

Lastverteilung, Tragwirkung und Verformungsverhalten für nachgiebig miteinander verbundene Brettstapelelemente

von

Hans Joachim Blaß und Volker Krämer

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abteilung Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

Univ.-Professor Dr.-Ing. H.J. Blaß

2001

Vorwort

Seit einigen Jahren wird die Brettstapelbauweise in zunehmendem Maße im Wohnhausbau und auch in anderen Gebieten des Hochbaus eingesetzt. Brettstapelelemente sind flächige Bauteile, die aus einzelnen, hochkant nebeneinander gestellten und fortlaufend miteinander verbundenen Massivholzbrettern hergestellt werden. Die Bemessung dieser Bauteile ist in keiner Vorschrift oder Norm geregelt. Die Nachweisführung der Brettstapelelemente (Beanspruchungen und Verformungen) unterliegt daher Näherungen, die zum Teil auch auf der „unsicheren“ Seite liegen können.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Bemessungsgleichungen für den Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Brettstapelelementen zu entwickeln. Diese Gleichungen wurden über Simulationen empirisch ermittelt. Bei den Simulationen wurden verschiedene Einflussparameter variiert und bei den daraus abgeleiteten Gleichungen berücksichtigt. Um diese Gleichungen zu bestätigen, wurden 43 Prüfkörper entworfen und geprüft. Die Ergebnisse der Gleichungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.

Das Forschungsvorhaben entstand im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) mit finanzieller Unterstützung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) und durch die Holzwirtschaft. Die Planung, die Durchführung und die Dokumentation der Forschungsarbeiten erfolgte durch Herrn Dipl.- Ing. V. Krämer. Ein Teil der Simulationen wurde von Frau cand.- ing. Michaela Haberer durchgeführt und ausgewertet. Bei der Planung und der Herstellung der Prüfkörper sowie bei der Durchführung und Auswertung der Versuche war Frau Dipl.- Ing. Julia Denzler maßgeblich beteiligt. Frau cand.- ing. Katherina Beck arbeitete als wissenschaftliche Hilfskraft über einen längeren Zeitraum an dem Forschungsvorhaben. Herr Martin Huber war als unermüdlicher Mitarbeiter verantwortlich für den reibungslosen Ablauf der Versuche.

Die Prüfkörper wurden in der Firma Kaufmann Massivholz GmbH in Oberstadion hergestellt. Herrn Kaufmann sei besonders für die uneigennützigere Bereitstellung von Arbeitszeit, Arbeitsplatz und den Transport der Prüfkörper von Oberstadion nach Karlsruhe gedankt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Hans Joachim Blaß

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Ziel der Untersuchungen.....	1
1.2.1	Voruntersuchung verstärkter Stoßnagelung	2
1.2.2	Voruntersuchung Nagelabstand und Nagelart.....	2
1.2.3	Simulation einer großen Anzahl von Brettstapelelementen	2
1.2.4	Ableiten von Bemessungsgleichungen.....	3
1.2.5	Durchführung bestätigender Versuche	3
2	Vorversuche	3
2.1	Biegeversuche mit ungestoßenen Lamellen	5
2.1.1	Prüfkörper mit unterschiedlichen Nageltypen	5
2.1.2	Variation der Nagelabstände	6
2.2	Biegeversuche mit gestoßenen Lamellen.....	8
3	Simulation von Brettstapelelementen	11
3.1	Lamellen	11
3.2	Dimensionen der Brettstapelelemente	12
3.3	Verbindungsmittel	13
3.4	Mechanisches Modell	14
3.5	Grundlage der Simulationen	15
3.6	Simulationsparameter	15
4	Ergebnisse der Simulationen.....	17
4.1	Brettstapelsysteme unter zentrischer Einzellast	17
4.1.1	Ungestoßene Lamellen.....	17
4.1.1.1	Biegerandspannungen.....	17
4.1.1.2	Elastische Verformung.....	18
4.1.1.3	Nagelbeanspruchung.....	19

4.1.2	Wechselseitig gestoßene Lamellen	19
4.1.2.1	Biegerandspannungen.....	20
4.1.2.2	Elastische Verformung.....	20
4.1.2.3	Nagelbeanspruchung.....	20
4.1.3	Wandernd gestoßene Lamellen.....	21
4.1.3.1	Biegerandspannungen.....	22
4.1.3.2	Elastische Verformung.....	22
4.1.3.3	Nagelbeanspruchung.....	22
4.1.4	Zufällig gestoßene Lamellen.....	23
4.1.4.1	Biegerandspannungen.....	23
4.1.4.2	Elastische Verformung.....	24
4.1.4.3	Nagelbeanspruchung.....	24
4.2	Brettstapelsysteme unter gleichförmiger Flächenlast.....	25
4.2.1	Ungestoßene Lamellen.....	25
4.2.1.1	Biegerandspannungen.....	25
4.2.1.2	Elastische Verformung.....	26
4.2.2	Wechselseitig gestoßene Lamellen	26
4.2.2.1	Biegerandspannungen.....	27
4.2.2.2	Elastische Verformung.....	27
4.2.2.3	Nagelbeanspruchung.....	28
4.2.3	Wandernd gestoßene Lamellen	28
4.2.3.1	Biegerandspannungen.....	29
4.2.3.2	Elastische Verformung.....	29
4.2.3.3	Nagelbeanspruchung.....	30
4.2.4	Zufällig gestoßene Lamellen.....	30
4.2.4.1	Biegerandspannungen.....	30
4.2.4.2	Elastische Verformung.....	31
4.2.4.3	Nagelbeanspruchung.....	31

5	Versuche	32
5.1	Materialeigenschaften.....	32
5.1.1	Rohdichte und Feuchtegehalt der Lamellen	33
5.1.2	Mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen	33
5.1.3	Ästigkeit der Lamellen	34
5.2	Zusammenstellung der Versuche	34
5.3	Prüfkörper unter zentrischen Einzellasten	38
5.3.1	Versagensarten	38
5.3.2	Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse / Simulationen / Gleichungen	39
5.4	Prüfkörper unter gleichförmiger Flächenlast	42
5.4.1	Versagensarten	43
5.4.2	Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse / Simulationen / Gleichungen	44
6	Zusammenfassung	46
7	Literatur	47

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Seit einigen Jahren wird die Brettstapelbauweise in zunehmendem Maße für die unterschiedlichsten Konstruktionselemente angewendet. Brettstapelelemente sind flächige Bauteile, die aus einzelnen, hochkant nebeneinander gestellten Massivholzbrettern hergestellt werden. Die Verbindung der Bretter erfolgt entweder durch eine fortlaufende Nagelung oder durch das Einbringen von Laubholzdübeln in die Brettstapelelemente. Um bei den Brettstapelelementen nicht an eine bestimmte Länge gebunden zu sein, können die Bretter entweder an vorgegebenen Stellen oder auch willkürlich versetzt gestoßen sein. Hierdurch können massive Platten- und Scheibenelemente mit beliebiger Breite und Länge hergestellt werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden schon einige Bauvorhaben in Brettstapelbauweise verwirklicht, ohne dass allgemein anerkannte Berechnungsgrundlagen bzw. Hinweise in DIN 1052 oder DIN V ENV 1995 (Eurocode 5) vorhanden waren. Bisher wurden die Biegegrandspannungen der Brettstapelelemente auf der Grundlage der technischen Biegelehre mit einer Einheitsbreite berechnet. Die Anzahl der Verbindungsmittel wurde willkürlich gewählt. Bei den Verformungsberechnungen der Brettstapelelemente wurden die Stöße der Lamellen nur pauschal berücksichtigt. Damit wird die gängige Bemessungspraxis dem Trag- und Verformungsverhalten der Brettstapelelemente nicht gerecht.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, Bemessungsgleichungen anzugeben, um Brettstapelelemente zuverlässig berechnen zu können. Hierbei wurde insbesondere das Problem der Lastverteilung bei nachgiebig miteinander verbundenen Einzelbauteilen untersucht. Das Phänomen der Lastverteilung tritt dann auf, wenn konzentrierte Einzellasten rechtwinklig zur Ebene des Brettstapelelements einwirken. So ist bei der Ermittlung der charakteristischen Einwirkungen nach DIN V ENV 1991 (Eurocode 1; Einwirkungen auf Tragwerke) [1] bei den Verkehrslasten für Decken und Dächer eine Einzellast, die Werte zwischen 2 und 7 kN annehmen kann, auf einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von 50 mm anzusetzen.

Ein weiterer wesentlicher Punkt der Untersuchungen war die Auswirkung der Verbindungsmittelabstände und der Verbindungsmitteldurchmesser auf das Trag- und Verformungsverhalten des Brettstapels. Ferner wurde untersucht, wie die Anordnung von Stößen innerhalb eines Brettstapelelementes das Tragverhalten beeinflussen. Die Untersuchungen wurden für die beiden Belastungssituationen „zentrische Einzellast“ und „Flächenlast“ durchgeführt.

Um Bemessungsgleichungen angeben zu können, wurden folgende Teiluntersuchungen durchgeführt:

1.2.1 Voruntersuchung verstärkter Stoßnagelung

Um den Einfluss verstärkter Stoßnagelungen auf die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen abzuschätzen, wurden Versuche mit nur drei nebeneinander liegenden Lamellen durchgeführt. Die Lamellen wurden kontinuierlich vernagelt, wobei die beiden äußeren Lamellen gestoßen waren und die innere Lamelle durchlief.

1.2.2 Voruntersuchung Nagelabstand und Nagelart

Bei diesen Versuchen wurde das Verformungsverhalten von drei ungestoßenen Lamellen untersucht, die kontinuierlich miteinander verbunden waren und nur die mittlere Lamelle belastet wurde. Hierbei wurden drei Nagelabstände variiert. Eine vierte Versuchsserie wurde mit Sondernägeln (Rillennägeln) durchgeführt.

1.2.3 Simulation einer großen Anzahl von Brettstapelelementen

Um den großen Aufwand vieler Laborversuche zu minimieren, wurde eine sehr große Anzahl von Brettstapelelementen simuliert. Hierfür müssen die statistischen Verteilungen der Einflussparameter bekannt sein. Die geometrischen Parameter der Brettstapelelemente ($l/b/h$) wurden in realistischen Bereichen frei gewählt und variiert. Die Nagelanordnung und die Nageldurchmesser wurden nach praktischen Gesichtspunkten gewählt und variiert. Das Trag- und Verformungsverhalten der Nägel wurde entsprechend den Steifigkeitswerten nach Eurocode 5 berechnet. Die Lamellen der Brettstapelelemente und ihre streuenden Steifigkeitseigenschaften wurden wirklichkeitsnah simuliert.

1.2.4 Ableiten von Bemessungsgleichungen

Auf der Grundlage der Simulationen wurden Bemessungsgleichungen zur Berechnung der Biegebeanspruchung der Lamellen, der maximalen Nagelbeanspruchung und der elastischen Verformung abgeleitet.

1.2.5 Durchführung bestätigender Versuche

Abschließend wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, nach dem insgesamt 42 Prüfkörper hergestellt wurden. Die Prüfkörper wurden unter Einzellasten und unter Flächenlasten geprüft und wiesen eine große Streuung der o.g. Einflussparameter (l/h , Nageldichte, Nagelabstand und Nageldurchmesser) auf. Die Ergebnisse der Versuche wurden mit den Werten aus den Simulationen und den Ergebnissen aus den Bemessungsgleichungen verglichen.

2 Vorversuche

Die Vorversuche wurden als 4- Punkt- Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN 408 [2] durchgeführt. Der Versuchsaufbau entsprach **Bild 1**.

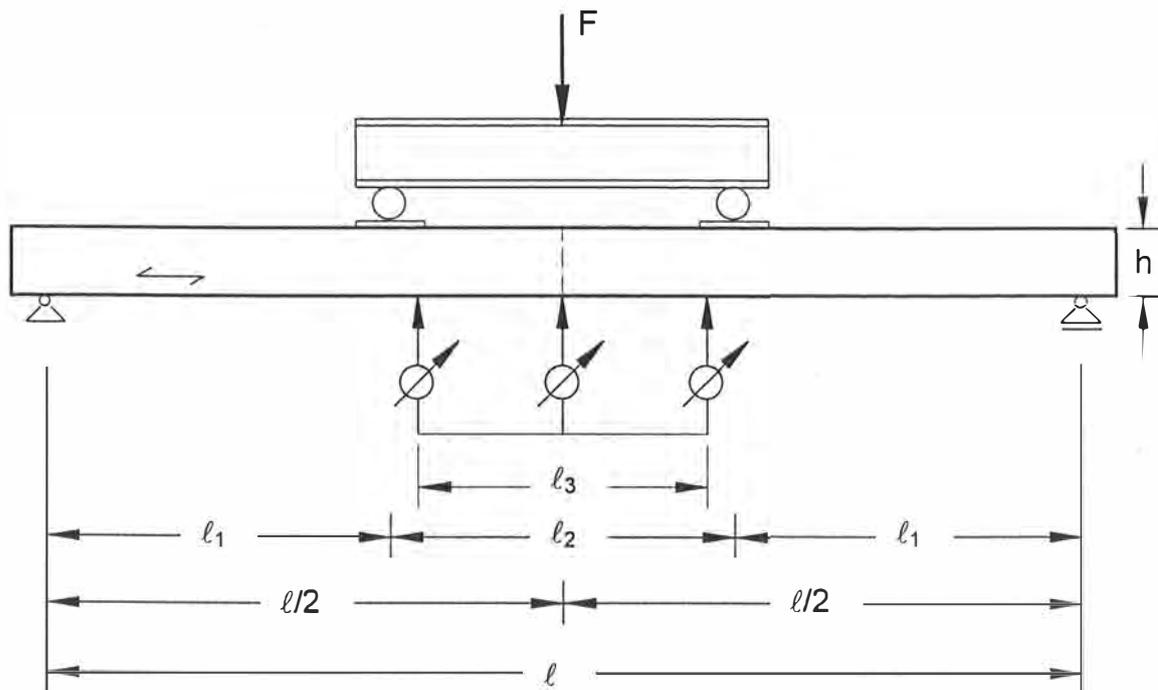


Bild 1 Aufbau Biegeversuche

Angaben:

$$\ell = 21 \cdot h = 21 \cdot 17,1 \text{ cm} \cong 360 \text{ cm}$$

$$\ell_1 = 7,5 \cdot h = 7,5 \cdot 17,1 \text{ cm} \cong 129 \text{ cm}; \quad \ell_2 = 6 \cdot h = 6 \cdot 17,1 \text{ cm} \cong 102 \text{ cm}$$

$$\ell_3 = 5 \cdot h = 5 \cdot 17,1 \text{ cm} \cong 85,0 \text{ cm}$$

Die vertikalen Verformungen wurden an jeder Lamelle an den Lasteinleitungspunkten und an der Stelle $\ell/2$ der Prüfkörper gemessen.

Die Lamellen ($t/h = 35 \text{ mm} / 171 \text{ mm}$) bestanden aus gehobeltem Nadelholz der Sortierklasse S10 und hatten eine mittlere Holzfeuchte von 13 % (± 2 %). Um den Einfluss der Reibung zwischen den Lamellen gering zu halten, wurden zwischen die einzelnen Lamellen jeweils zwei Streifen aus PE- Baufolie ($t = 0,15 \text{ mm}$) eingelegt.

Die Prüfkörper wurden im Labor der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, hergestellt. Vor dem Zusammenbau wurden folgende Holzeigenschaften bzw. geometrische Größen der Lamellen bestimmt:

- Maße $t / h / \ell$ [mm]
- Rohdichte [kg/m^3]; Holzfeuchte [%]
- Elastizitätsmodul [N/mm^2]

Der mittlere Elastizitätsmodul der Lamellen wurde über Schwingungsmessungen bestimmt. Die mittlere Rohdichte der verwendeten Lamellen lag in einem Bereich von $331 \text{ kg}/\text{m}^3$ bis $553 \text{ kg}/\text{m}^3$, der Elastizitätsmodul lag innerhalb eines Bereiches von $6760 \text{ N}/\text{mm}^2$ bis $19300 \text{ N}/\text{mm}^2$.

Es wurden nur solche Prüfkörper hergestellt, bei denen alle drei Lamellen einen ähnlichen Elastizitätsmodul aufwiesen. Um eine praxisgerechte Vernagelung der Prüfkörper zu gewährleisten, wurden diese mittels eines Pressluftnaglers (Streifennagler GN 131 S, Paslode) und den dazugehörigen Streifennägeln (38x121 und 38x121 RS) hergestellt.

Die Nägel wurden wechselseitig höhenversetzt in die Prüfkörper eingetrieben. Das hierdurch entstandene Nagelbild glich einer Sägezahnlinie.

Die Last wurde in die mittlere Lamelle eingeleitet.

2.1 Biegeversuche mit ungestoßenen Lamellen

2.1.1 Prüfkörper mit unterschiedlichen Nageltypen

Die Prüfkörper dieser Versuchsserie bestanden aus drei Lamellen und wurden mit Rillennägeln bzw. glattschaftigen beharzten Nägeln kontinuierlich vernagelt. Hierbei sollte geklärt werden, ob der erhöhte Auszieh Widerstand der Sondernägel sich wesentlich auf das Tragverhalten der Brettstapelelemente in Lamellenlängsrichtung auswirkt. Der Nagelabstand parallel zur Faser betrug $2 a_1 = 30 \text{ cm}$ (siehe **Bild 2**). In jeder Versuchsserie wurden jeweils fünf Einzelversuche durchgeführt.

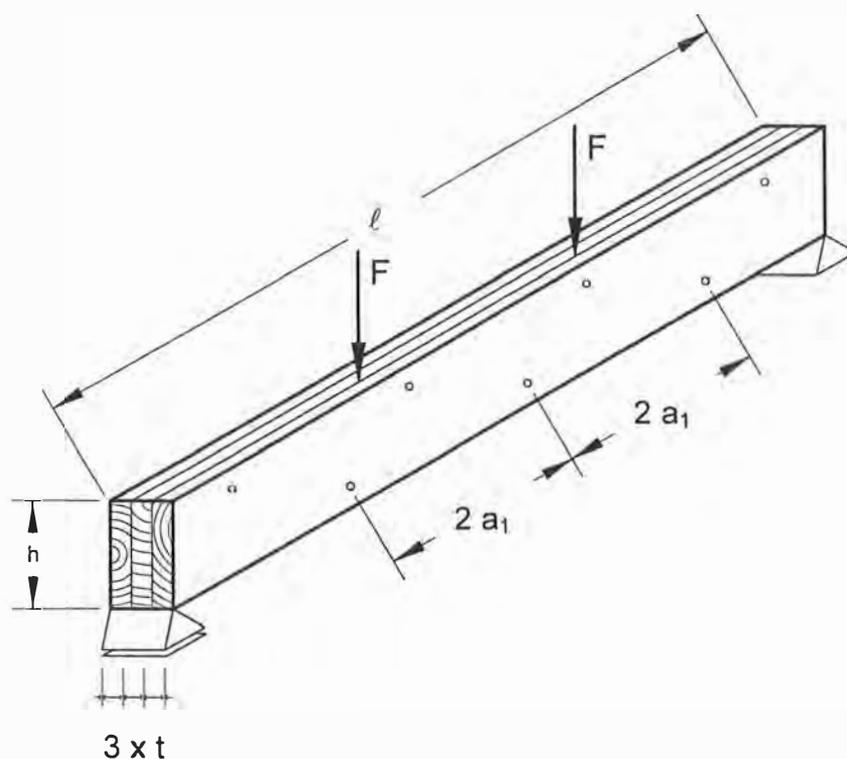


Bild 2 Biegeversuche mit ungestoßenen Lamellen

Als Versagensursache wurde bei den meisten Prüfkörpern das Erreichen der Biegefestigkeit festgestellt. Die Streuungen der Traglasten lassen sich durch die Ästigkeit der Lamellen erklären. Nach der Durchführung der Versuche wurde deshalb bei allen Lamellen die Ästigkeit im Bereich der maximalen Biegebeanspruchung (mittleres Drittel) bestimmt. Die Ästigkeit der Lamellen wurde als KAR- Wert (Knot-Area- Ratio) nach den Richtlinien der ECE [3] ermittelt. Der KAR- Wert stellt das Verhältnis der in Bauteillängsrichtung projizierten Astfläche zur Querschnittsfläche in einem 15 cm langen Segment einer Lamelle dar. Äste mit einem Durchmesser von

weniger als 5 mm wurden bei der Ermittlung der KAR- Werte nicht berücksichtigt. Die Definition des KAR- Wertes ist in Anlage D dargestellt.

Eine signifikante Abhängigkeit der wirksamen Biegesteifigkeit von den verschiedenen Verbindungsmittelarten (Nägel / Rillennägel) konnte nicht festgestellt werden.

2.1.2 Variation der Nagelabstände

Mit dieser Versuchsserie wurde untersucht, ob unterschiedliche Nagelabstände die wirksame Biegesteifigkeit der Brettstapelelemente beeinflussen. Die Nagelabstände wurden in den Bereichen $2 a_1 = 30, 60$ und 90 cm variiert. Der Versuchsaufbau, die Dimensionen der Prüfkörper und die Herstellung der Prüfkörper entsprach den Angaben aus Abschnitt 2. Als Verbindungsmittel wurden glattschaftige beharzte Nägel (38x121) verwendet.

In **Bild 3** sind die vertikalen Verformungen der drei Versuchsreihen und der Versuchsserie mit Rillennägeln bei einer Laststufe von $2,0$ kN pro Lastkolben gegenübergestellt.

Eine signifikante Abhängigkeit der wirksamen Biegesteifigkeit von den unterschiedlichen Verbindungsmittelabständen konnte nicht festgestellt werden.

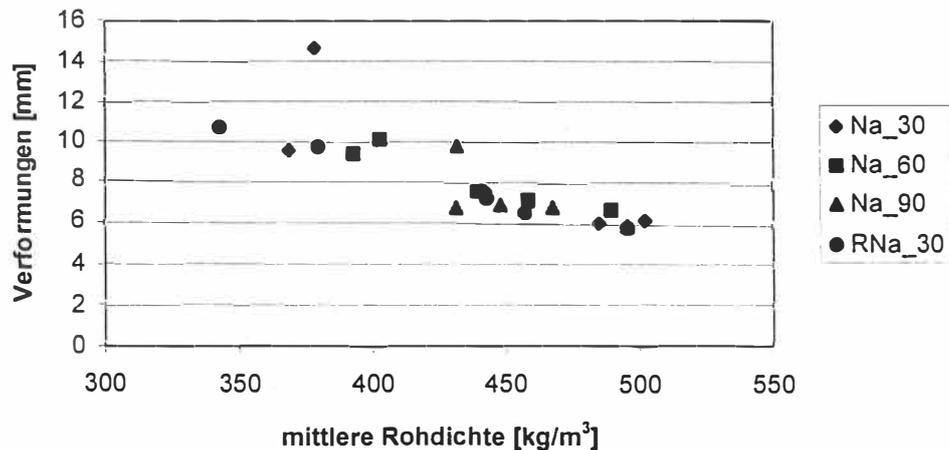


Bild 3 Vertikale Verformungen, Variation der Nagelabstände

In **Tabelle 1** sind die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln, die wirksamen Biegesteifigkeiten der Prüfkörper und der Quotient der wirksamen Biegesteifigkeiten und der Biegesteifigkeit einer Lamelle aufgezeigt. Die wirksame Biegesteifigkeit der Prüfkörper ($EI_{ef, \text{versuch}}$) wurde aus dem linear-elastischen Bereich der Last-Verschiebungskurve nach Gleichung (1) ermittelt:

$$EI_{ef} = \frac{F}{v} \cdot \frac{\ell^3 \cdot (3 \cdot \alpha - 4 \cdot \alpha^3)}{48} \quad (1)$$

Hierin bedeutet:

- α Quotient der Länge bis zur Lasteinleitung und der Spannweite des Prüfkörpers l_1/l (vgl. **Bild 1**).

Die wirksame Biegesteifigkeit der Prüfkörper wurde mit der Biegesteifigkeit einer Lamelle verglichen ($EI_{\text{Versuch}} / EI_{1 \text{ Lam}}$). Die Biegesteifigkeit der Lamellen ($EI_{1 \text{ Lam}}$) wurde mit dem mittleren Elastizitätsmodul der zugehörigen Prüfkörper berechnet.

Tabelle 1 Vergleich der Versuchsergebnisse; Nagelvarianten

2 a₁ = 30			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	15856	5,74E+11	2,48
2	14818	5,60E+11	2,59
3	12313	4,68E+11	2,60
4	8958	3,45E+11	2,64
5	7156	2,45E+11	2,34
2 a₁ = 60			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	14983	5,46E+11	2,50
2	12562	4,75E+11	2,59
3	12175	4,74E+11	2,67
4	9479	3,39E+11	2,45
5	9220	3,46E+11	2,58
2 a₁ = 90			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	13302	4,83E+11	2,49
2	12791	4,80E+11	2,57
3	9717	3,56E+11	2,51
4	13566	5,04E+11	2,55
5	16613	5,65E+11	2,33
2 a₁ = 30 RNa			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	15336	5,94E+11	2,66
2	14660	5,32E+11	2,49
3	12385	4,66E+11	2,58
4	7918	3,14E+11	2,72
5	9117	3,49E+11	2,63

2.2 Biegeversuche mit gestoßenen Lamellen

Bei den Versuchsreihen mit gestoßenen Lamellen wurde untersucht, ob eine verstärkte Stoßnagelung einen Einfluss auf die wirksame Biegesteifigkeit kleiner Brettstapelelemente hat. Die Prüfkörper bestanden aus einer durchlaufenden Mittellamelle und jeweils mittig gestoßenen Seitenlamellen. Der Nagelabstand a_1 betrug einheitlich 15 cm. Als Verbindungsmittel wurden glattschaftige beharzte Nägel (38x121) verwendet. Für folgende Stoßvarianten wurden jeweils fünf Versuche durchgeführt:

- kontinuierliche Nagelung; keine Stoßverstärkung (kV)
- 4 Nägel mit einem Abstand untereinander von 15cm
- 8 Nägel mit einem Abstand untereinander von 15cm
- 8 Nägel mit einem Abstand untereinander von 7,5cm

Die einzelnen Stoßvarianten sind in **Bild 4** dargestellt.

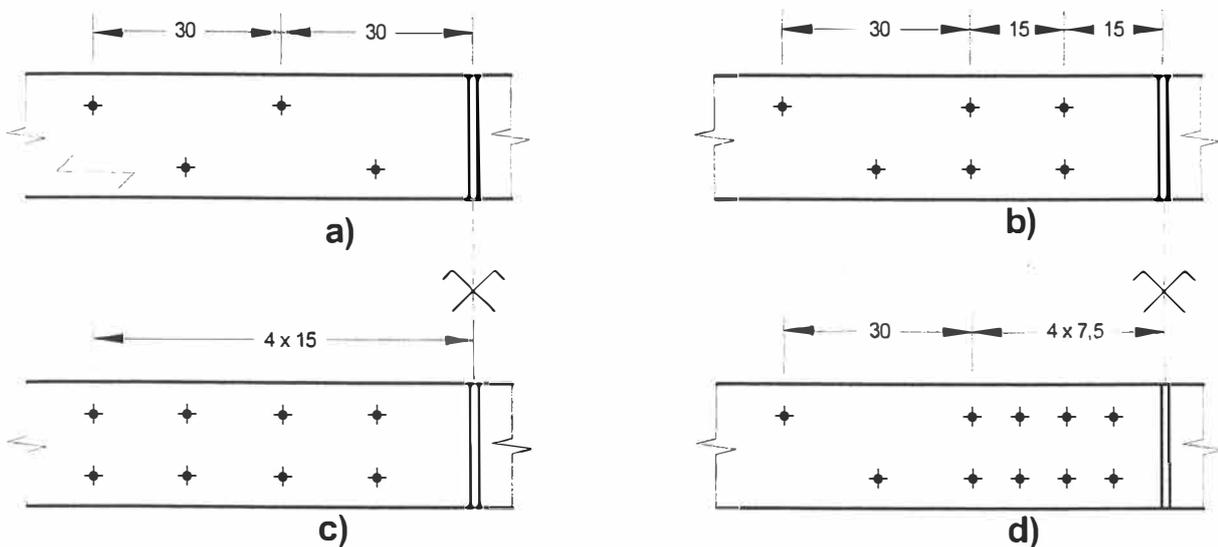


Bild 4 Stoßvarianten der Vorversuche

In **Bild 5** sind die vertikalen Verformungen der vier Versuchsreihen bei einer Laststufe von 2,0 kN pro Lastkolben über die mittlere Rohdichte der Lamellen abgetragen. Die vier Versuchsserien zeigten keine signifikant unterschiedlichen wirksamen Biegesteifigkeiten. Der Einfluss von verstärkten Stoßnagelungen auf die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen ist als vernachlässigbar klein anzusehen und wird daher im weiteren nicht mehr betrachtet.

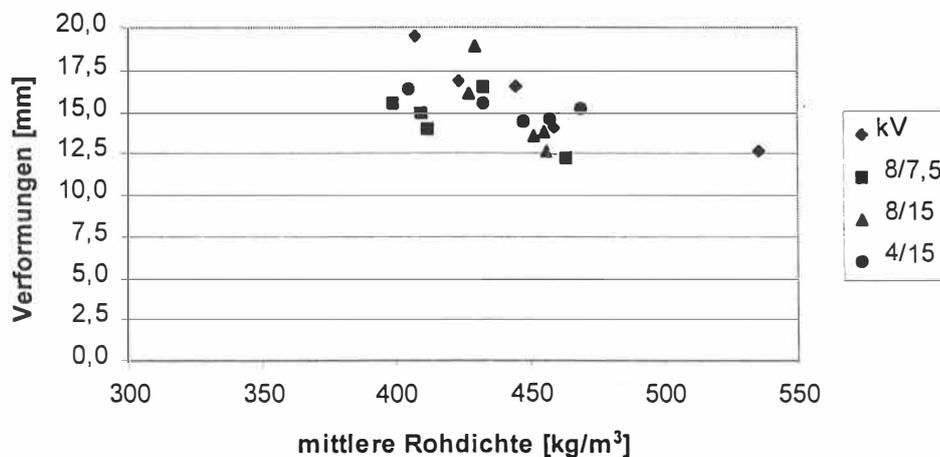


Bild 5 Vertikale Verformungen, Stoßvarianten

In **Tabelle 2** sind die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln, die wirksamen Biegesteifigkeiten der Prüfkörper und der Quotient der wirksamen Biegesteifigkeiten und der Biegesteifigkeit einer Lamelle aufgezeigt. Die Werte wurden analog zu Abschnitt 2.1.2 ermittelt und verglichen.

Tabelle 2 Vergleich der Versuchsergebnisse; Stoßvarianten

keine Verstärkung			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	11081	1,87E+11	1,16
2	13065	2,16E+11	1,13
3	11908	1,98E+11	1,14
4	17350	2,61E+11	1,03
5	9526	1,64E+11	1,18
8Nä/7,5cm			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	10068	1,98E+11	1,35
2	10919	2,04E+11	1,28
3	10664	2,06E+11	1,33
4	10727	2,23E+11	1,43
5	14136	2,56E+11	1,24
8Nä/15cm			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	9869	1,69E+11	1,17
2	13488	2,52E+11	1,28
3	11403	2,01E+11	1,21
4	13148	2,27E+11	1,19
5	14805	2,36E+11	1,09
4Nä/15cm			
Versuch	MW E-Modul [N/mm ²]	EI _{ef, Versuch} [Nmm ²]	EI _{Vers} / EI _{1 Lam}
1	12252	2,08E+11	1,16
2	10259	1,95E+11	1,30
3	12329	2,07E+11	1,15
4	11662	2,21E+11	1,30
5	13993	2,21E+11	1,08

3 Simulation von Brettstapelelementen

Die Bemessung von Holzbauteilen erfolgt nach einem wahrscheinlichkeitsorientiertem Sicherheitskonzept. Dieses Sicherheitskonzept setzt die Kenntnis der Streuungen der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Lamellen und ihrer Verbindungen voraus. Die Streuungen der Materialeigenschaften und deren Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen über Versuche zu bestimmen, würde einen zu großen Zeit- und Finanzaufwand bedeuten. Hier bietet sich die Simulation der Lamellen bzw. der Bauteile im Computer mit Hilfe von theoretischen Modellen an.

Bei der Simulation der Brettstapelelemente wurden die Materialeigenschaften der Lamellen sowohl im Bereich der ganzen Lamellen (mittlerer Elastizitätsmodul in Lamellenlängsrichtung) als auch die abschnittsweise veränderlichen Elastizitätsmoduln innerhalb einer Lamelle wirklichkeitsnah generiert. Für das Trag- und Verformungsverhalten von glattschaftigen Nägeln nach DIN 1151 [4] und DIN 1143-1 [5] konnten in der Literatur keine statistischen Verteilungen der Parameter gefunden werden, mit denen die Streuungen der Verschiebungsmoduln oder der Traglasten realitätsnah hätten beschrieben werden können.

3.1 Lamellen

Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Lamellen wurden auf der Grundlage der Arbeiten von Görlacher [6] und Colling [7] simuliert. Hierbei wird eine Lamelle mit einer Länge von 4,50 m in 15 cm lange Segmente unterteilt. Jedem dieser Segmente werden über Regressionsgleichungen Werte für den Elastizitätsmodul, die Ästigkeit (KAR) und die Rohdichte zugewiesen.

Die Grundlage dieser Simulationen sind Untersuchungen von Lamellen für Brettschichtholz. Die in [6] untersuchten Lamellen (1329 Stück) ergaben einem Mittelwert des Elastizitätsmoduls von 13480 N/mm^2 mit einer Standardabweichung von 2425 N/mm^2 . Vergleiche der simulierten Lamellen mit Untersuchungen von Glos [8], [9] zeigten, dass die simulierten Lamellen der Sortierklasse S10 entsprachen. In Anlage D sind die Materialeigenschaften der in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Lamellen (923 Stück) den Simulationswerten gegenübergestellt.

In **Bild 6** ist als Simulationsbeispiel einer Lamelle der Betrag der Elastizitätsmoduln der einzelnen 15 cm langen Lamellensegmente dargestellt.

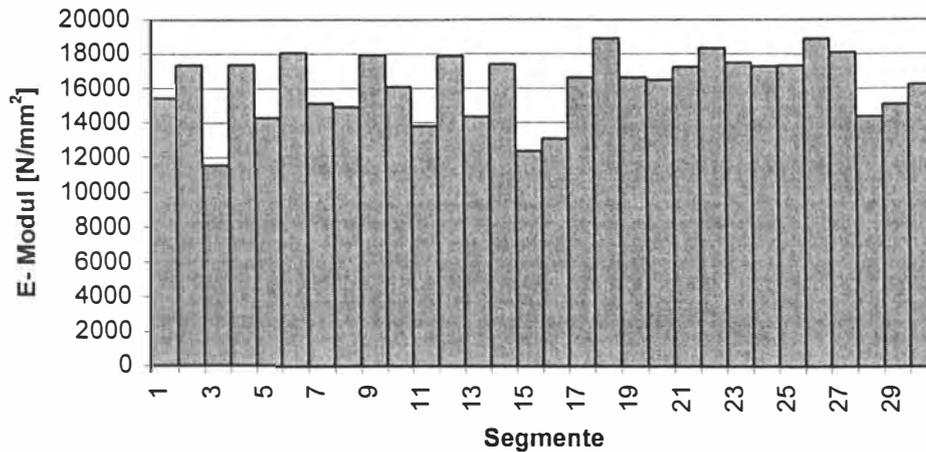


Bild 6 Simulationsbeispiel einer Lamelle ($E_{\text{mean}} = 15959 \text{ N/mm}^2$)

3.2 Dimensionen der Brettstapelelemente

Die Brettstapelelemente wurden als Einfeldträger ohne seitliche Auflagerung simuliert. Aus Gründen der Vereinfachung (Auswertung der Simulationen) wurde die Stützweite ℓ der Brettstapelelemente konstant bei 3,60 m gehalten. Die Höhe h der Lamellen und somit des Brettstapels wurde in den Bereichen 14, 16 und 18 cm variiert. Somit ergaben sich praxisnahe ℓ/h - Verhältnisse von 25,7, 22,5 und 20 [10], [11], [12].

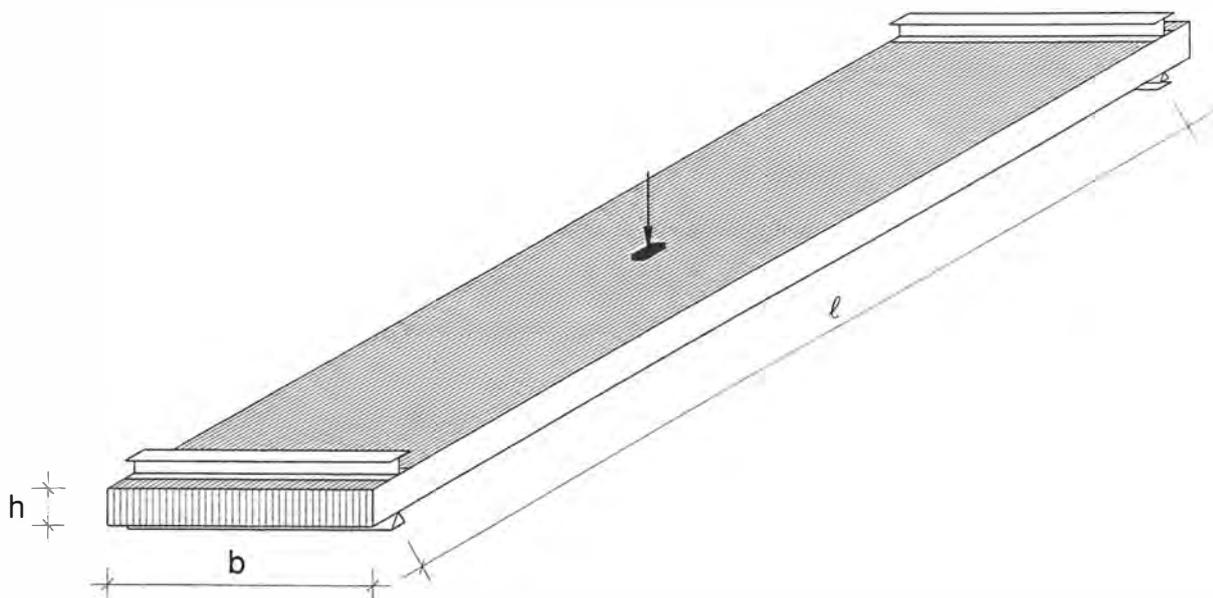


Bild 7 Dimensionen der simulierten Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast

Die Dicke t_{Lam} der Lamellen wurde in den Bereichen 30 mm, 35 mm und 40 mm variiert. Bei unterschiedlichen Lamellendicken wurde die Anzahl der Lamellen konstant gehalten. Die Anzahl der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes hing von der Art der Belastung ab. Brettstapelelemente, die durch Einzellasten belastet wurden (vgl. **Bild 7**), bestanden aus mindestens 30 Lamellensträngen, Brettstapelelemente unter Flächenlasten aus 15 Lamellensträngen.

3.3 Verbindungsmittel

Die Simulation der Nägel fußt auf der Annahme einer zweischnittigen Holz- Holz-Nagelverbindung und der Einhaltung der Mindesteinschlagtiefen nach DIN 1052-2. Hierdurch sind die Nageldurchmesser direkt von den Lamellendicken abhängig. Die Dimensionen der Nägel wurden DIN 1151 und DIN 1143-1 entnommen. Bei einer Lamellendicke von $t_{\text{Lam}} = 30$ mm sollte z.B. nur die Nagelgröße 34x90 verwendet werden. Es hat sich gezeigt, dass Nägel im Grenzbereich einer zweischnittigen Verbindung, d.h. geringfügig weniger als $8 d_{\text{Na}}$ Einschlagtiefe in der dritten Lamelle oder einen leichten Überstand des Nagels über die dritte Lamelle hinaus, ohne Einbußen der Steifigkeit der Brettstapelelemente verwendet werden können. Für obige Lamelle von $t_{\text{Lam}} = 30$ mm könnte auch ein Nagel der Größe 31x80 Verwendung finden, wenn auch die nach DIN 1052 geforderte Mindesteinschlagtiefe von $8 d_{\text{Na}}$ nicht erreicht wird.

Weiterhin wurde angenommen, dass die Nägel nach dem sogenannten Zick- Zack-Muster eingetrieben werden. Das sich somit ergebende Nagelbild ist in **Bild 8** dargestellt. Der Nagelabstand a_1 wurde in den Bereichen 75 mm, 150 mm und 225 mm variiert.

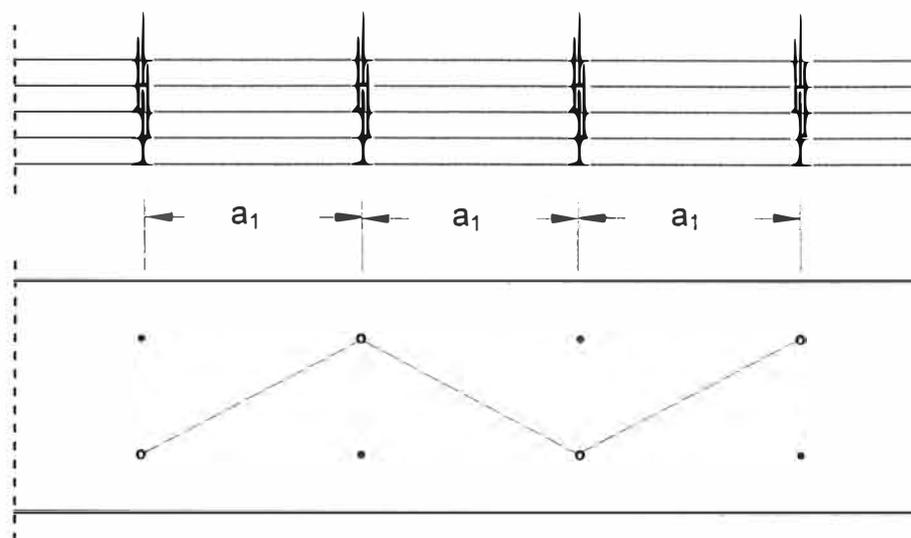


Bild 8 Nagelbild im Brettstapel (Zick- Zack- Muster)

Die mechanischen Eigenschaften der Nägel wurden über ein statisches Ersatzmodell berücksichtigt. Als statisches Ersatzmodell wurde ein beidseitig eingespannter Einfeldträger der Länge t_{Lam} gewählt. Die vertikale Verformung des beidseitig eingespannten Einfeldträgers infolge einer Einheitslast 1 wurde der Verschiebung einer Nagelverbindung nach Eurocode 5 gleichgestellt. Durch Auflösen der Gleichung nach dem Elastizitätsmodul des beidseitig eingespannten Einfeldträgers wurde eine wirksame Biegesteifigkeit EI_{ef} ermittelt.

3.4 Mechanisches Modell

Als mechanisches Modell für das Brettstapelelement wurde ein Trägerrost gewählt. Die Träger in Längsrichtung wurden durch die Lamellen dargestellt. Die Träger in Querrichtung wurden biegesteif an die Lamellen gekoppelt und erhielten die Steifigkeitseigenschaften EI_{ef} der Nägel. Am einen Ende des Brettstapelelementes wurden die Lamellen in x-, y- und z- Richtung unverschieblich gehalten. Am anderen Ende des Brettstapelelementes wurden die Lamellen nur in y- und z- Richtung gehalten.

Um bei Simulationen mit Einzellasten eine räumliche Ausdehnung der Lasteinleitung zu simulieren, wurde die Einzellast von 1,0 kN über 6 Knoten auf zwei Lamellen des Brettstapelelementes zentrisch aufgebracht. Der Aufbau des statischen Ersatzmodells ist in **Bild 9** dargestellt.

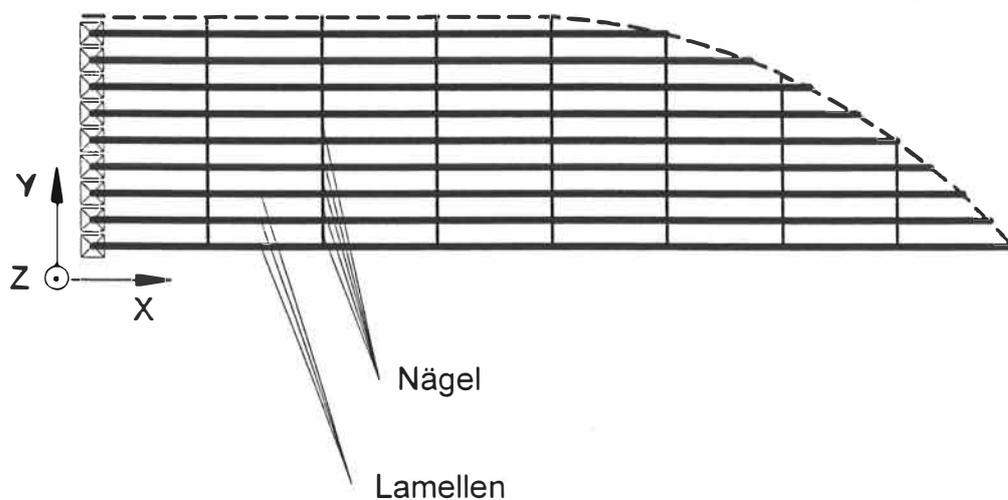


Bild 9 Trägerrostmodell des Brettstapelelementes, Draufsicht

3.5 Grundlage der Simulationen

Zur Simulation der Brettstapelelemente wurden im Vorfeld Dateien mit den Lamelleneigenschaften generiert. Die Simulation der Brettstapelelemente erfolgte automatisiert mittels des Finite- Elemente- Programms ANSYS. Die dafür erforderlichen Eingabedateien (Materialeigenschaften, Geometrie etc.) wurden über eigens dafür geschriebene Programme generiert. Die Berechnungen wurden linear-elastisch durchgeführt, d.h. die Brettstapelelemente konnten z. B. durch eine zentrische Einheitslast $F = 1,0 \text{ kN}$ belastet werden und die Ergebnisse der Berechnungen konnten somit linear extrapoliert werden.

Die optimale Anzahl der Simulationen eines Brettstapelsystems wurde über eine Simulationsreihe ermittelt. Hierfür wurde ein Brettstapelsystem (mit streuenden Einflussgrößen) 500, 650 und 800 mal simuliert und ausgewertet [13]. Die Änderungen der Mittelwerte und der Fraktilwerte mit der Zunahme der Simulationsanzahl ist so gering, dass eine Simulationsanzahl von 500 pro Brettstapelelement als ausreichend angesehen wurde.

3.6 Simulationsparameter

Grundsätzlich werden die Simulationen der Brettstapelsysteme bezüglich der Belastung in zwei Bereiche unterteilt:

- Belastung durch zentrische Einzellast
- Belastung durch eine gleichförmige Flächenlast

Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen wurden nur mit einer Belastung durch eine zentrische Einzellast simuliert. Die Simulation der Brettstapelelemente unter einer gleichförmigen Flächenlast war wegen der gleichmäßigen Verformung der ungestoßenen Lamellen nicht erforderlich.

Weiterhin wurden Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen unter den beiden o.g. Belastungsformen simuliert. Für die Simulationen wurden folgende Stoßvarianten der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes gewählt:

- wechselseitig gestoßene Lamellen
- wandernd gestoßene Lamellen
- zufällig gestoßene Lamellen

Die Stoßvarianten sind in **Bild 10** dargestellt.

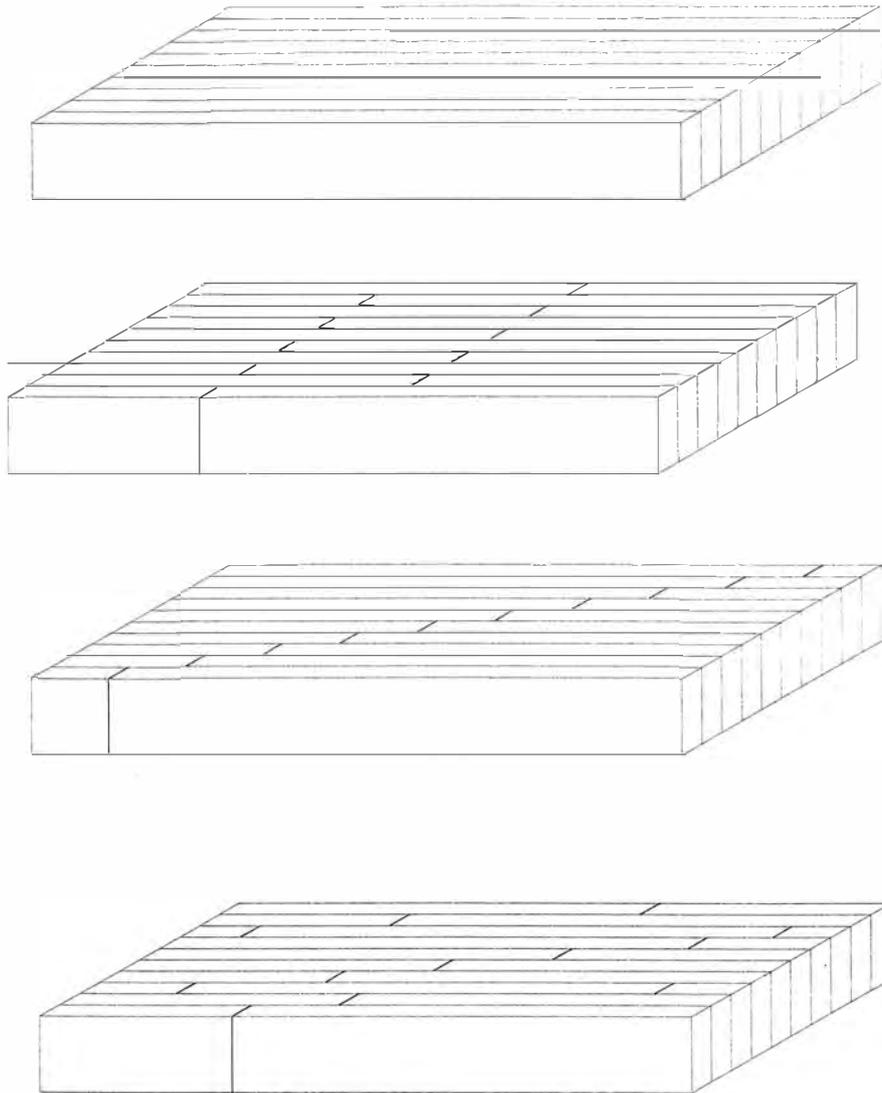


Bild 10 Stoßvarianten der Brettstapelelemente

Bei allen Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen wurden neben den Übergreifungslängen der Lamellen (Stoßlage) auch die im Abschnitt 3.2 und 3.3 aufgeführten Parameter variiert.

