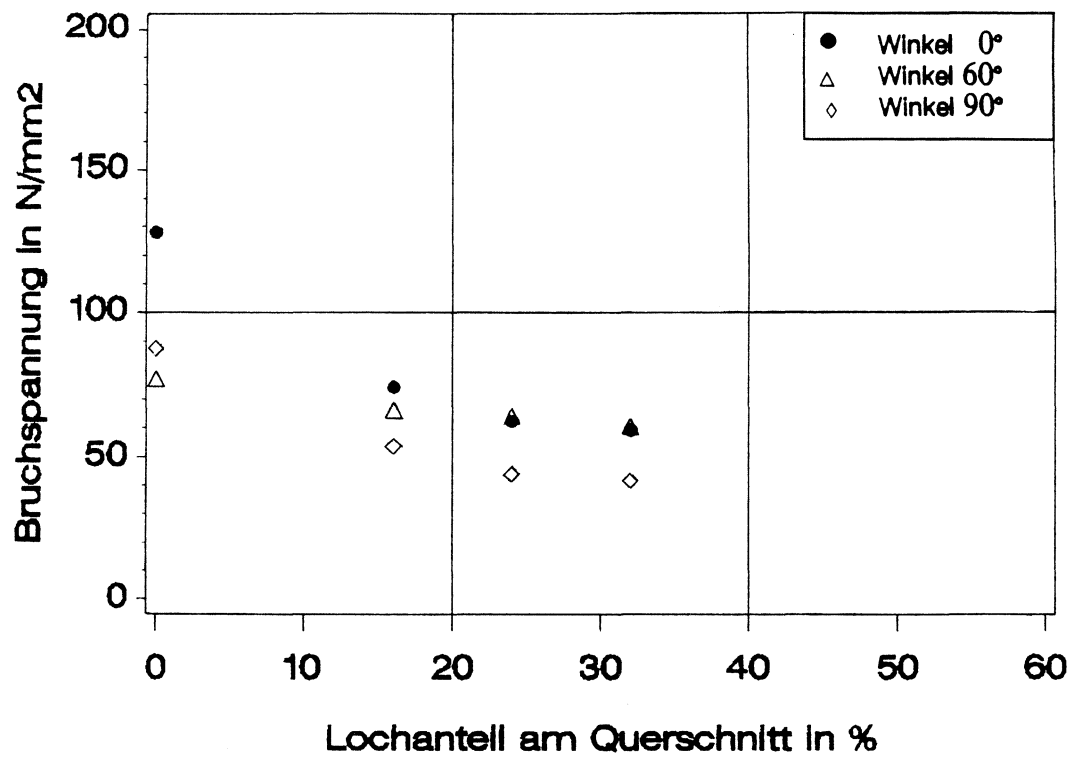


Bild 16:

Bruchspannungen der Platten aus KPSP des Herstellers A  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten A1, A2 und A3)