Ein Simulationsplan findet sich in Anlage C.

4 Ergebnisse der Simulationen

Alle Simulationen wurden nach den elastischen Verformungen, der Biegebeanspruchung der Lamellen und den Nagelbeanspruchungen ausgewertet. Für jedes Brettstapelelement (vgl. Simulationsplan in Anlage C) lagen jeweils 500 Ergebnisse der o.g. Werte vor. Aus diesen 500 Ergebnissen wurden die Mittelwerte der Verformungen und die 95%- Fraktile der Biegebeanspruchungen der Lamellen und der Nagelbeanspruchungen berechnet. Für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast konnten z.B. 36 unterschiedliche Mittelwerte der elastischen Verformungen berechnet werden. Hieraus wurden die signifikanten Einflussparameter für die Berechnung der Verformungen der jeweiligen Brettstapelelemente bestimmt. Mit diesen Einflussparametern wurden mit Hilfe multipler, nichtlinearer Regressionen [14] Bemessungsgleichungen und modifizierte Querschnittswerte der Brettstapelelemente hergeleitet. Analog wurde unter Verwendung der jeweiligen Mittelwerte oder der 95%- Fraktile bei der Herleitung aller Bemessungsgleichungen für die Brettstapelelemente vorgegangen.

Bei Verformungsberechnungen von Brettstapelelementen darf ein mittlerer Elastizitätsmodul von $E = 12600 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden.

4.1 Brettstapelsysteme unter zentrischer Einzellast

Die Gleichungen, bzw. die modifizierten Querschnittswerte für Brettstapelelemente unter zentrischen Einzellasten wurden auf der Grundlage einer wirksamen Lamellenanzahl abgeleitet. Um ein gängiges Bemessungsverfahren (Balkenstatik) beizubehalten, wurde die wirksame Lamellenanzahl in die Querschnittswerte integriert. Die folgenden Gleichungen gelten unter der Voraussetzung, dass sich jeweils 10 Lamellen rechts und links der Einzellast befinden.

4.1.1 Ungestoßene Lamellen

4.1.1.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen erfolgt bei Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen, wie auch bei den Elementen mit gestoßenen Lamellen, über Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

M das Biegemoment

\hat{W} das modifizierte Widerstandsmoment

Das Biegemoment M kann nach der technischen Biegelehre bestimmt werden zu:

$$M = F \cdot \frac{\ell}{4} \quad [\text{Nmm}] \quad (3)$$

Das modifizierte Widerstandsmoment berechnet sich zu:

$$\hat{W} = \frac{b \cdot h \cdot \ell}{4,5 \cdot a_1^{0,3}} \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.1.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen erfolgt, wie auch bei den Elementen mit gestoßenen Lamellen, über Gleichung (5):

$$v = F \cdot \frac{\ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

- F Zentrische Einzellast [N]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- E Mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
- \hat{I} Modifiziertes Flächenmoment 2. Grades

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades berechnet sich zu:

$$\hat{I} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \ell^{0,86}}{0,9 \cdot a_1^{0,4}} \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.1.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer zentrischen Einzellast auf ein Brettstapelelement mit ungestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (7):

$$F_{\text{Na}} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{8,5} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

F	Zentrische Einzellast [kN]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
h	Höhe der Lamelle [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]

4.1.2 Wechselseitig gestoßene Lamellen

Für die Simulationen der Brettstapelelemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen wurden die Stöße bei $\ell/5$, $\ell/4$ und $\ell/3$ symmetrisch zur Mitte des Brettstapels angesetzt (vgl. **Bild 11**). Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigte, dass die Stoßanordnung bei $\ell/3$ die größten Verformungen und die höchsten Beanspruchungen der Bauteile ergab. Die Simulationsergebnisse mit Stoßanordnungen bei $\ell/4$ und $\ell/5$ ergaben keine signifikant geringeren Verformungen oder Beanspruchungen. So gelten die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Gleichungen für Brettstapelelemente deren wechselseitige Stöße im Bereich $\ell/3$ bis $\ell/5$ angeordnet sind.

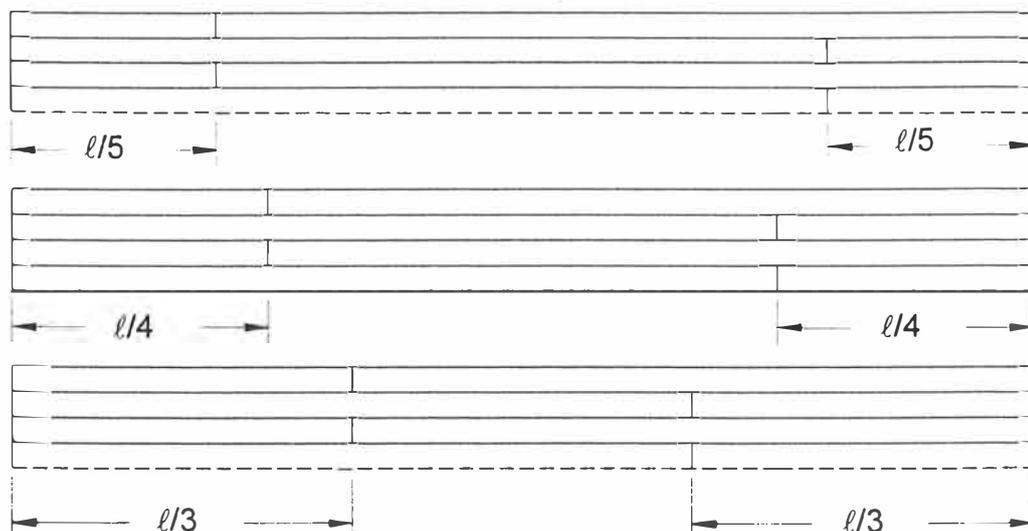


Bild 11 Stoßanordnung bei wechselseitig gestoßenen Lamellen

Die Nägel sollten einen faserparallelen Abstand von mindestens $15 d_{Na}$ ($a_{3,t}$) von den Stößen haben.

4.1.2.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment berechnet sich zu:

$$\hat{W} = \frac{b \cdot h^{0,85} \cdot \ell}{2,3 \cdot a_1^{0,3}} \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.2.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.1.1.2 mit Gleichung (5):

$$v = F \cdot \frac{\ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades berechnet sich zu:

$$\hat{I} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \ell}{4,0 \cdot a_1^{0,4}} \quad (9)$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.2.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer zentrischen Einzellast auf ein Brettstapelelement mit wechselseitig gestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (10):

$$F_{Na} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{8,5} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

Hierin bedeuten:

F	Zentrische Einzellast [kN]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
h	Höhe der Lamelle [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]

4.1.3 Wandernd gestoßene Lamellen

Bei den Simulationen der Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen wurde die Übergreifungslänge der Lamellen zu $\ell/6$ und $\ell/4$ (vgl. **Bild 12**) gewählt. Bei einer Übergreifungslänge von $\ell/3$ ergibt sich das Stoßmuster der wechselseitig gestoßenen Lamellen.

Die Brettstapelelemente mit einer Übergreifungslänge von $\ell/6$ zeigten die größten Verformungen und die höchsten Beanspruchungen der Bauteile, wobei die Ergebnisse der Simulationen mit größeren Übergreifungslängen keine deutlich geringeren Werte lieferten.

Die folgenden Gleichungen gelten unter den Voraussetzungen, dass die Nägel einen faserparallelen Abstand von mindestens $15 d_{Na}$ ($a_{3,i}$) von den Stößen haben und dass die Einzellasten nicht direkt über einem Stoß eingeleitet werden.

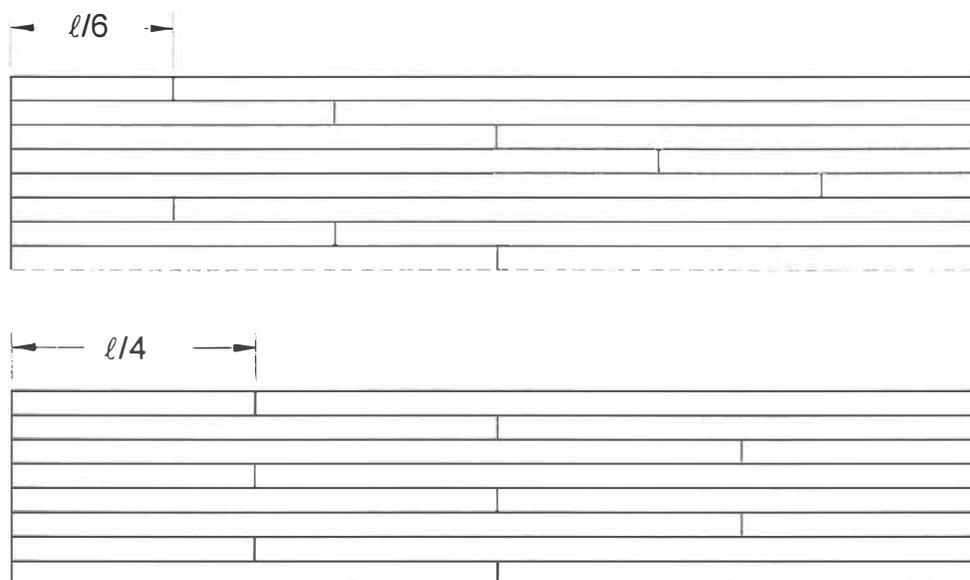


Bild 12 Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen

4.1.3.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegespannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit wandernd gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment berechnet sich zu:

$$\hat{W} = \frac{b \cdot h^{0,85} \cdot \ell}{2,8 \cdot a_1^{0,3}} \quad (11)$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.3.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit wandernd gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.1.1.2 mit Gleichung (5):

$$v = F \cdot \frac{\ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades berechnet sich mit Gleichung (9):

$$\hat{I} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \ell}{4,0 \cdot a_1^{0,4}}$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.3.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer zentrischen Einzellast auf ein Brettstapelelement mit wandernd gestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (12):

$$F_{Na} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{5,5} \quad [\text{N}] \quad (12)$$

Hierin bedeuten:

F	Zentrische Einzellast in [kN]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes in [mm]
h	Höhe der Lamelle in [mm]
a_1	Nagelabstand in [mm]

4.1.4 Zufällig gestoßene Lamellen

Bei diesen Simulationen wurden mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen gleichverteilte Lamellenlängen von 2,5 m bis 4,5 m erzeugt. Das Brettstapelelement wurde generiert, indem die Reststücke der Lamellen wieder als Anfangsstücke der nächsten Lamellenlage verwendet wurden. Da es sich um zufällig, gleichverteilte Lamellenlängen handelte, wurden im Brettstapelelement die Stöße zusätzlich durchmischelt. Für jedes einzelne Brettstapelelement wurden die Längen der Lamellen neu erzeugt. Einzige Einschränkung bei der Generierung der Brettstapelelemente war, dass nicht mehr als zwei Stöße in einer Lamellenlage vorhanden waren.

Durch dieses Herstellungsprinzip können Brettstapelelemente ohne wesentlichen Holzverlust hergestellt werden.

4.1.4.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit zufällig gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment berechnet sich mit Gleichung (11):

$$\hat{W} = \frac{b \cdot h^{0,85} \cdot \ell}{2,8 \cdot a_1^{0,3}}$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.4.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit zufällig gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.1.1.2 mit Gleichung (5):

$$v = F \cdot \frac{\ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades berechnet sich mit Gleichung (9):

$$\hat{I} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \ell}{4,0 \cdot a_1^{0,4}}$$

Hierin bedeuten:

- b, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.1.4.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer zentrischen Einzellast auf ein Brettstapelelement mit zufällig gestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (13):

$$F_{\text{Na}} = F \cdot 2 \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right)^{2/3} \cdot a_1^{1/3} \quad [\text{N}] \quad (13)$$

Hierin bedeuten:

- F Zentrische Einzellast [kN]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- h Höhe der Lamelle [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

4.2 Brettstapelsysteme unter gleichförmiger Flächenlast

Den Gleichungen zur Berechnung der Biege- und Randspannungen und der Verformungen liegen Brettstapelelemente mit einer Einheitsbreite von 1,0 m zugrunde. Werden Brettstapelelemente mit anderen Breiten (Beanspruchung) berechnet, müssen die modifizierten Widerstandsmomente \hat{W} und die modifizierten Flächenmomente 2. Grades \hat{I} mit dem Faktor $\frac{b_{\text{vorhanden}} [\text{m}]}{1,0\text{m}}$ multipliziert werden.

4.2.1 Ungestoßene Lamellen

Durch die kontinuierliche Vernagelung der Lamellen werden Schubkräfte zwischen den Lamellen übertragen, wodurch den Lamellen eine gleichförmige vertikale Verformung aufgezwungen wird. Infolge dieser gleichförmigen Verformung aller Lamellen kann das Brettstapelelement als homogener Balken mit einer Einheitsbreite von 1,0 m berechnet werden. Hierdurch waren keine Simulationen von Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast erforderlich.

4.2.1.1 Biege- und Randspannungen

Für die Berechnung der Biege- und Randspannungen kann ein Brettstapelelement mit einer Einheitsbreite von $b_E = 1,0$ m herangezogen werden. Die Biege- und Randspannung kann nach Gleichung (14) berechnet werden:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (14)$$

Hierin bedeuten:

- M das Biegemoment
- W das Widerstandsmoment

Das Biegemoment M kann nach der technischen Biegelehre bestimmt werden zu:

$$M = \frac{q \cdot \ell^2}{8} \quad [\text{Nmm}] \quad (15)$$

Hierin bedeuten:

- q die gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]

Das Widerstandsmoment berechnet sich zu:

$$W = \frac{1000 \text{ mm} \cdot h^2}{6} \quad (16)$$

Hierin bedeutet:

h Höhe der Lamelle [mm]

4.2.1.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit ungestoßenen Lamellen erfolgt über Gleichung (17):

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

Hierin bedeuten:

q gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$

ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]

E Mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

I Flächenmoment 2. Grades $[\text{mm}^4]$

Das Flächenmoment 2. Grades berechnet sich zu:

$$I = \frac{1000 \text{ mm} \cdot h^3}{12} \quad (18)$$

Hierin bedeutet:

h Höhe der Lamelle [mm]

4.2.2 Wechselseitig gestoßene Lamellen

Für die Simulationen der Brettstapelelemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen wurden die Stöße bei $\ell/5$, $\ell/4$ und $\ell/3$ symmetrisch zur Mitte des Brettstapels angesetzt (analog zu den Simulationen mit zentrischer Einzellast). Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigte, dass die Stoßanordnung einen signifikanten Einfluss auf die Beanspruchungen der Bauteile und die Verformungen der Brettstapelelemente hat. Um diesen Einfluss der Stoßlage mitzuberechnen, wurde der Parameter ℓ'/ℓ eingeführt. Die Größe ℓ' bezeichnet die Lage der Lamellenstöße nach **Bild 11** und wurde somit mit den Werten $\ell/5$, $\ell/4$ und $\ell/3$ simuliert. Durch die Division von ℓ' mit ℓ erhält man einen dimensionslosen

Parameter zur Bestimmung der Beanspruchungen und Verformungen von Brettstapelelementen.

Die im folgenden angegebenen Gleichungen zur Bestimmung von Beanspruchungen und Verformungen von Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast gelten unter der Voraussetzung, dass die wechselseitigen Stöße in den Bereichen von $\ell/3$ bis $\ell/5$ und symmetrisch zur Brettstapelelementmitte angeordnet sind.

4.2.2.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{W} = \frac{35 \cdot h^2}{\sqrt{\frac{\ell'}{\ell}}} \quad (19)$$

Hierin bedeuten:

- h Höhe der Lamellen [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- ℓ' Stoßlage ab Auflager [mm]

4.2.2.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.2.1.2 mit Gleichung (17):

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{I} = \frac{30 \cdot h^{1\frac{1}{4}} \cdot \ell^{1\frac{1}{4}}}{\left(\frac{\ell'}{\ell}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot a_1^{\frac{1}{8}}} \quad (20)$$

Hierin bedeuten:

h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
ℓ'	Stoßlage ab Auflager [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]

4.2.2.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer gleichförmigen Flächenlast auf ein Brettstapelelement mit wechselseitig gestoßenen Lamellen, berechnet sich nach Gleichung (21):

$$F_{Na} = q \cdot \frac{\sqrt{\frac{\ell'}{\ell}} \cdot a_1^{1/3} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot d_N^{1.2}}{5} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

Hierin bedeuten:

q	gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$
h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
ℓ'	Stoßlage ab Auflager [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]
d_N	Nageldurchmesser [mm]

4.2.3 Wandernd gestoßene Lamellen

Bei den Simulationen der Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen wurde die Übergreifungslänge der Lamellen zu $\ell/6$ und $\ell/4$ (analog zu den Simulationen mit zentrischer Einzellast) gewählt.

Die Biegerandspannungen und die Verformungen dieser Brettstapelelemente hängen nur unwesentlich von der Übergreifungslänge der Lamellen ab. Die Beanspruchung der Nägel hängt jedoch signifikant von der Übergreifungslänge der Lamellen ab.

Die folgenden Gleichungen gelten unter der Voraussetzung, dass die Übergreifungslängen sich in dem Bereich von $\ell/4$ bis $\ell/6$ bewegen (vgl. **Bild 12**).

4.2.3.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit wandernd gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{W} = 50 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right)^{0,15} \quad (22)$$

Hierin bedeuten:

- h Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]

4.2.3.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit wandernd gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.2.1.2 mit Gleichung (17):

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{I} = \frac{25 \cdot h^3 \cdot \sqrt{\frac{\ell}{h}}}{a_1^{1/6}} \quad (23)$$

Hierin bedeuten:

- h Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a₁ Nagelabstand [mm]

4.2.3.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer gleichförmigen Flächenlast auf ein Brettstapelelement mit wandernd gestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (24):

$$F_{Na} = q \cdot \frac{a_1^{2/3} \cdot d_N^{4/3} \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/5}}{18 \cdot \left(\frac{\ell'}{\ell}\right)^{2/5}} \quad [\text{N}] \quad (24)$$

Hierin bedeuten:

q	gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right]$
h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
ℓ'	Übergreifungslänge [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]
d_N	Nageldurchmesser [mm]

4.2.4 Zufällig gestoßene Lamellen

Die Verteilung der Stöße innerhalb der Brettstapelelemente und der Aufbau der Brettstapelelemente wurde analog Abschnitt 4.1.4 generiert.

4.2.4.1 Biegerandspannungen

Die Berechnung der Biegespannung der Lamellen erfolgt bei den Brettstapelelementen mit zufällig gestoßenen Lamellen analog zu Abschnitt 4.1.1.1 mit Gleichung (2):

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Das modifizierte Widerstandsmoment (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{W} = \frac{50 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{1/4}}{a_1^{1/9}} \quad (25)$$

Hierin bedeuten:

h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]

4.2.4.2 Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Elemente mit zufällig gestoßenen Lamellen erfolgt analog zu Abschnitt 4.1.2.1 mit Gleichung (17):

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \hat{I}} \quad [\text{mm}]$$

Das modifizierte Flächenmoment 2. Grades (Bezugsbreite = 1000 mm) berechnet sich zu:

$$\hat{I} = \frac{8 \cdot h^3 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,9}}{a_1^{1/5}} \quad (26)$$

Hierin bedeuten:

h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]

4.2.4.3 Nagelbeanspruchung

Die Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren, infolge einer gleichförmigen Flächenlast auf ein Brettstapelelement mit zufällig gestoßenen Lamellen, berechnet sich über Gleichung (27):

$$F_{Na} = q \cdot \frac{\sqrt{\frac{\ell}{h}} \cdot a_1^{2/3} \cdot d_N^{1,5}}{10} \quad [\text{N}] \quad (27)$$

Hierin bedeuten:

q	gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$
h	Höhe der Lamelle [mm]
ℓ	Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
a_1	Nagelabstand [mm]
d_N	Nageldurchmesser [mm]

5 Versuche

Um die Simulationsergebnisse und die daraus abgeleiteten Bemessungsgleichungen zu bestätigen, wurden aus 934 Lamellen 43 Prüfkörper hergestellt und geprüft. Die Prüfkörper wurden von Herrn Dipl.- Ing. V. Krämer und von Frau Dipl.- Ing. J. Denzler [15] bei der Firma Kaufmann Massivholz GmbH in Oberstadion hergestellt.

An dieser Stelle sei ausdrücklich der Firma Kaufmann Massivholz GmbH in Oberstadion für die uneigennützigere Bereitstellung von Arbeitszeit, Arbeitsplatz und Arbeitsgerät und den Transport der Prüfkörper von Oberstadion nach Karlsruhe gedankt.

Die Prüfkörper unterschieden sich grundsätzlich durch die Art der Belastung (zentrische Einzellast und gleichförmige Flächenlast). Weiterhin wurden die Stoßvarianten, die Nagelanordnung und die l/h - Verhältnisse der Brettstapelelemente variiert. Um die Simulationsergebnisse direkt vergleichen zu können, wurden die Prüfkörper virtuell im Computer nachgebildet und die Belastung simuliert. Hierzu wurden die Rohdichte, die Holzfeuchte, die Ästigkeit und der Elastizitätsmodul der Lamellen erfasst. Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde die Lage der Lamellen und der Lamellenstöße notiert, so dass die Prüfkörper im Computer wirklichkeitsnah nachgebildet werden konnten.

Um den Einfluss der Reibung [16] zwischen den Lamellen möglichst gering zu halten, wurden in jede Scherfuge zwei 0,15 mm dicke PE- Folien eingelegt. Der Abstand der Lamellen im Stoßbereich wurde konstant mit 3,0 cm (Abstandsholz) ausgeführt.

Die verwendeten Lamellen entsprachen mit wenigen Ausnahmen nach visueller Sortierung mindestens der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074 [17]. Die schlechteren Lamellen wurden entsprechend gekappt und für Prüfkörper mit Stoßvarianten verwendet.

5.1 Materialeigenschaften

Die o.g. Materialeigenschaften der Lamellen sind die Eingangsgrößen der Regressionsgleichungen zur Simulation der Lamelleneigenschaften. Bei der Simulation der Prüfkörper wurden die Materialeigenschaften der Lamellen vorgegeben. Die Lamellen wurden so lange generiert, bis der mittlere Elastizitätsmodul der Lamelle um maximal 3% von dem gemessenen Wert abwich.

5.1.1 Rohdichte und Feuchtegehalt der Lamellen

Die Holzfeuchte wurde mittels eines Elektronik- Feuchtemessgerätes (GANN Hydromette M2050) gemessen. Der Mittelwert der Holzfeuchte ergab sich zu 14,4% mit einer Standardabweichung von 1,14%.

Zur Bestimmung der Rohdichte wurde die Masse der einzelnen Lamellen mit einer elektronischen Waage gemessen. Der Mittelwert der Rohdichte ergab sich zu 467 kg/m³ mit einer Standardabweichung von 45,9 kg/m³.

5.1.2 Mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen

Der mittlere Elastizitätsmodul der Lamellen wurde mit der dynamischen Methode bestimmt [18]. Hierzu werden die Lamellen mittels eines Impulses (Hammer) in Schwingungen versetzt. Die Frequenz der Longitudinalschwingungen bildet die Grundlage zur Berechnung des mittleren Elastizitätsmoduls einer Lamelle. Die Frequenzmessung wurde mit dem Messgerät GRINDO- SONIC durchgeführt. Der mittlere Elastizitätsmodul einer Lamelle berechnet sich nach Gleichung (28):

$$E = 4 \cdot \rho \cdot \ell^2 \cdot f^2 \cdot 10^6 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (28)$$

Der Mittelwert der Elastizitätsmoduln ergab sich zu 12600 N/mm² mit einer Standardabweichung von 2760 N/mm². In **Bild 13** ist der mittlere Elastizitätsmodul über die mittlere Rohdichte der Lamellen aufgetragen.

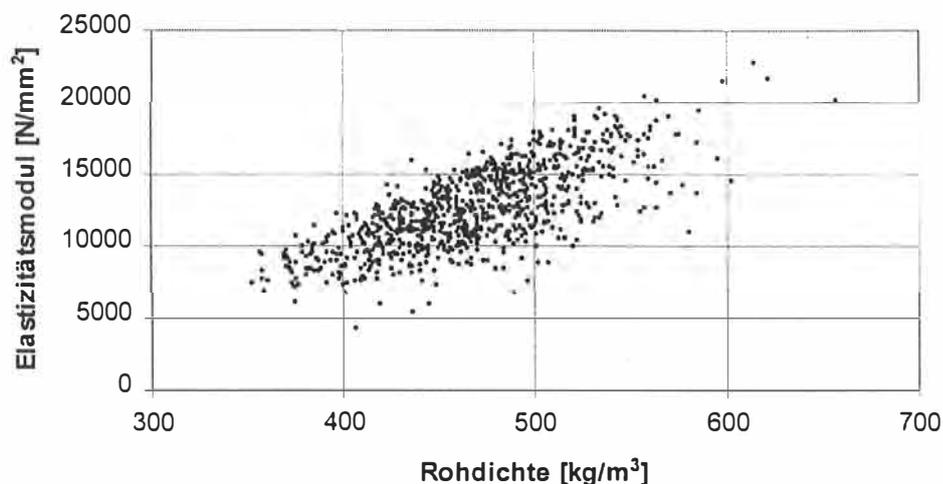


Bild 13 Mittlerer Elastizitätsmodul über die mittlere Rohdichte von 932 Lamellen

5.1.3 Ästigkeit der Lamellen

Als Maß für die Ästigkeit wird in den Richtlinien der ECE (Economic Comission for Europe) der KAR- Wert definiert. KAR steht dabei für Knot Area Ratio. Er bezeichnet die auf den Brettquerschnitt projizierte Astfläche. In die Berechnung des KAR-Wertes gehen alle Äste ein, die in einem 15 cm langen Brettabschnitt liegen und einen größeren Durchmesser als 5 mm aufweisen. Der KAR-Wert setzt sich aus der Summe aller im Brettabschnitt vorhandenen Äste zusammen.

Der Mittelwert der maximalen KAR- Werte ergab sich zu 0,235 mit einer Standardabweichung von 0,114. In **Bild 14** sind die maximalen KAR- Werte der Größe nach sortiert dargestellt.

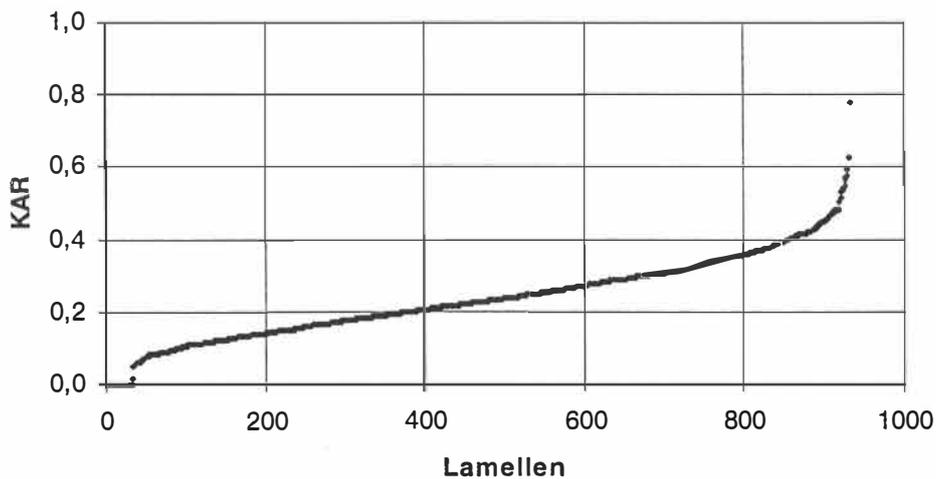
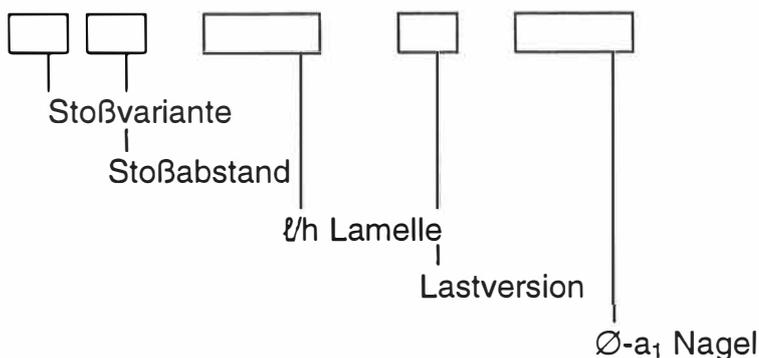


Bild 14 Maximale KAR- Werte der Lamellen

5.2 Zusammenstellung der Versuche

Die Prüfkörper wurden nach folgendem Muster bezeichnet, das alle relevanten Daten enthält:



Stoßvariante	W	wechselseitiger Stoß
	T	treppenförmiger bzw. wandernder Stoß
	Z	zufällig verteilter Stoß
	U	ungestoßen
Stoßabstand	Abstand des ersten Stoßes bis zum Auflager (ℓ') [cm]	
ℓ/h Lamelle	Stützweite der Lamellenstränge [m] / Höhe der Lamellen [mm]	
Lastversion	Q	Flächenlast
	F	Einzellast
\varnothing -a ₁ Nagel	Durchmesser des Nagels [mm] – Nagelabstand [cm] zwischen den in eine Reihe geschobenen Nägeln	

Die Bezeichnung [Q08] T60_4.20/165_Q_3.1-7.5 beinhaltet folgende Informationen:

Q08 ist eine Kurzbezeichnung und bedeutet, dass es sich um einen flächig belastenden Brettstapel mit der laufenden Nummer 08 handelt. Diese Kurzform wird im folgenden verwendet. Die eigentliche Bezeichnung liefert alle relevanten Daten: der Prüfkörper besitzt treppenförmig bzw. wandernd verteilte Stöße; der Abstand des ersten Stoßes vom Auflager beträgt 60 cm; die Stützweite ist 4,20 m; die Lamellenhöhe 165 mm; das folgende „Q“ steht wie bei der Kurzbezeichnung für eine Flächenlast. Hergestellt wurde der Brettstapel mit 3,1 mm dicken Nägeln im Abstand von 7,5 cm.

Die Prüfkörper, die durch eine zentrische Einzellast beansprucht wurden, bestanden aus mindestens 30 Lamellensträngen, die Prüfkörper mit ungestoßenen Lamellen bestanden aus 40 Lamellen. Dies war erforderlich, um die Lastverteilung innerhalb eines Brettstapelelementes und deren Verformung experimentell untersuchen zu können. Die Prüfkörper, mit denen die Belastung durch eine gleichförmige Flächenlast untersucht wurde, bestanden aus 15 Lamellensträngen, da bei dieser Belastungsvariante eine Lastverteilung innerhalb des Brettstapels nicht zu untersuchen war.

Die Versuche mit Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast sind in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Tabelle 3 Zusammenstellung der Versuche mit gleichförmiger Flächenlast

Bezeichnungen		l_{ges}	l	h	D	a_1	Stoßart
[/]		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[cm]	[/]
Q1	W107_3.15/165_Q_3.1-7.5	3,50	3,15	165	3,1	7,5	Wechsel
Q2	W107_3.15/165_Q_3.1-15	3,50	3,15	165	3,1	15,0	Wechsel
Q3	W107_3.15/165_Q_3.4-22.5	3,50	3,15	165	3,4	22,5	Wechsel
Q4	W107_3.15/180_Q_3.1-15	3,50	3,15	180	3,1	15,0	Wechsel
Q5	W90_3.60/165_Q_3.4-7.5	4,00	3,60	165	3,4	7,5	Wechsel
Q6	W90_3.60/165_Q_3.4-15	4,00	3,60	165	3,4	15,0	Wechsel
Q7	W80_4.05/165_Q_3.4-22.5	4,50	4,05	165	3,4	22,5	Wechsel
Q8	T60_4.20/165_Q_3.1-7.5	4,50	4,20	165	3,1	7,5	Treppe
Q9	T60_4.20/165_Q_3.1-15	4,50	4,20	165	3,1	15,0	Treppe
Q10	T60_3.60/165_Q_3.1-22.5	4,00	3,60	165	3,1	22,5	Treppe
Q11	T60_4.20/165_Q_3.4-15	4,50	4,20	165	3,4	15,0	Treppe
Q12	T90_3.60/180_Q_3.1-15	4,00	3,60	180	3,1	15,0	Treppe
Q13	T120_4.80/180_Q_3.1-7.5	5,00	4,80	180	3,1	7,5	Treppe
Q14	T120_4.80/180_Q_3.1-15	5,00	4,80	180	3,1	15,0	Treppe
Q15	T118_4.725/180_Q_3.1-22.5	5,00	4,73	180	3,1	22,5	Treppe
Q16	T120_4.80/180_Q_3.4-15	5,00	4,80	180	3,4	15,0	Treppe
Q17	T90_3.60/165_Q_3.1-15	4,00	3,60	165	3,1	15,0	Treppe
Q18	Z_3.60/165_Q_3.1-7.5	3,80	3,60	165	3,1	7,5	Zufall
Q19	Z_3.60/165_Q_3.1-15	3,80	3,60	165	3,1	15,0	Zufall
Q20	Z_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,80	3,60	165	3,1	22,5	Zufall
Q21	Z_3.60/180_Q_3.4-7.5	3,80	3,60	180	3,4	7,5	Zufall
Q22	Z_3.60/180_Q_3.4-15	3,80	3,60	180	3,4	15,0	Zufall
Q23	Z_3.60/180_Q_3.4-22.5	3,80	3,60	180	3,4	22,5	Zufall
Q24	U_4.05/180_Q_3.1-22.5	4,50	4,05	180	3,1	22,5	Ohne

Die Versuche mit Brettstapелеlementen unter zentrischer Einzellast sind in **Tabelle 4** zusammengestellt.

Tabelle 4 Zusammenstellung der Versuche mit zentrischen Einzellasten

Bezeichnungen [/]		l_{ges} [m]	l [m]	h [mm]	d [mm]	a_1 [cm]	Stoßart [/]
F01	W105_3.15/180_F_3.1-7.5	3,50	3,15	180	3,1	7,50	Wechsel
F02	W105_3.15/180_F_3.1-15	3,50	3,15	180	3,1	15,0	Wechsel
F03	W105_3.15/180_F_3.1-22.5	3,50	3,15	180	3,1	22,5	Wechsel
F04	W80_4.05/165_F_3.4-15	4,50	4,05	165	3,4	15,0	Wechsel
F05	W100_4.05/165_F_3.1-15	4,50	4,05	165	3,1	15,0	Wechsel
F06	T60_3.60/180_F_3.1-7.5	4,00	3,60	180	3,1	7,5	Treppe
F07	T60_3.60/180_F_3.1-15	4,00	3,60	180	3,1	15,0	Treppe
F08	T60_3.60/180_F_3.1-22.5	4,00	3,60	180	3,1	22,5	Treppe
F09	T105_4.20/165_F_3.1-15	4,50	4,20	165	3,1	15,0	Treppe
F10	T75_4.50/180_F_3.4-15	5,00	4,50	180	3,4	15,0	Treppe
F11	Z_3.60/180_F_3.1-15	3,80	3,60	180	3,1	15,0	Zufall
F12	Z_3.60/180_F_3.4-15	3,80	3,60	180	3,4	15,0	Zufall
F13	Z_3.60/165_F_3.1-22.5	3,80	3,60	165	3,1	22,5	Zufall
F14	U_3.75/190_F_3.8-15	4,00	3,75	190	3,8	15,0	Ohne
F15	U_4.50/155_F_3.1-15	5,00	4,50	155	3,1	15,0	Ohne
F16	U_4.50/140_F_3.4-15	5,00	4,50	140	3,4	15,0	Ohne
F17	U_3.75/180_F_3.1-7.5	4,00	3,75	180	3,1	7,50	Ohne
F18	U_3.75/180_F_3.1-15	4,00	3,75	180	3,1	15,0	Ohne
F19	U_3.60/180_F_3.1-22.5	4,00	3,60	180	3,1	22,5	Ohne

5.3 Prüfkörper unter zentrischen Einzellasten

Die Verformungen der Prüfkörper wurden unabhängig von der Belastungsart (Einzellast / Flächenlast) mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Bei den Versuchen mit zentrischen Einzellasten wurden die Verformungen in der Symmetrieachse quer zur Elementhaupttrichtung gemessen. Weiterhin wurden Wegaufnehmer im Bereich der Lasteinleitung und im Bereich von $l/4$, wiederum quer zur Elementhaupttrichtung, angebracht. In **Bild 15** sind die Lagen der induktiven Wegaufnehmer an den Prüfkörpern durch Kreuze markiert.

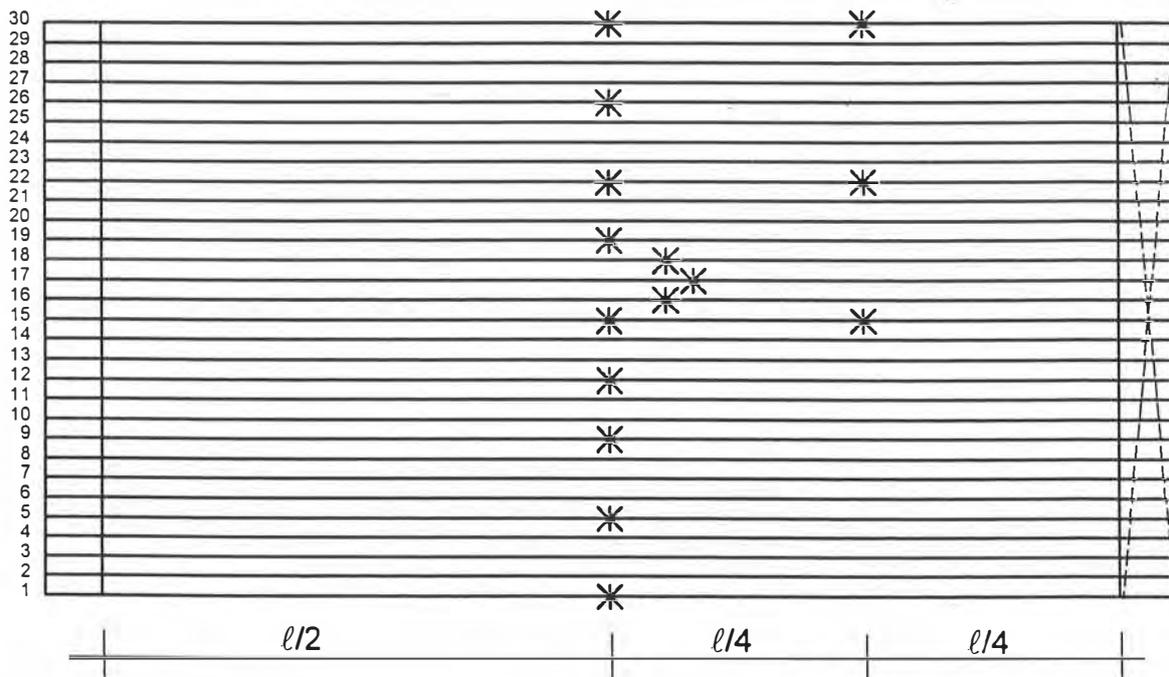


Bild 15 Lage der Wegaufnehmer bei Versuchen mit Einzellasten (Draufsicht)

Die Lasteinleitung erfolgte durch ein Stahlblock, der die Breite von $2 t_{\text{Lamelle}} - 2 \text{ mm}$ aufwies.

5.3.1 Versagensarten

Die Prüfkörper, die durch zentrische Einzellasten beansprucht wurden, zeigten zwei unterschiedliche Versagensformen. Prüfkörper mit ungestoßenen Lamellen oder mit einer engen Nagelung versagten in der Regel durch das Erreichen der Biegefestigkeit der Lamellen. Die Prüfkörper mit einer weiten Nagelung oder mit ungünstigen Stoßvarianten versagten infolge des Durchstanzens der Lamellen.



Bild 16 Versagen eines Prüfkörpers infolge des Durchstanzens der Einzellast

5.3.2 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse / Simulationen / Gleichungen

Um die Verlässlichkeit der Simulationen und der daraus abgeleiteten Gleichungen zu überprüfen, wurden die Versuchsergebnisse den Simulationen und den Ergebnissen aus den Bemessungsgleichungen gegenübergestellt. In **Bild 17** sind die vertikalen Verformungen der Prüfkörper F 14 – F 19 (ungestoßene Lamellen), die Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die mit den Gleichungen (5) und (6) berechneten Verformungen bei einer Laststufe von 5,0 kN abgetragen.

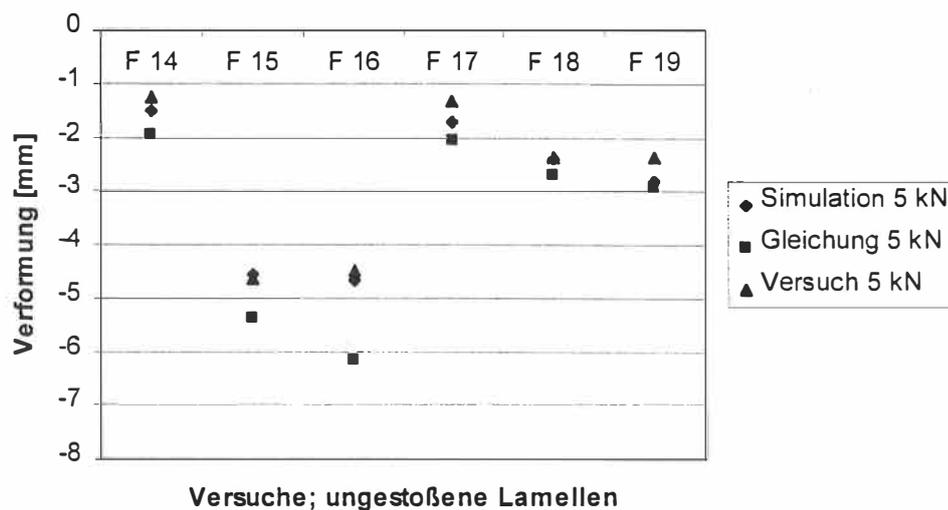


Bild 17 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung bei 5,0 kN

Die Verformungen der Brettstapelelemente mit den wechselseitig, wandernd, und zufällig gestoßenen Lamellen können nach Gleichung (9) berechnet werden. In den **Bildern 18 – 20** sind die vertikalen Verformungen der Prüfkörper F 1 – F 13 (gestoßene Lamellen), die Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die mit den Gleichung (9) berechneten Verformungen bei einer Laststufe von 20,0 kN abgetragen.

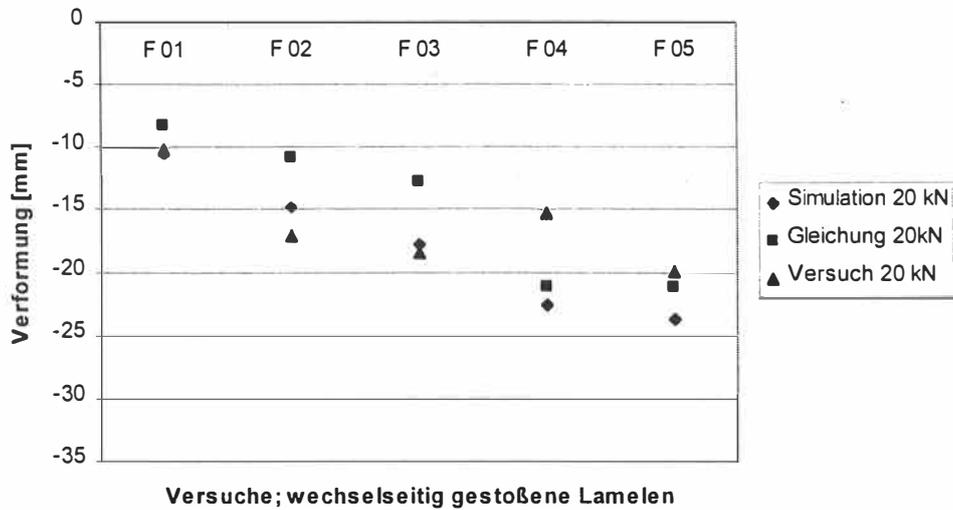


Bild 18 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; wechselseitig gestoßene Lamellen

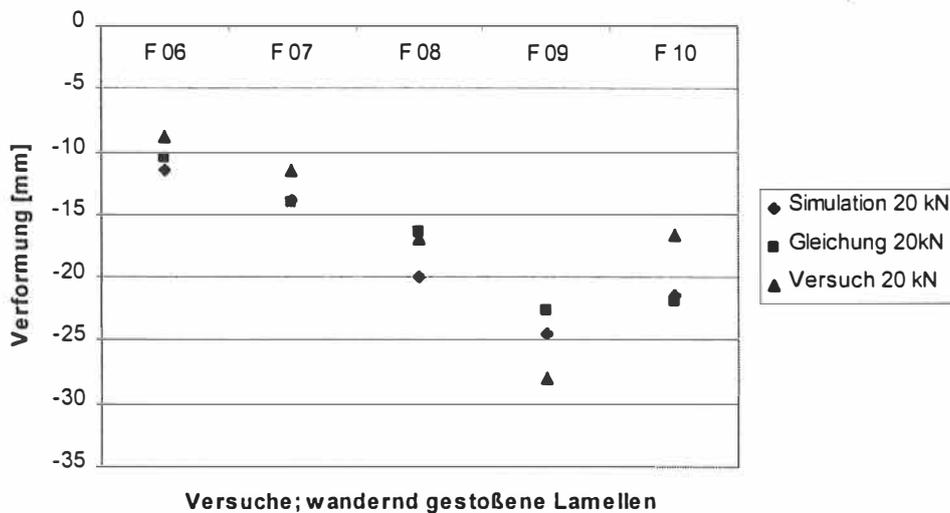


Bild 19 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; wandernd gestoßene Lamellen

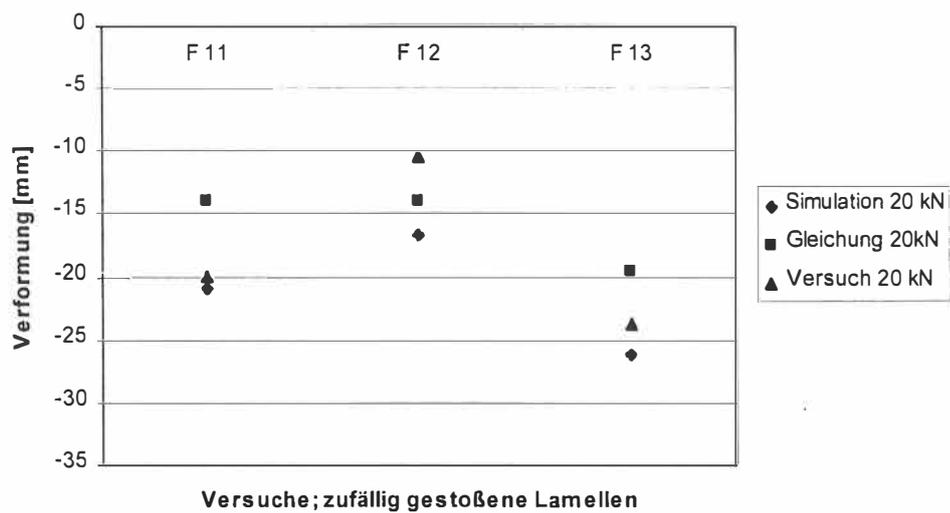


Bild 20 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; zufällig gestoene Lamellen

In Anlage B findet sich die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Simulationsergebnissen.

5.4 Prüfkörper unter gleichförmiger Flächenlast

Die Prüfkörper mit gleichförmiger Flächenlast bestanden aus jeweils 12 Lamellensträngen. Mit dieser Anzahl von Lamellensträngen konnten alle Stoßvarianten, mit Ausnahme der zufällig verteilten Stöße, symmetrisch zur Brettstapelelement- Längsachse hergestellt werden. Weiterhin entfiel - im Gegensatz zu den Prüfkörpern mit zentrischer Einzellast - die Untersuchung der Lastausbreitung.

Um bei den Versuchen eine möglichst realistische Flächenlast zu simulieren, wurde die Prüfkraft mittels vier gleichgeschalteten Einzelprüfzylindern über vier Längstraversen in 8 U- Profile eingeleitet. Somit wurden in den $l/9$ - Punkten des Prüfkörpers jeweils eine Linienlast quer zur Prüfkörperhaupttrichtung aufgebracht. In **Bild 21** ist der Aufbau der Versuche mit Prüfkörpern unter gleichförmiger Flächenlast dargestellt.

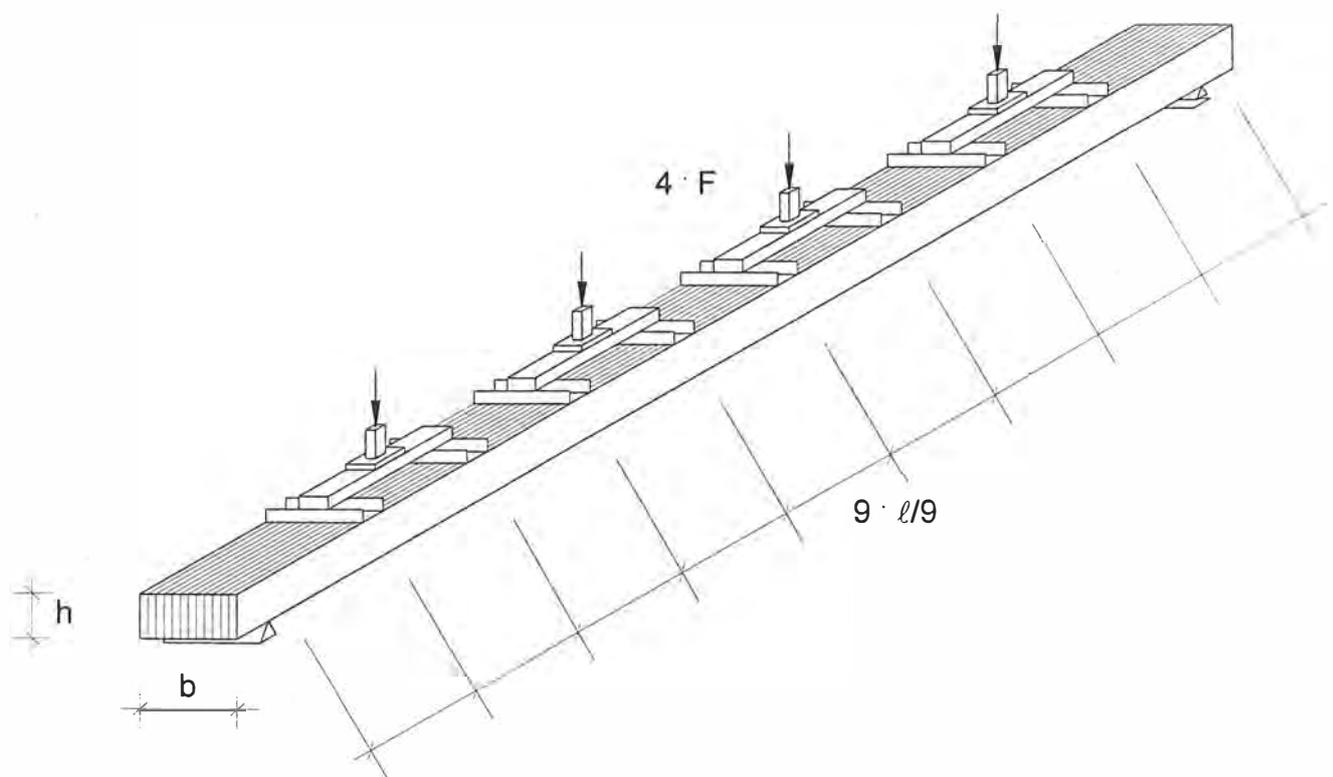


Bild 21 Versuchsaufbau für Prüfkörper unter gleichförmiger Flächenlast

Bei den Versuchen mit gleichförmigen Flächenlasten wurden die Verformungen an den Längsseiten bei $l/4$, $l/2$ und bei $3l/4$ gemessen. Weiterhin wurden Wegaufnehmer im Bereich der Prüfkörpermitte und im Stoßbereich einer Lamelle angebracht. In **Bild 22** sind die Lagen der induktiven Wegaufnehmer an den Prüfkörpern durch Kreuze markiert.

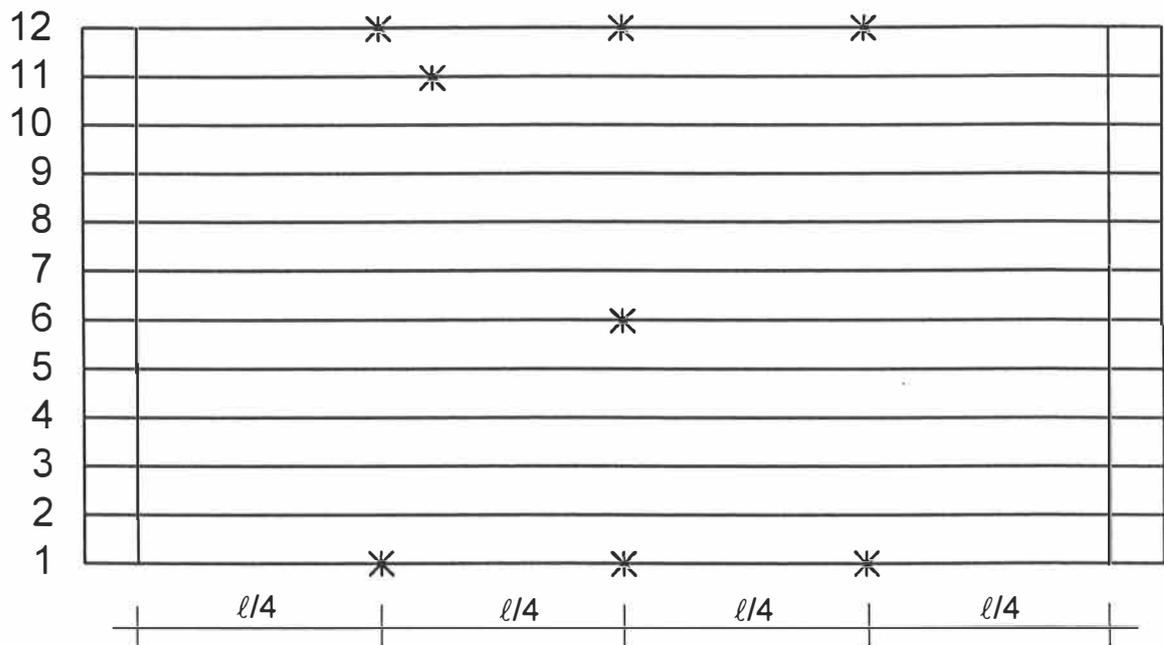


Bild 22 Lage der Wegaufnahme bei Versuchen mit Flächenlasten (Draufsicht)

5.4.1 Versagensarten

Die Prüfkörper, die durch Flächenlasten beansprucht wurden, zeigten zwei unterschiedliche Versagensformen. Prüfkörper mit einer engen Nagelung versagten in der Regel durch das Erreichen der Biegefestigkeit der Lamellen. Die Prüfkörper mit einer weiten Nagelung oder mit ungünstigen Stoßvarianten versagten infolge der Tragfähigkeit der Nägel, so dass die Lamellen gegenseitig abscheren. In **Bild 23** ist Prüfkörper Q4 dargestellt, der durch das Abscheren der Nägel versagte.



Bild 23 Versagen eines Prüfkörpers durch das Abscheren der Verbindungsmittel

5.4.2 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse / Simulationen / Gleichungen

Um die Verlässlichkeit der Simulationen und der daraus abgeleiteten Gleichungen zu überprüfen, wurden analog zu den Versuchen mit zentrischen Einzellasten die Versuchsergebnisse den Simulationen und den Ergebnissen aus den Gleichungen gegenübergestellt. In den **Bildern 24 – 26** sind die vertikalen Verformungen der Prüfkörper Q01 – Q23, die Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die mit den Bemessungsgleichungen aus Abschnitt 4.2 berechneten Verformungen bei einer Laststufe von 2,0 kN pro Lastkolben abgetragen. Die Streckenlast q zur Berechnung der Verformungen kann mit Gleichung 32 berechnet werden.

$$q = \frac{4 \cdot 2000 \text{ N}}{\ell} \quad [\text{N/mm}] \quad (32)$$

Bei einer Last von 2,0 kN pro Lastkolben wirkten auf die Prüfkörper Streckenlasten von 1,67 N/mm bis 2,54 N/mm ein.

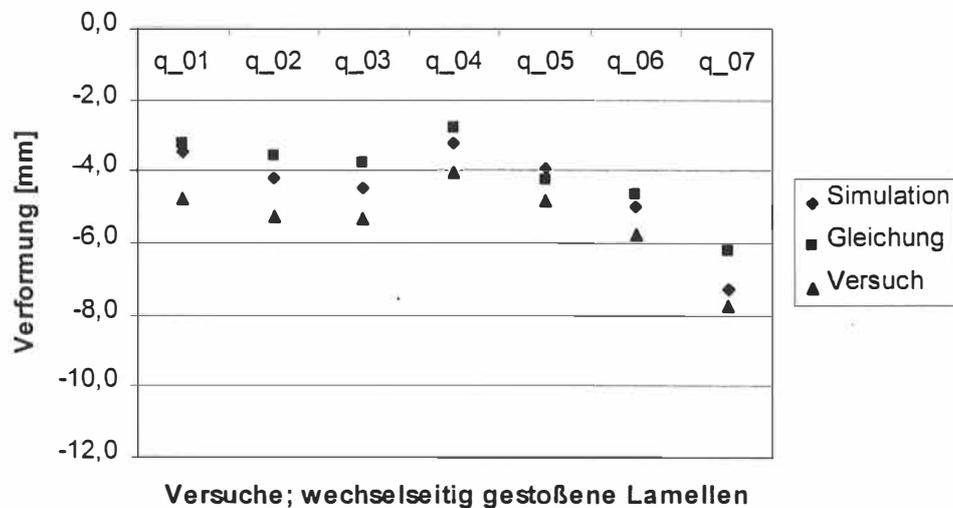


Bild 24 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; wechselseitig gestoßene Lamellen

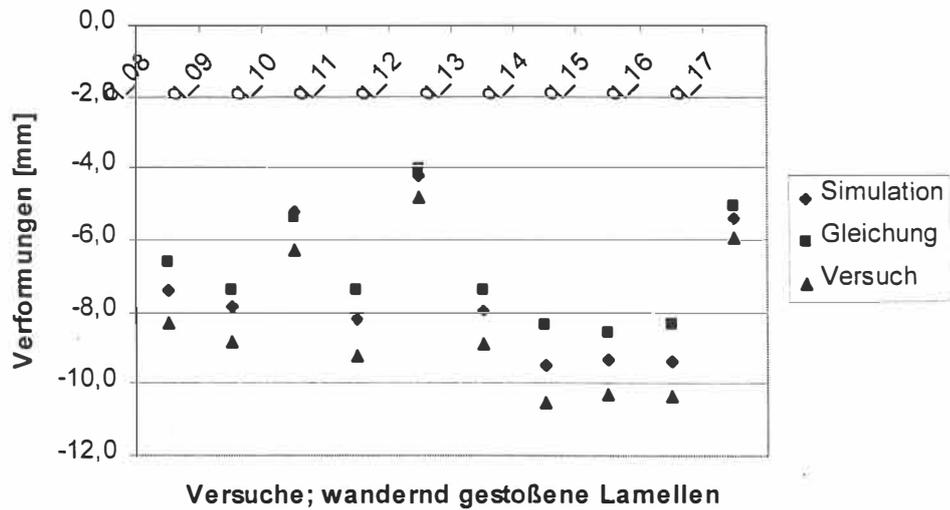


Bild 25 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; wandernd gestoßene Lamellen

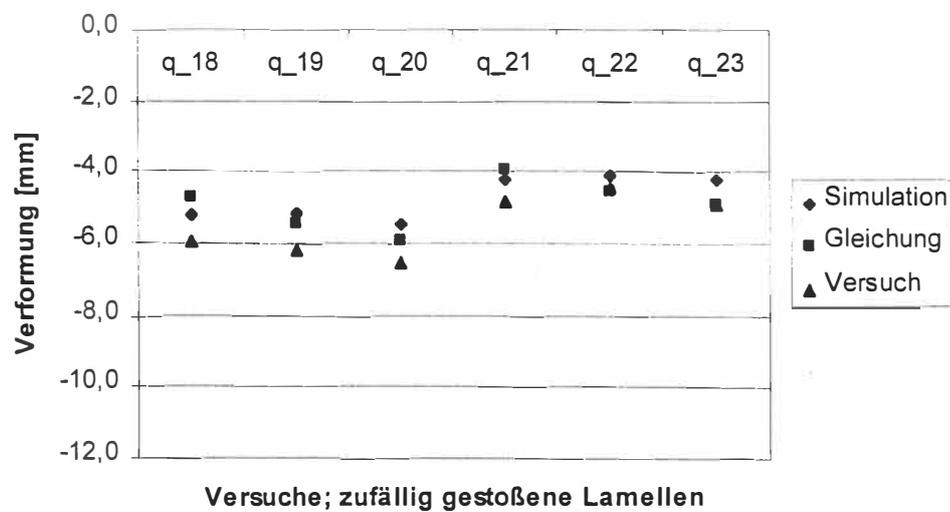


Bild 26 Verformungen Versuch / Simulation / Gleichung; zufällig gestoßene Lamellen

In Anlage B findet sich die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Simulationsergebnissen.

6 Zusammenfassung

Brettstapelelemente bestehen aus hochkant nebeneinander gestellten, fortlaufend miteinander verbundenen Massivholzbrettern. Um nicht an die Länge der Bretter gebunden zu sein, können die Lamellen im Brettstapelelement gestoßen werden. Hierdurch können beliebig große, flächige Bauteile hergestellt werden. Ziel des Forschungsvorhabens war es, Bemessungsgleichungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu bestimmen.

Im ersten Schritt des Forschungsvorhabens wurde der Einfluss unterschiedlicher Nageltypen (glattschaftige und Rillennägel) auf die wirksame Biegesteifigkeit kleiner Brettstapelelemente untersucht. Weiterhin wurde mittels Versuchen untersucht, ob bei kleinen Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen sich eine verstärkte Stoßnagelung auf die wirksame Biegesteifigkeit auswirkt. Beide Varianten zeigten im Vergleich zum jeweiligen Grundsystem keine signifikanten Unterschiede.

Die Bemessungsgleichungen wurden über die Simulation der Brettstapelelemente empirisch abgeleitet. Wenn die Werte und die Verteilungen der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Einzelbauteile bekannt sind, können die Brettstapelelemente wirklichkeitsnah simuliert werden. Dies bietet den Vorteil, dass eine sehr große Anzahl von Simulationsergebnissen ausgewertet werden kann, wodurch die empirischen Bemessungsgleichungen statistisch abgesichert sind. Bei den Simulationen wurden die Geometrie der Brettstapelelemente (b , h , ℓ), die Nagelabstände, die Nageldurchmesser, die Stoßanordnungen (ungestoßene, wechselseitig, wandernd, und zufällig gestoßene Lamellen) und die Belastung durch eine zentrische Einzellast und durch eine gleichförmige Flächenlast variiert. Die Einflussparameter, die sich signifikant auf die jeweils zu berechnende Größe auswirkten, wurden in die Bemessungsgleichungen aufgenommen. Die Bemessungsgleichungen wurden bestimmt für den Nachweis der Biegespannungen der Lamellen, die Beanspruchung der Verbindungsmittel auf Abscheren und die elastische Verformung des Brettstapelelementes.

Um die Ergebnisse der Simulationen und die daraus abgeleiteten Bemessungsgleichungen zu bestätigen, wurden 43 Prüfkörper entworfen und geprüft. Beim Entwurf der Prüfkörper wurden die o.g. Einflussparameter mitberücksichtigt. Alle Versuche wurden im Vorfeld simuliert, um die Traglasten und die Verformungen zu bestimmen. Die Versuchsergebnisse, die Simulationen und die Bemessungsgleichungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

7 Literatur

- [1] DIN V ENV 1991-1 (Eurocode 1): Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke; Ausgabe Dezember 1995
- [2] DIN EN 408: Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz; Ausgabe April 1996
- [3] United Nations; Economic Commission for Europe 1982: ECE recommended standard for stress grading of coniferous sawn timber. Timber Bull. for Europe, Vol XXXIV, Suppl. 16: 1 – 17, Genf, Schweiz
- [4] DIN 1151: Drahtstifte rund; Ausgabe April 1973
- [5] DIN 1143-1: Maschinenstifte rund, lose, Ausgabe August 1982
- [6] Görlacher, R.: Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen; 4. Folge – Heft 21, Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe; 1990
- [7] Colling, F.: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von festigkeitsrelevanten Einflußgrößen; 4. Folge – Heft 22, Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe; 1990
- [8] Glos, P.: Maschinelle Festigkeitssortierung von frisch eingeschnittenem Schnittholz; Bericht Nr. 95507, Institut für Holzforschung der Universität München; 1997
- [9] Glos, P.: Klassifizierung von Brettlamellen für den Holzleimbau; Bericht Nr. 91509, Institut für Holzforschung der Universität München; 1993
- [10] Brettstapelbauweise; Informationsschrift der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau Darmstadt

- [11] Brettstapelbauweise; holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 17, Folge 1, Informationsdienst Holz
- [12] Brettstapelbau-Bausystem, Handbuch, hiwo Holzindustrie Waldburg zu Wolfegg GmbH & Co. KG; November 1997
- [13] Haberer, M.: Die Querverteilung von Lasten an Brettstapelelementen; Vertieferarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe; Juni 2000, unveröffentlicht
- [14] Freund / Litell: SAS System for Regression; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 1991
- [15] Denzler, J.: Wirklichkeitsnahe Darstellung und Simulation statisch unbestimmter Flächentragwerke im direkten Vergleich zu Laborergebnissen; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe; Februar 2001
- [16] Möhler, K. / Herröder, W.: Obere und untere Reibbeiwerte von sägerauhem Fichtenholz; aus Holz als Roh- und Werkstoff- 37/1979, Springer-Verlag
- [17] DIN 4074: Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit; September 1989
- [18] Görlacher, R.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls; Sonderdruck aus bauen mit holz, Heft 8/91, Bruderverlag Karlsruhe, 1991

[The text in this section is extremely faint and illegible. It appears to be a list of items or a table with multiple columns and rows. The content is not discernible.]

the 1990s, the number of people in the world who are under 15 years of age is expected to increase from 1.1 billion to 1.5 billion.

As a result of the demographic changes, the number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

The number of people in the world who are 65 years of age and older is expected to increase from 200 million in 1990 to 500 million in 2025.

Inhaltsverzeichnis – Anlage

Anlage A

Prüfkörperzusammenstellung Flächenlasten.....	A-1 / A-12
Prüfkörperzusammenstellung Einzellasten.....	A-13 / A-25

Anlage B

Tabelle B-1 Versuche unter Flächenlasten und Bruchlasten.....	B-1
Tabelle B-2 Versuche unter Einzellasten und Bruchlasten.....	B-2
Last- Verformungskurven und Biegelinien - Flächenlasten.....	B-3 / B26
Last- Verformungskurven und Biegelinien Längs- und Querrichtung - Einzellasten.....	B-27 / B-58

Anlage C

Tabelle C-1 Simulationsplan; ungestoßene Lamellen; zentrische Einzellast (z E)....	C-1
Tabelle C-2 Simulationsplan; wechselseitig gestoßene Lamellen; z E.....	C-2
Tabelle C-3 Simulationsplan; wandernd gestoßene Lamellen; z E.....	C-3
Tabelle C-4 Simulationsplan; zufällig gestoßene Lamellen; z E.....	C-4
Tabelle C-5 Simulationsplan; wechselseitig gestoßene Lamellen gleichförmige Flächenlast (g F).....	C-5
Tabelle C-6 Simulationsplan; wandernd gestoßene Lamellen; g F.....	C-6
Tabelle C-7 Simulationsplan; zufällig gestoßene Lamellen; g F.....	C-7