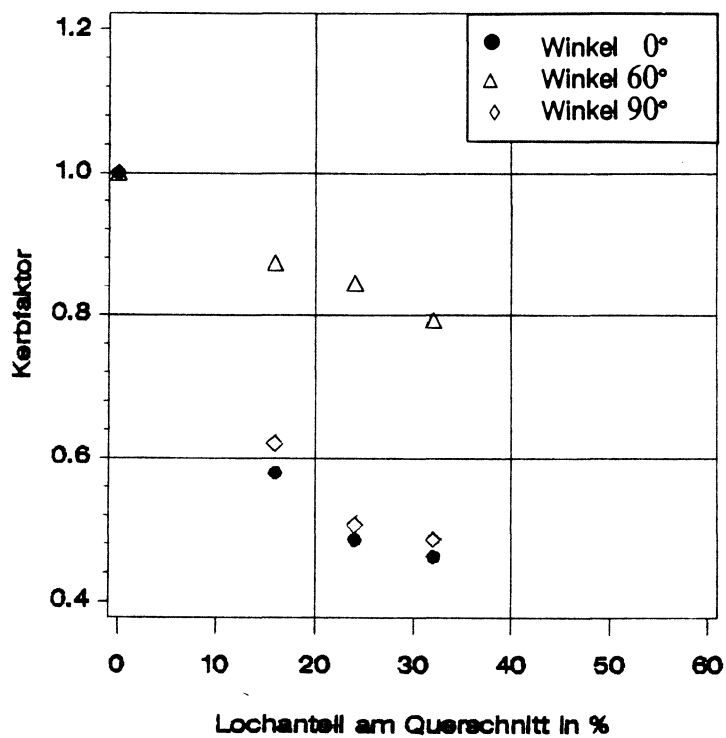


Bild 17:

Kerbfaktoren der Platten aus KPSP des Herstellers A  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten A1, A2 und A3)

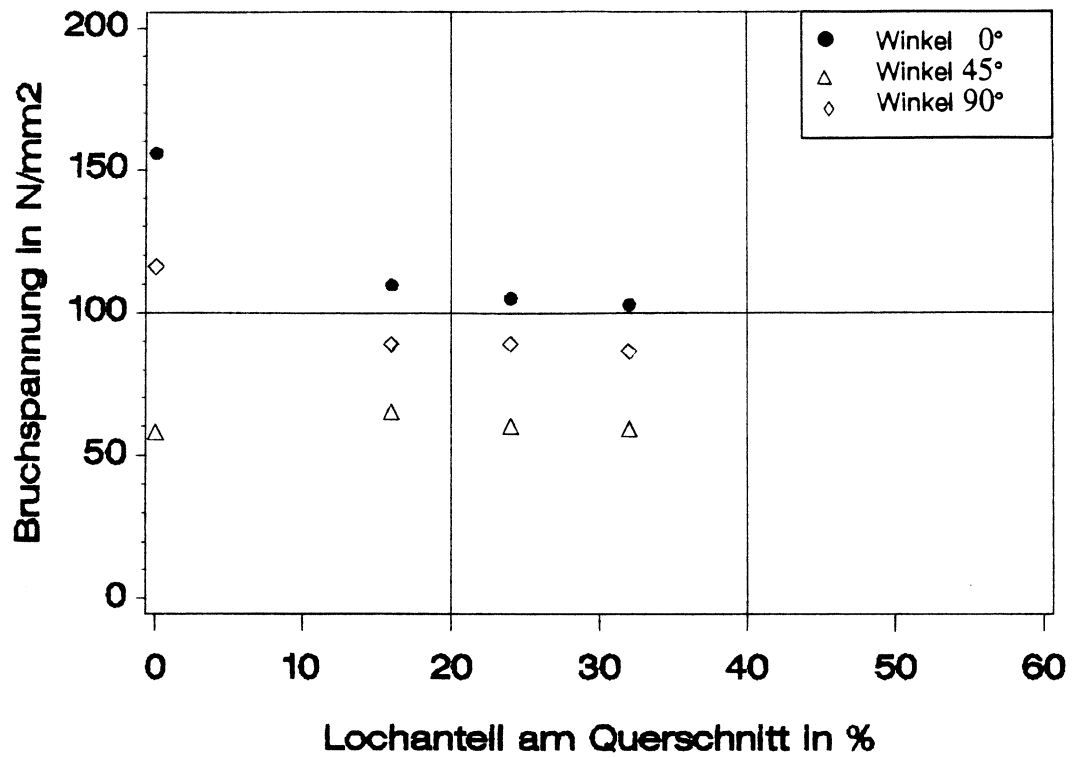


Bild 18:

Bruchspannungen der Platten aus KPSP des Herstellers B  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten B1, B2 und B3)