Anlage D

Materialeigenschaften.....	D-1 / D-4
----------------------------	-----------

Anlage E

Photos.....	E-1 / E-4
-------------	-----------

Q01 W107_3.15/165_Q_3.1-7.5

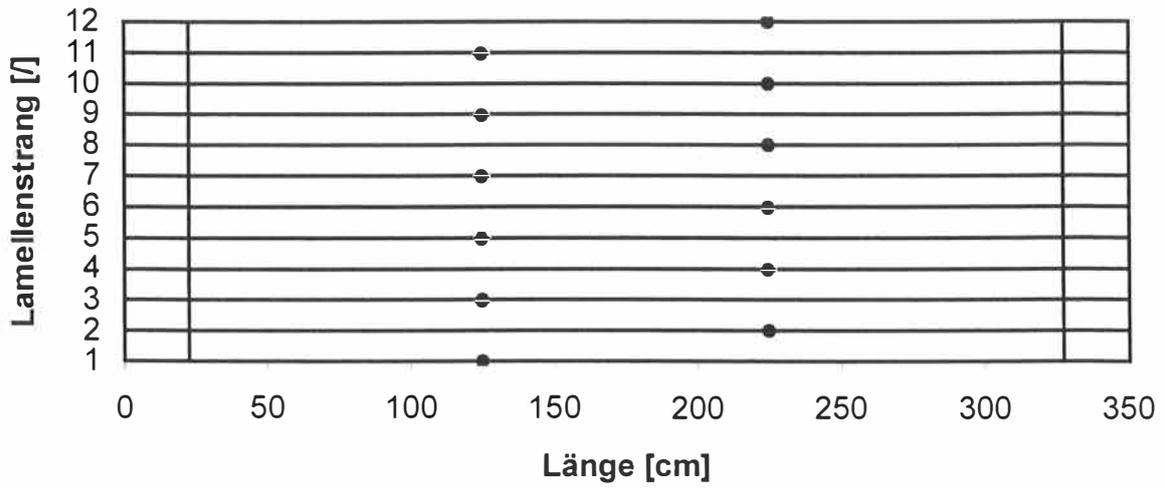


Bild A-1 Prüfkörper Q01, Draufsicht

Q02 W107_3.15/165_Q_3.1-15

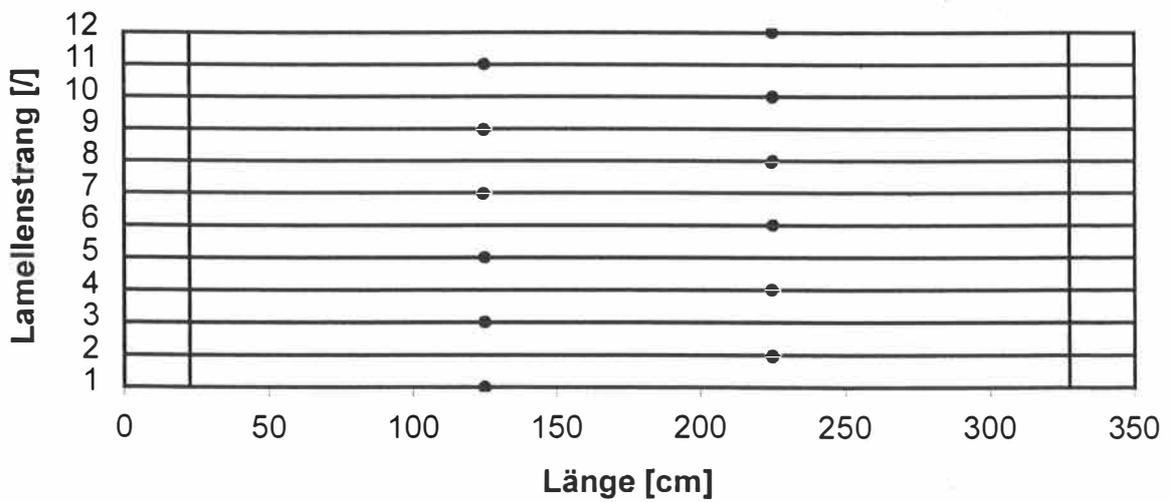


Bild A-2 Prüfkörper Q02, Draufsicht

Q03 W107_3.15/165_Q_3.4-22.5

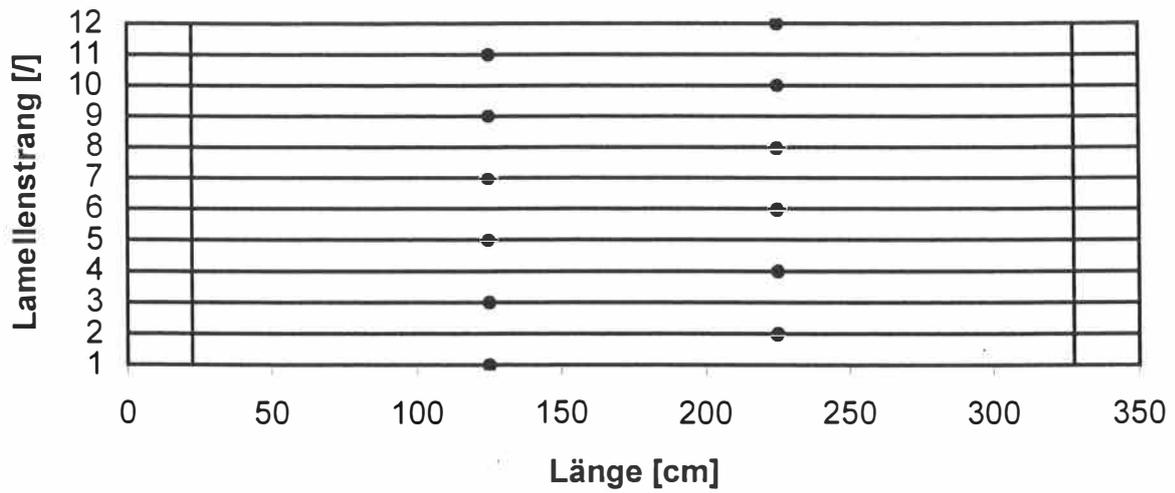


Bild A-3 Prüfkörper Q03, Draufsicht

Q04 W107_3.15/180_Q_3.1-15

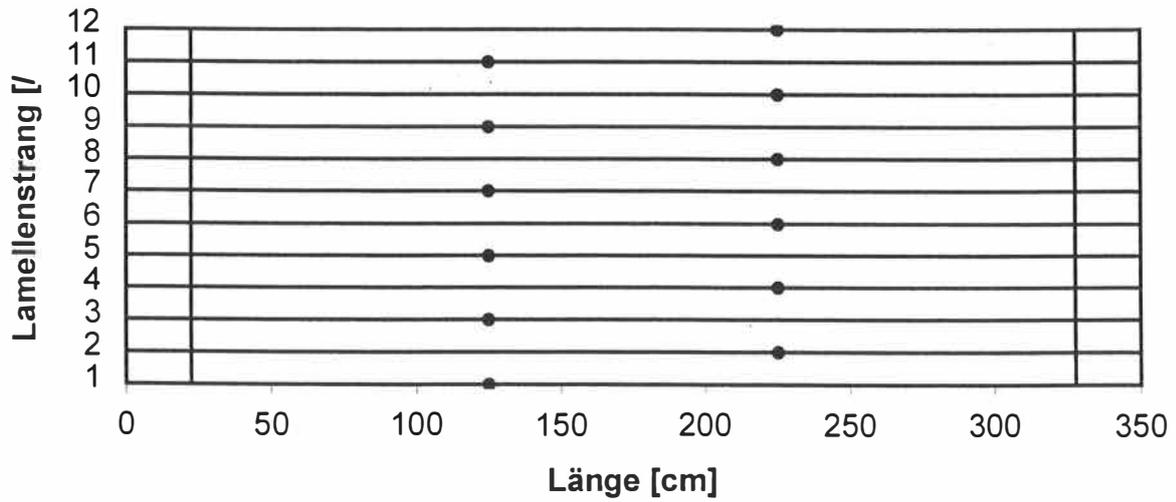


Bild A-4 Prüfkörper Q04, Draufsicht

Q05 W90_3.60/165_Q_3.4-7.5

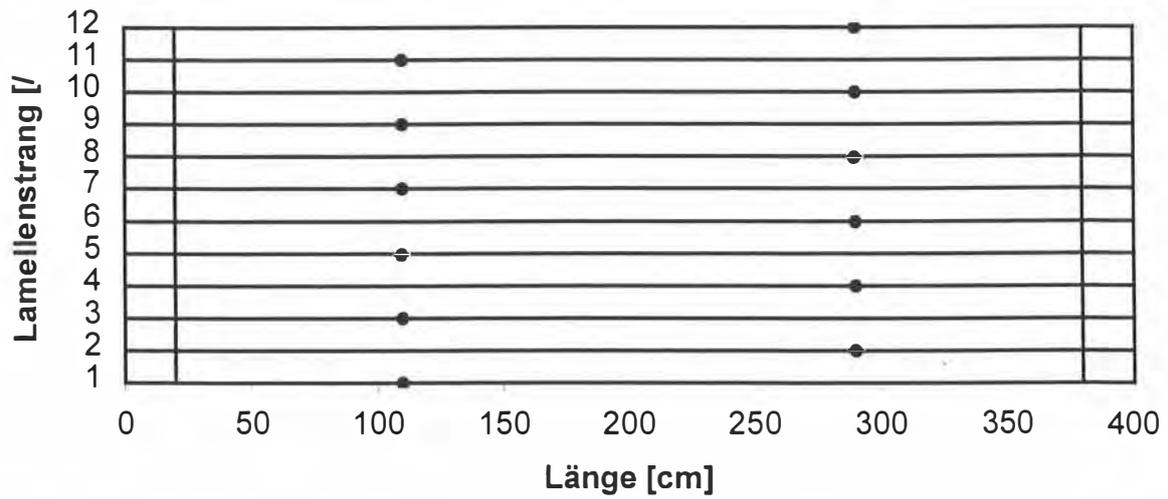


Bild A-5 Prüfkörper Q05, Draufsicht

Q06 W90_3.60/165_Q_3.4-15

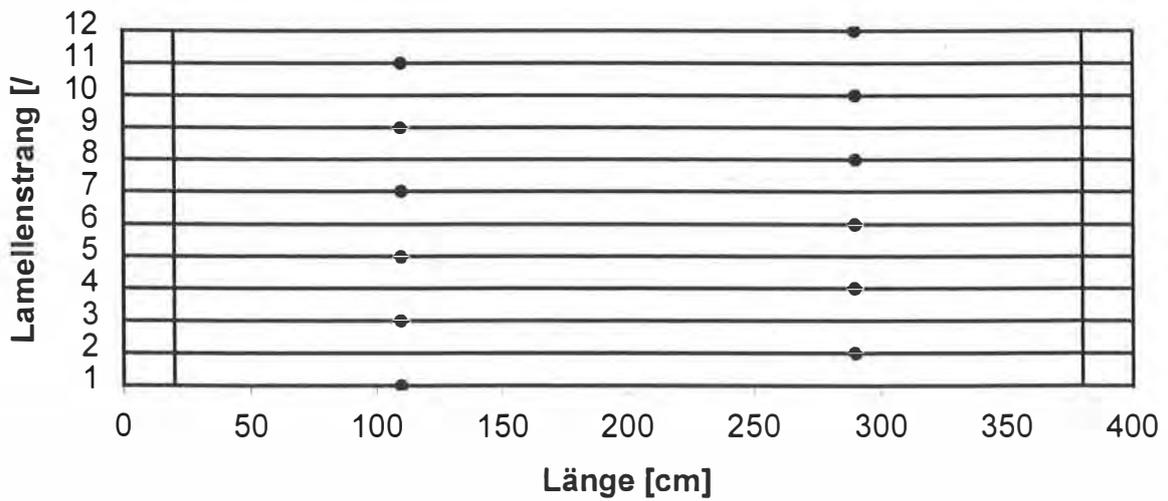


Bild A-6 Prüfkörper Q6, Draufsicht

Q07 W80_4.05/165_Q_3.4-22.5

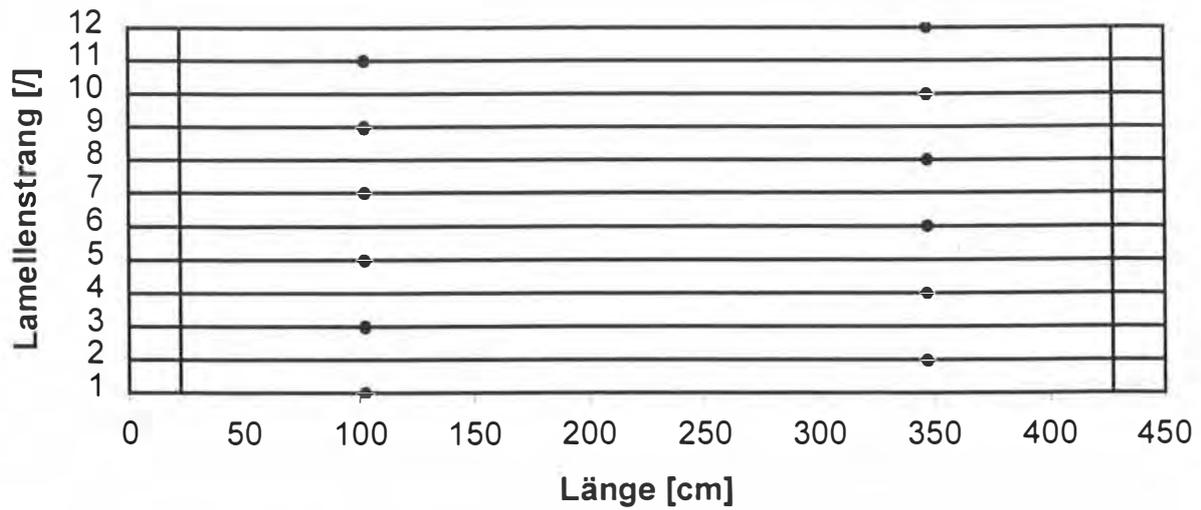


Bild A-7 Prüfkörper Q07, Draufsicht

Q08 T60_4.20/165_Q_3.1-7.5

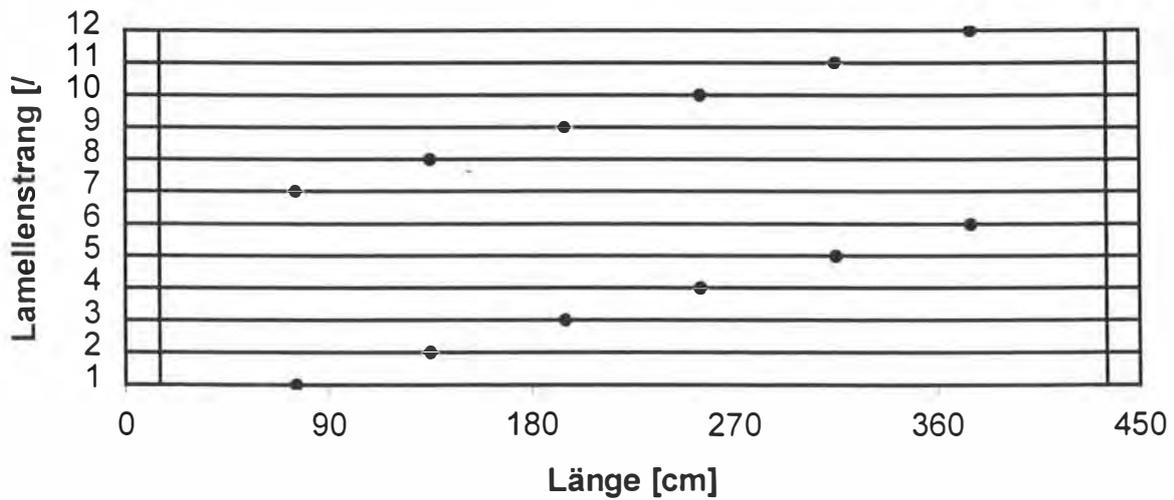


Bild A-8 Prüfkörper Q08, Draufsicht

Q09 T60_4.20/165_Q_3.1-15

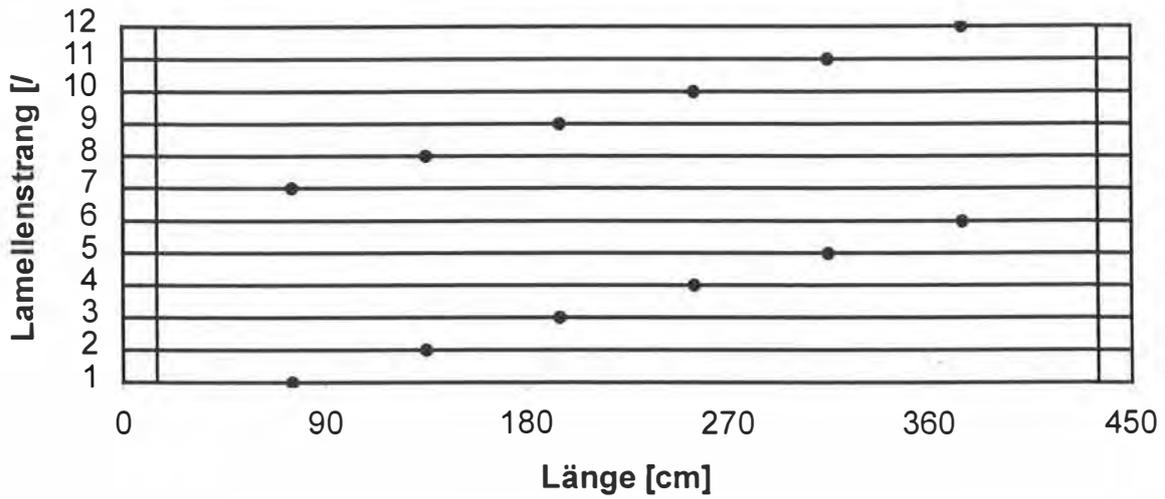


Bild A-9 Prüfkörper Q09, Draufsicht

Q10 T60_3.60/165_Q_3.1-22.5

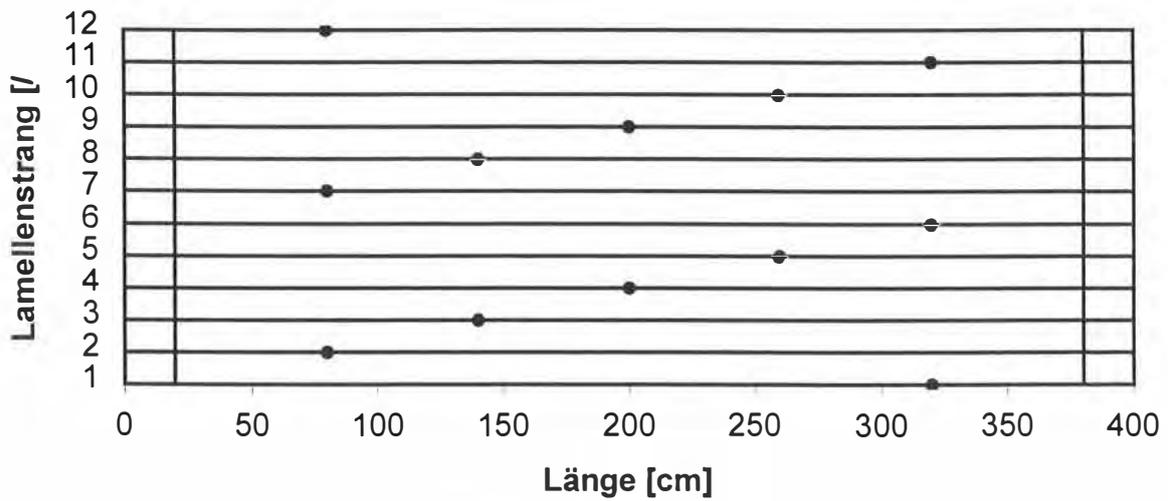


Bild A-10 Prüfkörper Q10, Draufsicht

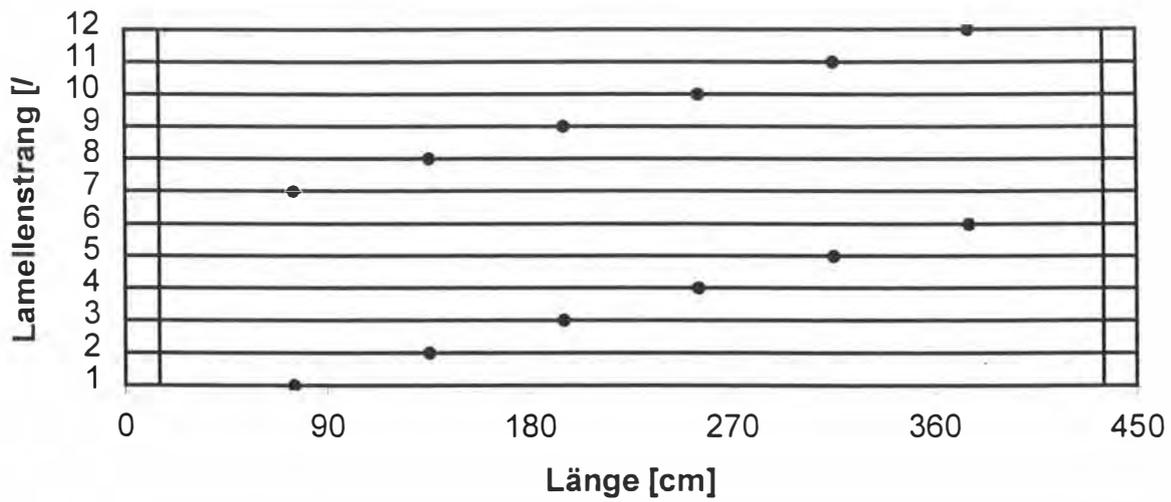
Q11 T60_4.20/165_Q_3.4-15

Bild A-11 Prüfkörper Q11, Draufsicht

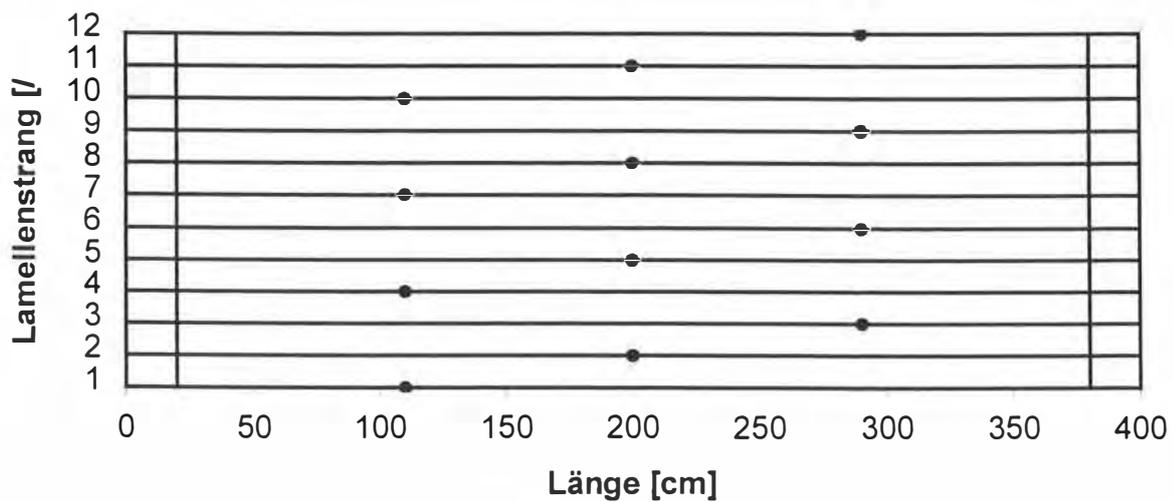
Q12 T90_3.60/180_Q_3.1-15

Bild A-12 Prüfkörper Q12, Draufsicht

Q13 T120_4.80/180_Q_3.1-7.5

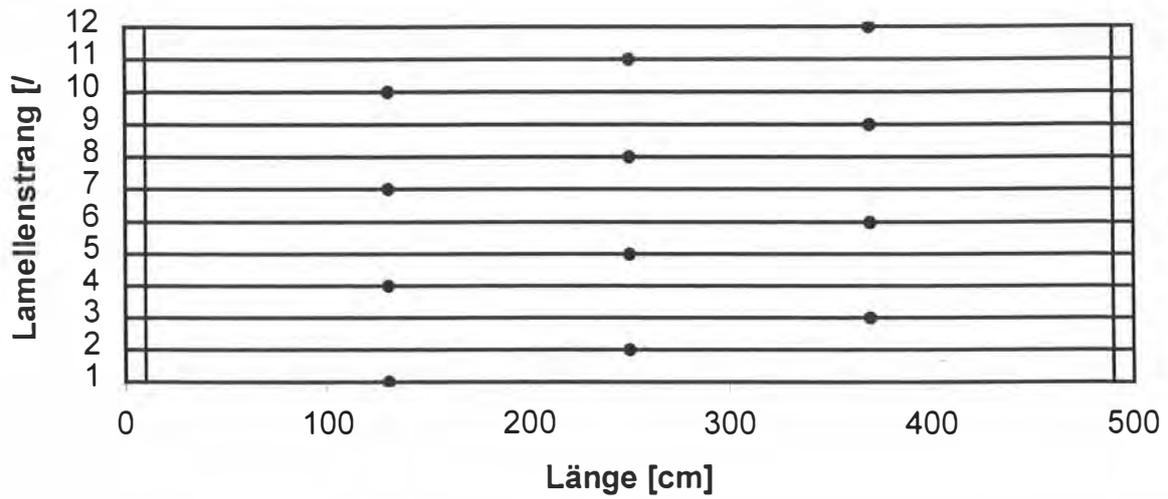


Bild A-13 Prüfkörper Q13, Draufsicht

Q14 T120_4.80/180_Q_3.1-15

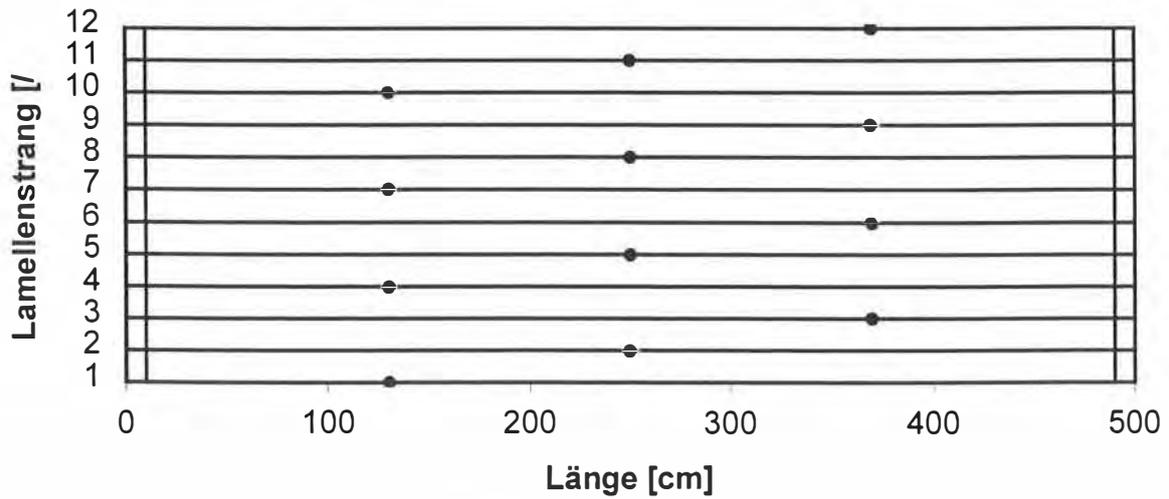


Bild A-14 Prüfkörper Q14, Draufsicht

Q15 T118_4.725/180_Q_3.1-22.5

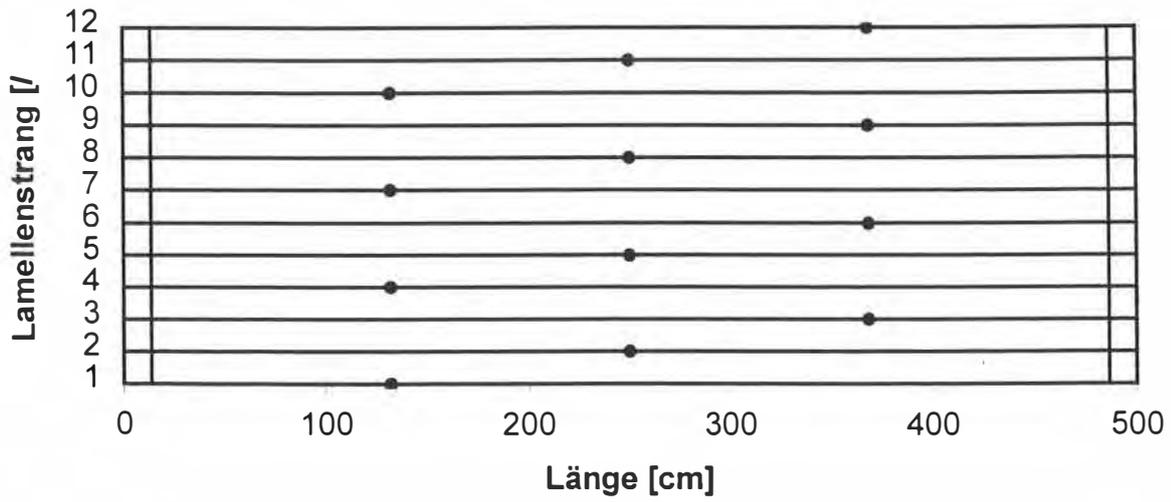


Bild A-15 Prüfkörper Q15, Draufsicht

Q16 T120_4.80/180_Q_3.4-15

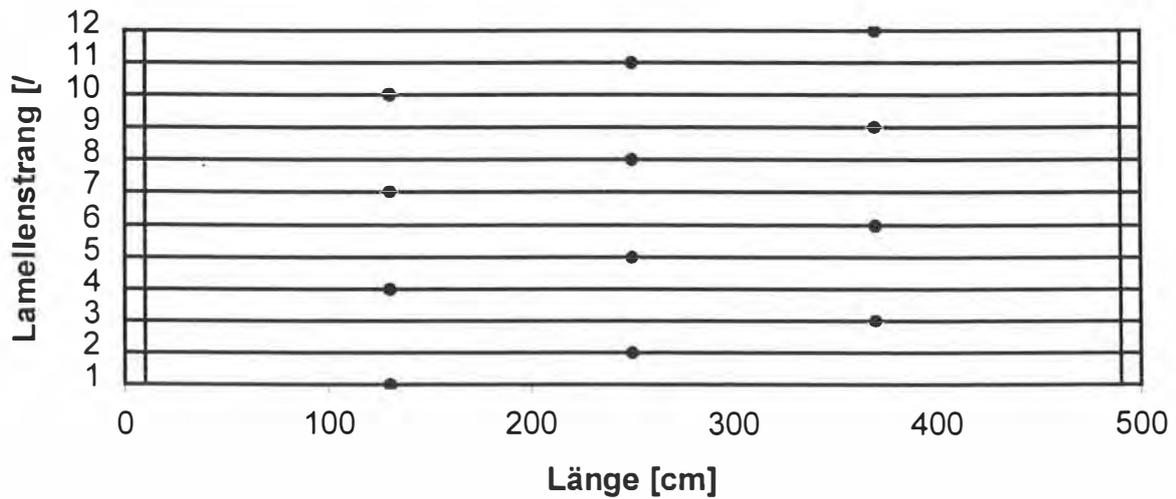


Bild A-16 Prüfkörper Q16, Draufsicht

Q17 T90_3.60/165_Q_3.1-15

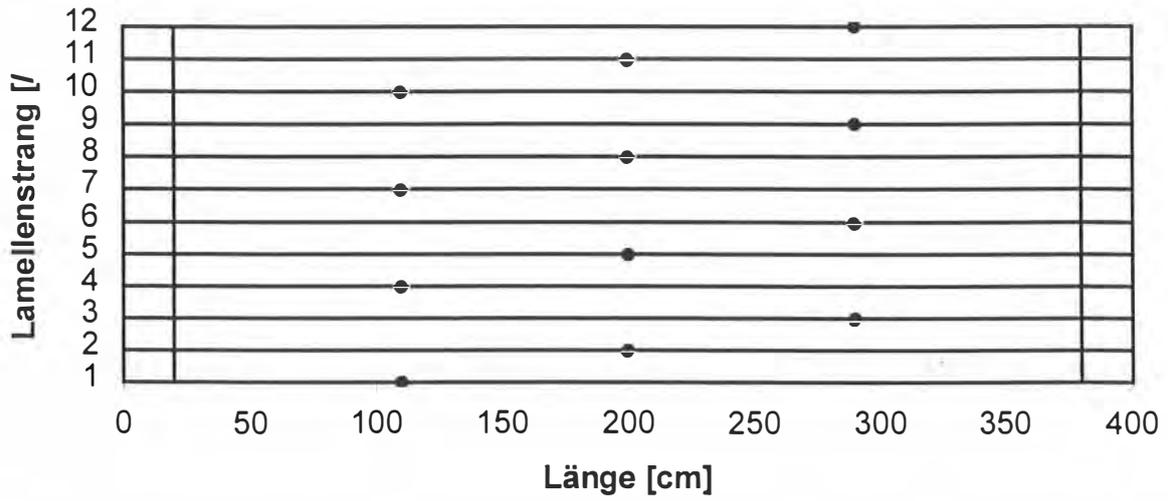


Bild A-17 Prüfkörper Q17, Draufsicht

Q18 Z_3.60/165_Q_3.1-7.5

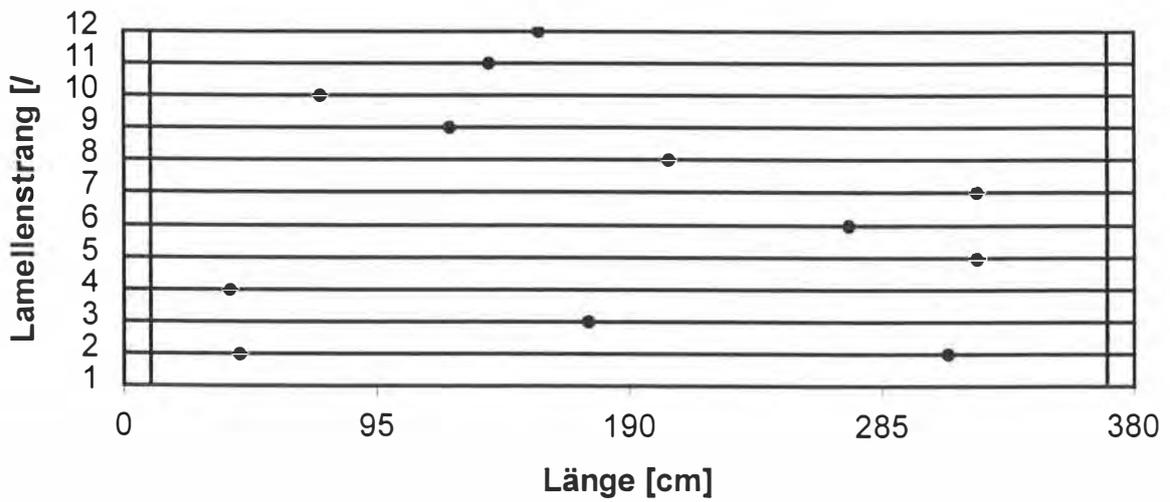


Bild A-18 Prüfkörper Q18, Draufsicht

Q19 Z_3.60/165_Q_3.1-15

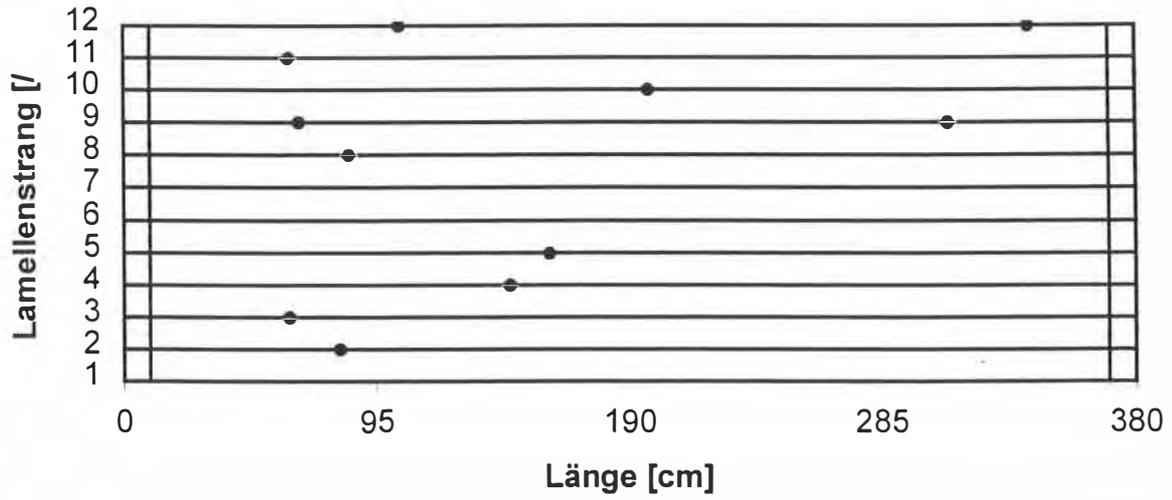


Bild A-19 Prüfkörper Q19, Draufsicht

Q20 Z_3.60/165_Q_3.1-22.5

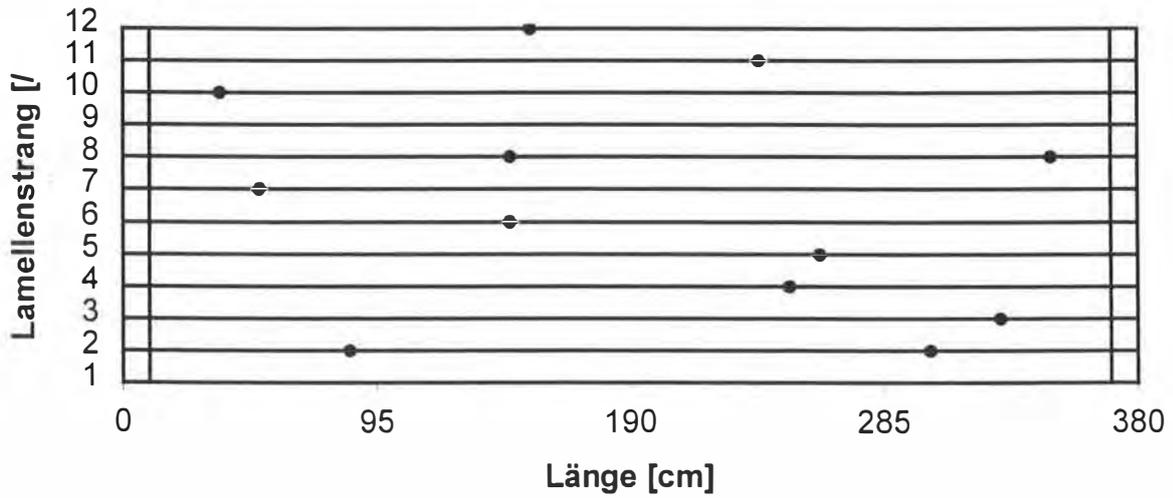


Bild A-20 Prüfkörper Q20, Draufsicht

Q21 Z_3.60/180_Q_3.4-7.5

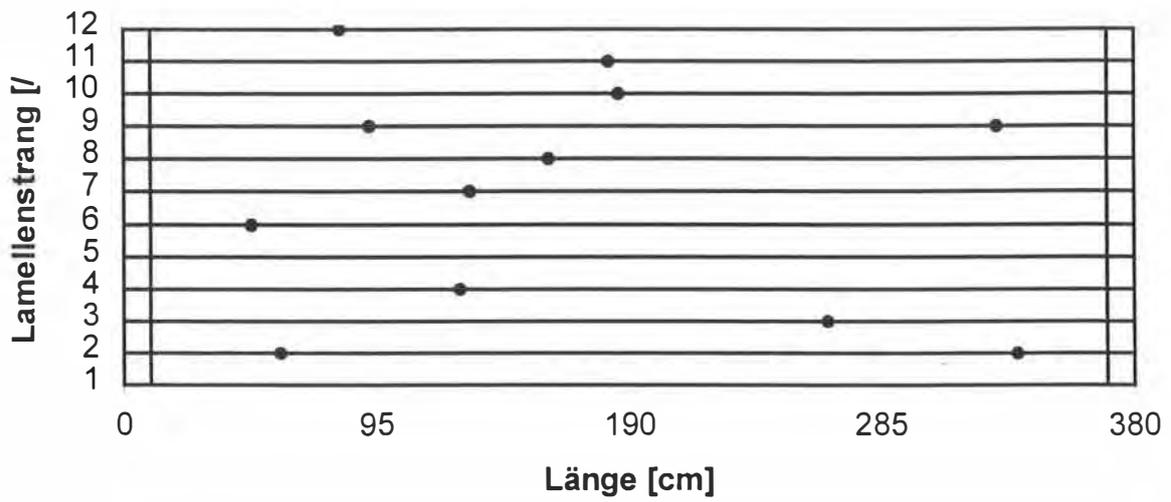


Bild A-21 Prüfkörper Q21, Draufsicht

Q22 Z_3.60/180_Q_3.4-15

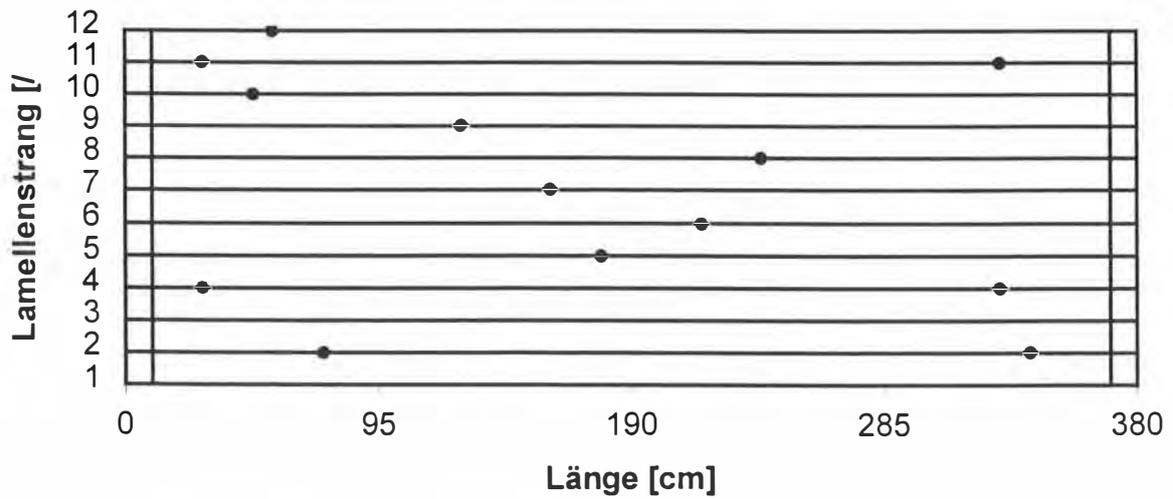


Bild A-22 Prüfkörper Q22, Draufsicht

Q23 Z_3.60/180_Q_3.4-22.5

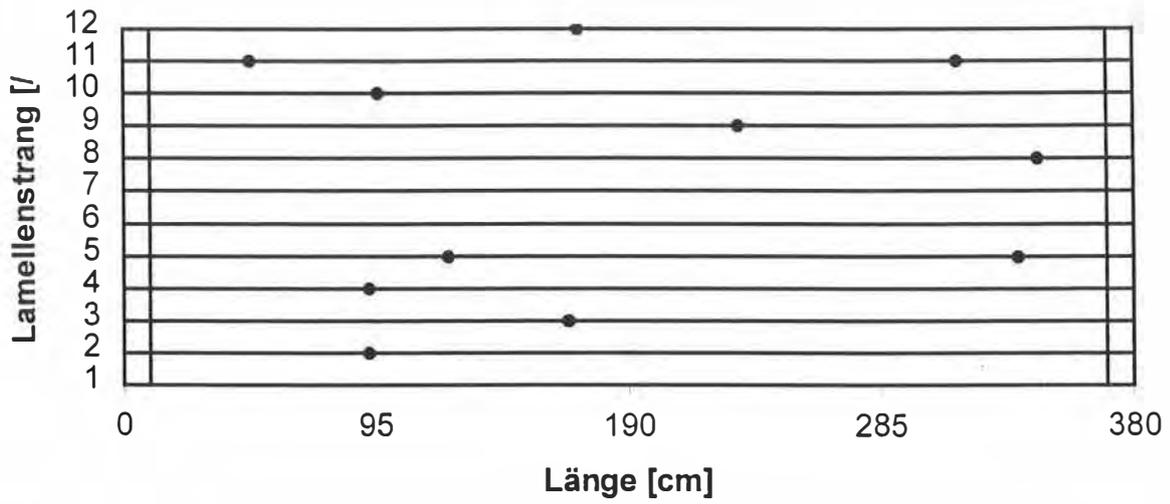


Bild A-23 Prüfkörper Q23, Draufsicht

Q24 U_4.05/180_Q_3.1-22.5

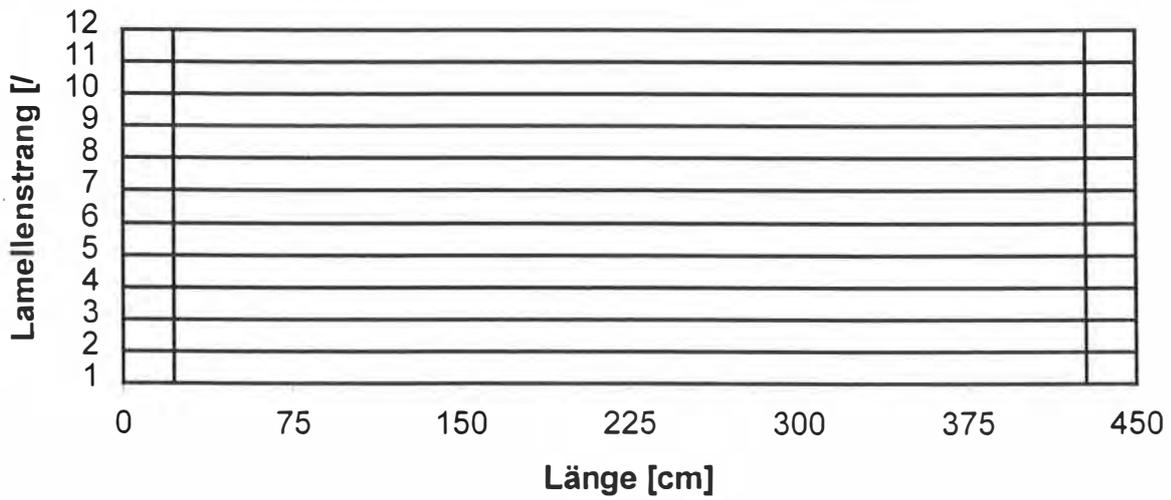


Bild A-24 Prüfkörper Q24, Draufsicht

F01 W105_3.15/180_F_3.1-7.5

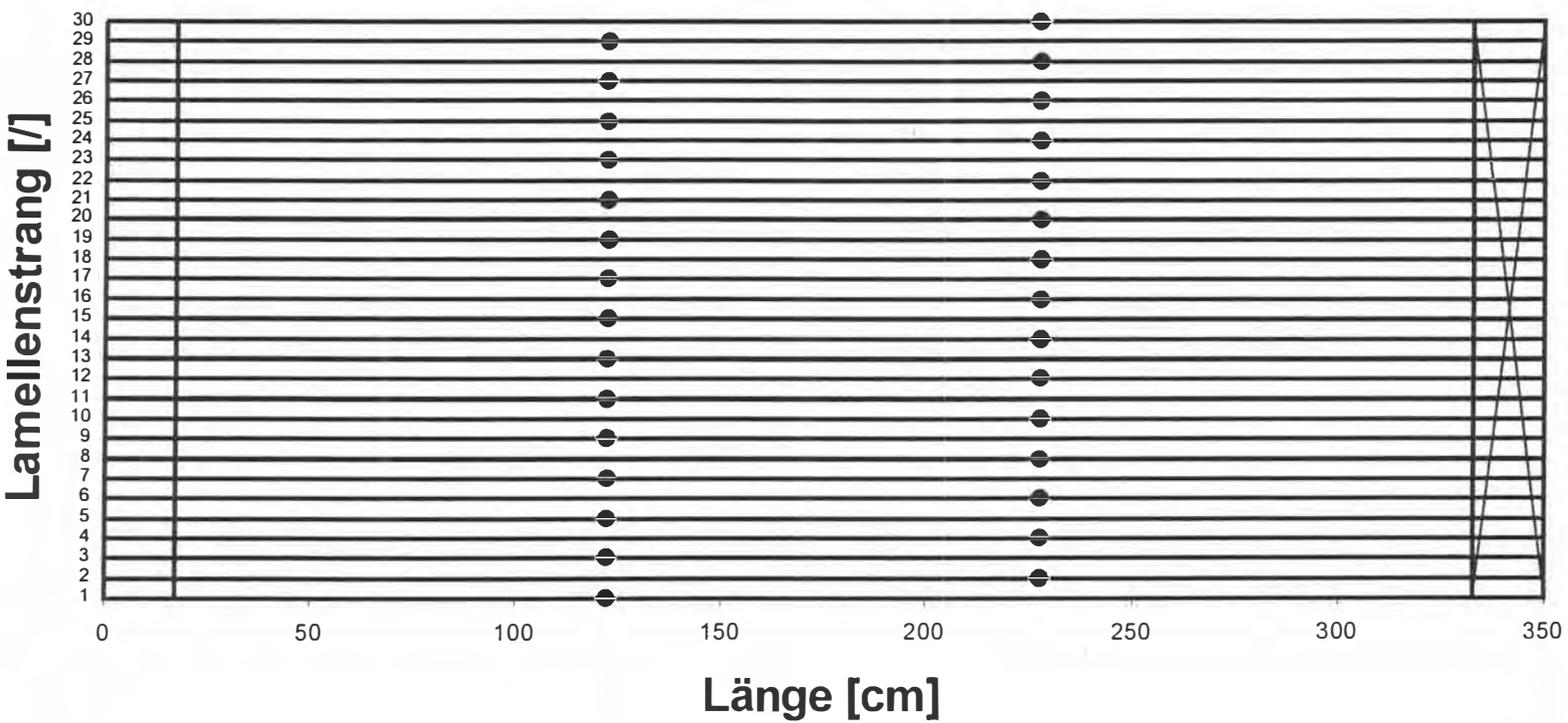


Bild A-25

Prüfkörper F01, Draufsicht

F02 W105_3.15/180_F_3.1-15

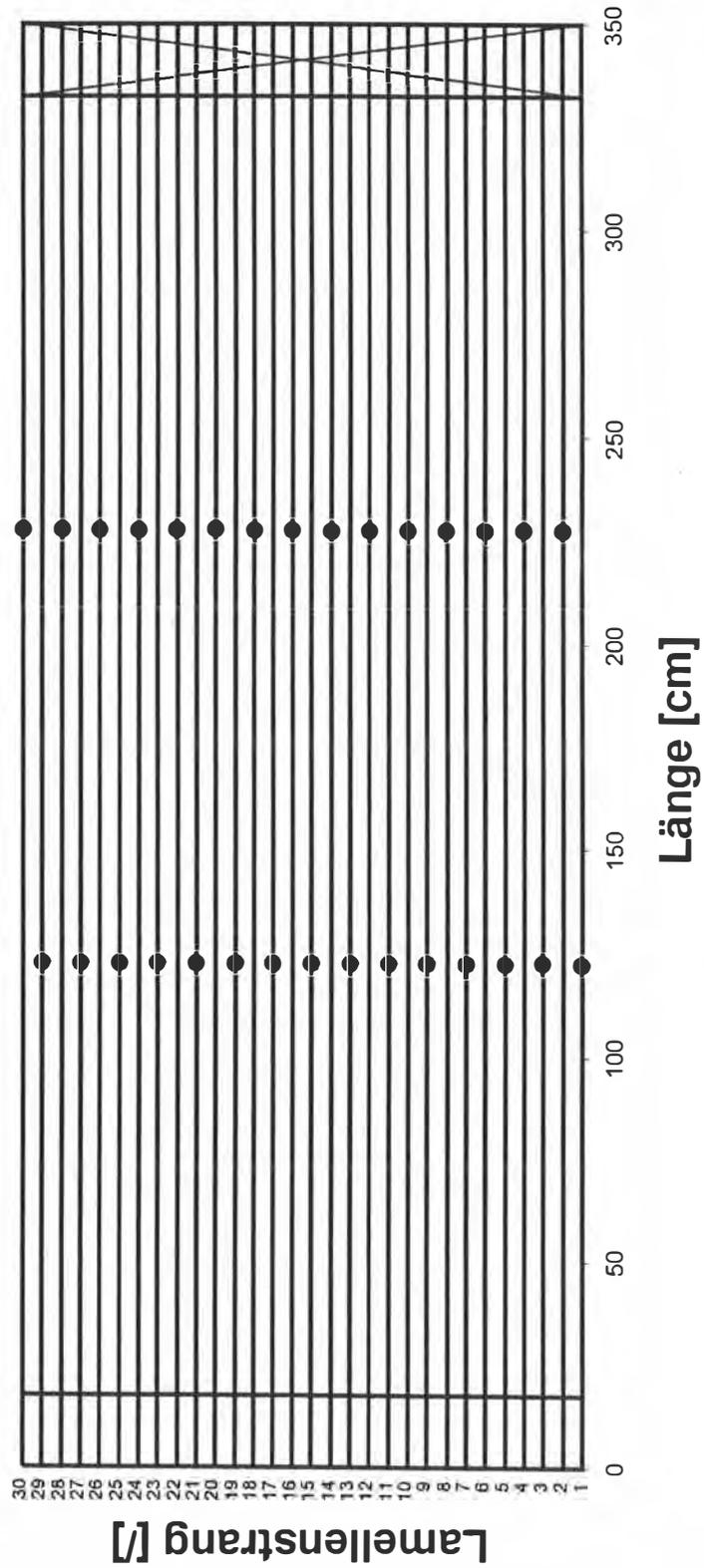


Bild A-26

Prüfkörper F02, Draufsicht

F03 W105_3.15/180_F_3.1-22.5

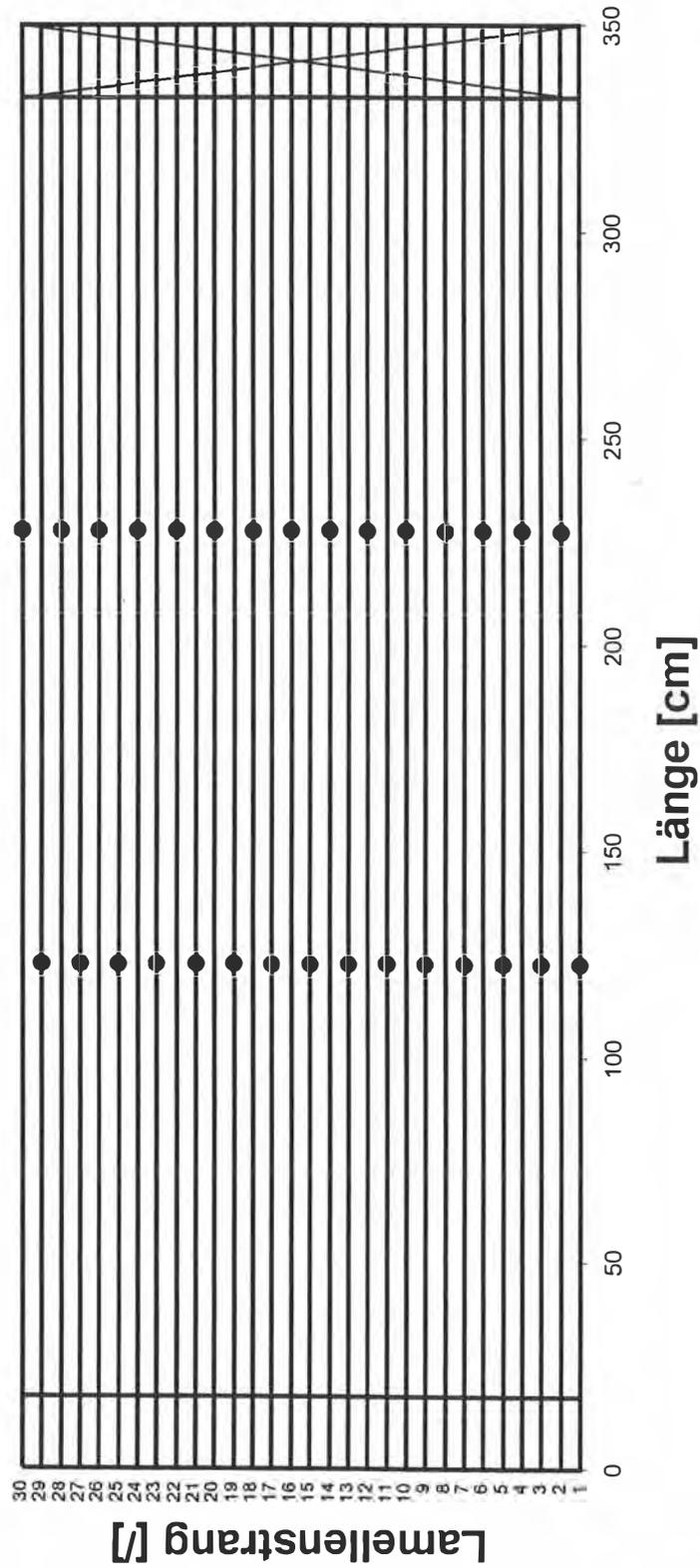


Bild A-27

Prüfkörper F03, Draufsicht

F04 W80_4.05/165_F_3.4-15

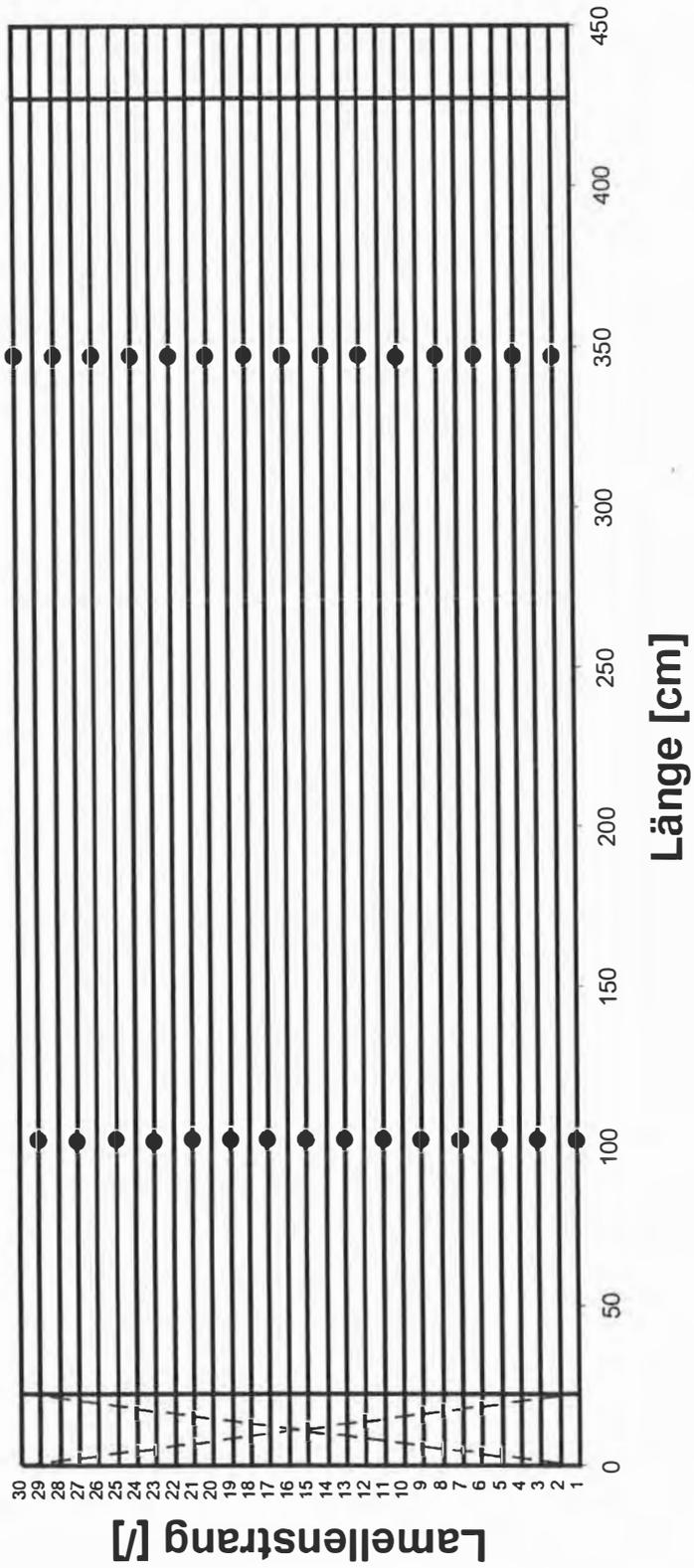


Bild A-28

Prüfkörper F04, Draufsicht

F05 W100_4.05/165_F_3.1-15

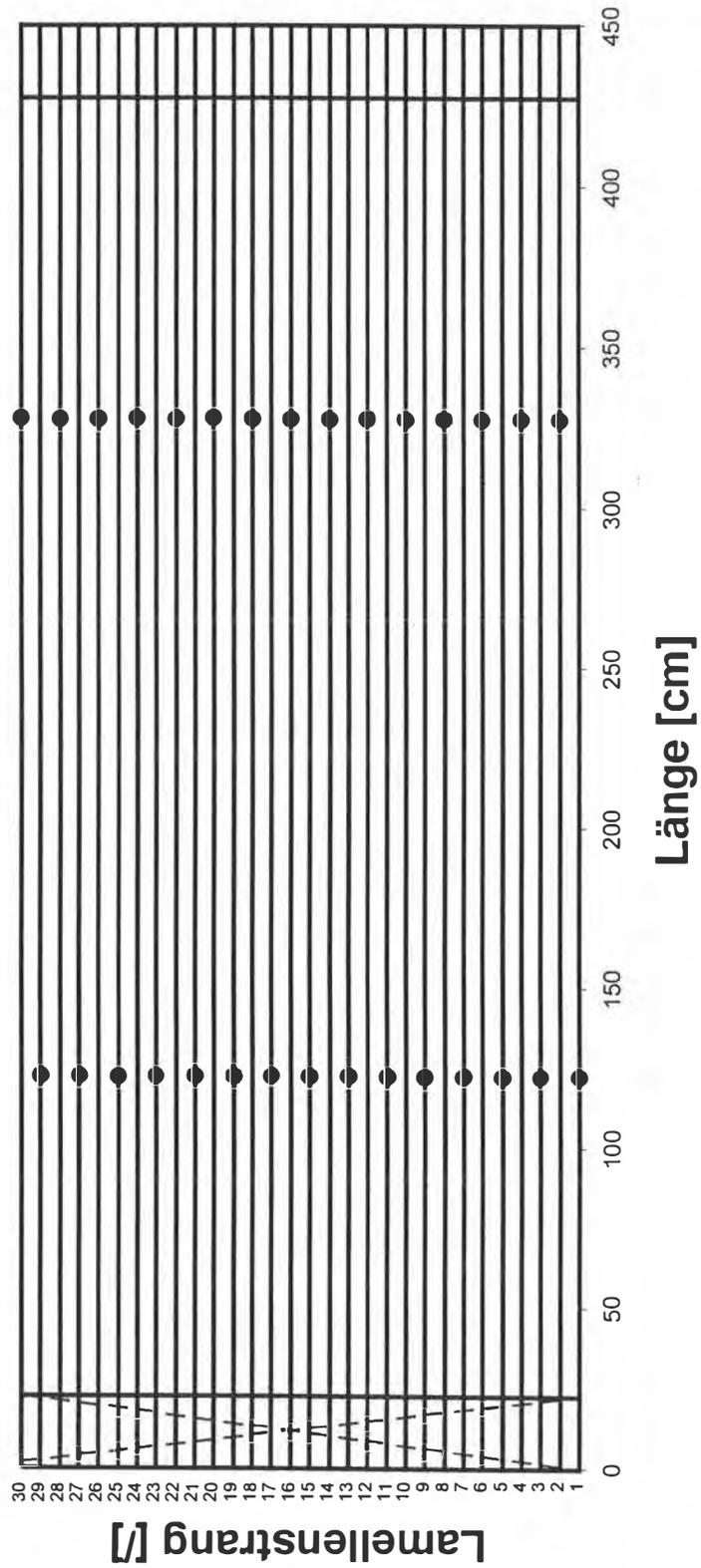


Bild A-29

Prüfkörper F05, Draufsicht

F06 T60_3.60/180_F_3.1-7.5

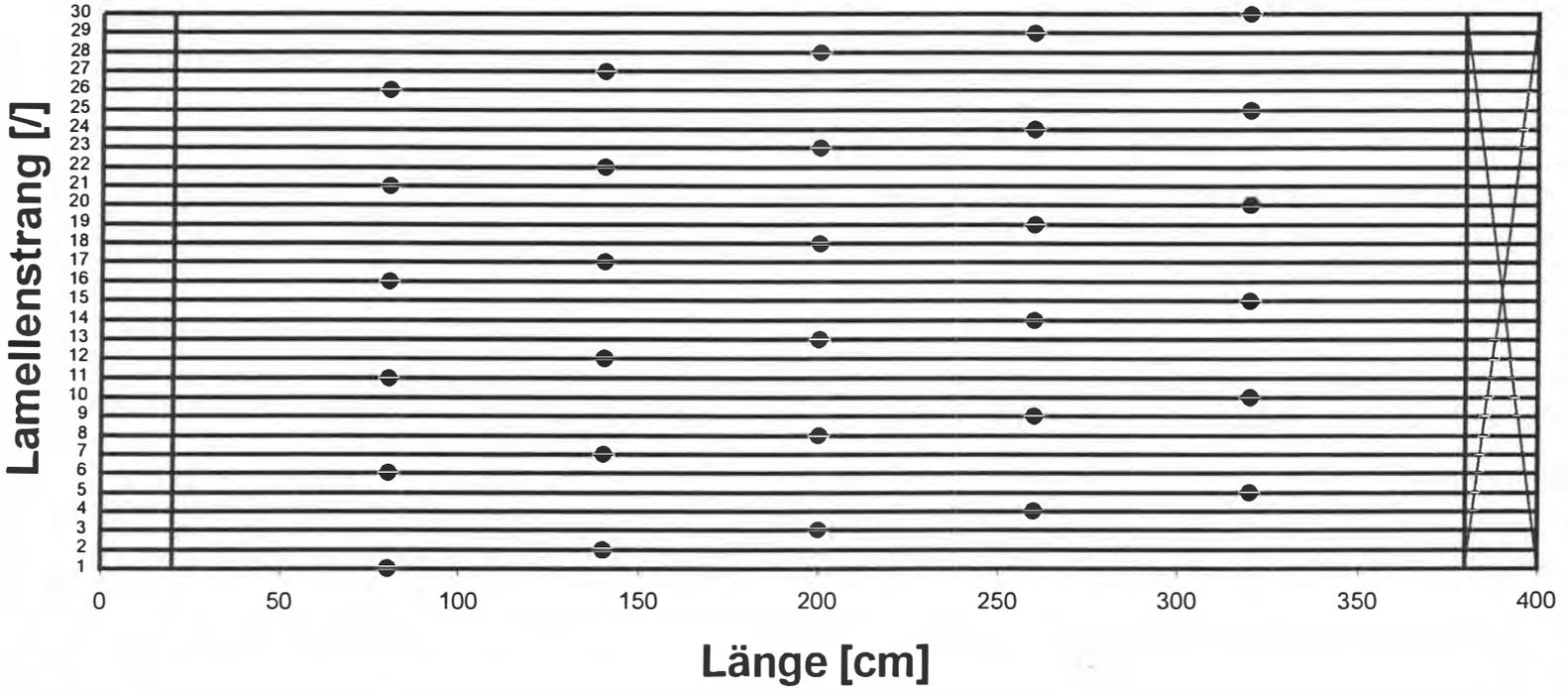


Bild A-30

Prüfkörper F06, Draufsicht

F07 T60_3.60/180_F_3.1-15

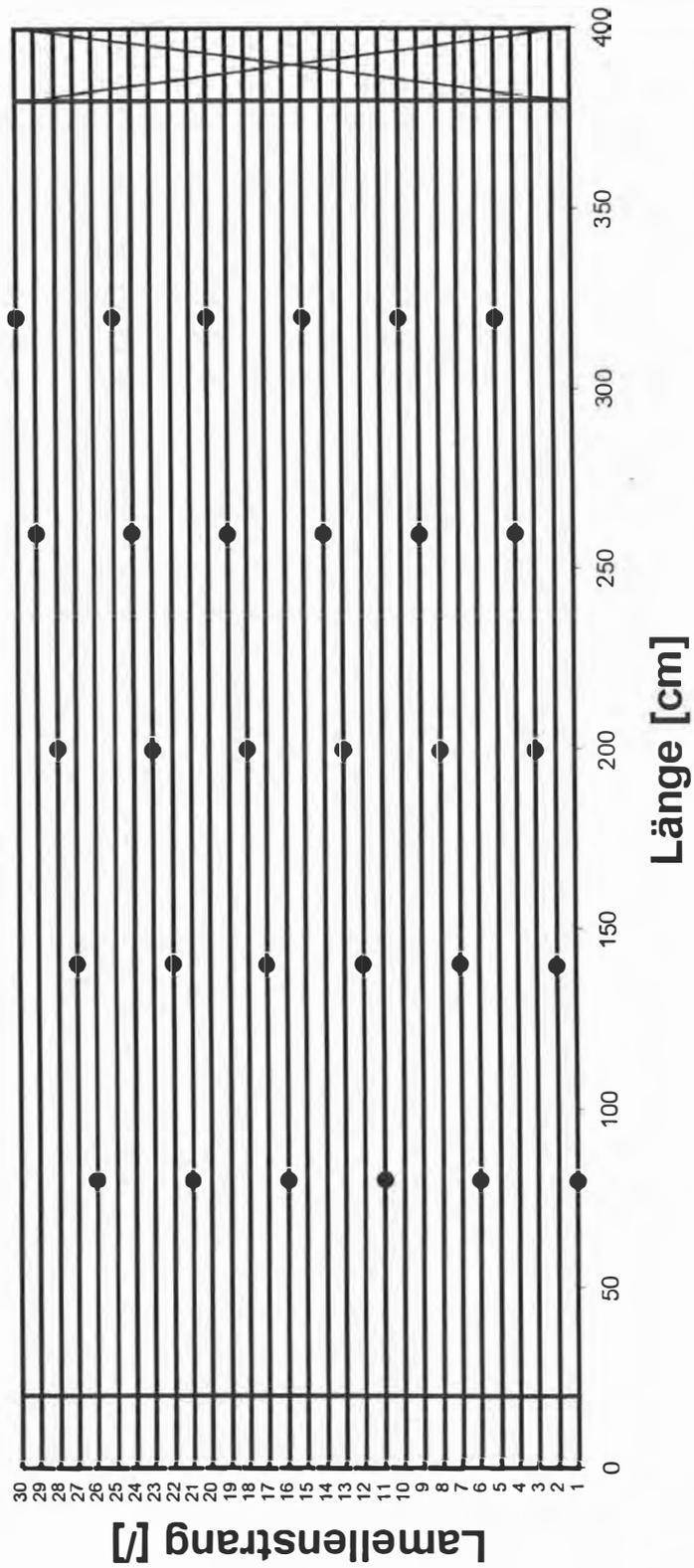


Bild A-31

Prüfkörper F07, Draufsicht

F08 T60_3.60/180_F_3.1-22.5

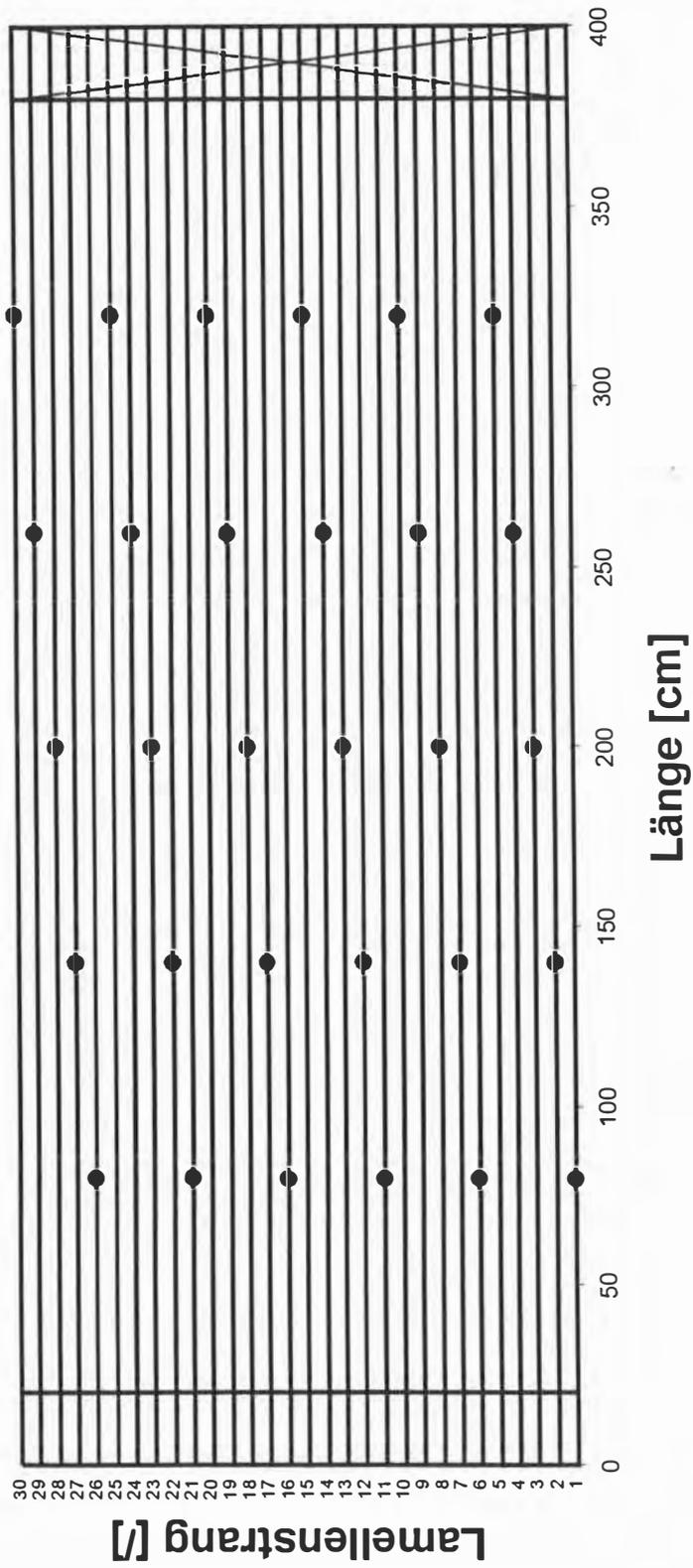


Bild A-32

Prüfkörper F08, Draufsicht

F09 T105_4.20/165_F_3.1-15

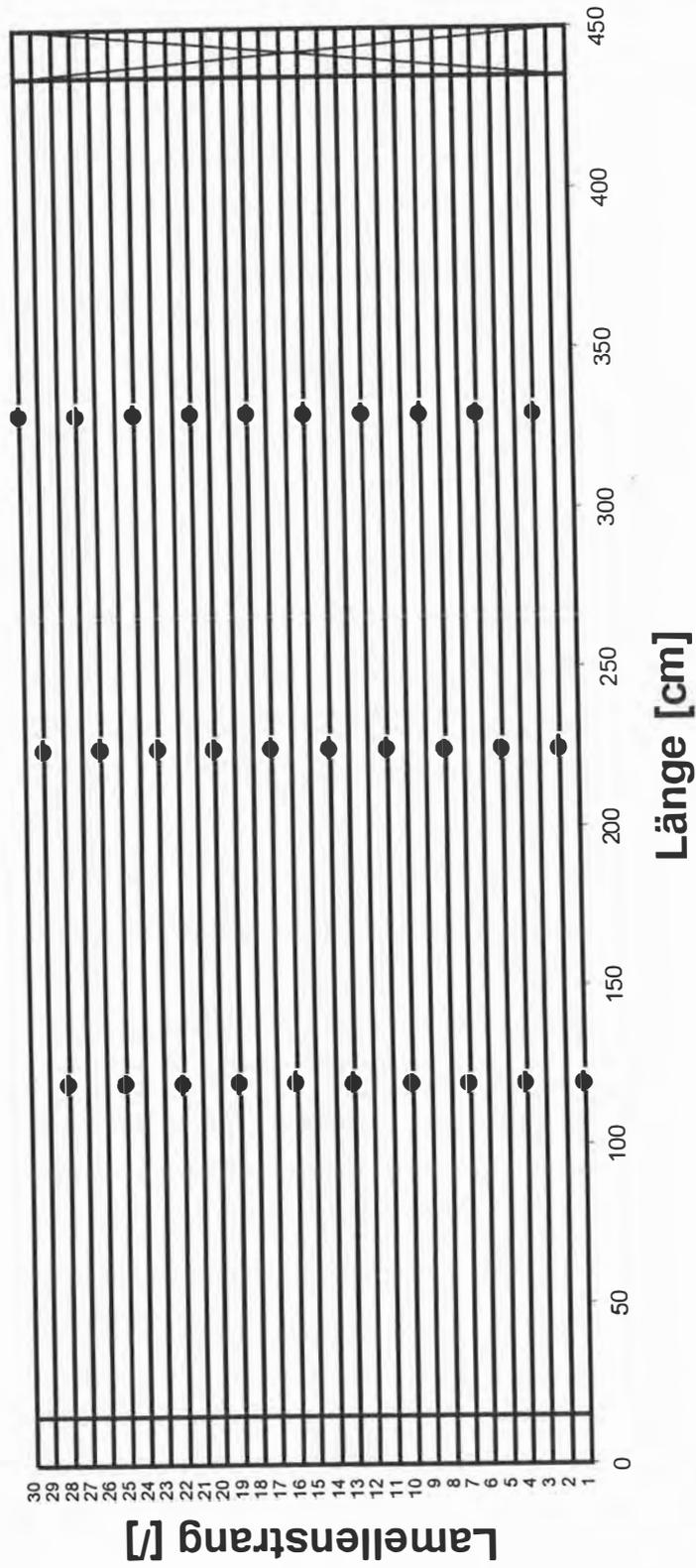


Bild A-33 Prüfkörper F09, Draufsicht

F10 T75_4.50/180_F_3.4-15

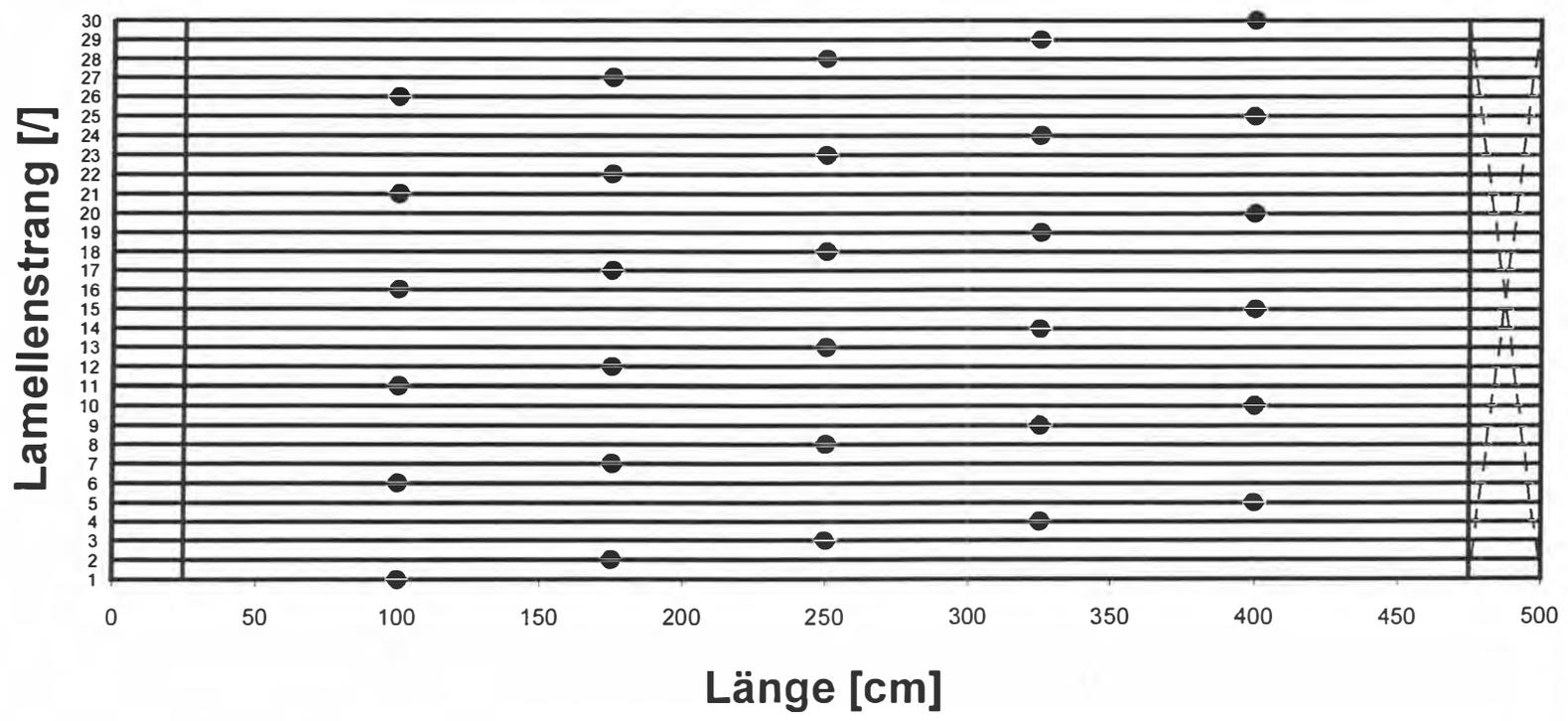


Bild A-34

Prüfkörper F10, Draufsicht

F11 Z_3.60/180_F_3.1-15

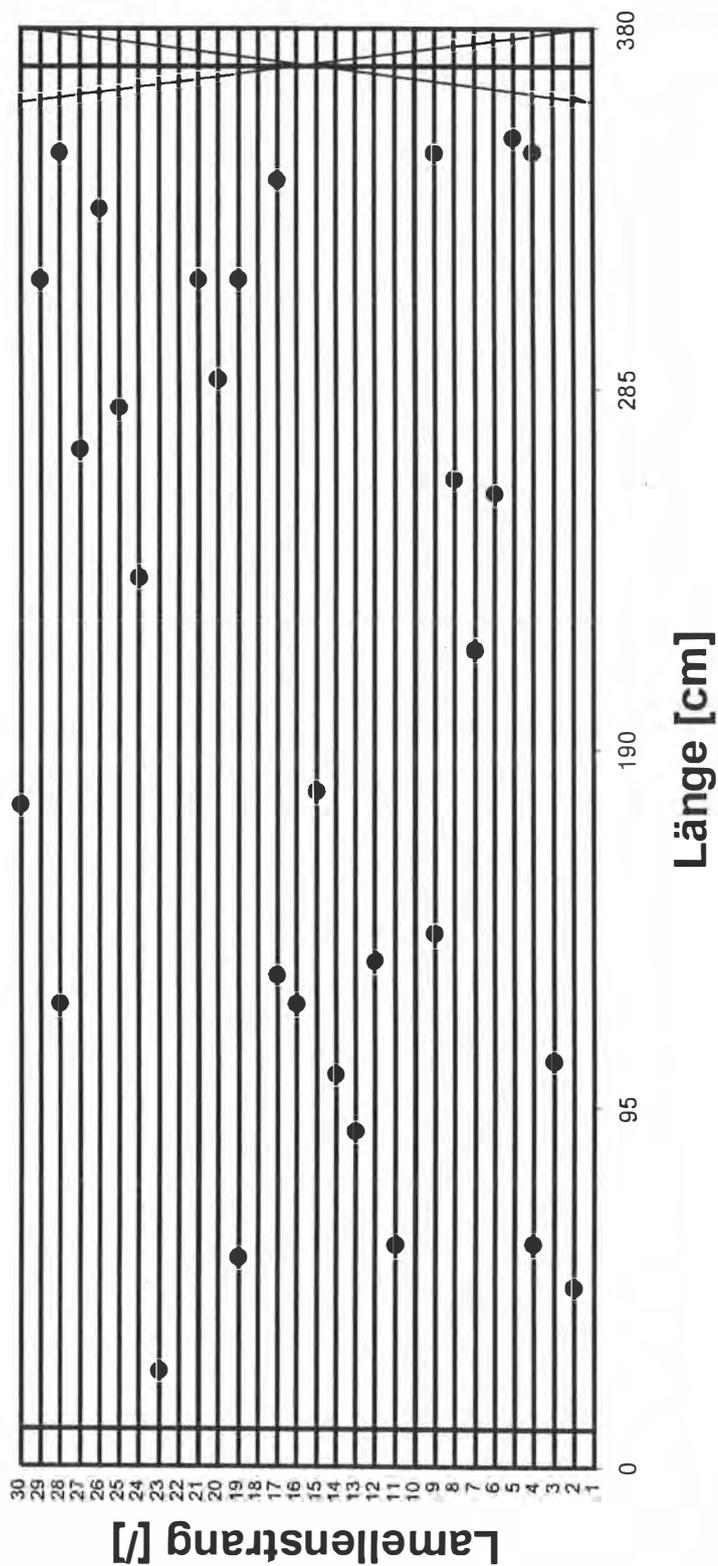


Bild A-35

Prüfkörper F11, Draufsicht

F12 Z_3.60/180_F_3.4-15

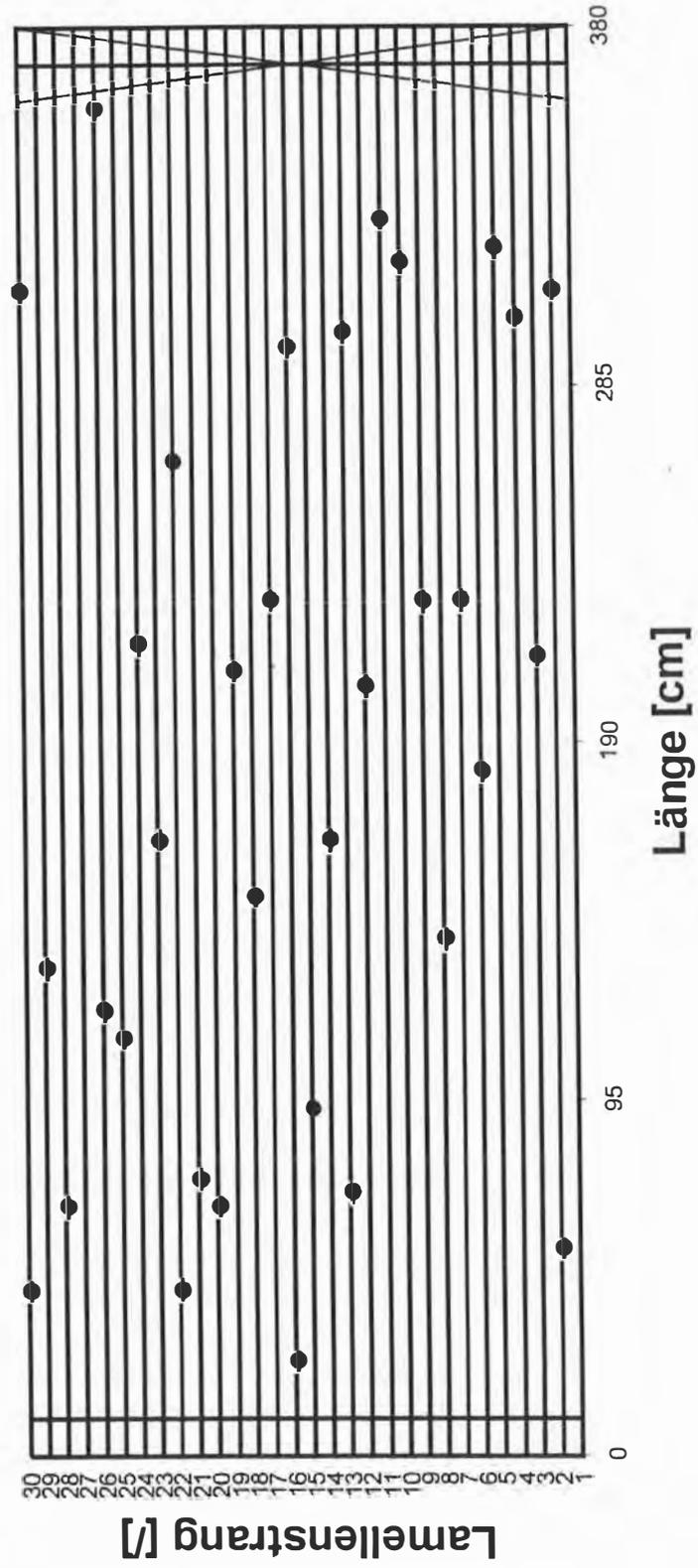


Bild A-36

Prüfkörper F12, Draufsicht

F13 Z_3.60/165_F_3.1-22.5

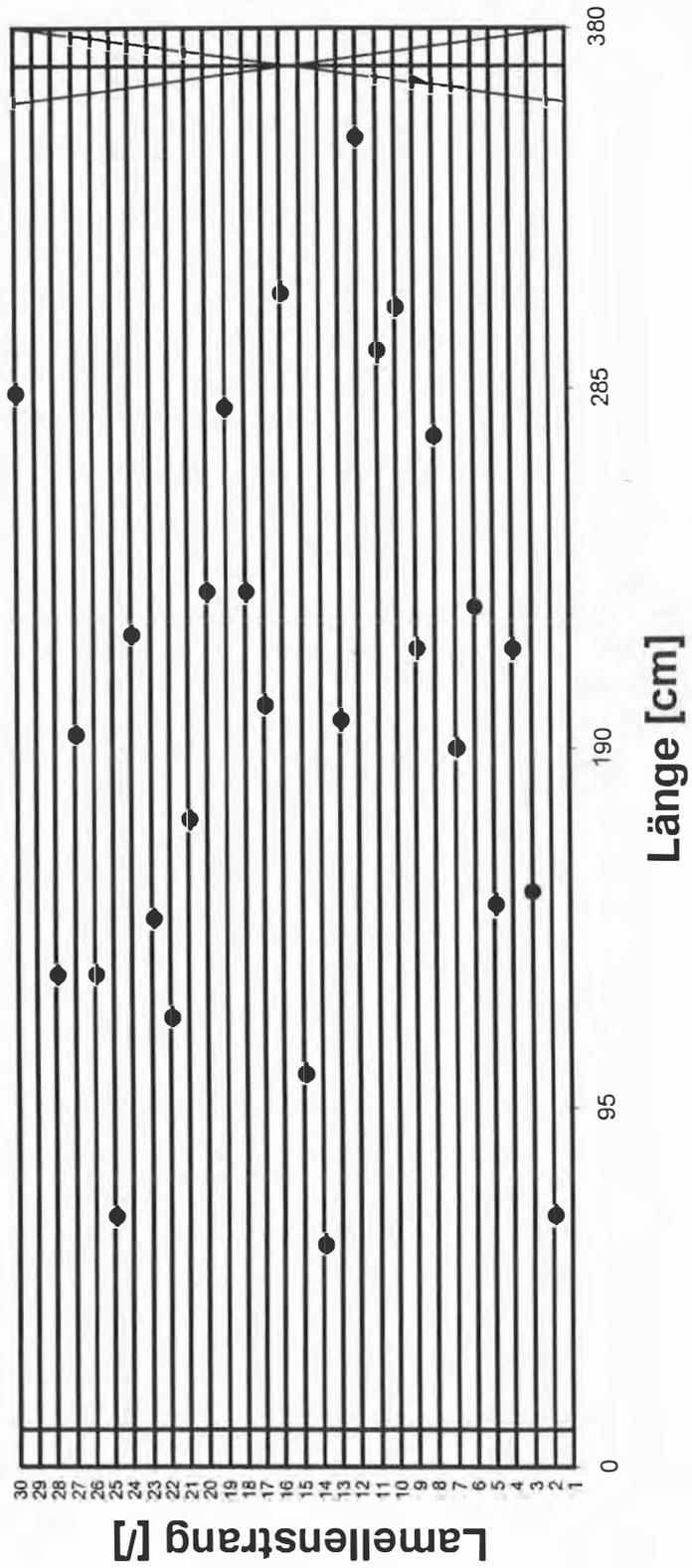


Bild A-37 Prüfkörper F13, Draufsicht

Tabelle B-1 Versuche mit Flächenlasten und Bruchlasten

Bezeichnungen			F ₁	q'
[/]		[m]	[kN]	[kN/m]
Q1	W107_3.15/165_Q_3.1-7.5	3,15	15,5	19,7
Q2	W107_3.15/165_Q_3.1-15	3,15	15,5	19,7
Q3	W107_3.15/165_Q_3.4-22.5	3,15	14,4	18,3
Q4	W107_3.15/180_Q_3.1-15	3,15	17,8	22,6
Q5	W90_3.60/165_Q_3.4-7.5	3,60	17,9	19,9
Q6	W90_3.60/165_Q_3.4-15	3,60	17,2	19,1
Q7	W80_4.05/165_Q_3.4-22.5	4,05	14,5	14,3
Q8	T60_4.20/165_Q_3.1-7.5	4,20	14,4	13,7
Q9	T60_4.20/165_Q_3.1-15	4,20	13,9	13,2
Q10	T60_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,60	17,2	19,1
Q11	T60_4.20/165_Q_3.4-15	4,20	14,1	13,4
Q12	T90_3.60/180_Q_3.1-15	3,60	17,9	19,9
Q13	T120_4.80/180_Q_3.1-7.5	4,80	21,3	17,8
Q14	T120_4.80/180_Q_3.1-15	4,80	17,1	14,3
Q15	T118_4.725/180_Q_3.1-22.5	4,73	13,7	11,6
Q16	T120_4.80/180_Q_3.4-15	4,80	12,9	10,8
Q17	T90_3.60/165_Q_3.1-15	3,60	17,0	18,9
Q18	Z_3.60/165_Q_3.1-7.5	3,60	18,6	20,7
Q19	Z_3.60/165_Q_3.1-15	3,60	21,5	23,9
Q20	Z_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,60	15,0	16,7
Q21	Z_3.60/180_Q_3.4-7.5	3,60	20,3	22,6
Q22	Z_3.60/180_Q_3.4-15	3,60	24,4	27,1
Q23	Z_3.60/180_Q_3.4-22.5	3,60	25,7	28,6
Q24	U_4.05/180_Q_3.1-22.5	4,05	33,3	32,9

Die Bruchlast F₁ bezieht sich auf einen der vier gleichgeschalteten Lastkolben. Eine angenäherte Streckenlast kann mit $q' = \frac{4 \cdot F}{\ell}$ berechnet werden.

Tabelle B-2 Versuche mit zentrischen Einzellasten und Bruchlasten

Bezeichnungen [l]		l [m]	F [kN]
F01	W105_3.15/180_F_3.1-7.5	3,15	44,7
F02	W105_3.15/180_F_3.1-15	3,15	29,3
F03	W105_3.15/180_F_3.1-22.5	3,15	24,3
F04	W80_4.05/165_F_3.4-15	4,05	52,6
F05	W100_4.05/165_F_3.1-15	4,05	44,1
F06	T60_3.60/180_F_3.1-7.5	3,60	59,4
F07	T60_3.60/180_F_3.1-15	3,60	53,7
F08	T60_3.60/180_F_3.1-22.5	3,60	36,6
F09	T105_4.20/165_F_3.1-15	4,20	37,4
F10	T75_4.50/180_F_3.4-15	4,50	48,3
F11	Z_3.60/180_F_3.1-15	3,60	29,6
F12	Z_3.60/180_F_3.4-15	3,60	46,4
F13	Z_3.60/165_F_3.1-22.5	3,60	31,2
F14	U_3.75/190_F_3.8-15	3,75	99,2
F15	U_4.50/155_F_3.1-15	4,50	30,4
F16	U_4.50/140_F_3.4-15	4,50	37,2
F17	U_3.75/180_F_3.1-7.5	3,75	61,5
F18	U_3.75/180_F_3.1-15	3,75	46,7
F19	U_3.60/180_F_3.1-22.5	3,60	43,0

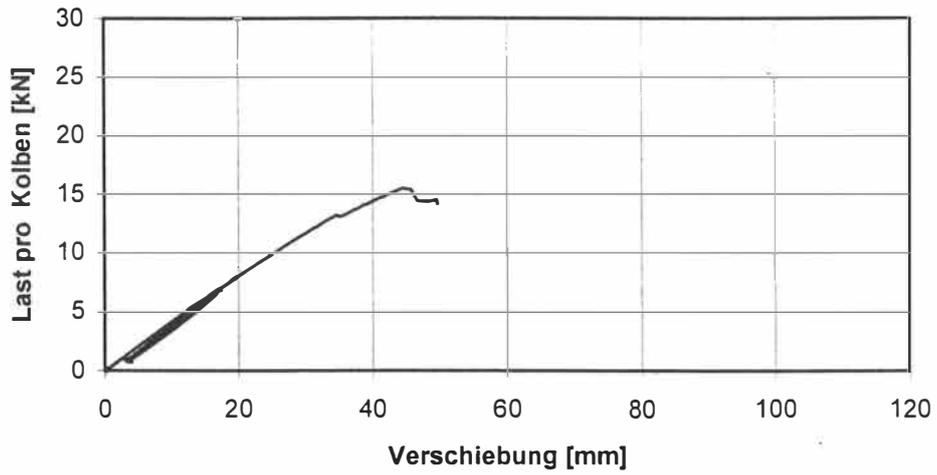


Bild B-1 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q01

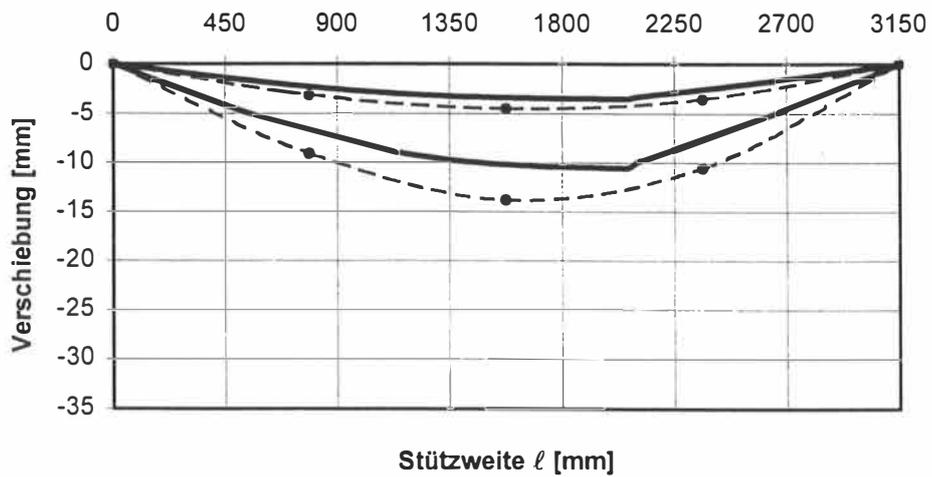


Bild B-2 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q01

— ANSYS - - - - - Versuch

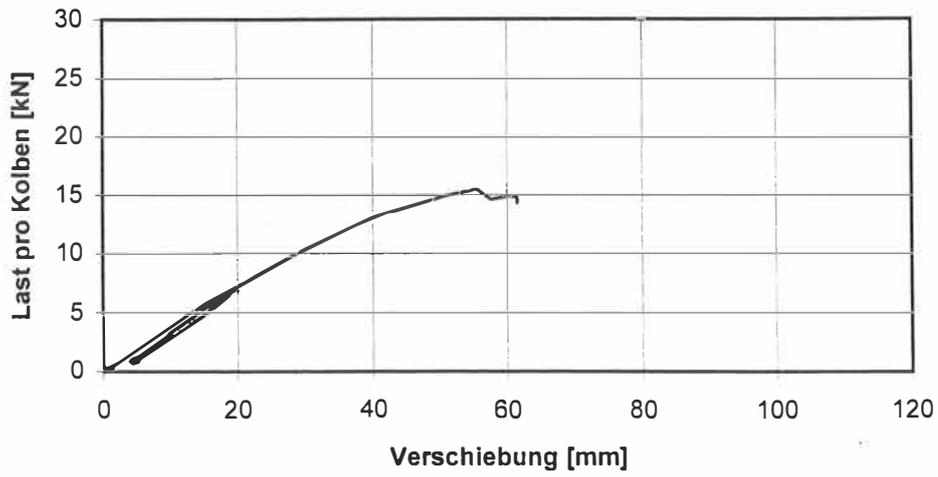


Bild B-3 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q02

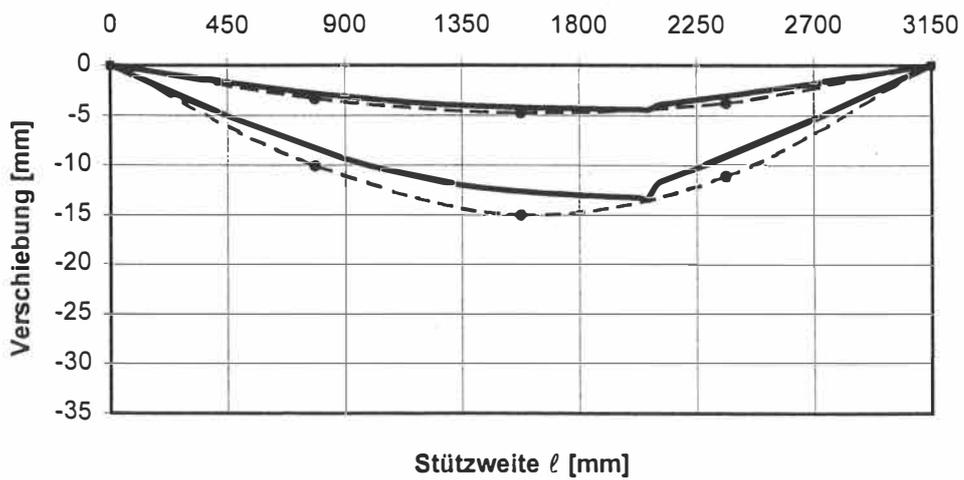


Bild B-4 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q02

— ANSYS - - - • - - - Versuch

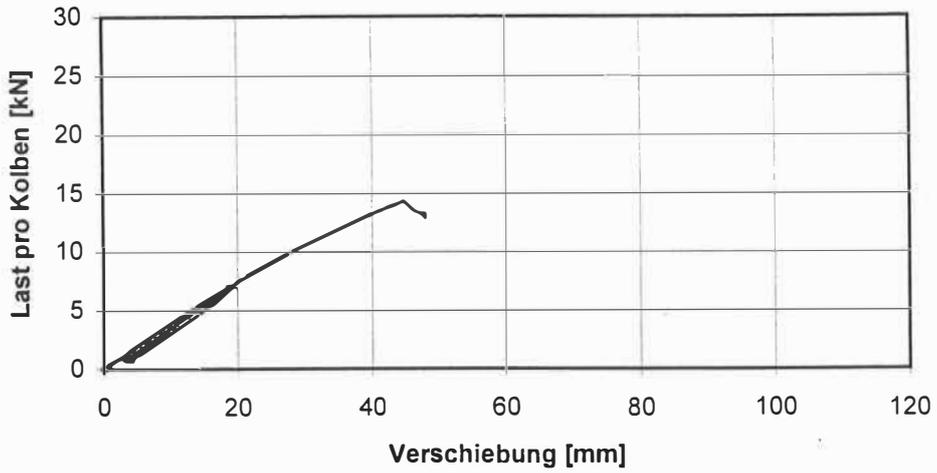


Bild B-5 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q03

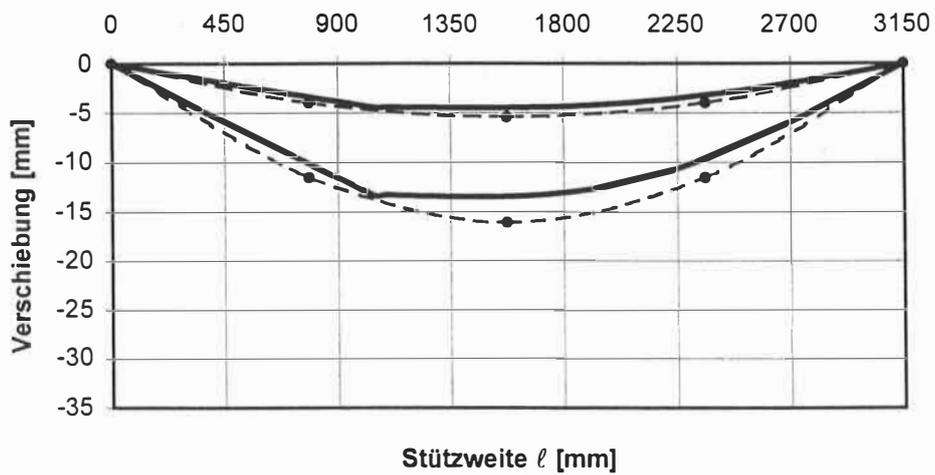


Bild B-6 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q03

— ANSYS - - - - - Versuch

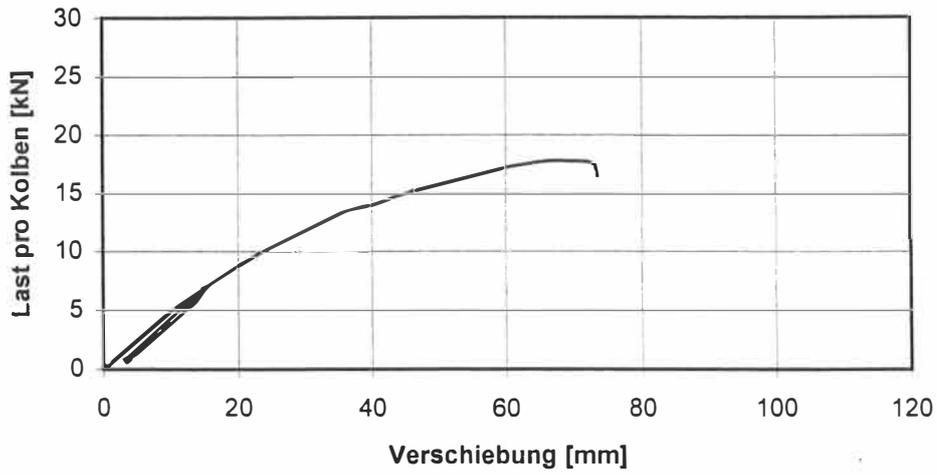


Bild B-7 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q04

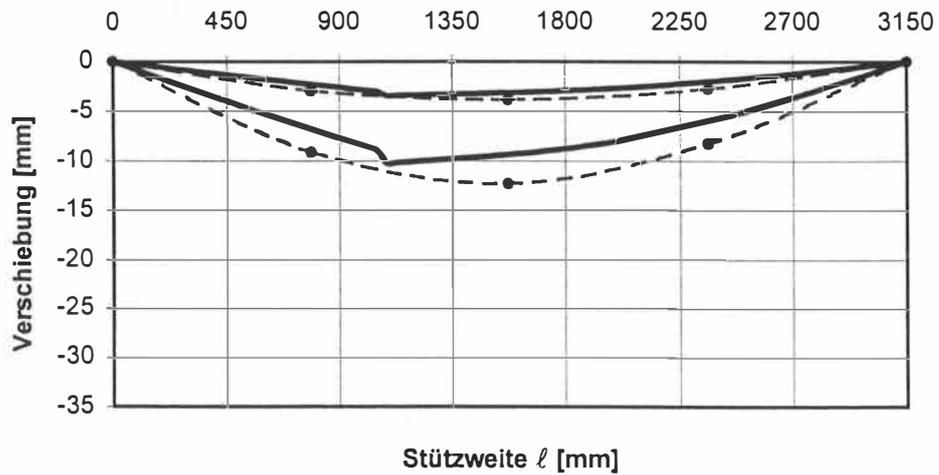


Bild B-8 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q04

— ANSYS - - - • - - - Versuch

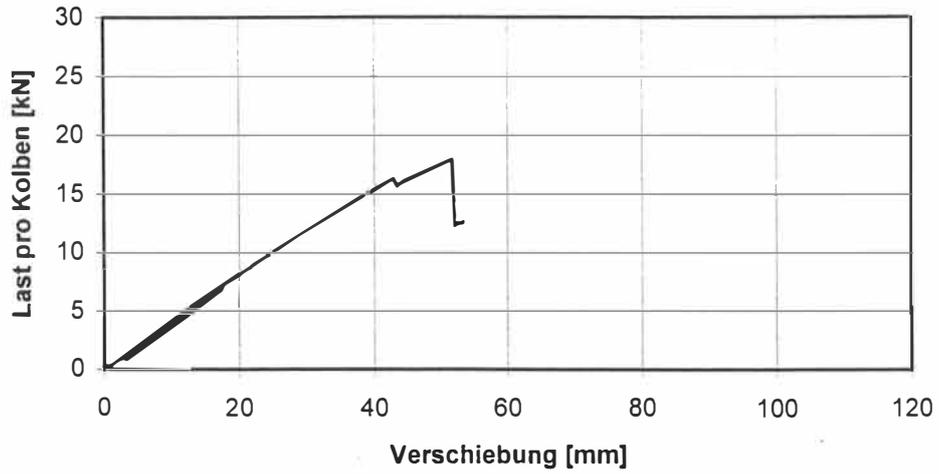


Bild B-9 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q05

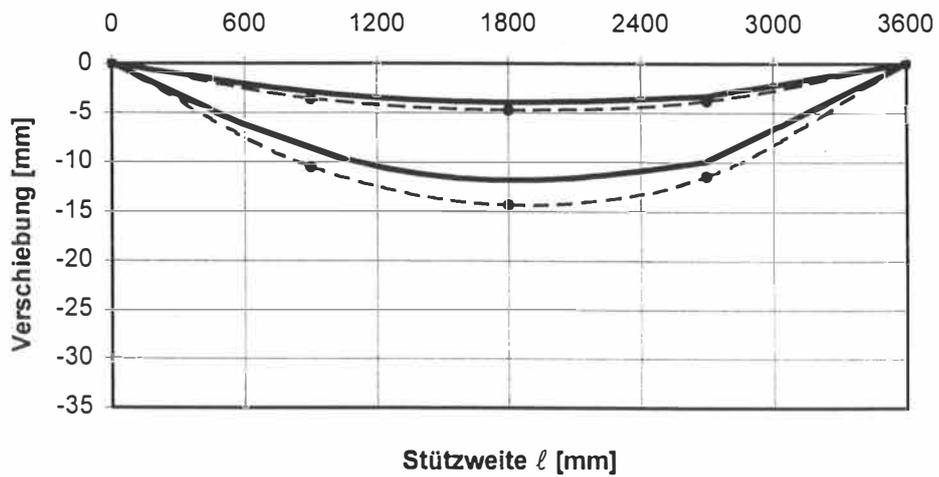


Bild B-10 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q05

— ANSYS - - - - - Versuch

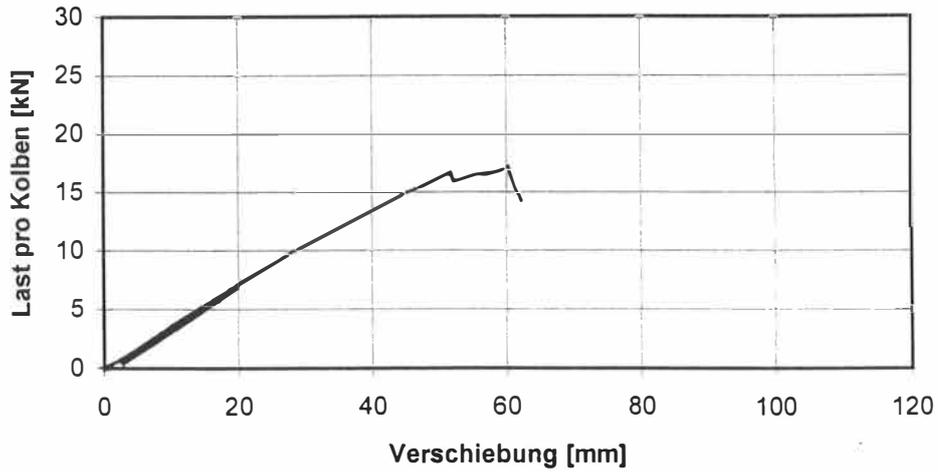


Bild B-11 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q06

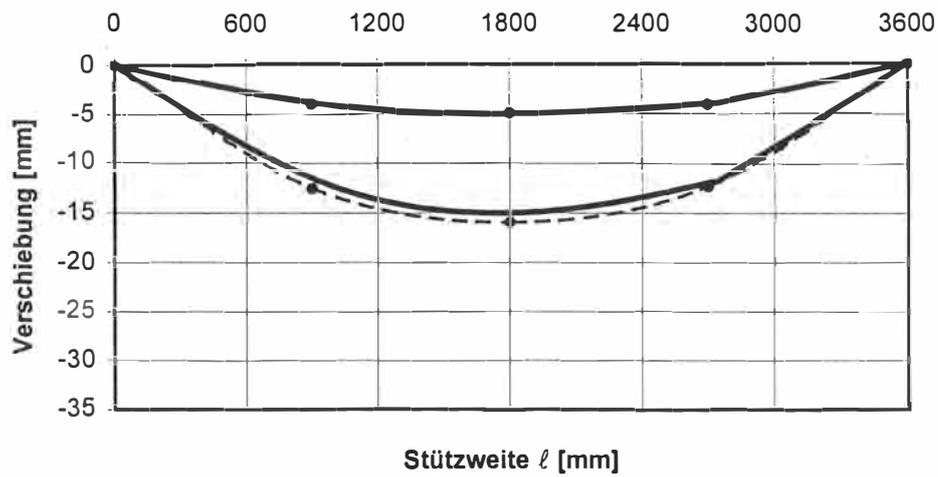


Bild B-12 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q06

— ANSYS - - - • - - - Versuch

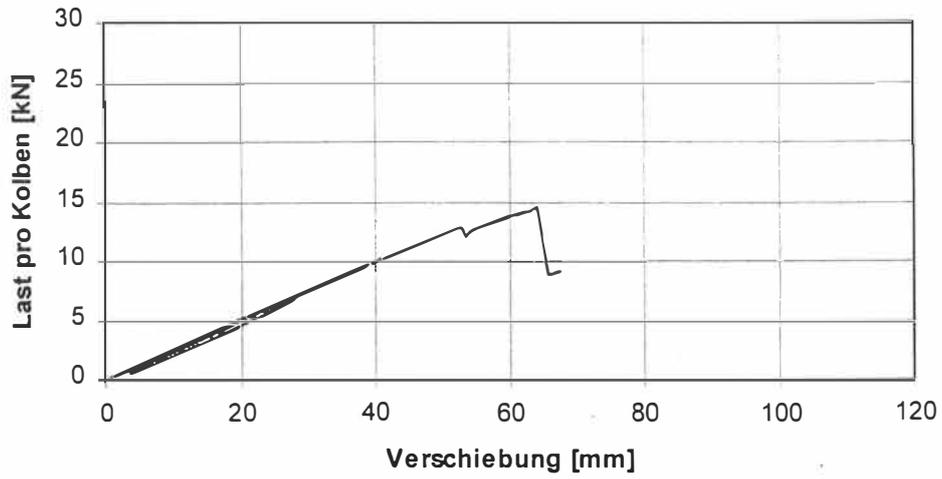


Bild B-13 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q07

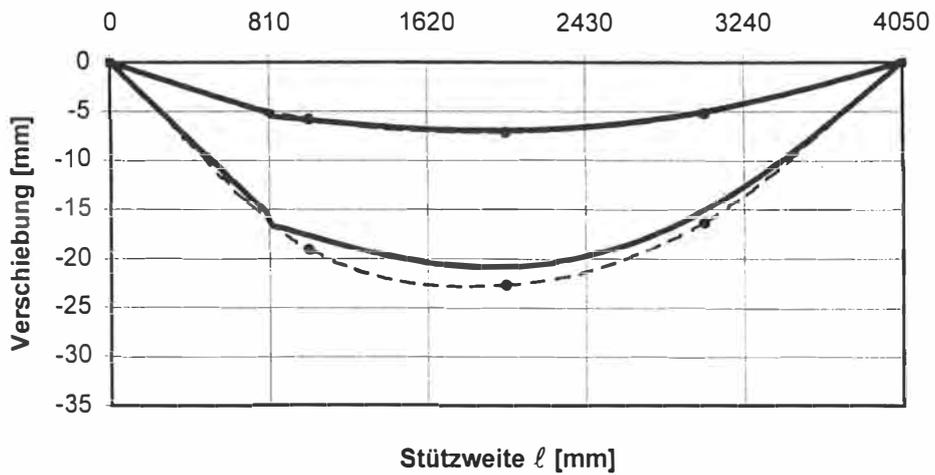


Bild B-14 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Brettstapels Q07

— ANSYS - - - • - - - Versuch

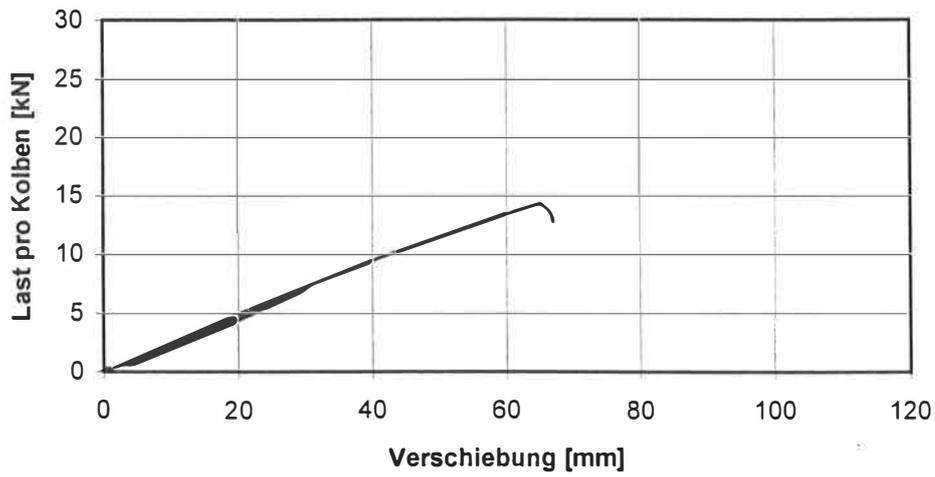


Bild B-15 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q08

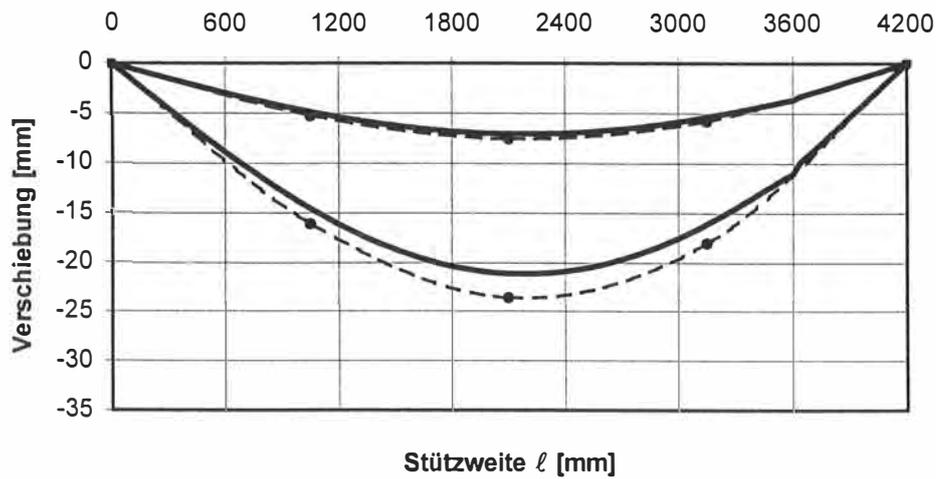


Bild B-16 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q08

— ANSYS - - - - - Versuch

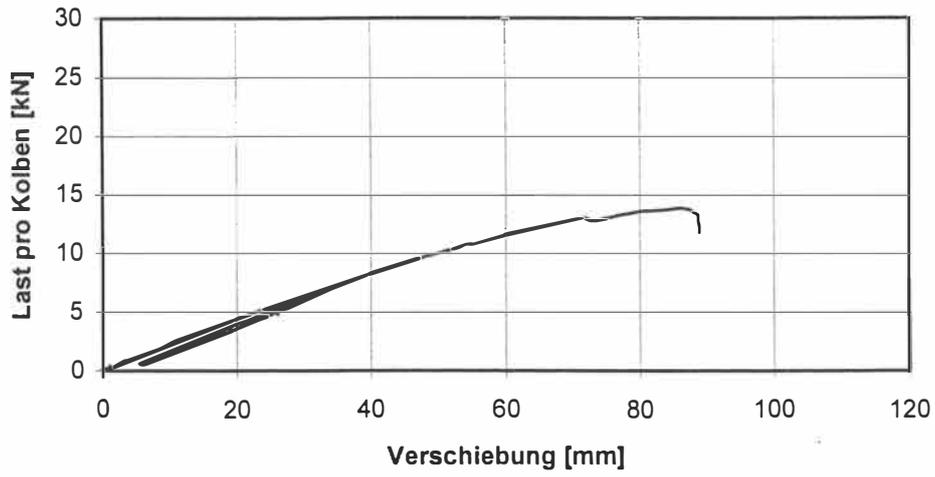


Bild B-17 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q09

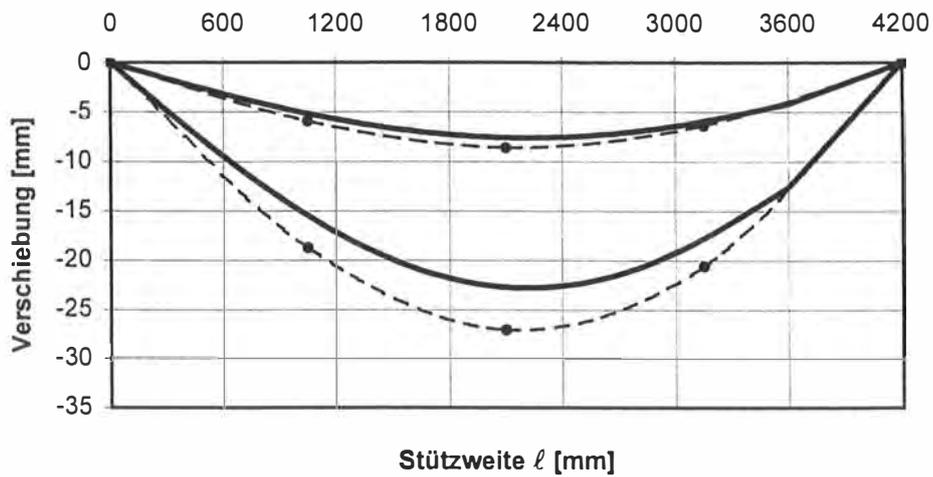


Bild B-18 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q09

— ANSYS - - - - - Versuch

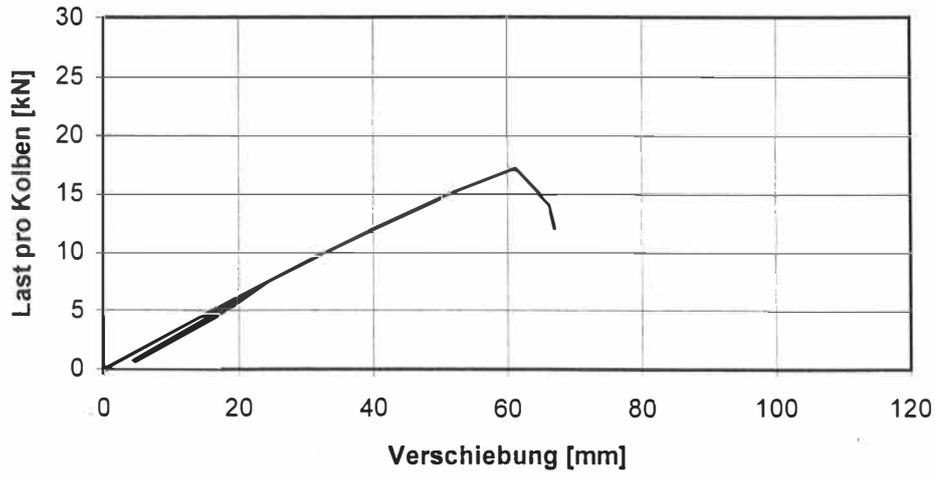


Bild B-19 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q10

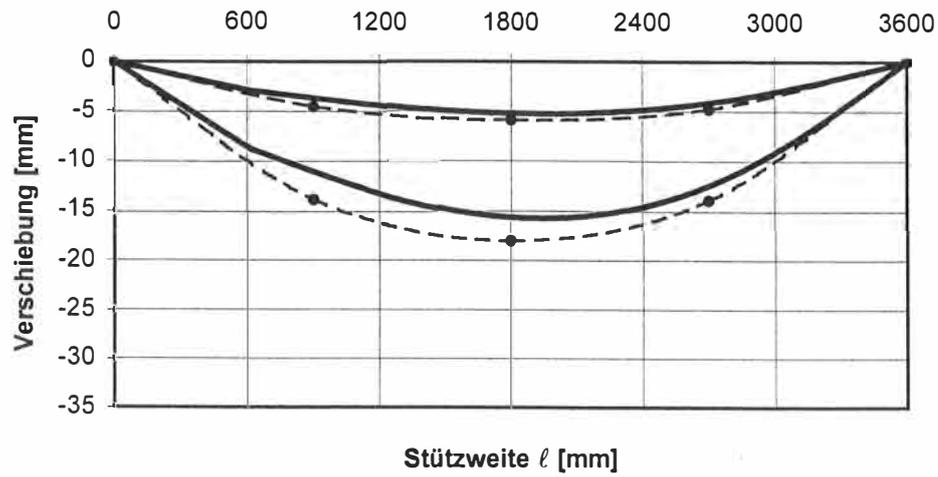


Bild B-20 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q10

— ANSYS - - - - - Versuch

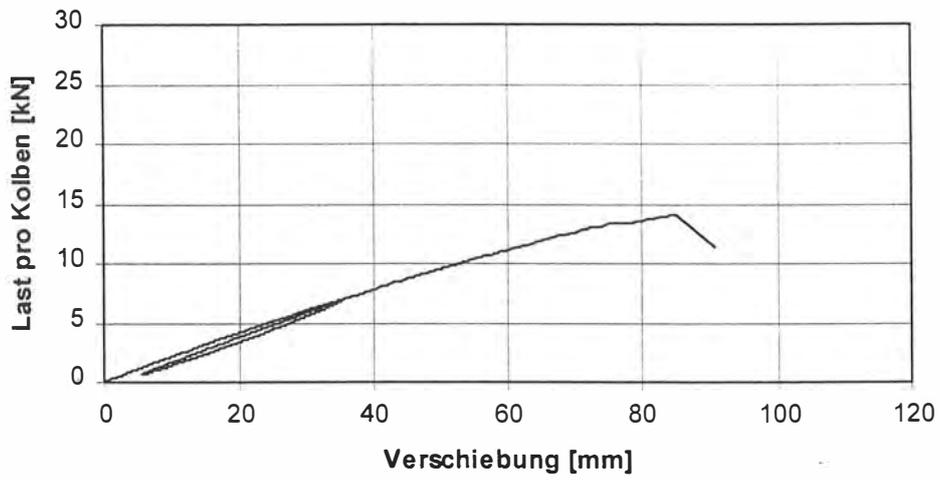


Bild B-21 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q11

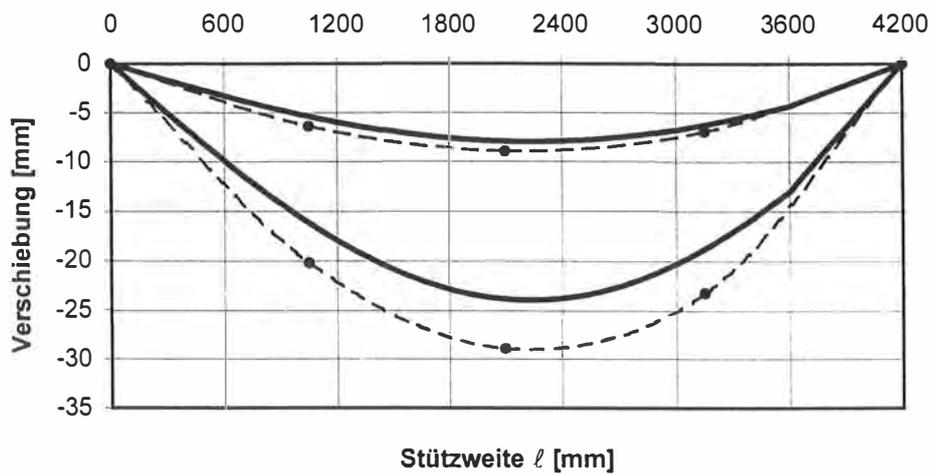


Bild B-22 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN des Brettstapels Q11