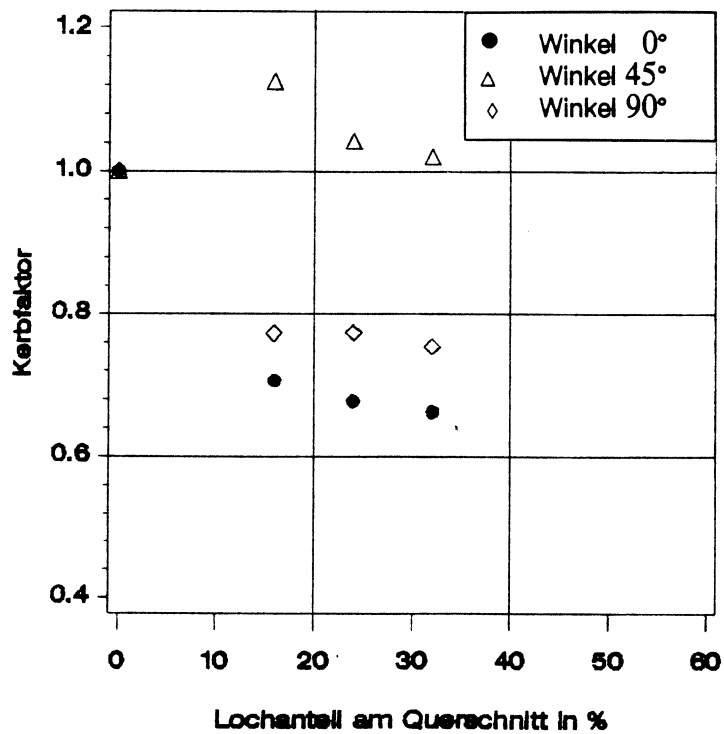


Bild 19:

Kerbfaktoren der Platten aus KPSP des Herstellers B  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten B1, B2 und B3)

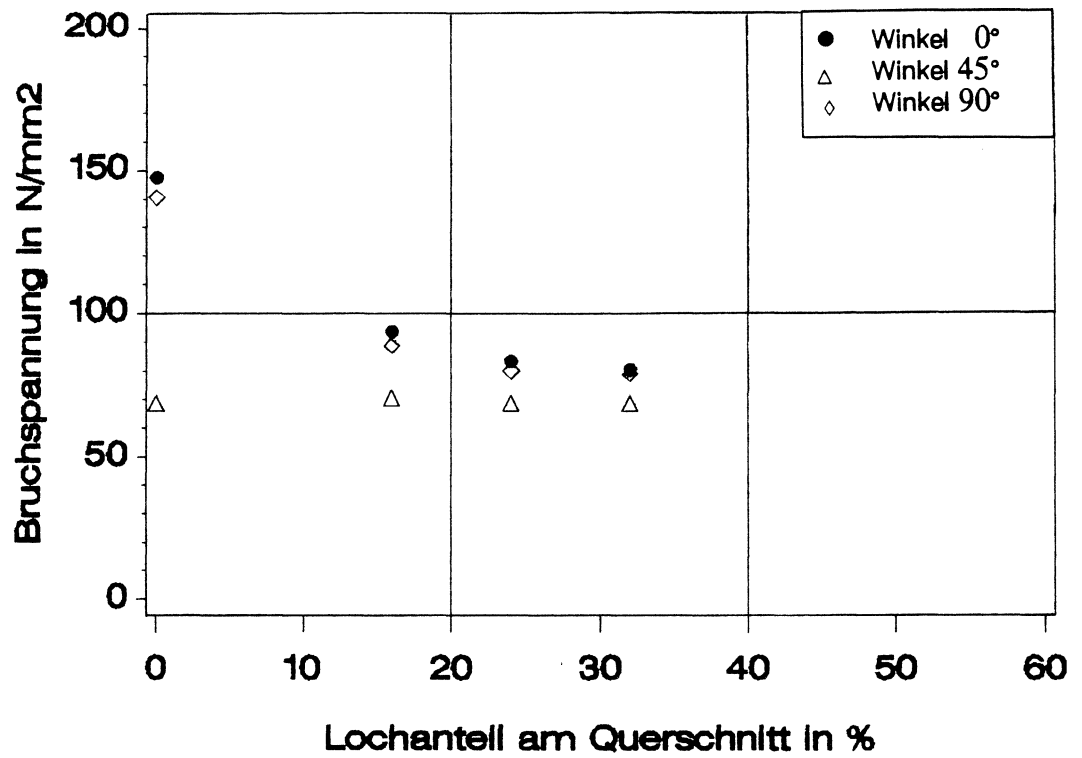


Bild 20:

Bruchspannungen der Platten aus KPSP des Herstellers B  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten B4, B5 und B6)

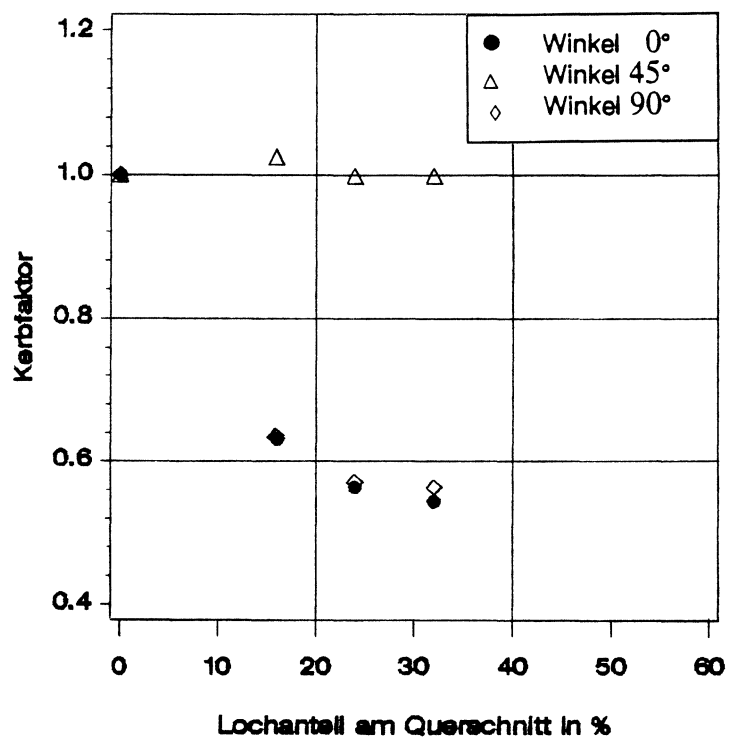


Bild 21:

Kerbfaktoren der Platten aus KPSP des Herstellers B  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten B4, B5 und B6)