— ANSYS - - - - - Versuch

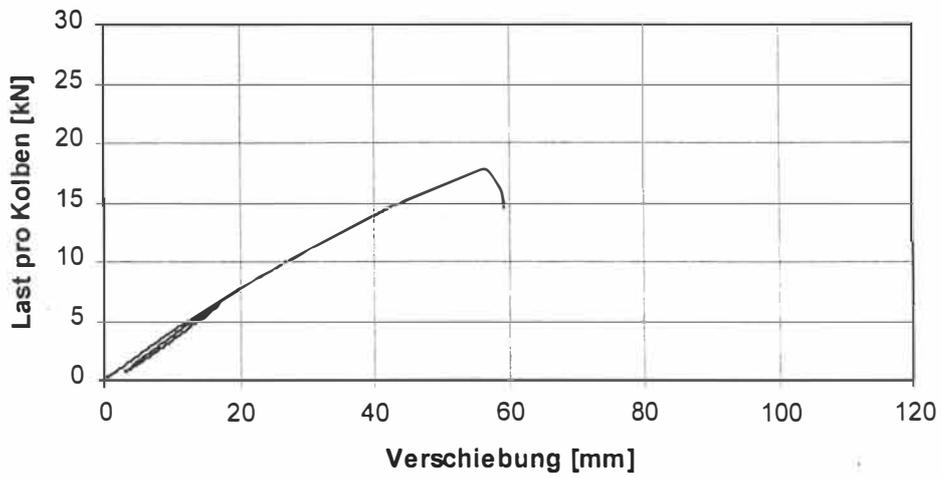


Bild B-23 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q12

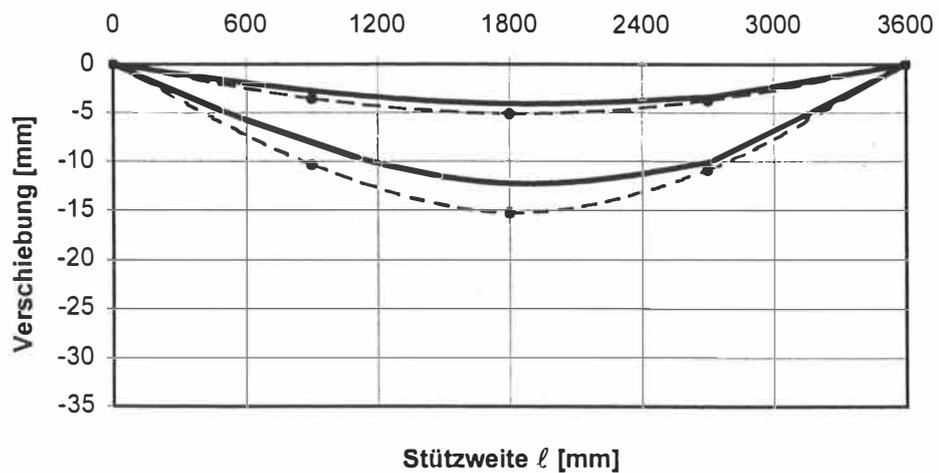


Bild B-24 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q12

— ANSYS -·- Versuch

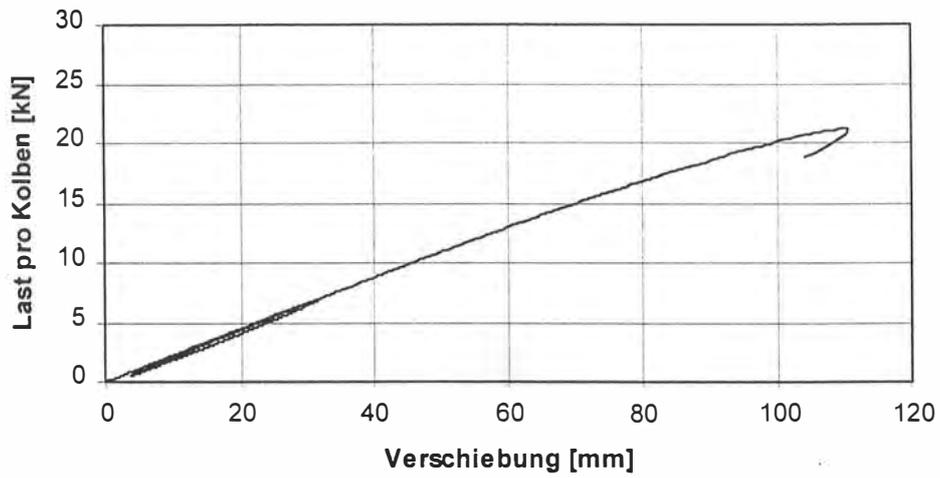


Bild B-25 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q13

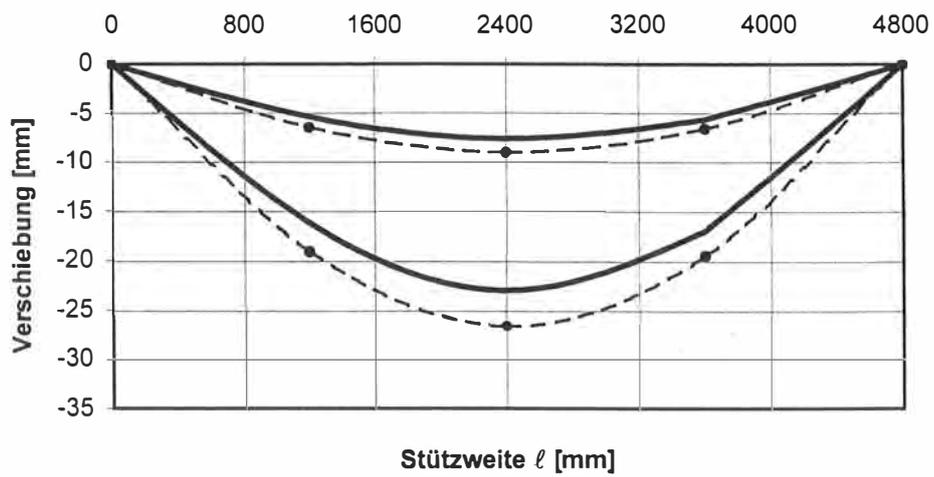


Bild B-26 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q13

— ANSYS - - - - - Versuch

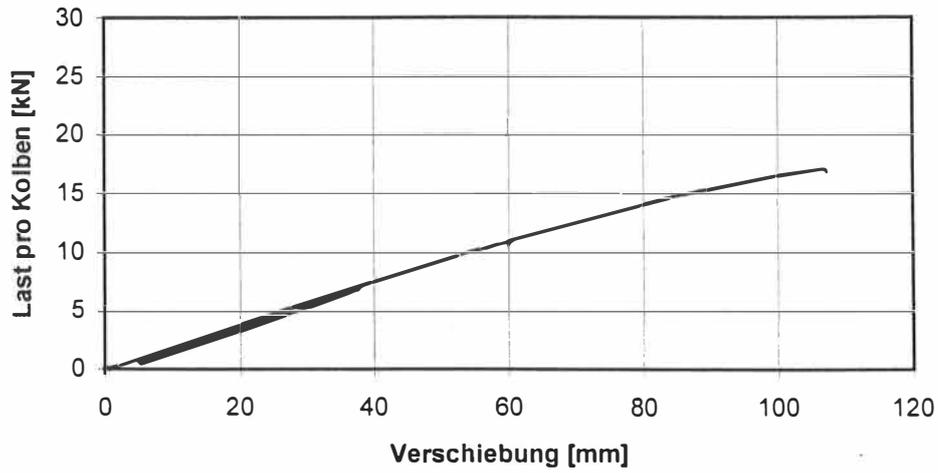


Bild B-27 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q14

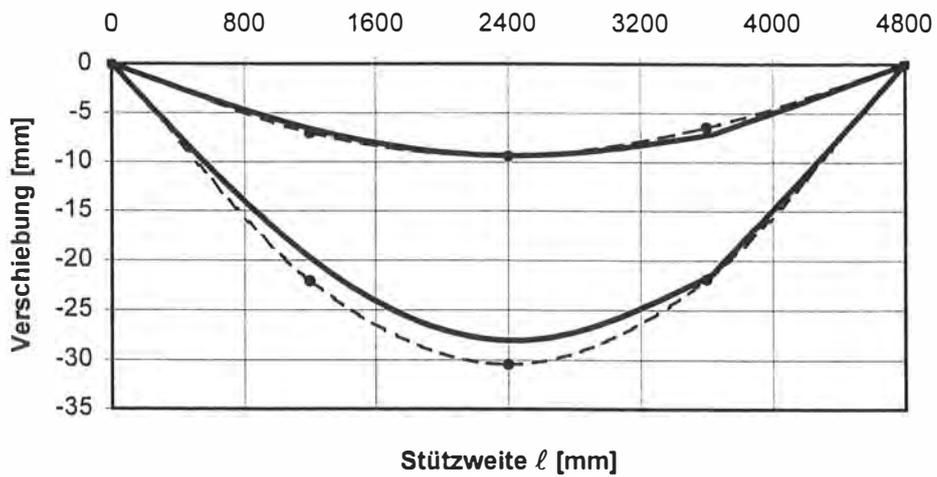


Bild B-28 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q14

— ANSYS - - - • - - - Versuch

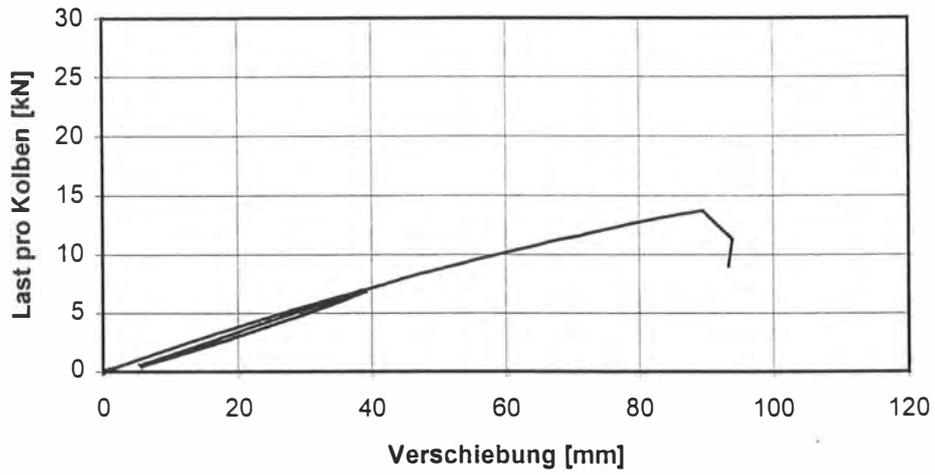


Bild B-29 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q15

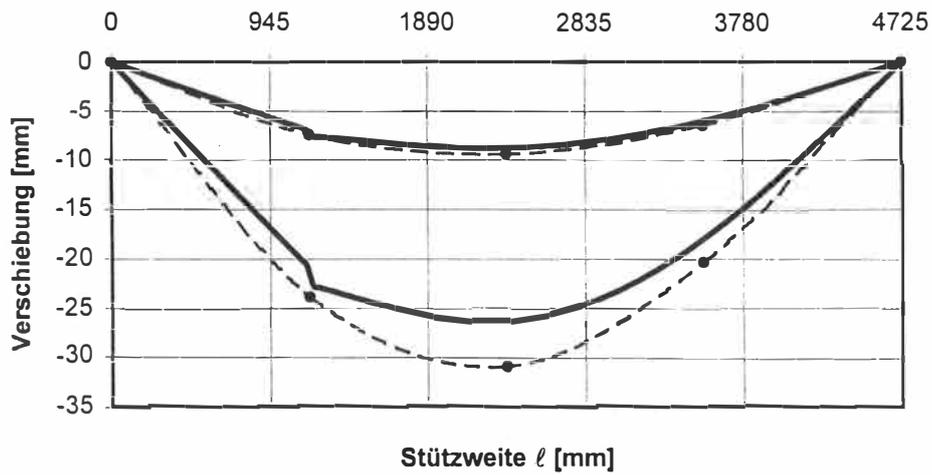


Bild B-30 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q15

— ANSYS - - - - - Versuch

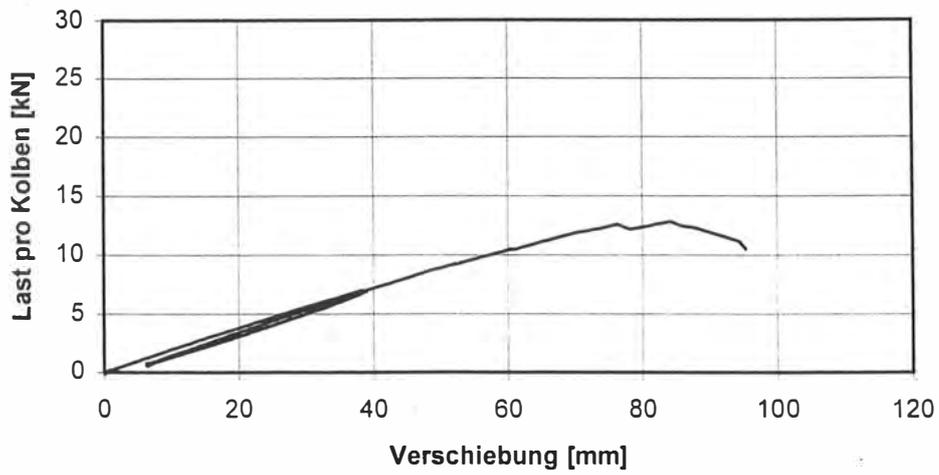


Bild B-31 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q16

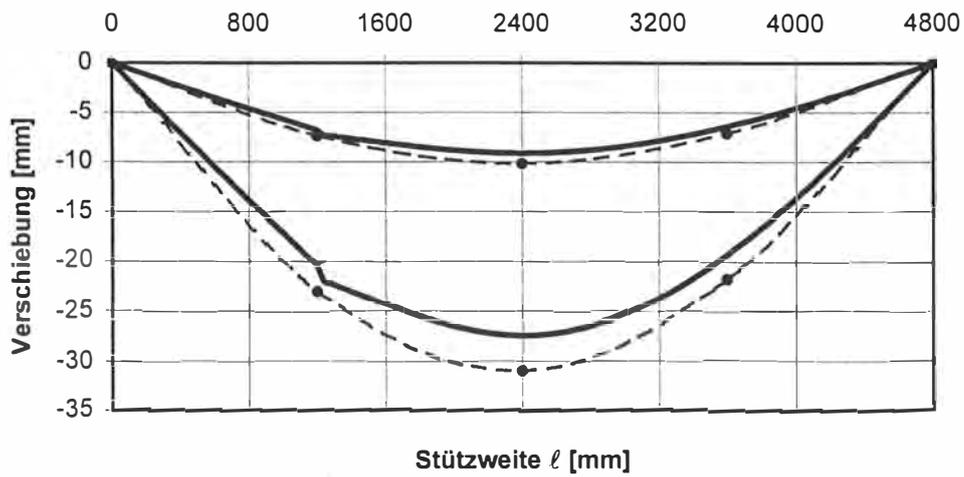


Bild B-32 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q16

— ANSYS -·-·- Versuch

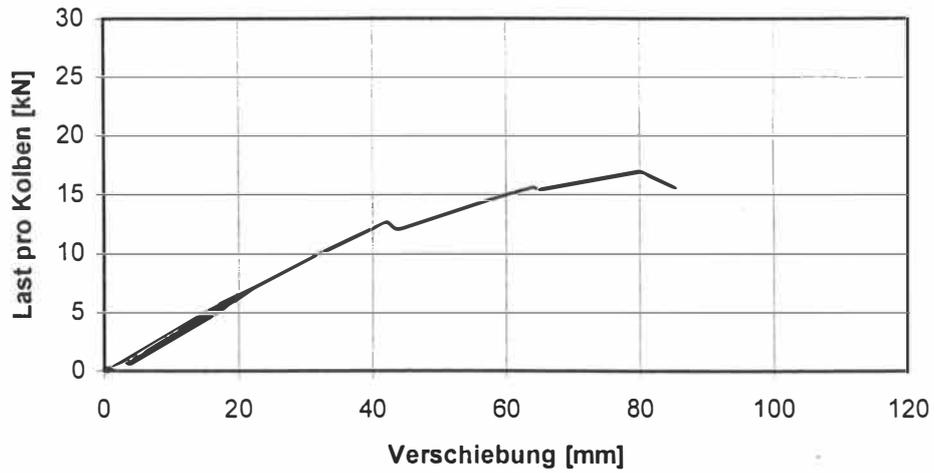


Bild B-33 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q17

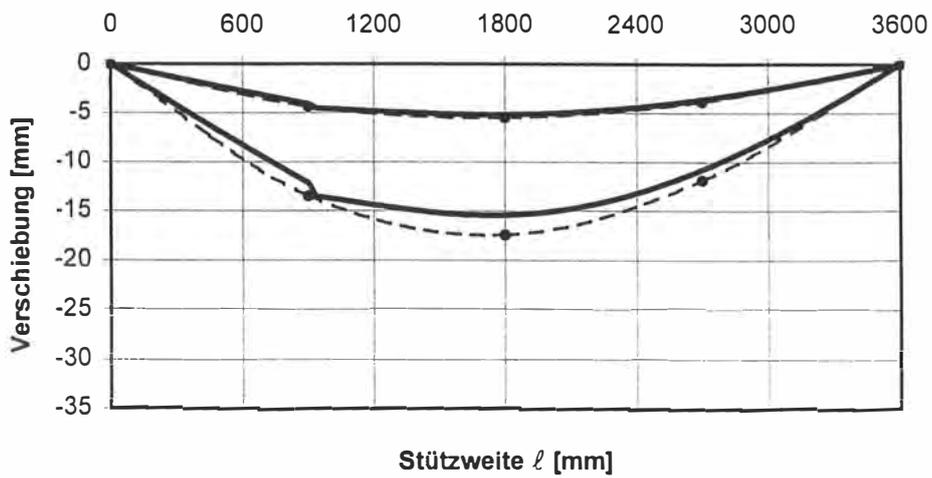


Bild B-34 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q17

— ANSYS - - - - - Versuch

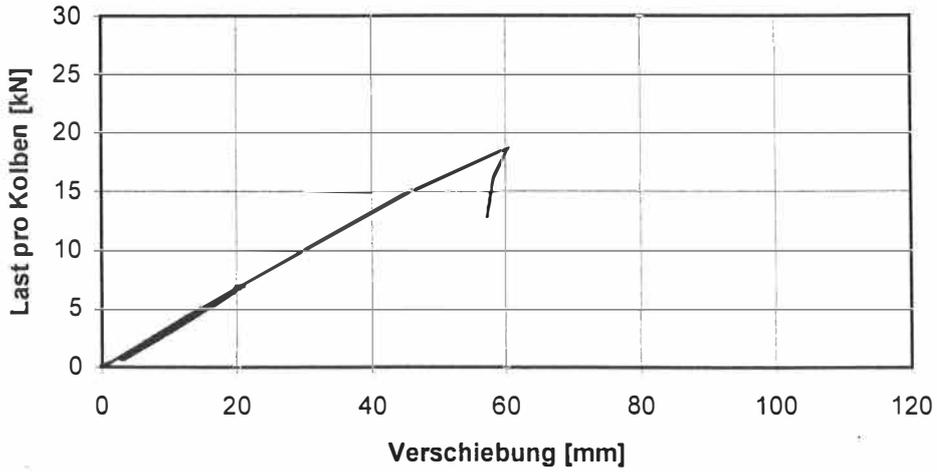


Bild B-35 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q18

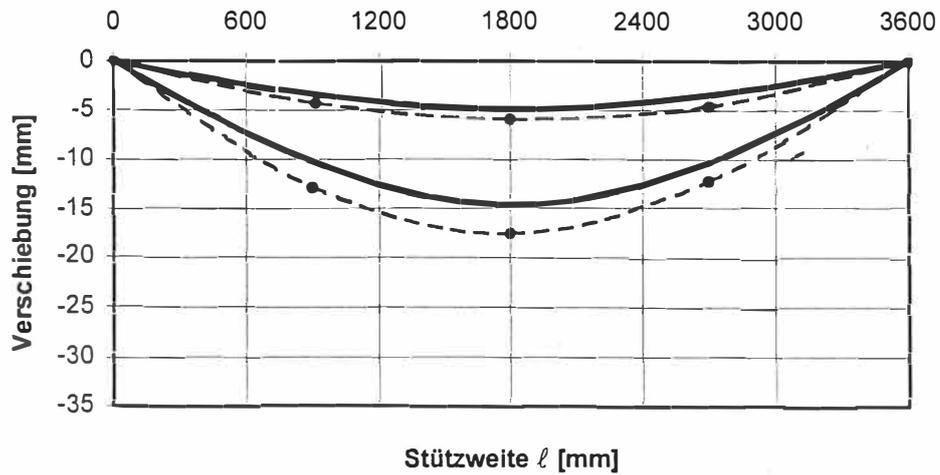


Bild B-36 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q18

— ANSYS - - - - • - - - - Versuch

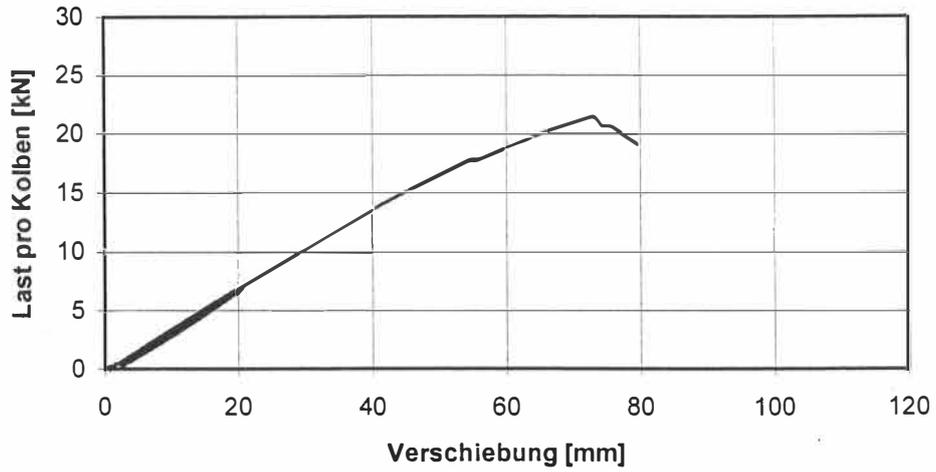


Bild B-37 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q19

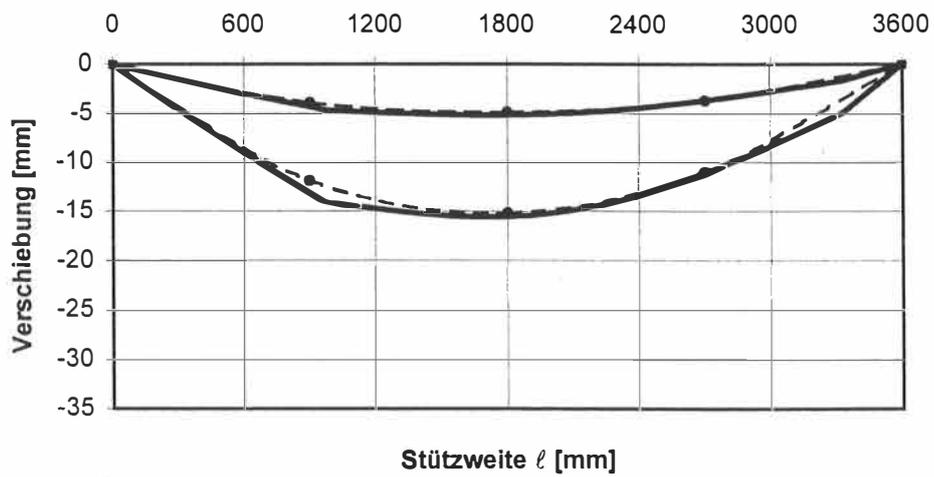


Bild B-38 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q19

— ANSYS - - - Versuch

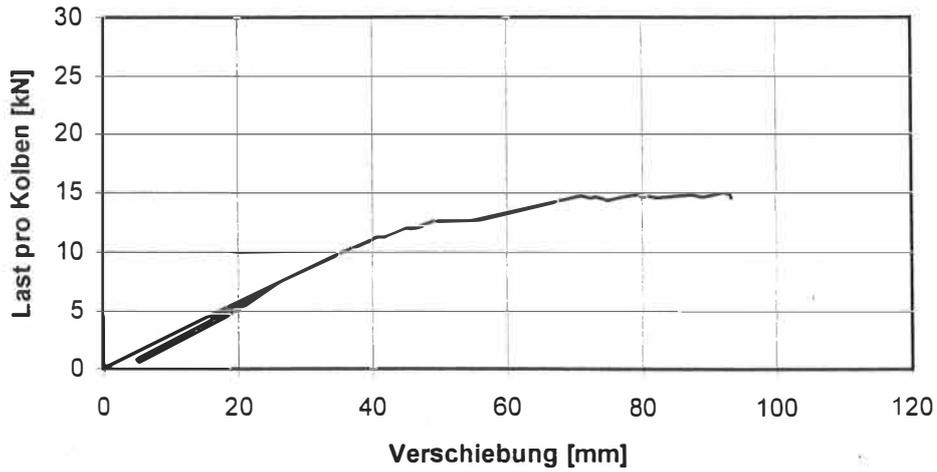


Bild B-39 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q20

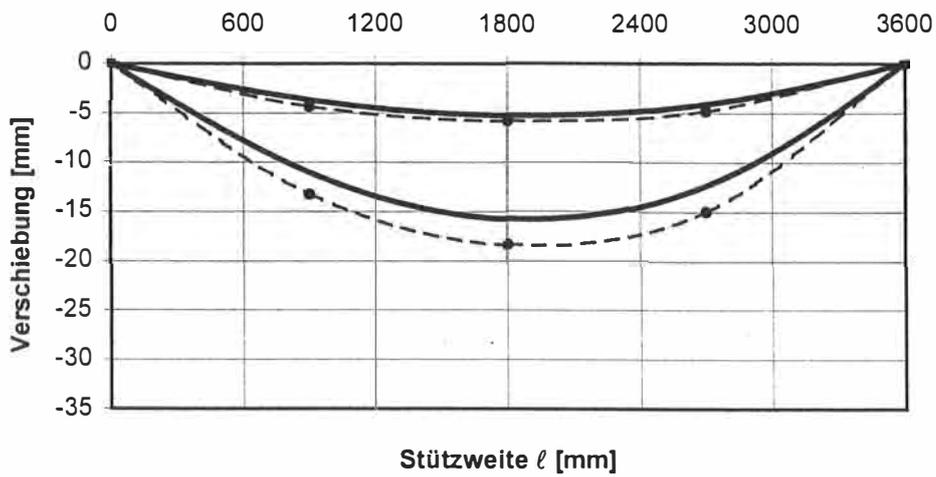


Bild B-40 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q20

— ANSYS - - - - • - - - - Versuch

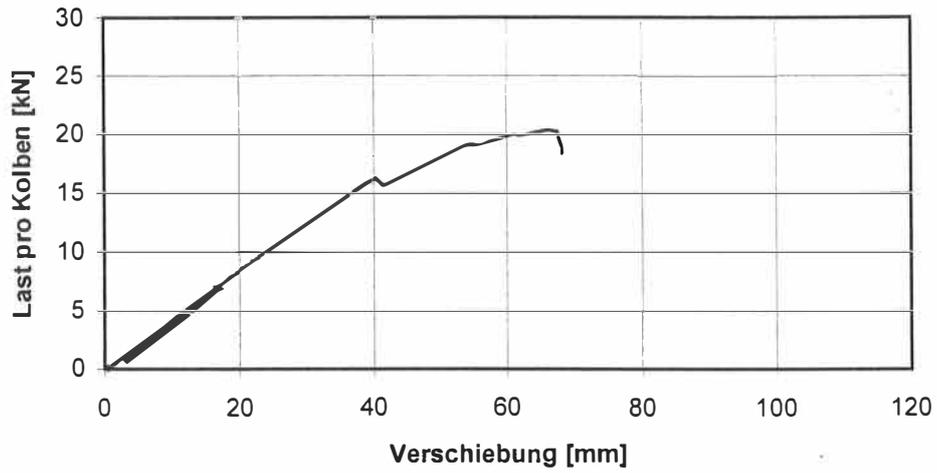


Bild B-41 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q21

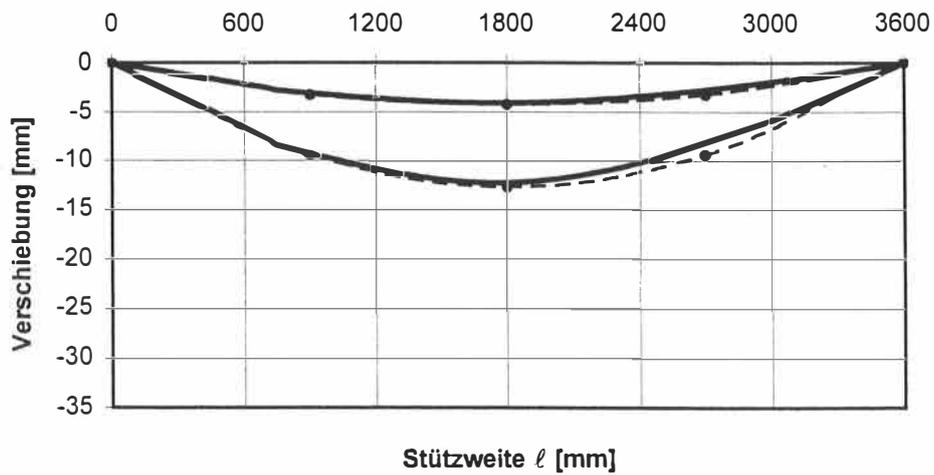


Bild B-42 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q21

— ANSYS - - - Versuch

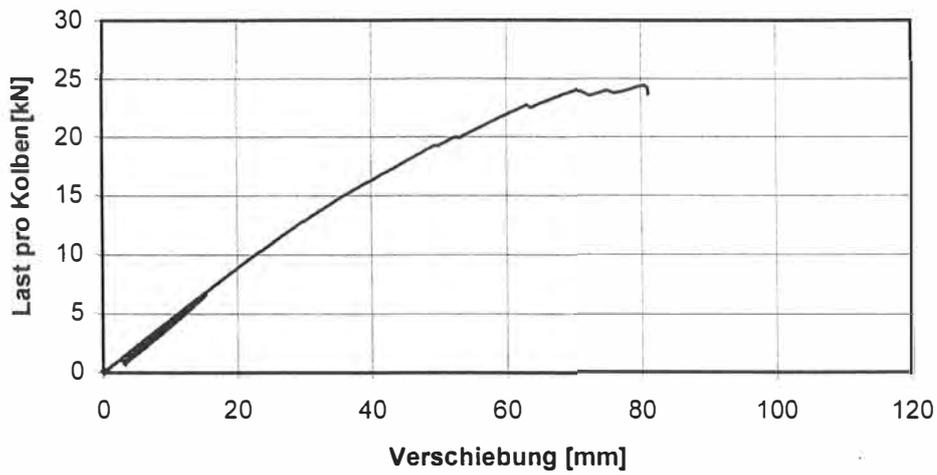


Bild B-43 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q22

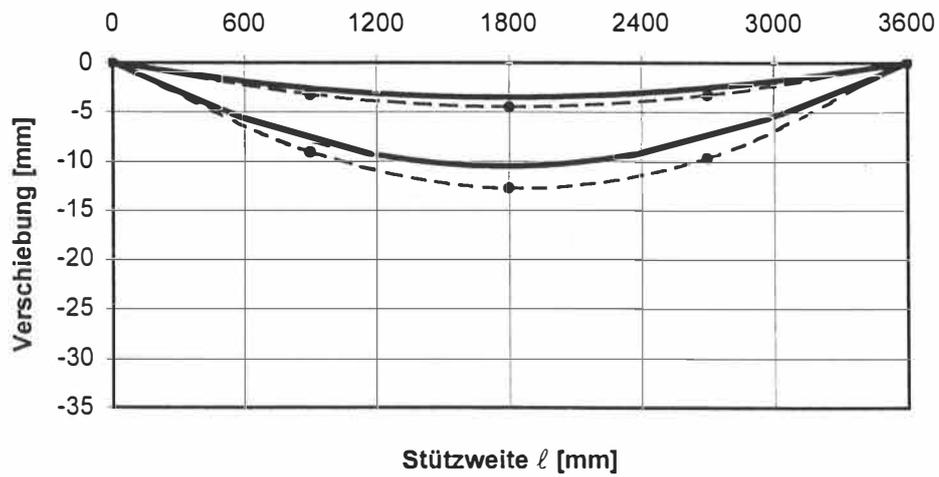


Bild B-44 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q22

— ANSYS - - - • - - - Versuch

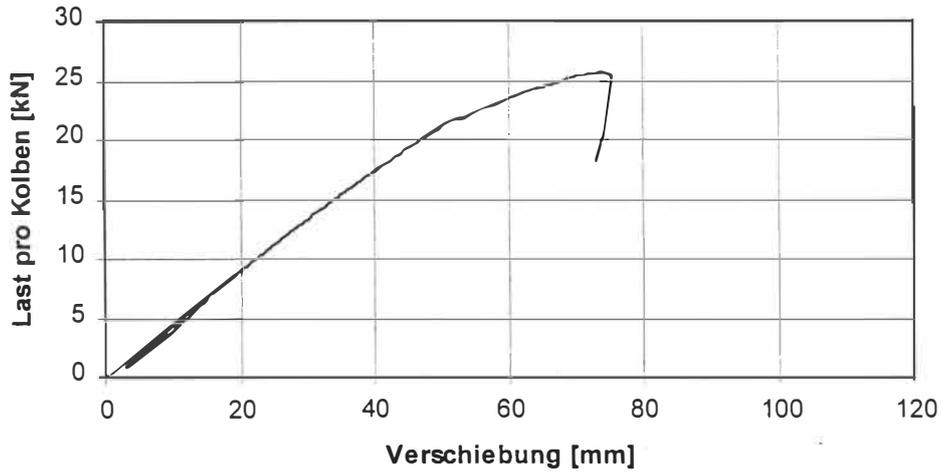


Bild B-45 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q23

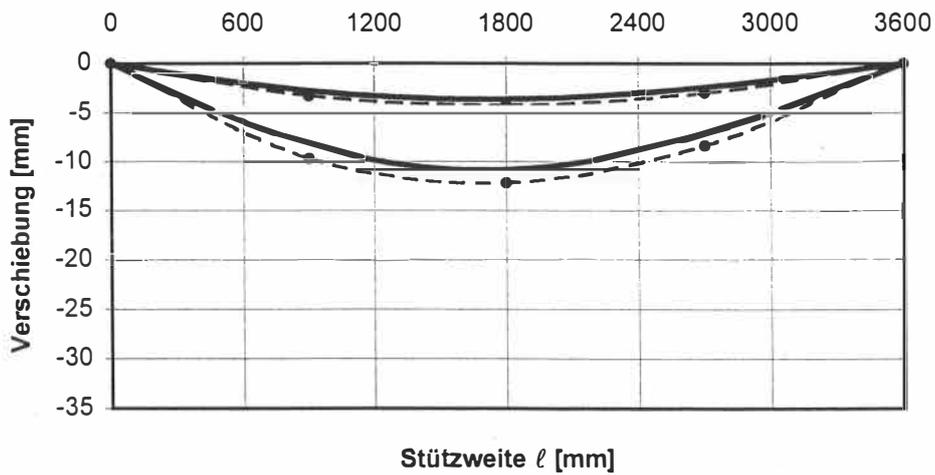


Bild B-46 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q23

— ANSYS - - - - - Versuch

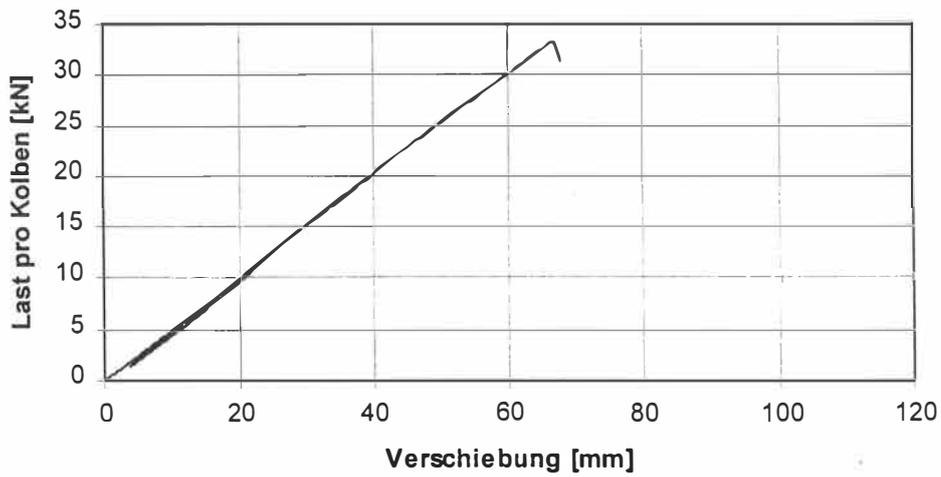


Bild B-47 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers Q24

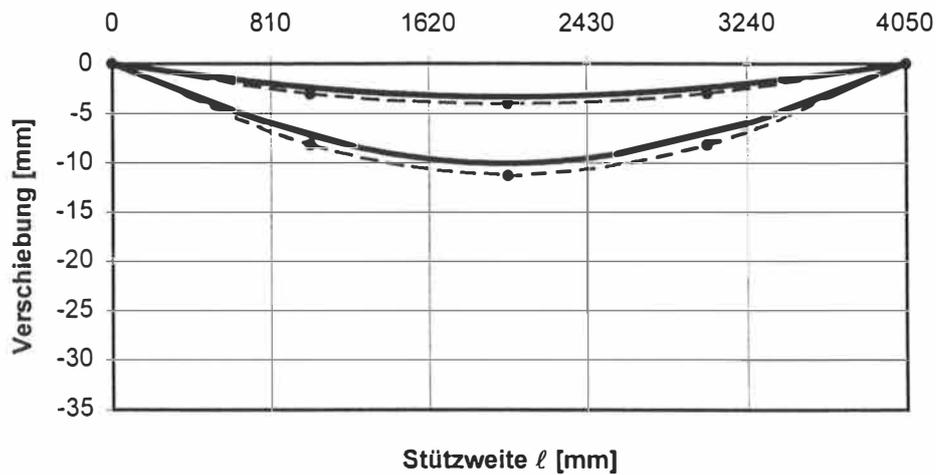


Bild B-48 Vergleich der Biegelinien bei einer Last pro Kolben von 2 kN und 6 kN; Prüfkörper Q24

— ANSYS - - - - • - - - - Versuch

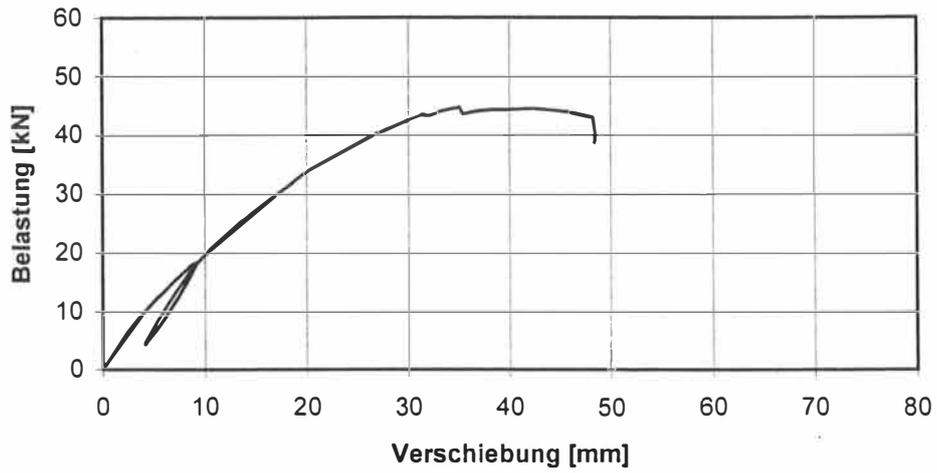


Bild B-49 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F01

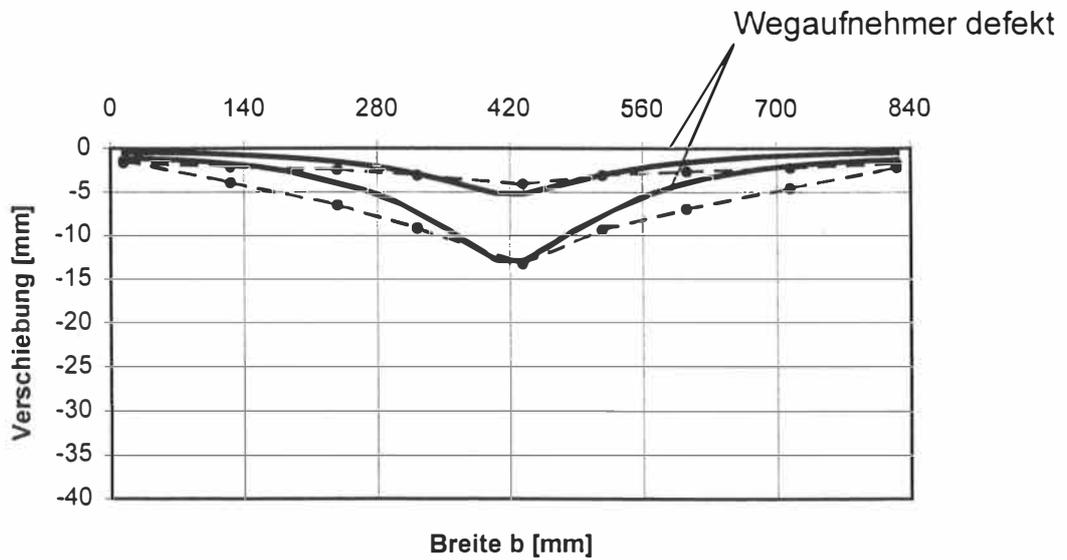


Bild B-50 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F01

— ANSYS - - - - - Versuch

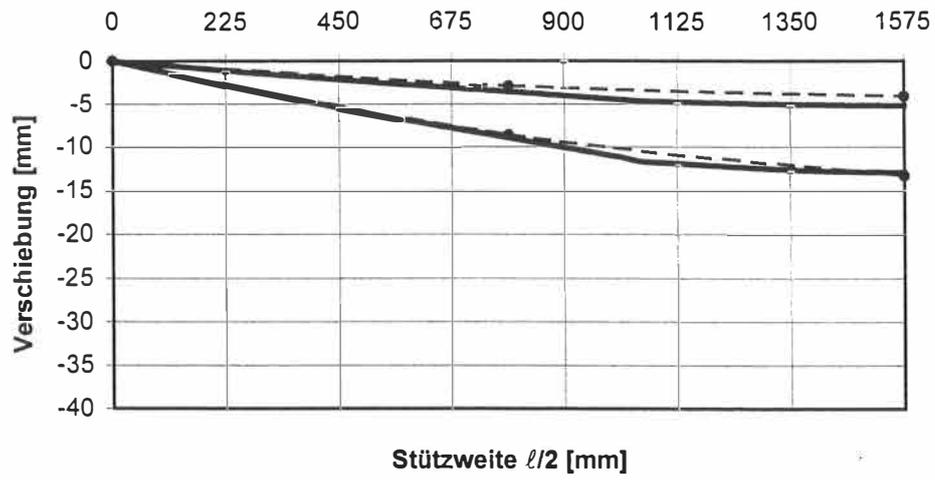


Bild B-51

Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F01

— ANSYS - - - Versuch

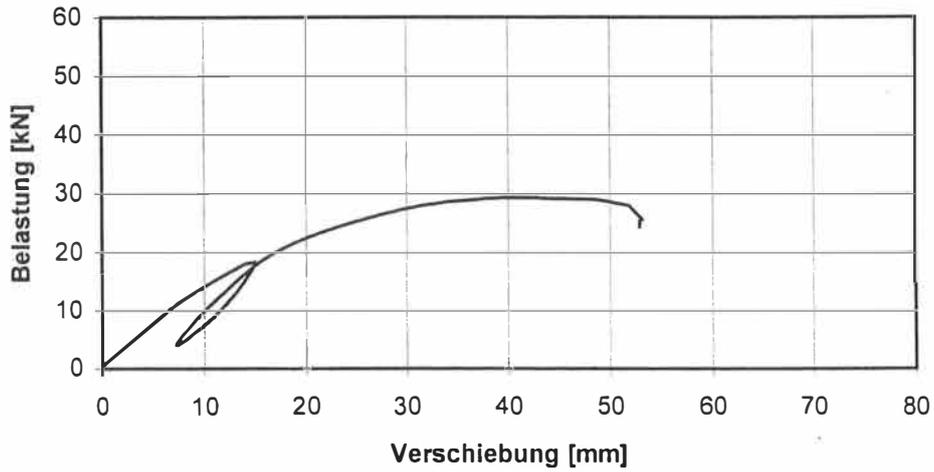


Bild B-52 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F02

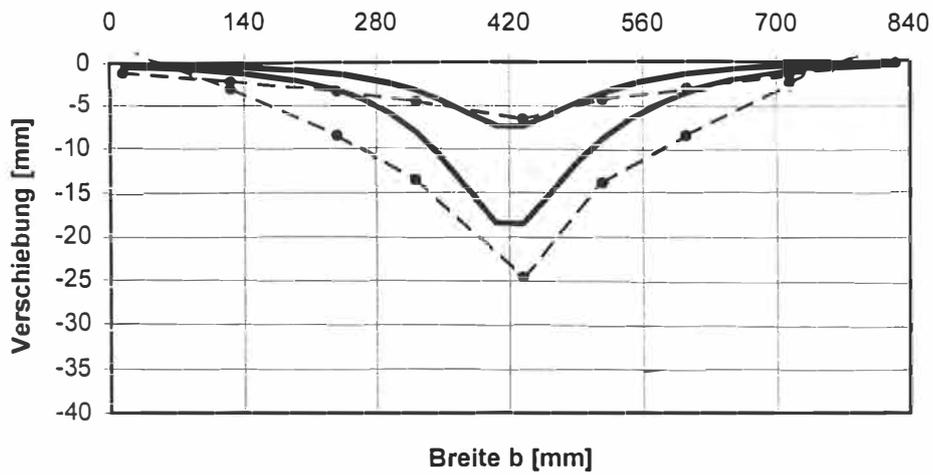


Bild B-53 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN Prüfkörpers F02

— ANSYS - - - - - Versuch

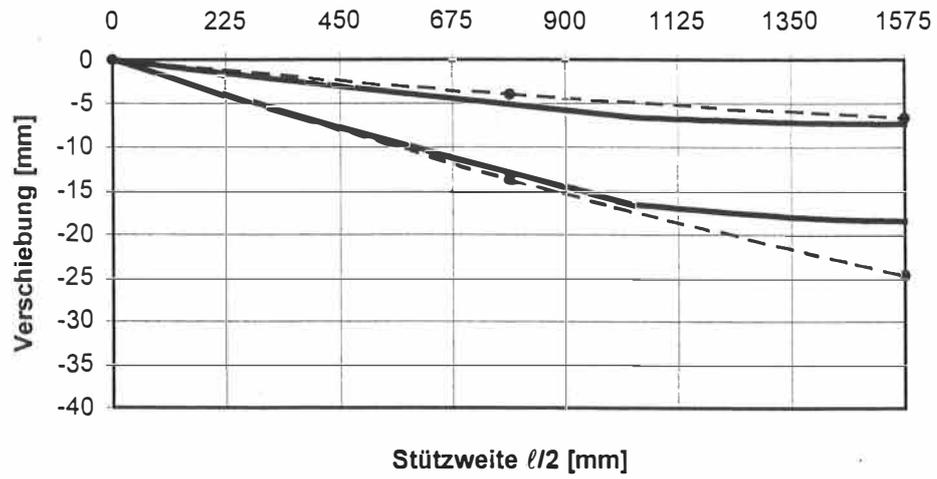


Bild B-54 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F02

— ANSYS - - - - • - - - - Versuch

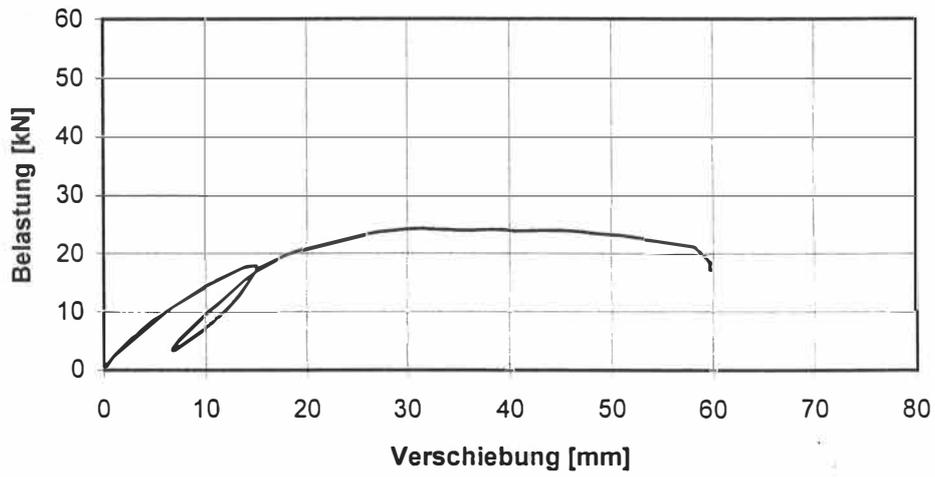


Bild B-55 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F03

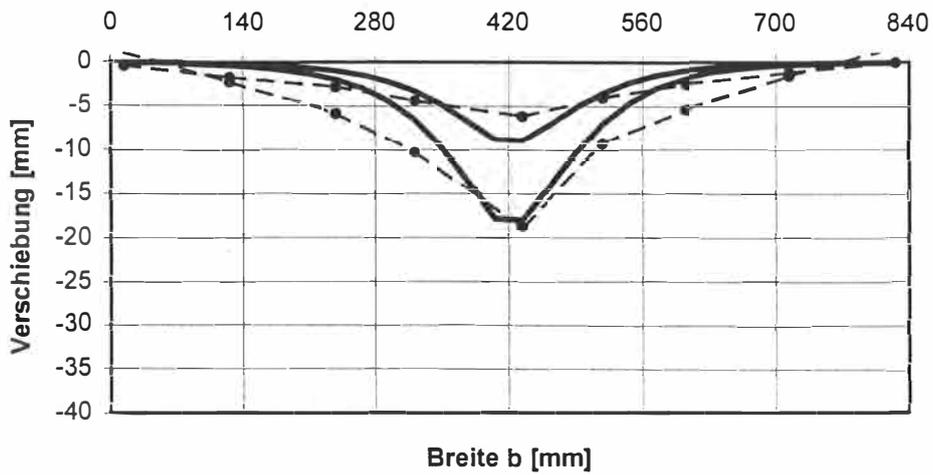


Bild B-56 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 20 kN; Prüfkörper F03

— ANSYS - - - Versuch

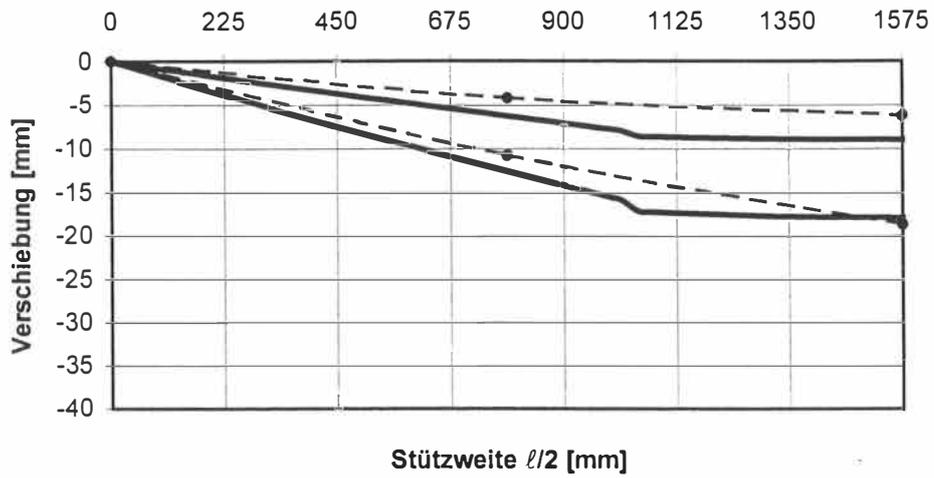


Bild B-57

Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 20 kN; Prüfkörper F03

—— ANSYS - - - - - Versuch

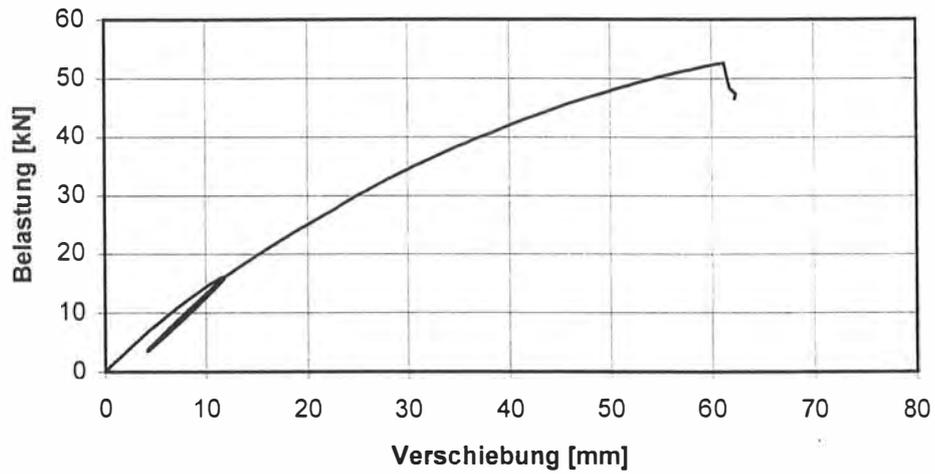


Bild B-58 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F04

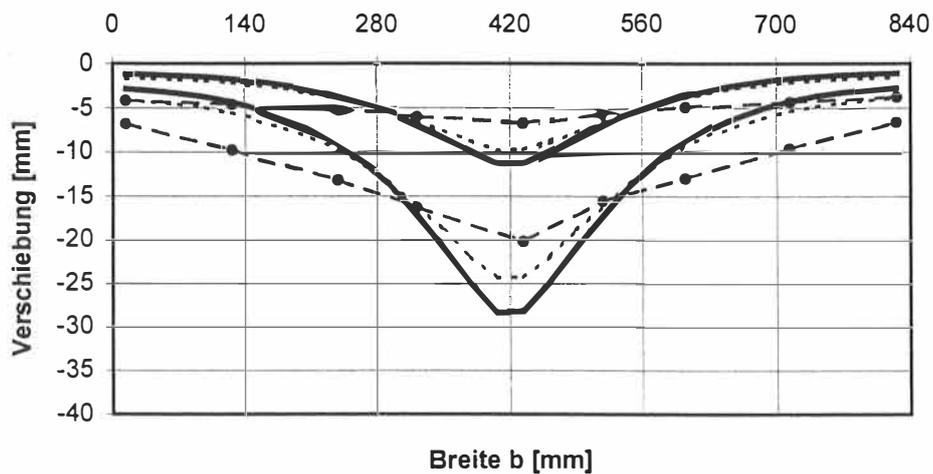


Bild B-59 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F04

ANSYS
 Versuch 2schnittig
 Versuch 3schnittig

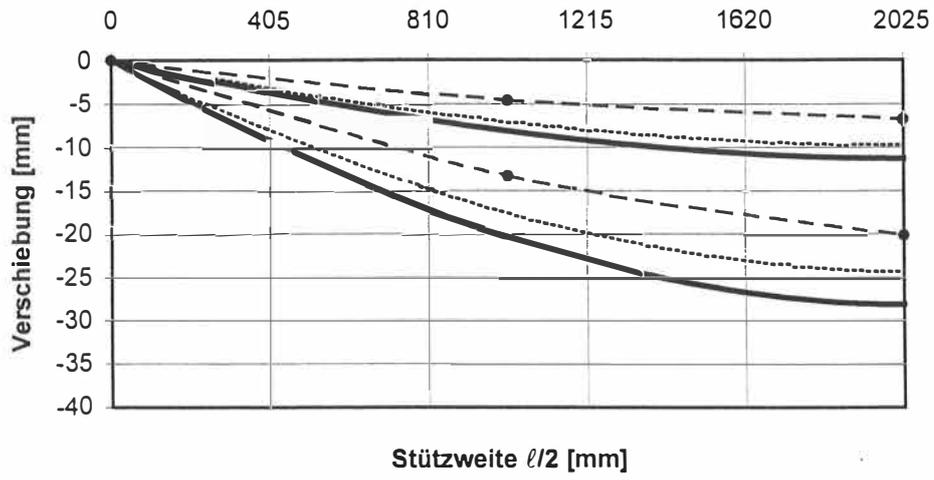


Bild B-60 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F04

ANSYS
 Versuch 2schnittig
 Versuch 3schnittig

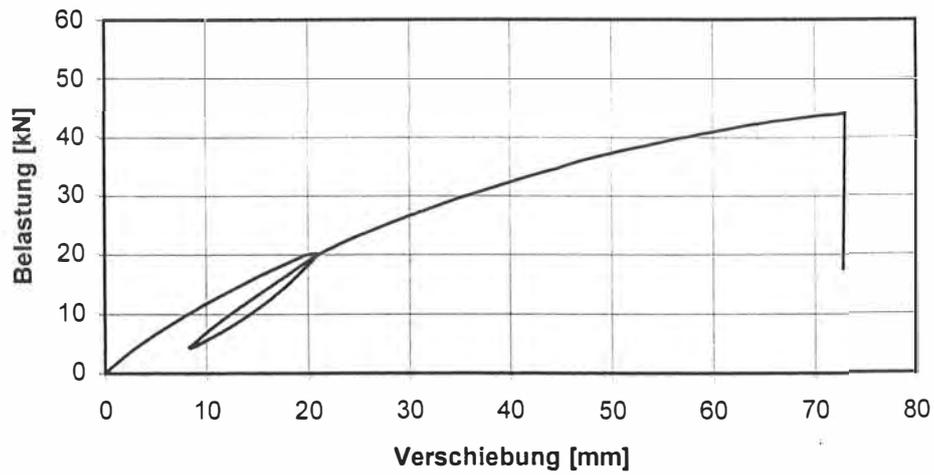


Bild B-61 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F05

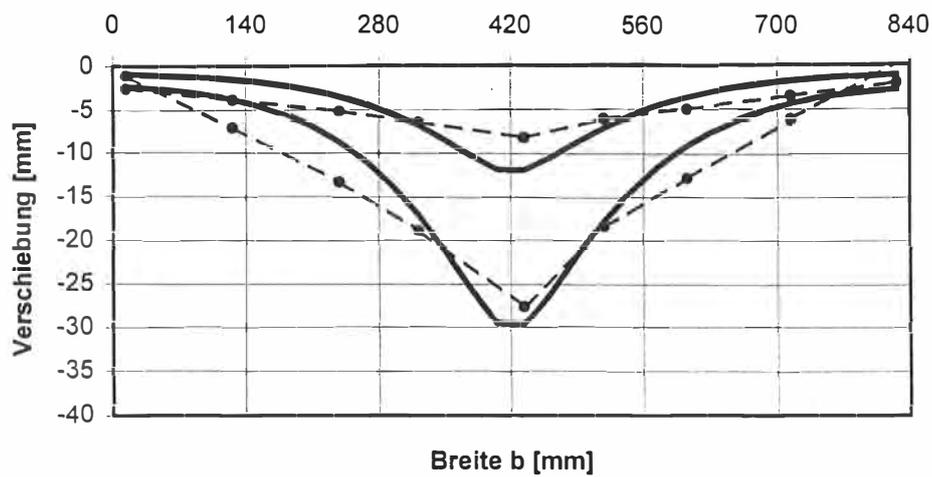


Bild B-62 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F05

— ANSYS - - - Versuch

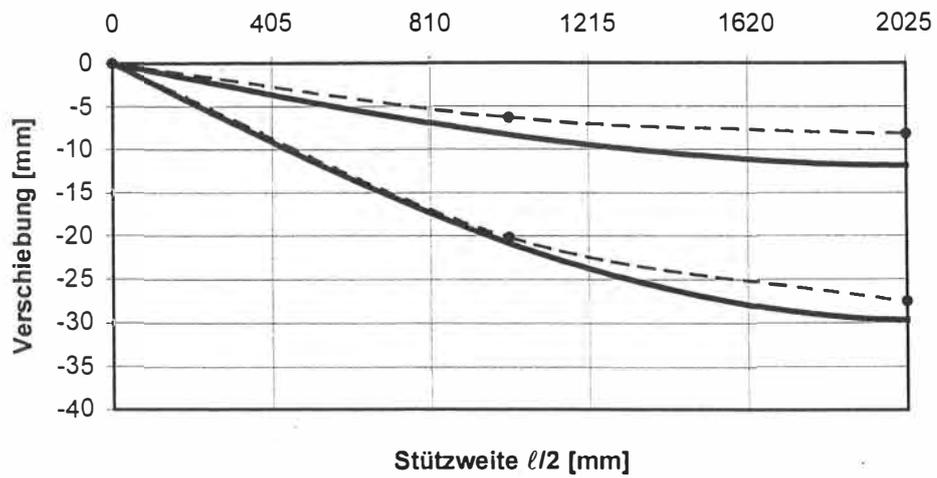


Bild B-63

Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F05

—— ANSYS - - - - Versuch

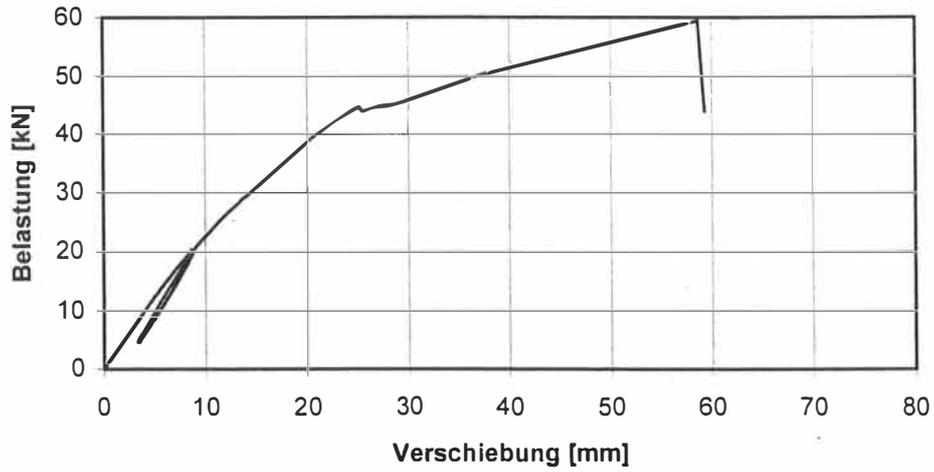


Bild B-64 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F06

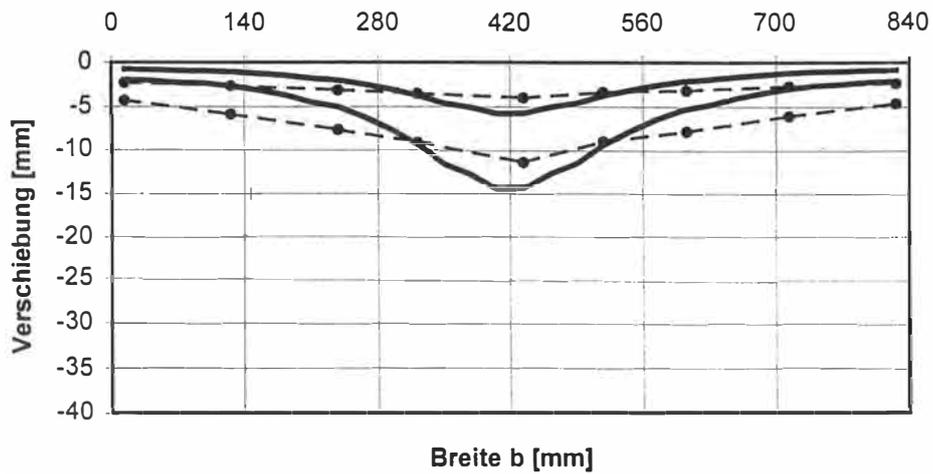


Bild B-65 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F06

— ANSYS - - - - - Versuch

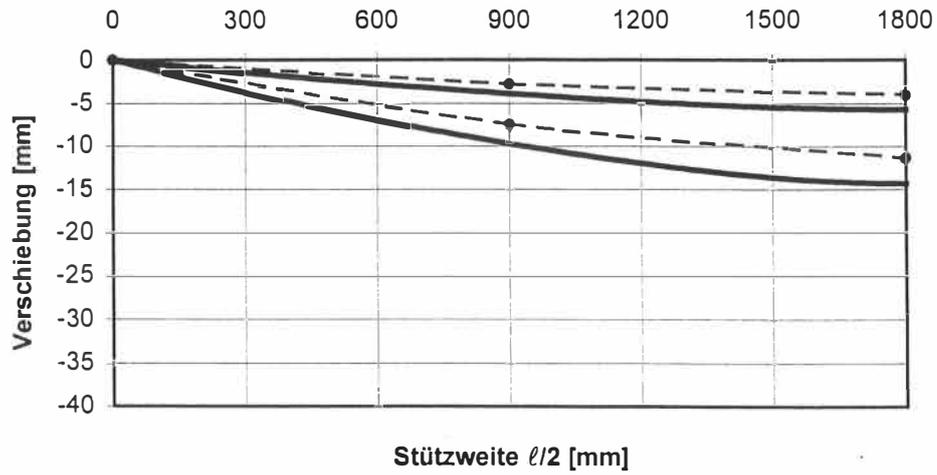


Bild B-66 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F06

— ANSYS - - - Versuch

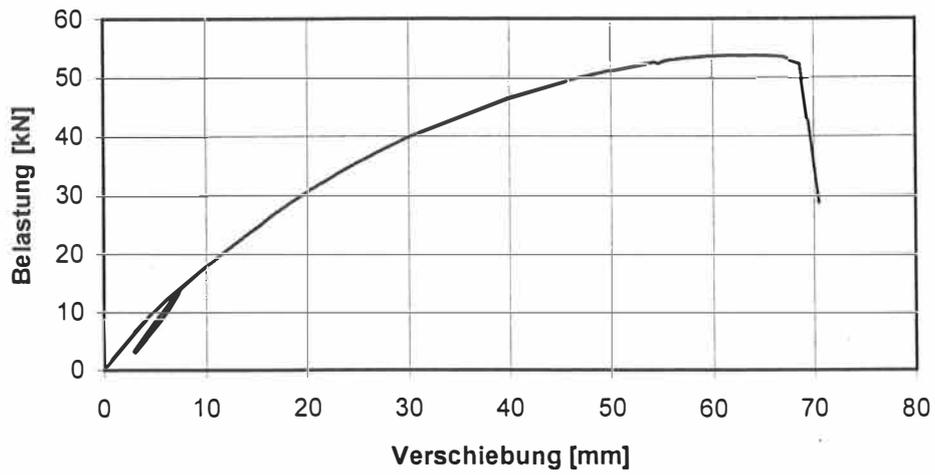


Bild B-67 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F07

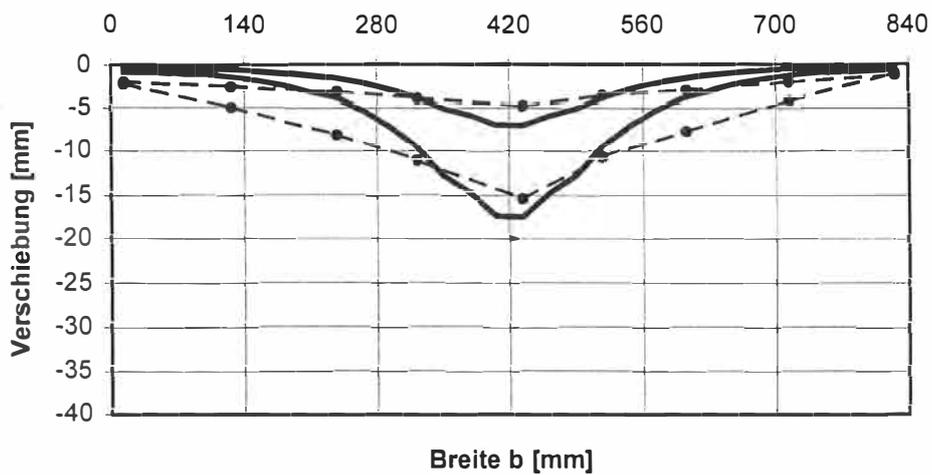


Bild B-68 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F07

— Ansys - - - - - Versuch

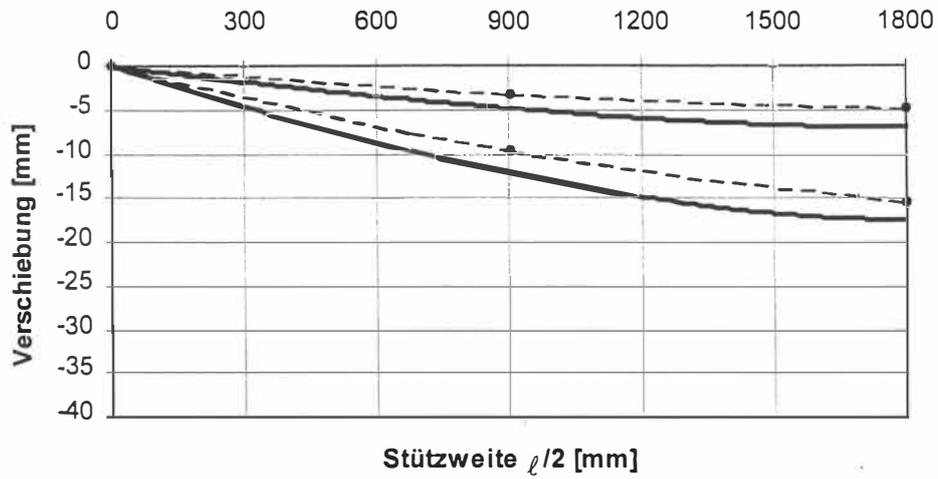


Bild B-69

Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F07

— Ansys - - - Versuch

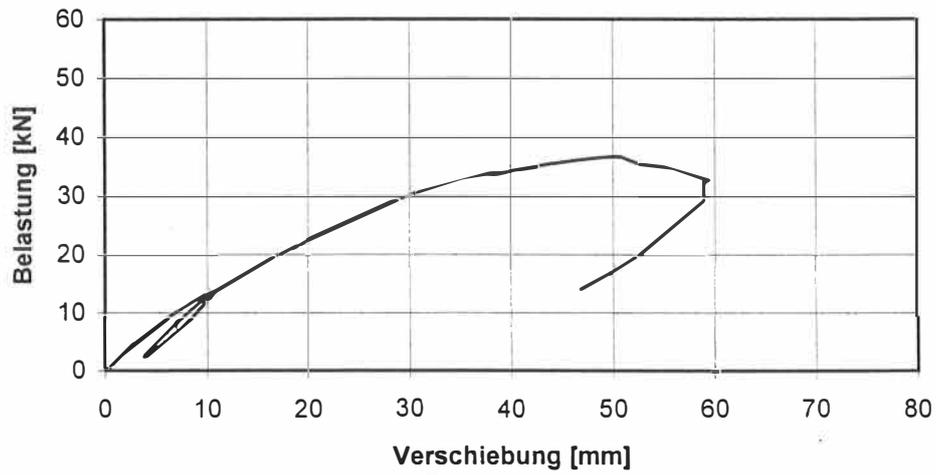


Bild B-70 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F08

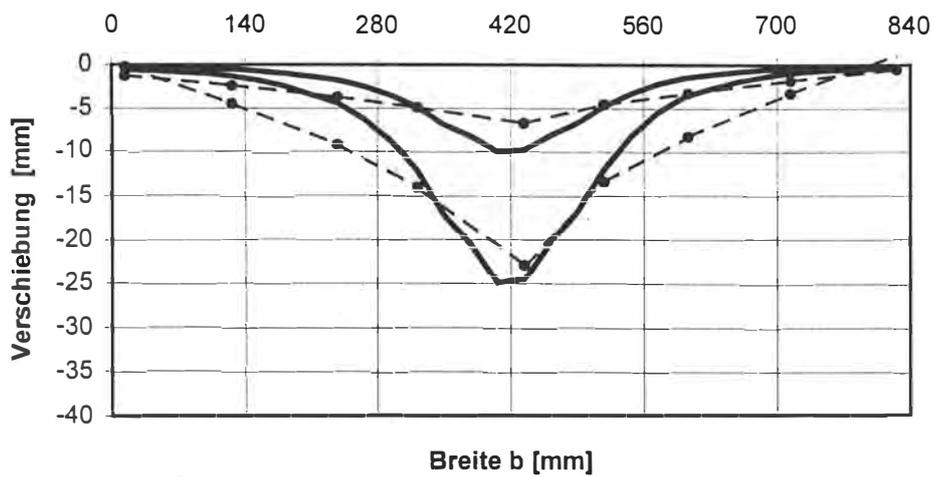


Bild B-71 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F08

— Ansys - - - - - Versuch

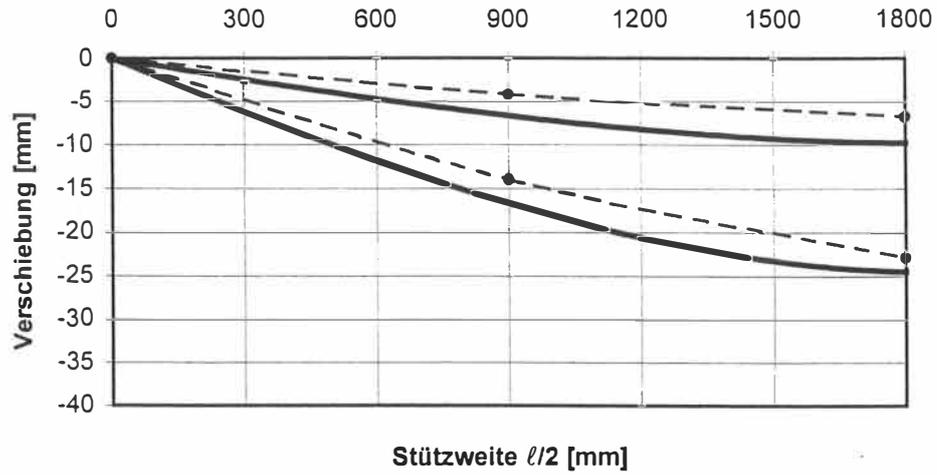


Bild B-72 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F08

— Ansys - - - • - - - Versuch

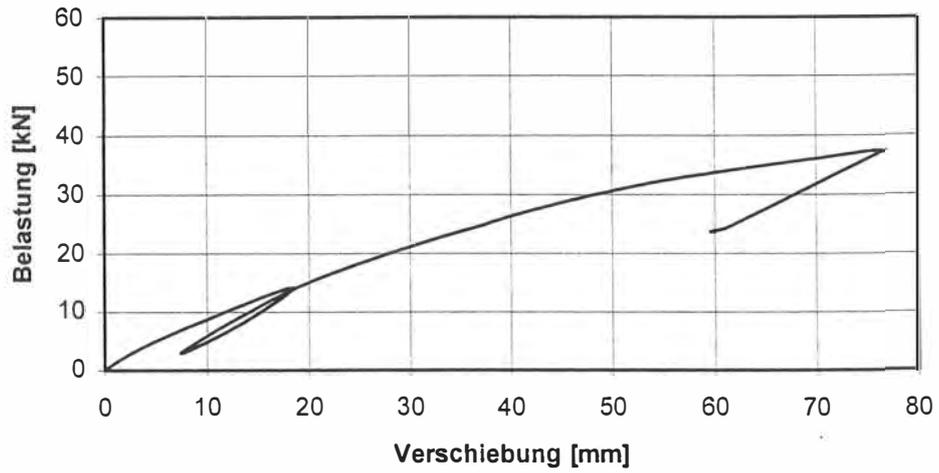


Bild B-73 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F09

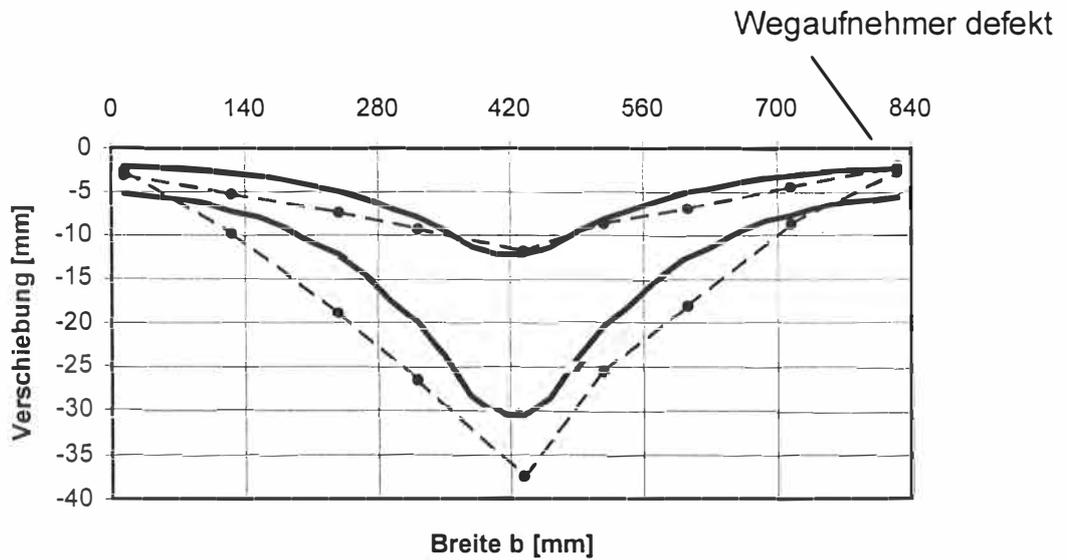


Bild B-74 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F09

— Ansys - - - - - Versuch

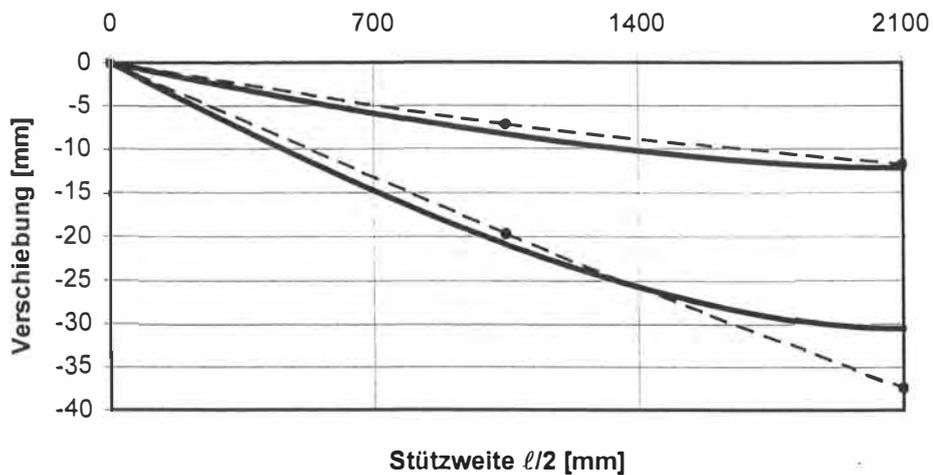


Bild B-75 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F09

— Ansys - - - Versuch

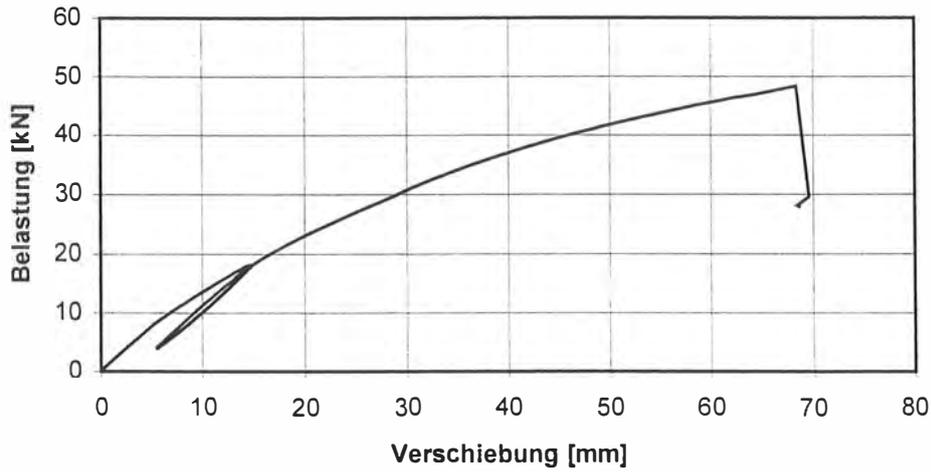


Bild B-76 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F10

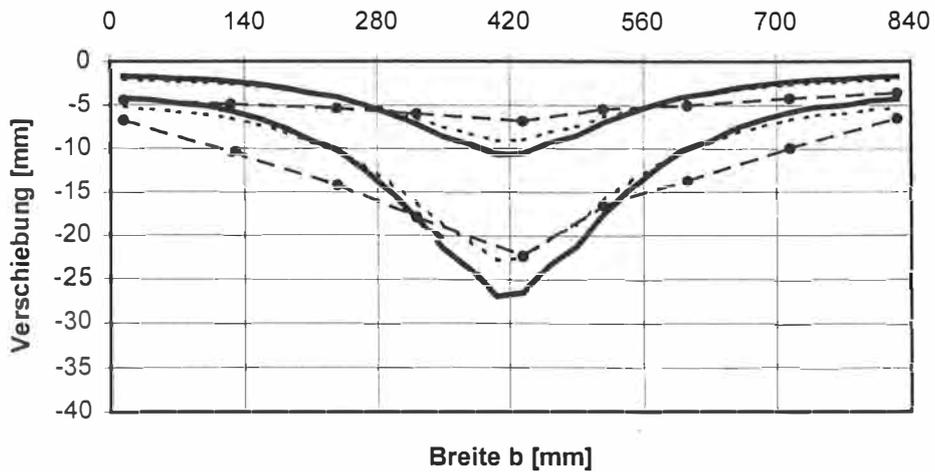


Bild B-77 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F10

Ansys
 Versuch 2schnittig
 Versuch 3schnittig

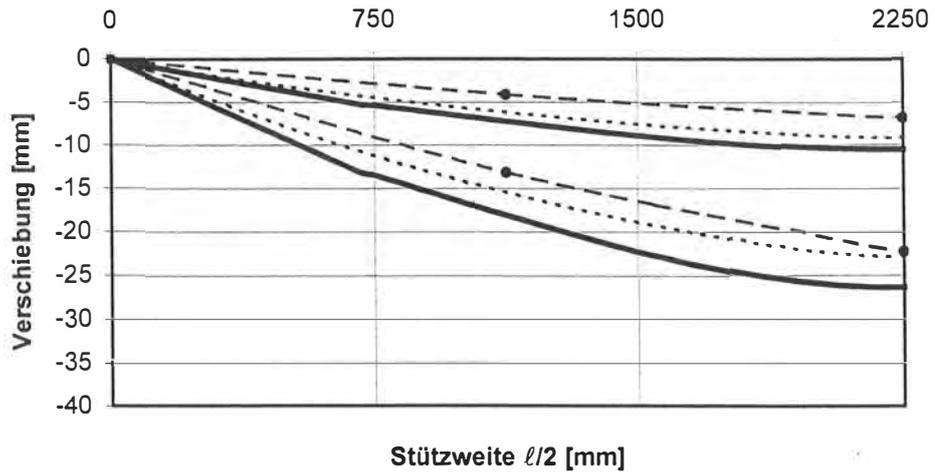


Bild B-78 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei der einer Belastung on 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F 10

Ansys
 Versuch 2schnittig
 Versuch 3schnittig

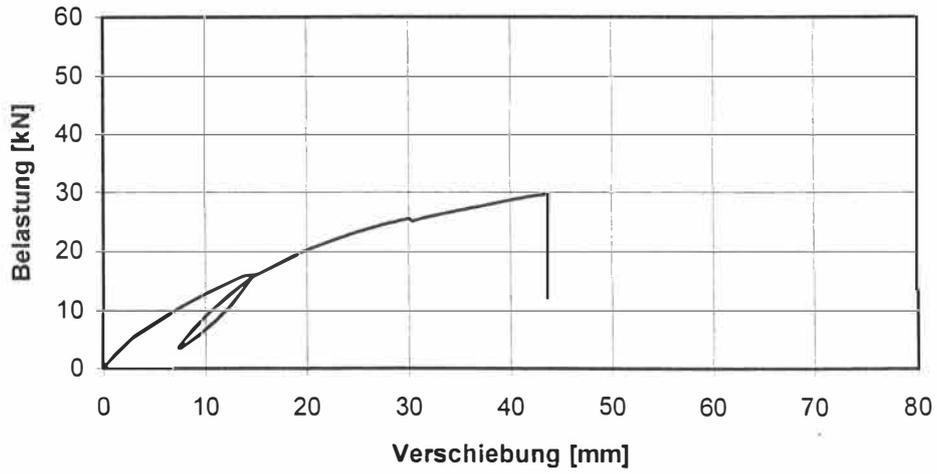


Bild B-79 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F11

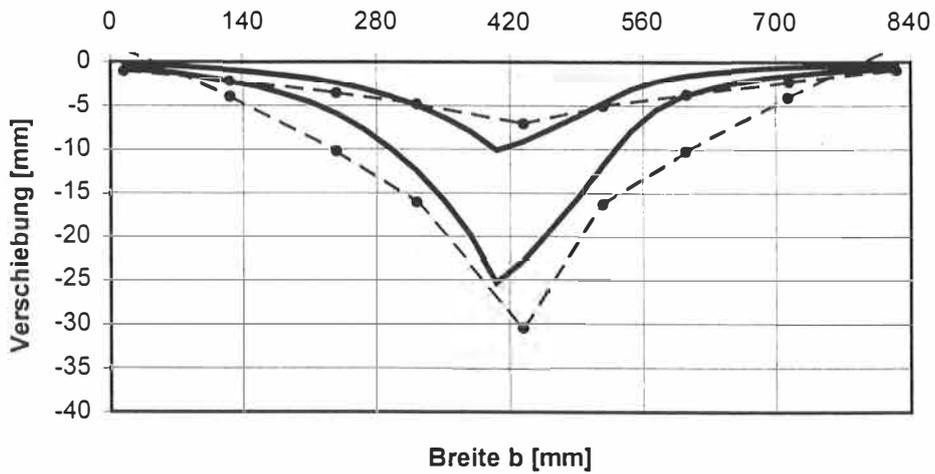


Bild B-80 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F11

— Ansys - - - Versuch

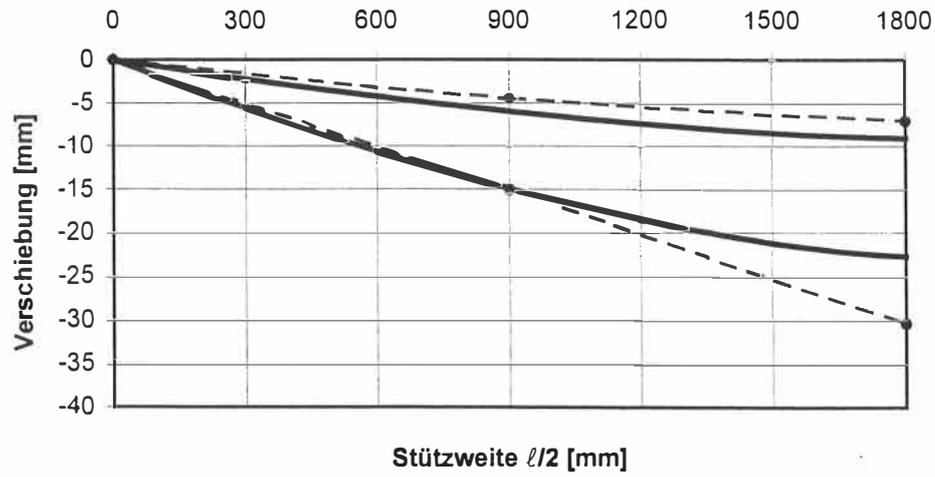


Bild B-81

Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F11

— Ansys

- - - Versuch

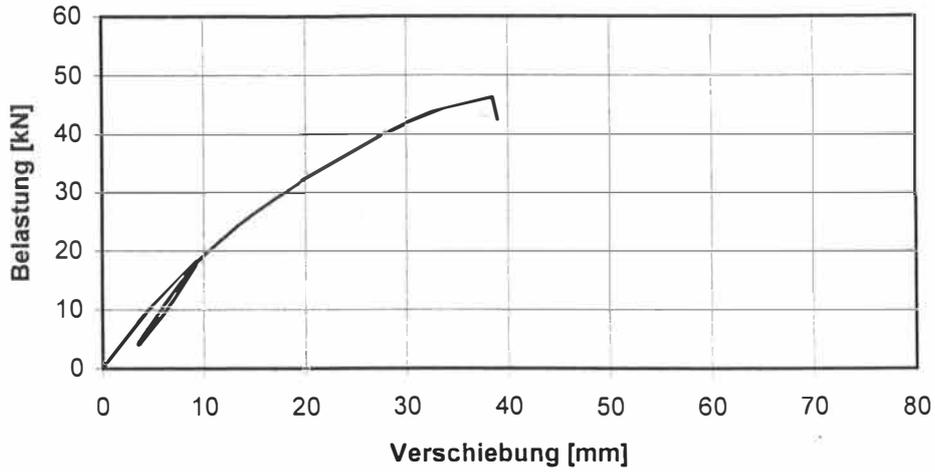


Bild B-82 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F12

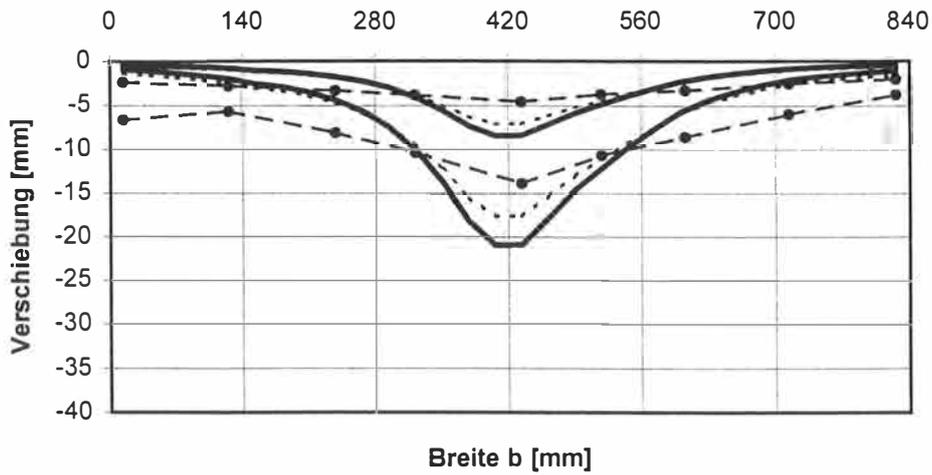


Bild B-83 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F12

Ansys
 Versuch 2schnittig
 Versuch 3schnittig

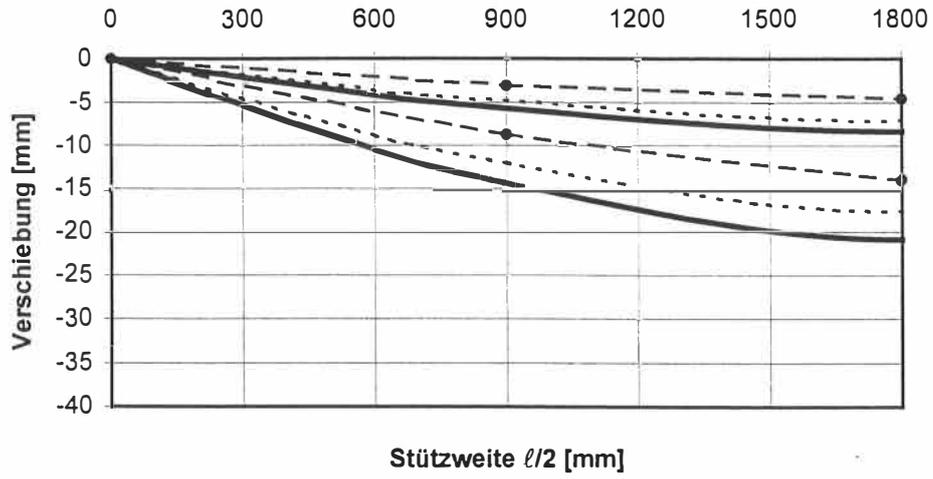


Bild B-84 Vergleich der Biegelinien des belasteten Lamellenstranges bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F12



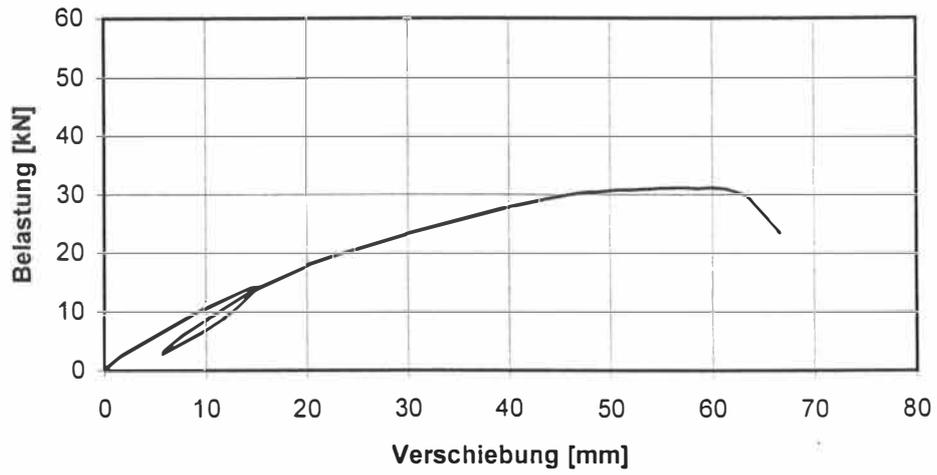


Bild B-85 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F13

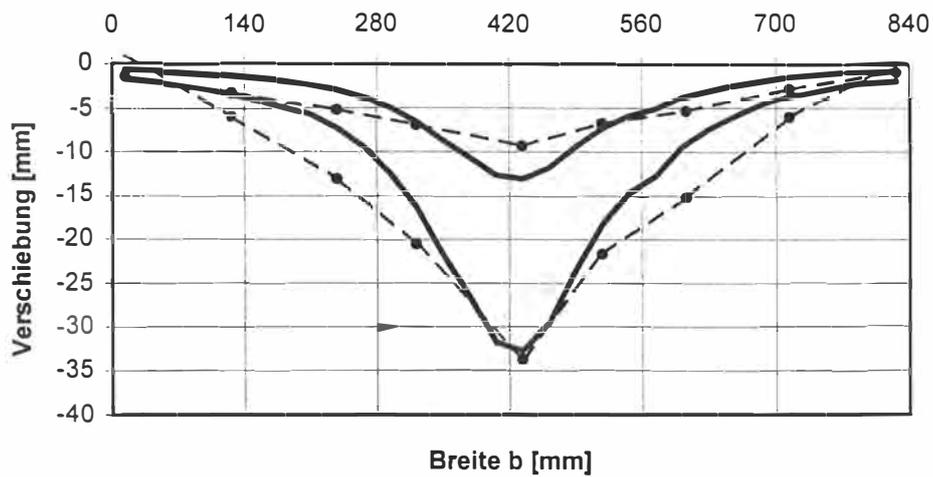


Bild B-86 Vergleich der Verformungen in Querrichtung bei der einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F13