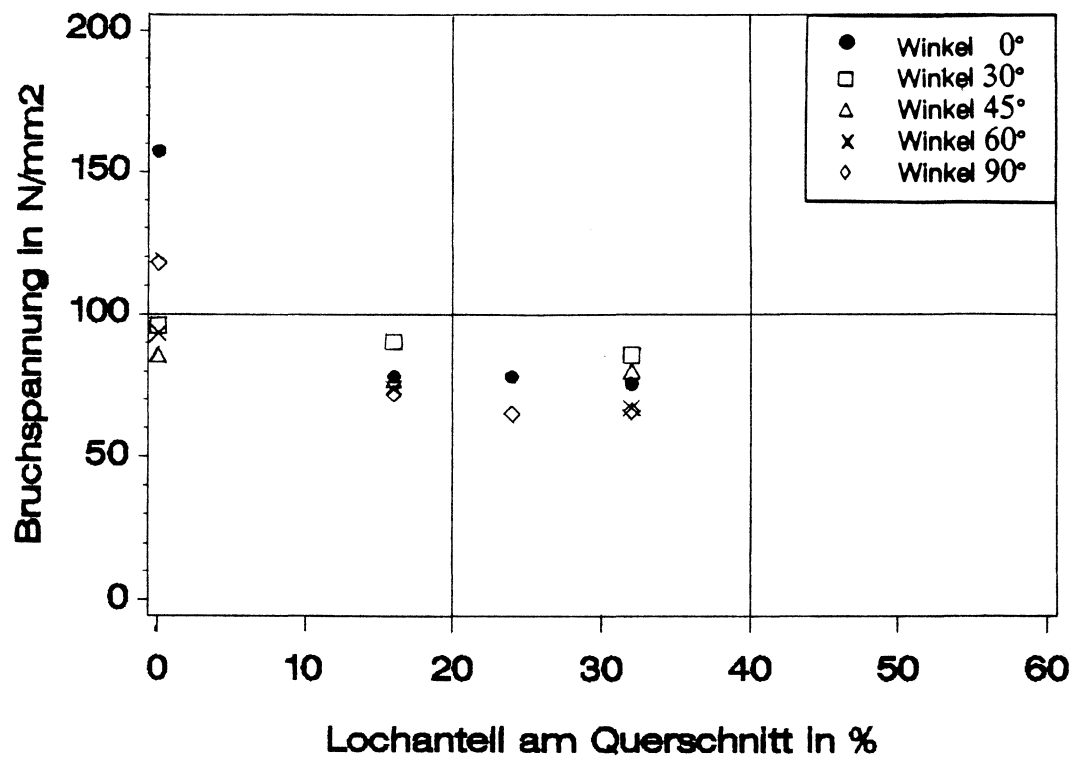


Bild 22:

Bruchspannungen der Platten aus KPSP des Herstellers C  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten C1, C2 und C3)

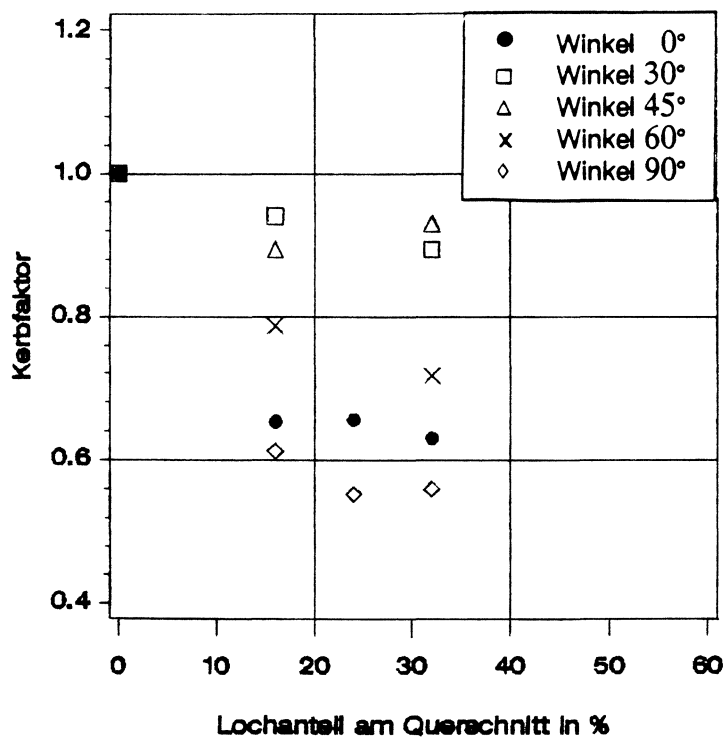


Bild 23:

Kerbfaktoren der Platten aus KPSP des Herstellers C  
(Gemeinsame Mittelwerte der Platten C1, C2 und C3)

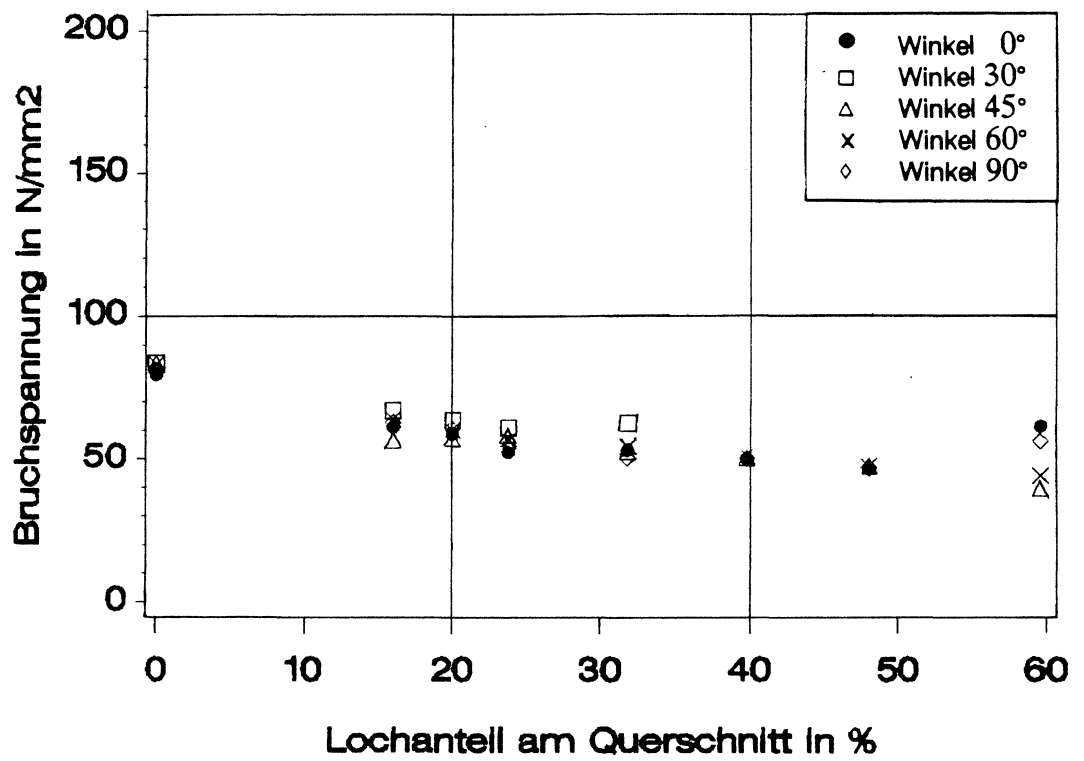


Bild 24:

Bruchspannungen der Platte aus KPSP des Herstellers D (Prüfplatte D1)

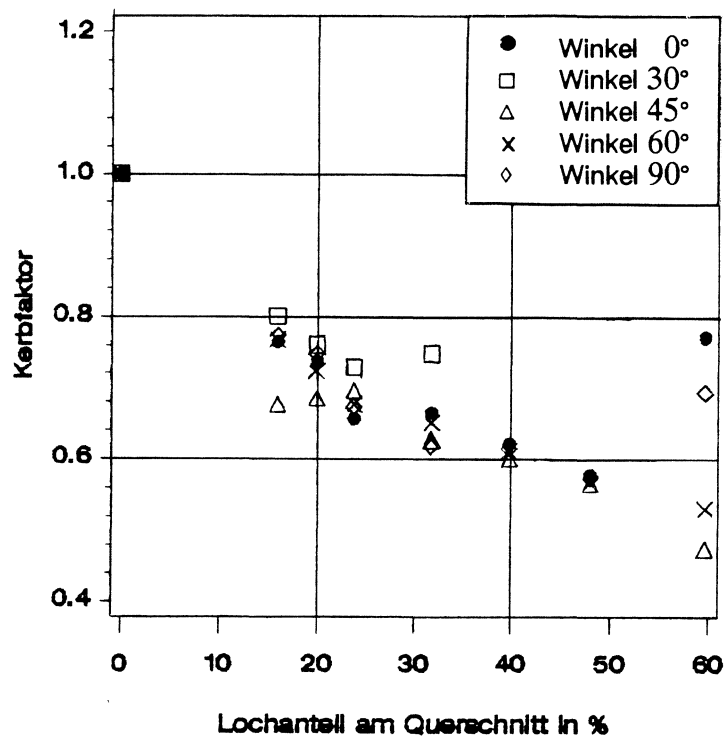


Bild 25:

Kerbfaktoren der Platte aus KPSP des Herstellers D (Prüfplatte D1)