— Ansys -·-·- Versuch

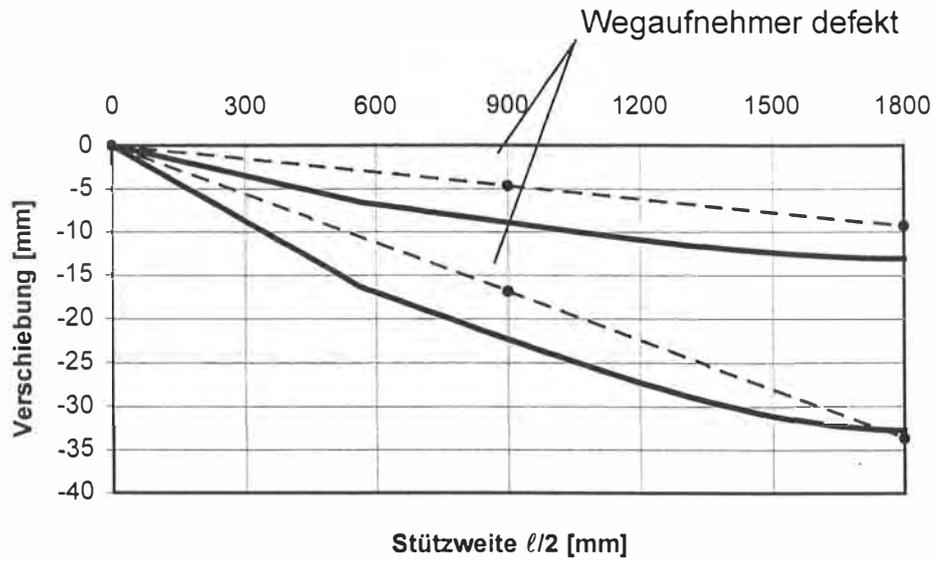


Bild B-87 Vergleich der Verschiebungen des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN des Prüfkörpers F13

— Ansys - - - - - Versuch

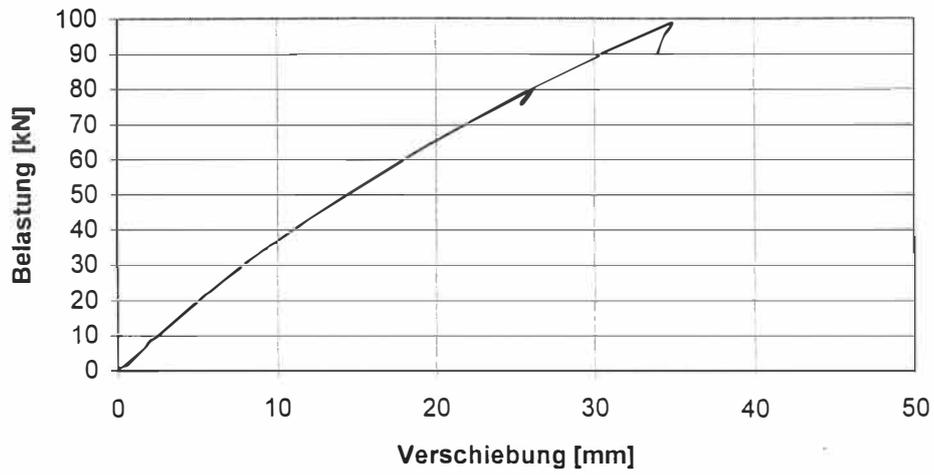


Bild B-88 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F14

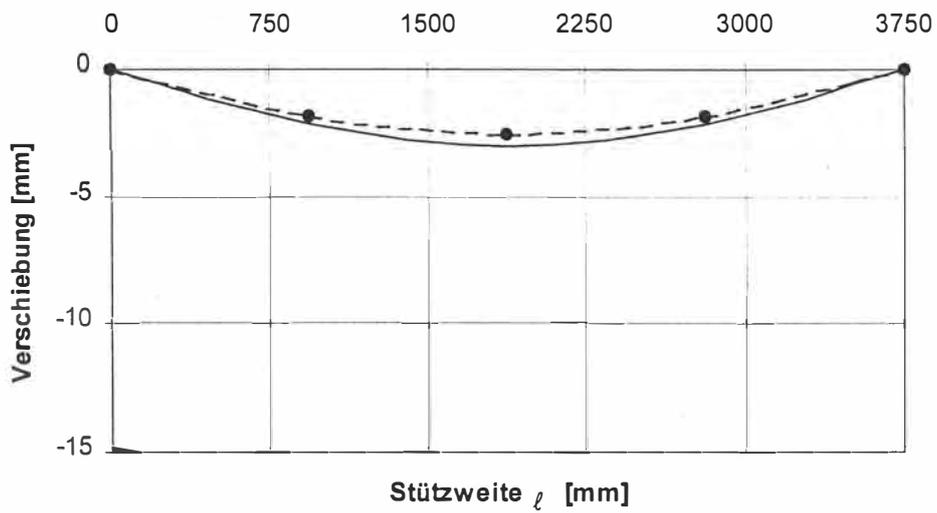


Bild B-89 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F14

—— ANSYS - - - - - Versuch

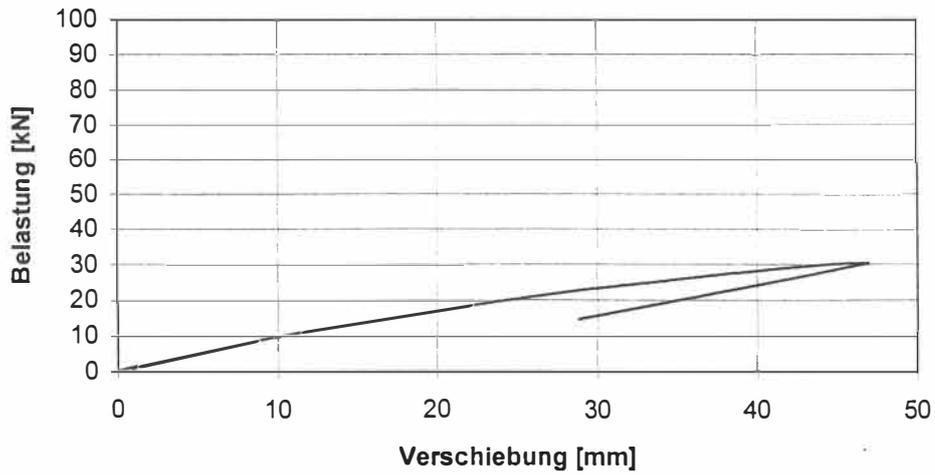


Bild B-90 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F15

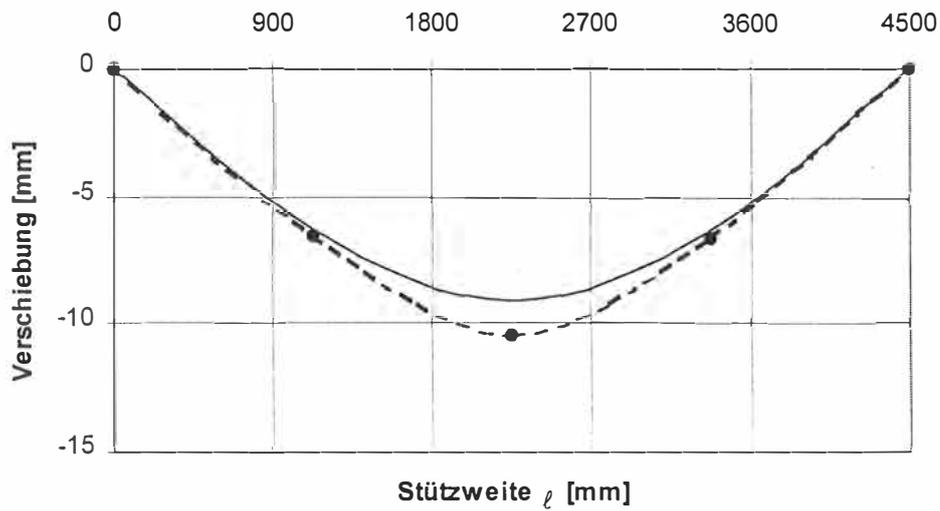


Bild B-91 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F15

—— ANSYS - - - - - Versuch

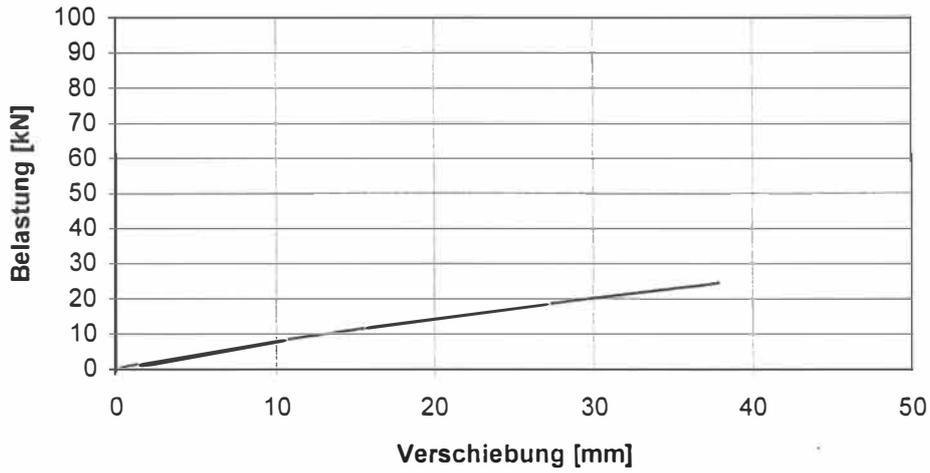


Bild B-92 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F16

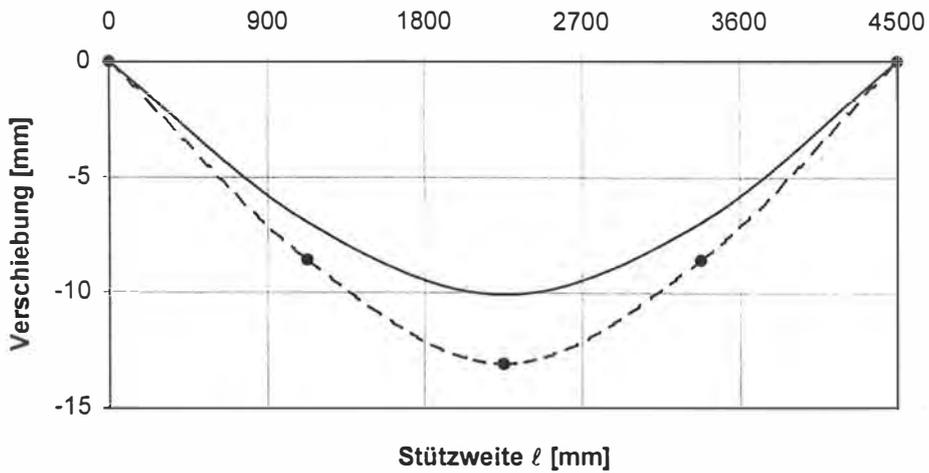


Bild B-93 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F16

—— ANSYS - - - - Versuch

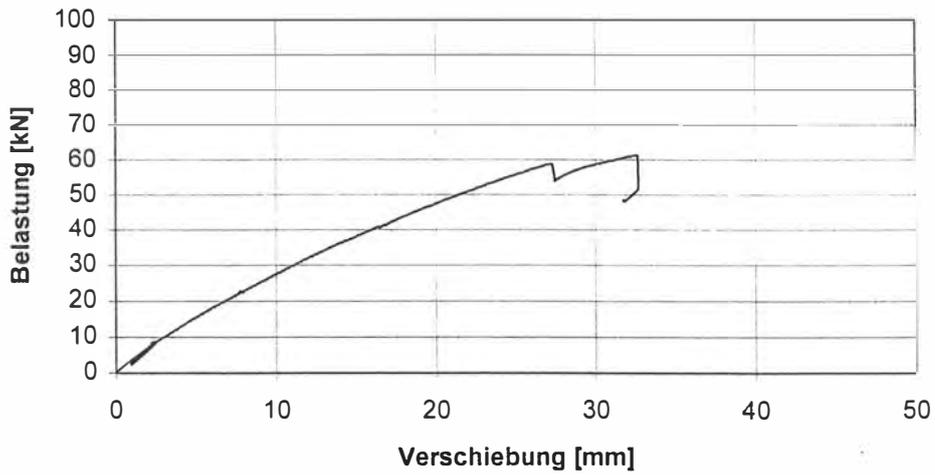


Bild B-94 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F17

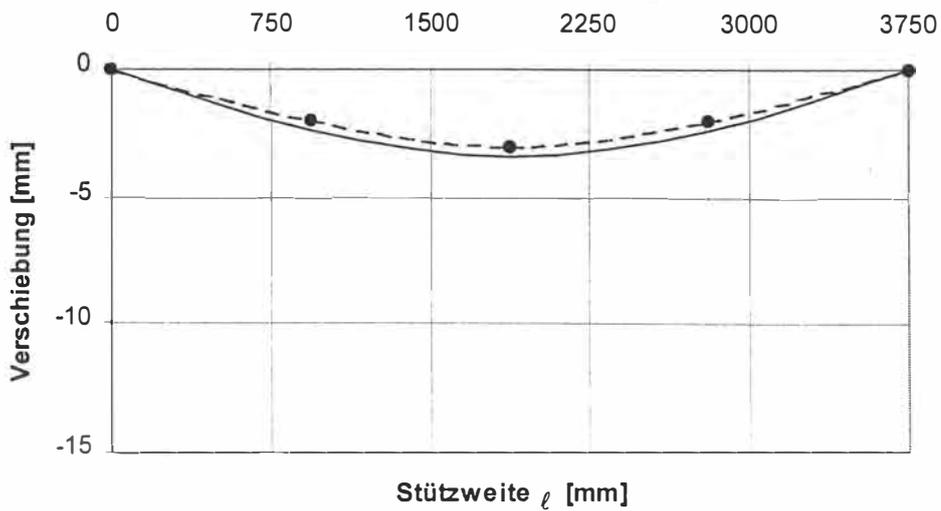


Bild B-95 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F17

—— ANSYS - - - - Versuch

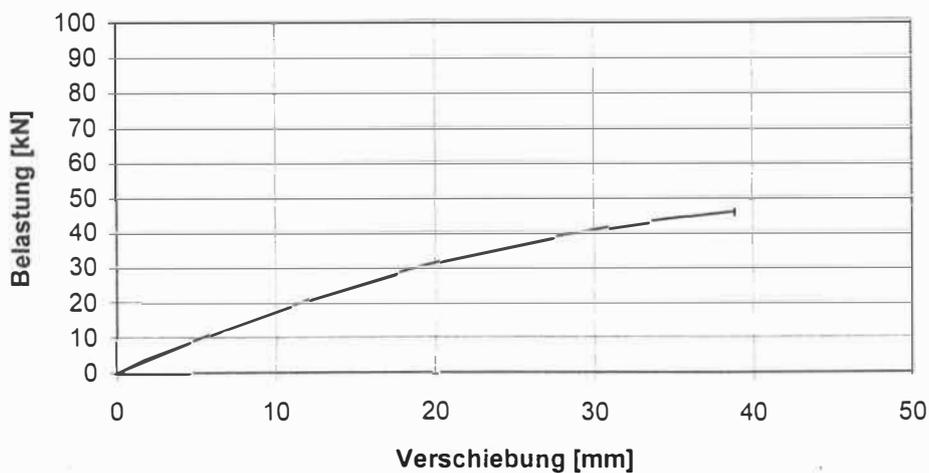


Bild B-96 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F18

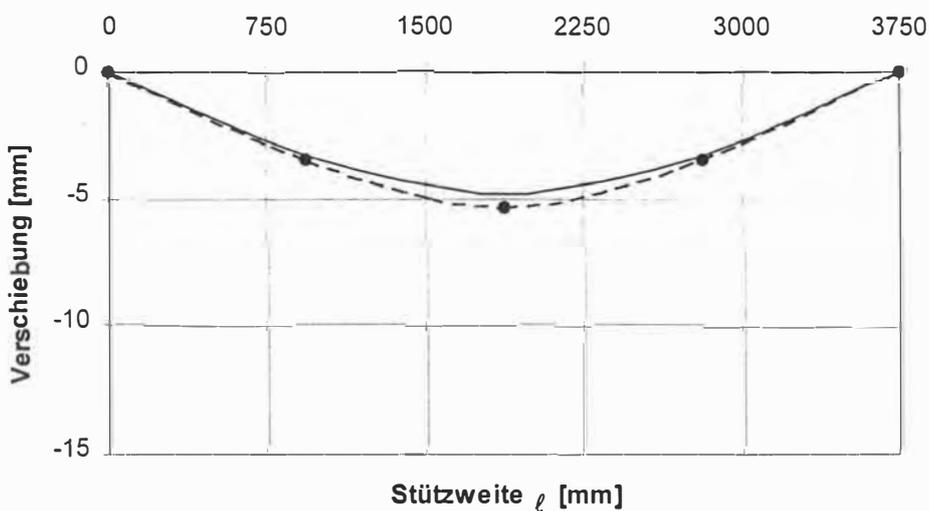


Bild B-97 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F18

— ANSYS - - - Versuch

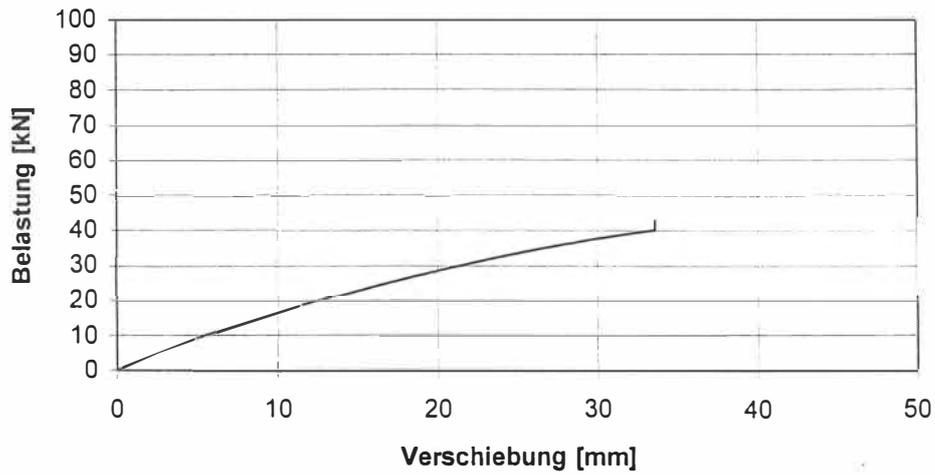


Bild B-98 Last- Verformungskurve des Prüfkörpers F19

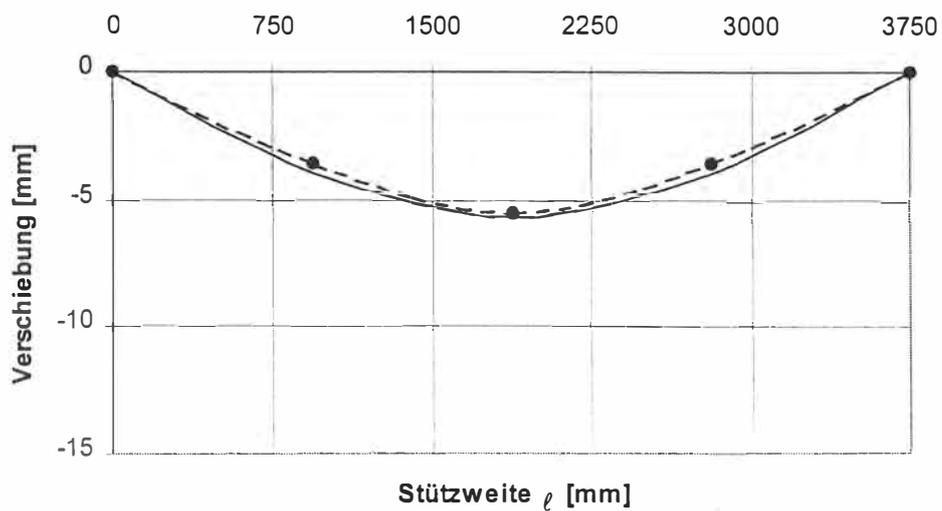


Bild B-99 Vergleich der Biegelinie bei einer Belastung von 10 kN; Prüfkörper F19

— ANSYS - - - Versuch

Tabelle C-1 Simulationsplan; ungestoßene Lamellen; zentrische Einzellast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]
1	140	30	34 x 90	75
2	140	35	38 x 100	75
3	140	40	42 x 120	75
4	160	30	34 x 90	75
5	160	35	38 x 100	75
6	160	40	42 x 120	75
7	180	30	34 x 90	75
8	180	35	38 x 100	75
9	180	40	42 x 120	75
10	140	30	34 x 90	150
11	140	35	38 x 100	150
12	140	40	42 x 120	150
13	160	30	34 x 90	150
14	160	35	38 x 100	150
15	160	40	42 x 120	150
16	180	30	34 x 90	150
17	180	35	38 x 100	150
18	180	40	42 x 120	150
19	140	30	34 x 90	225
20	140	35	38 x 100	225
21	140	40	42 x 120	225
22	160	30	34 x 90	225
23	160	35	38 x 100	225
24	160	40	42 x 120	225
25	180	30	34 x 90	225
26	180	35	38 x 100	225
27	180	40	42 x 120	225
28	140	30	34 x 90	300
29	140	35	38 x 100	300
30	140	40	42 x 120	300
31	160	30	34 x 90	300
32	160	35	38 x 100	300
33	160	40	42 x 120	300
34	180	30	34 x 90	300
35	180	35	38 x 100	300
36	180	40	42 x 120	300

Es wurden 18 000 Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast simuliert.

Tabelle C-2 Simulationsplan; wechselseitig gestoßene Lamellen; zentrische Einzellast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a_1 [mm]	Stoßlage e'
1	160	35	3600	38 x 100	150	1/4
2	160	35	3600	38 x 100	150	1/3
3	160	35	3600	38 x 100	225	1/5
4	160	35	3600	38 x 100	225	1/4
5	160	35	3600	38 x 100	225	1/3
6	160	35	3600	38 x 100	75	1/5
7	160	35	3600	38 x 100	75	1/4
8	160	35	3600	38 x 100	75	1/3
9	140	35	3600	38 x 100	150	1/3
10	140	35	3600	38 x 100	225	1/3
11	140	35	3600	38 x 100	75	1/3
12	180	35	3600	38 x 100	150	1/3
13	180	35	3600	38 x 100	225	1/3
14	180	35	3600	38 x 100	75	1/3
15	160	30	3600	34 x 90	150	1/3
16	160	30	3600	34 x 90	225	1/3
17	160	30	3600	34 x 90	75	1/3
18	160	40	3600	42 x 120	150	1/3
19	160	40	3600	42 x 120	225	1/3
20	160	40	3600	42 x 120	75	1/3

Es wurden 10 000 Brettstapelelemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast simuliert.

Tabelle C-3 Simulationsplan; wandernd gestoßene Lamellen; zentrische Einzellast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10 mm x mm]	Nagelabstand a_1 [mm]	$l_{\bar{u}}^1$ [mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150	600
2	160	35	3600	38 x 100	150	900
3	160	35	3600	38 x 100	225	600
4	160	35	3600	38 x 100	225	900
5	160	35	3600	38 x 100	75	600
6	160	35	3600	38 x 100	75	900
7	140	35	3600	38 x 100	150	600
8	140	35	3600	38 x 100	225	600
9	140	35	3600	38 x 100	75	600
10	180	35	3600	38 x 100	150	600
11	180	35	3600	38 x 100	225	600
12	180	35	3600	38 x 100	75	600
13	160	30	3600	34 x 90	150	600
14	160	30	3600	34 x 90	225	600
15	160	30	3600	34 x 90	75	600
16	160	40	3600	42 x 120	150	600
17	160	40	3600	42 x 120	225	600
18	160	40	3600	42 x 120	75	600

¹ $l_{\bar{u}}$ entspricht der Übergreifungslänge

Es wurden 9 000 Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast simuliert.

Tabelle C-4 Simulationsplan; zufällig gestoßene Lamellen; zentrische Einzellast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10 mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150
2	160	35	3600	38 x 100	75
3	160	35	3600	38 x 100	225
4	140	35	3600	38 x 100	150
5	140	35	3600	38 x 100	75
6	140	35	3600	38 x 100	225
7	180	35	3600	38 x 100	150
8	180	35	3600	38 x 100	75
9	180	35	3600	38 x 100	225
10	160	30	3600	34 x 90	150
11	160	30	3600	34 x 90	75
12	160	30	3600	34 x 90	225
13	160	40	3600	42 x 120	150
14	160	40	3600	42 x 120	75
15	160	40	3600	42 x 120	225

Es wurden 7 500 Brettstapelelemente mit zufällig gestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast simuliert.

Tabelle C-5 Simulationsplan; wechselseitig gestoßene Lamellen; gleichförmige Flächenlast.

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a_1 [mm]	Stoßlage ℓ'
1	160	35	3600	38 x 100	150	1/5
2	160	35	3600	38 x 100	150	1/4
3	160	35	3600	38 x 100	150	1/3
4	160	35	3600	38 x 100	225	1/5
5	160	35	3600	38 x 100	225	1/4
6	160	35	3600	38 x 100	225	1/3
7	160	35	3600	38 x 100	75	1/5
8	160	35	3600	38 x 100	75	1/4
9	160	35	3600	38 x 100	75	1/3
10	140	35	3600	38 x 100	150	1/3
11	140	35	3600	38 x 100	225	1/3
12	140	35	3600	38 x 100	75	1/3
13	180	35	3600	38 x 100	150	1/3
14	180	35	3600	38 x 100	225	1/3
15	180	35	3600	38 x 100	75	1/3
16	160	30	3600	34 x 90	150	1/3
17	160	30	3600	34 x 90	225	1/3
18	160	30	3600	34 x 90	75	1/3
19	160	40	3600	42 x 120	150	1/3
20	160	40	3600	42 x 120	225	1/3
21	160	40	3600	42 x 120	75	1/3

Es wurden 10 500 Brettstapelelemente mit wechselseitig gestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast simuliert.

Tabelle C-6 Simulationsplan; wandernd gestoßene Lamellen; gleichförmige Flächenlast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]	ℓ _ü ¹ [mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150	600
2	160	35	3600	38 x 100	150	900
3	160	35	3600	38 x 100	225	600
4	160	35	3600	38 x 100	225	900
5	160	35	3600	38 x 100	75	600
6	160	35	3600	38 x 100	75	900
7	140	35	3600	38 x 100	150	600
8	140	35	3600	38 x 100	225	600
9	140	35	3600	38 x 100	75	600
10	180	35	3600	38 x 100	150	600
11	180	35	3600	38 x 100	225	600
12	180	35	3600	38 x 100	75	600
13	160	30	3600	34 x 90	150	600
14	160	30	3600	34 x 90	225	600
15	160	30	3600	34 x 90	75	600
16	160	40	3600	42 x 120	150	600
17	160	40	3600	42 x 120	225	600
18	160	40	3600	42 x 120	75	600

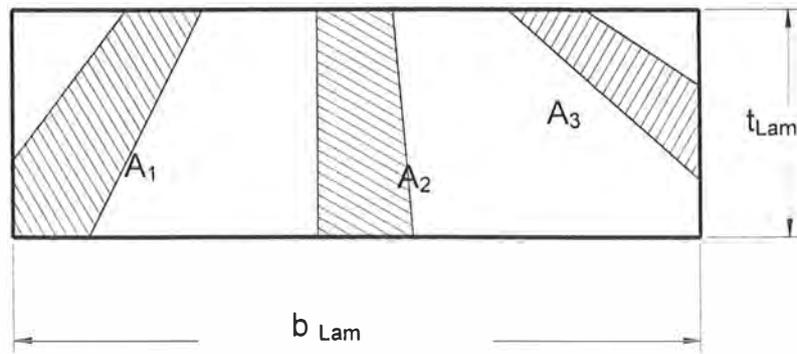
¹ ℓ_ü entspricht der Übergreifungslänge

Es wurden 9 000 Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast simuliert.

Tabelle C-7 Simulationsplan; zufällig gestoßene Lamellen; gleichförmige Flächenlast

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150
2	160	35	3600	38 x 100	75
3	160	35	3600	38 x 100	225
4	140	35	3600	38 x 100	150
5	140	35	3600	38 x 100	75
6	140	35	3600	38 x 100	225
7	180	35	3600	38 x 100	150
8	180	35	3600	38 x 100	75
9	180	35	3600	38 x 100	225
10	160	30	3600	34 x 90	150
11	160	30	3600	34 x 90	75
12	160	30	3600	34 x 90	225
13	160	40	3600	42 x 120	150
14	160	40	3600	42 x 120	75
15	160	40	3600	42 x 120	225

Es wurden 7 500 Brettstapelelemente mit zufällig gestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast simuliert.



$$\text{KAR} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{b_{\text{Lam}} \cdot t_{\text{Lam}}}$$

Bild D-1 Berechnung des KAR- Wertes

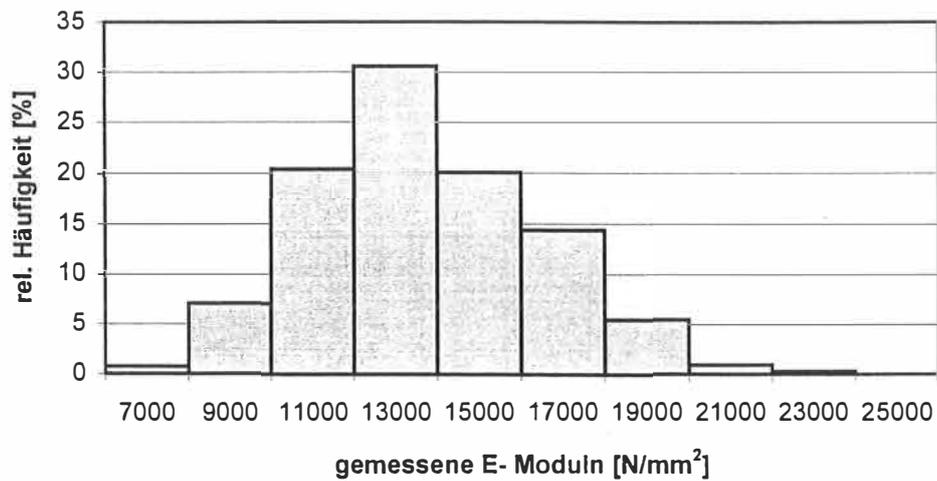


Bild D-2 Häufigkeitsverteilung der mittleren Elastizitätsmoduln; 932 Werte
Mittelwert = 12660 N/mm²; Standardabweichung = 2720 N/mm²

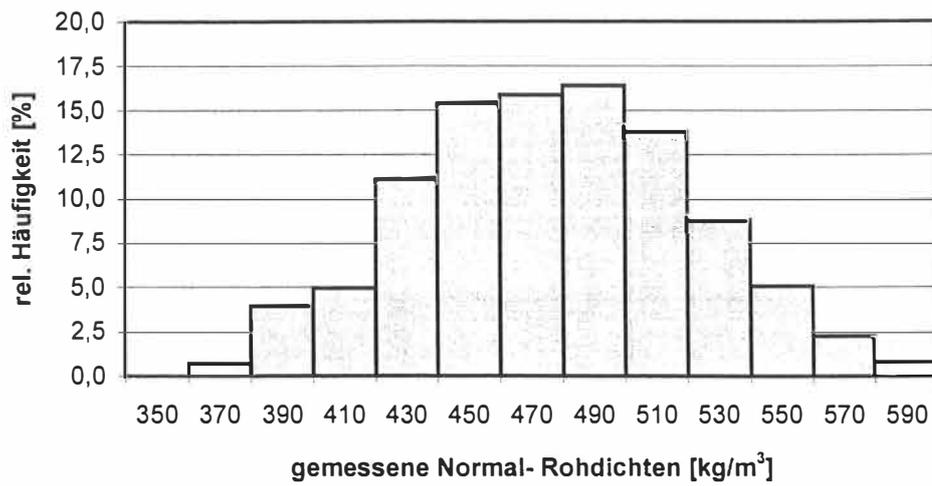


Bild D-3

Häufigkeitsverteilung der mittleren Rohdichten; 932 Werte
 Mittelwert = 468 kg/m³; Standardabweichung = 45,9 kg/m³

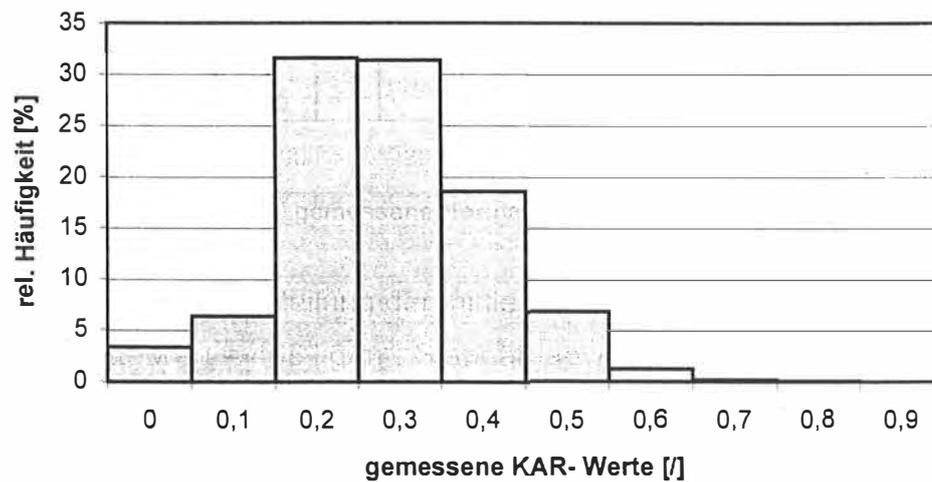


Bild D-4

Häufigkeitsverteilung der maximalen KAR- Werte; 932 Werte

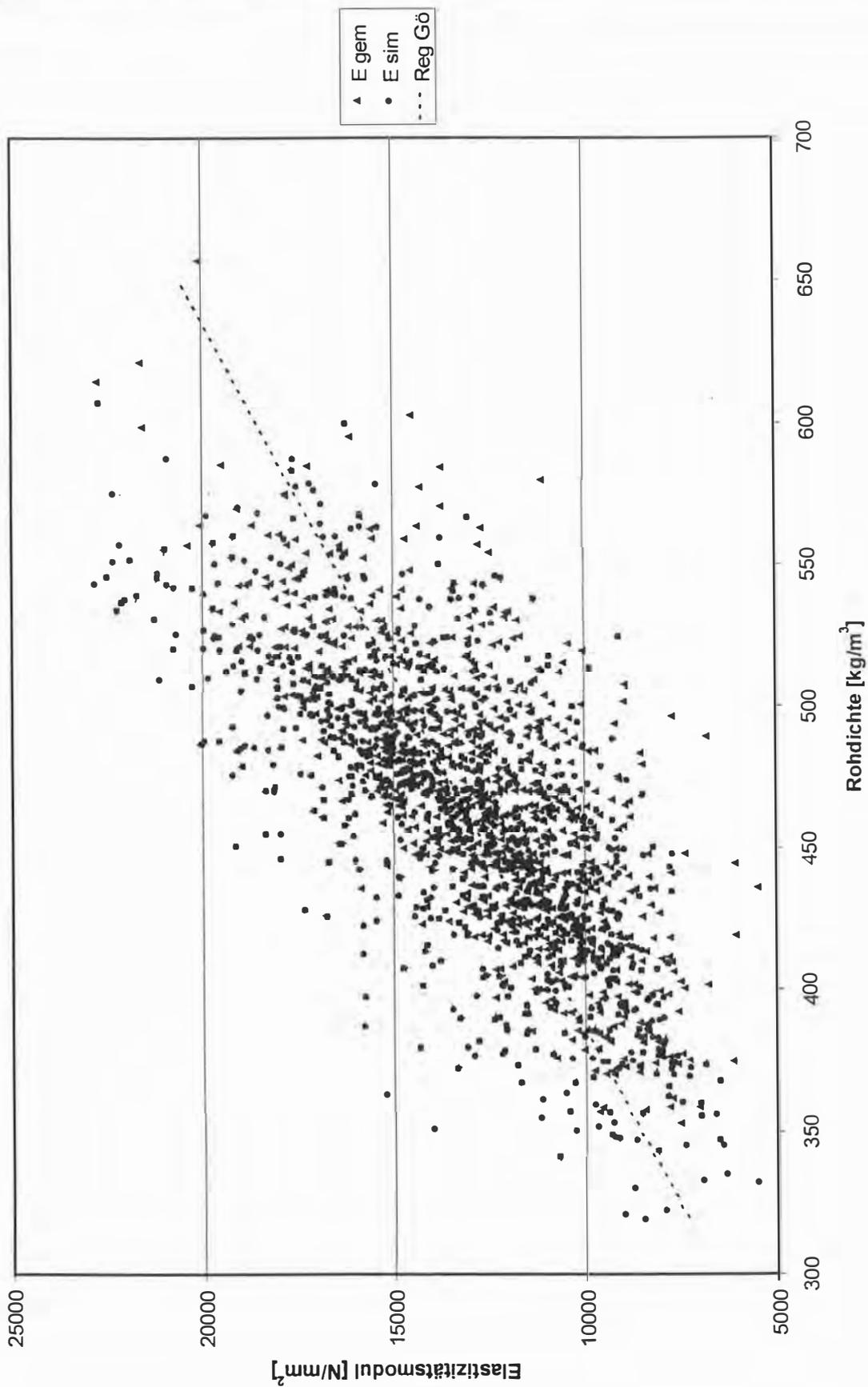


Bild D-5 Vergleich der gemessenen mittleren Elastizitätsmoduln mit simulierten Elastizitätsmoduln, abgetragen über die mittlere Normal- Rohdichte; 932 Werte

In [18] gibt Görlacher eine Regressionsgleichung zur Berechnung des mittleren Elastizitätsmoduls über die Rohdichte von Lamellen an:

$$E_{\text{Lam}} = -5520 + 4070 \cdot \rho_{\text{Lam}}$$

Diese Regressionsgleichung ist in Bild D-5 als „Reg Gö“ eingezeichnet und zeigt eine gute Übereinstimmung mit den linearen Regressionen aus den Messungen und den Simulationen.

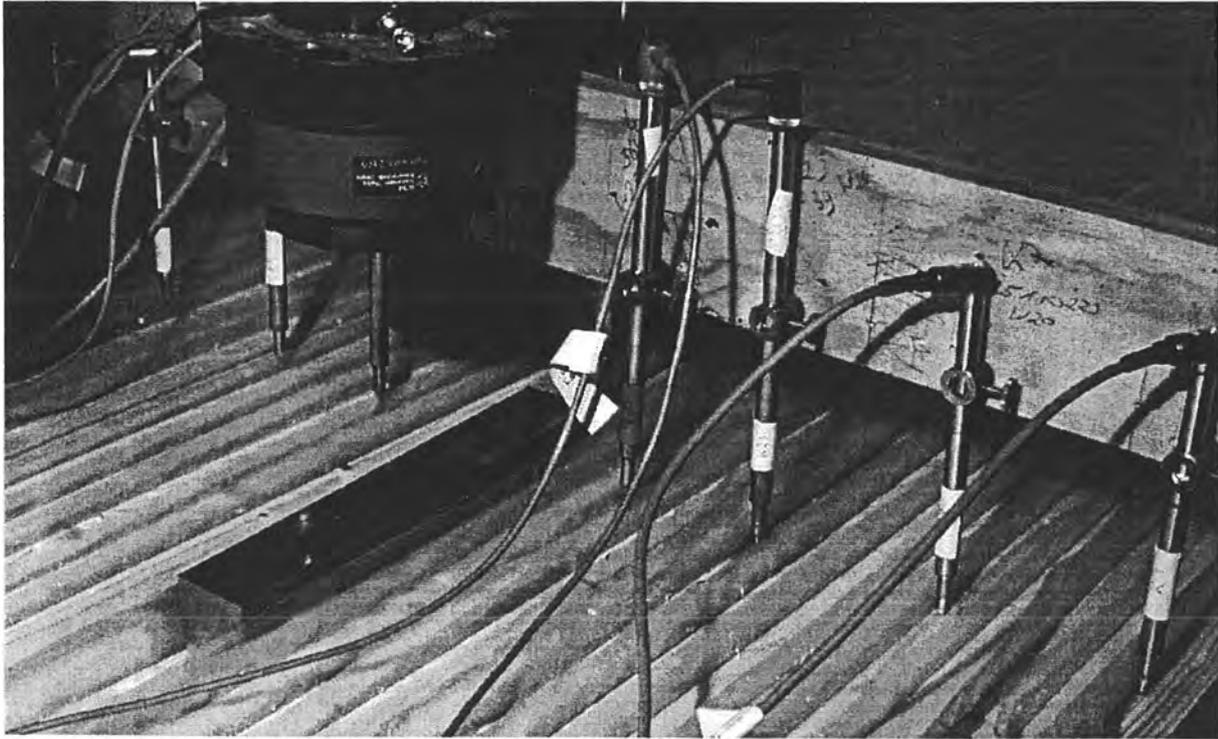


Bild E-1 Lasteinleitung und Wegaufnehmer – zentrische Einzellast

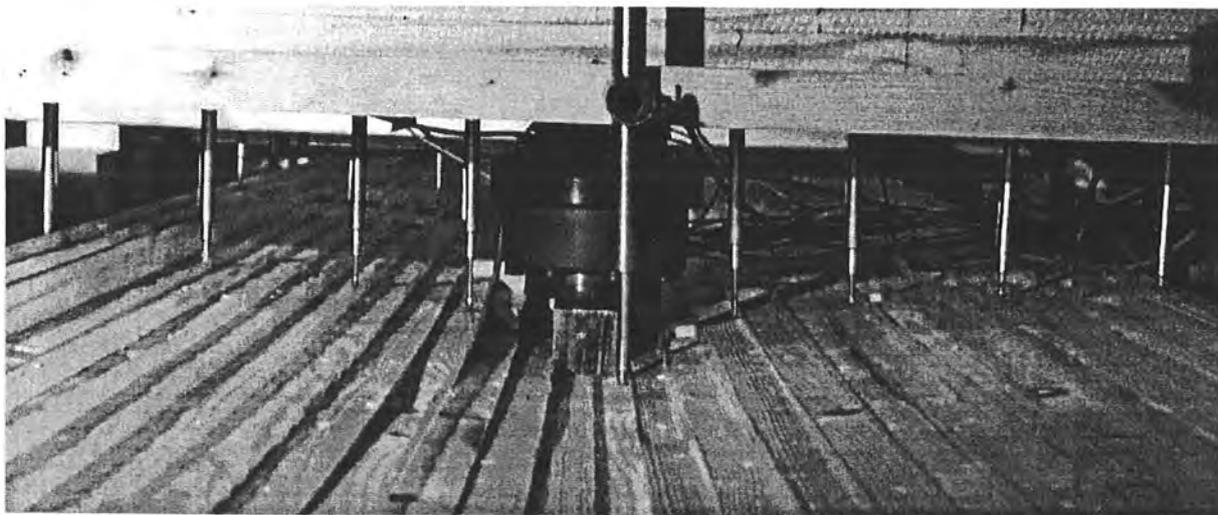


Bild E-2 Verformungsfigur – zentrische Einzellast

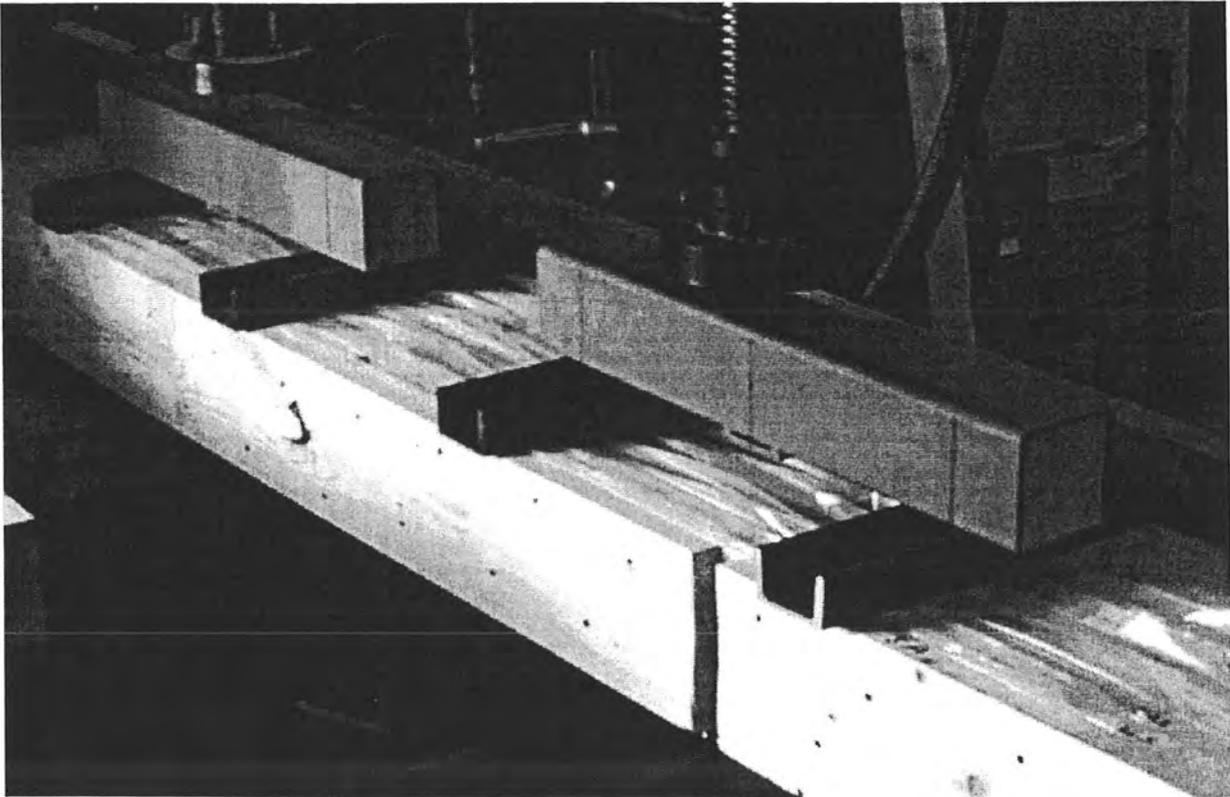


Bild E-3 Lasteinleitung – gleichförmige Flächenlast

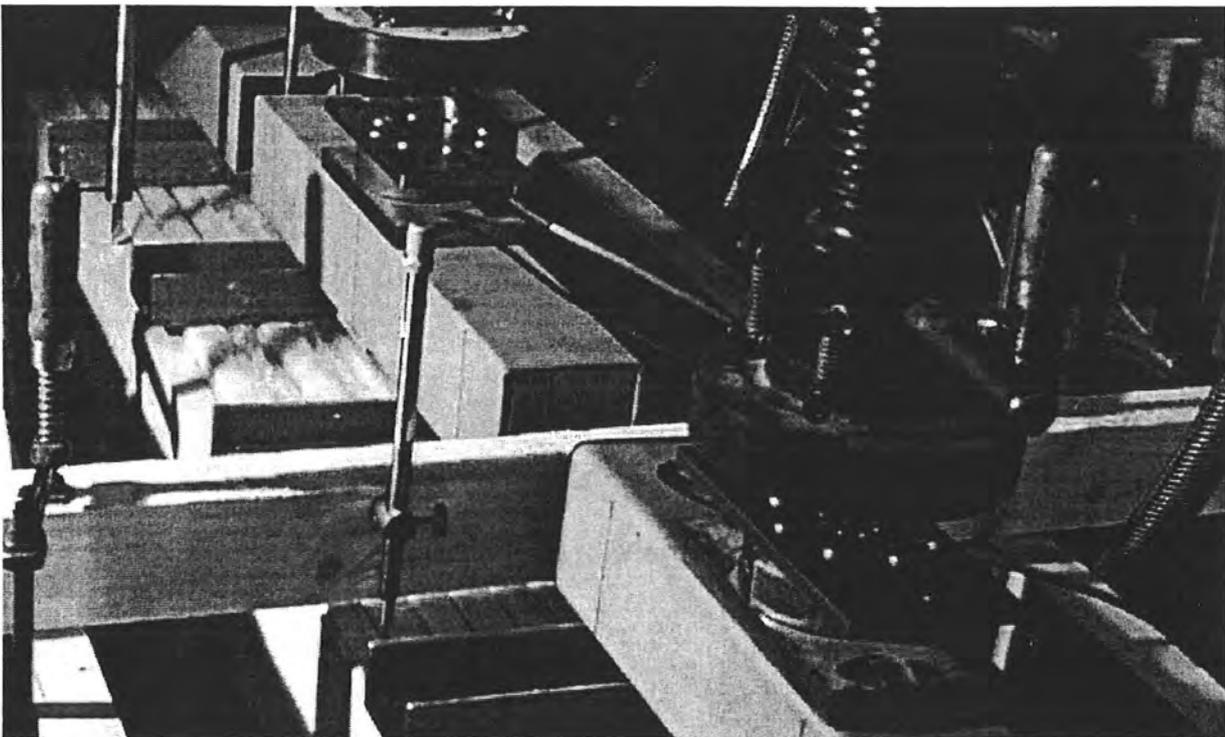


Bild E-4 Lasteinleitung und Wegaufnehmer – gleichförmige Flächenlast

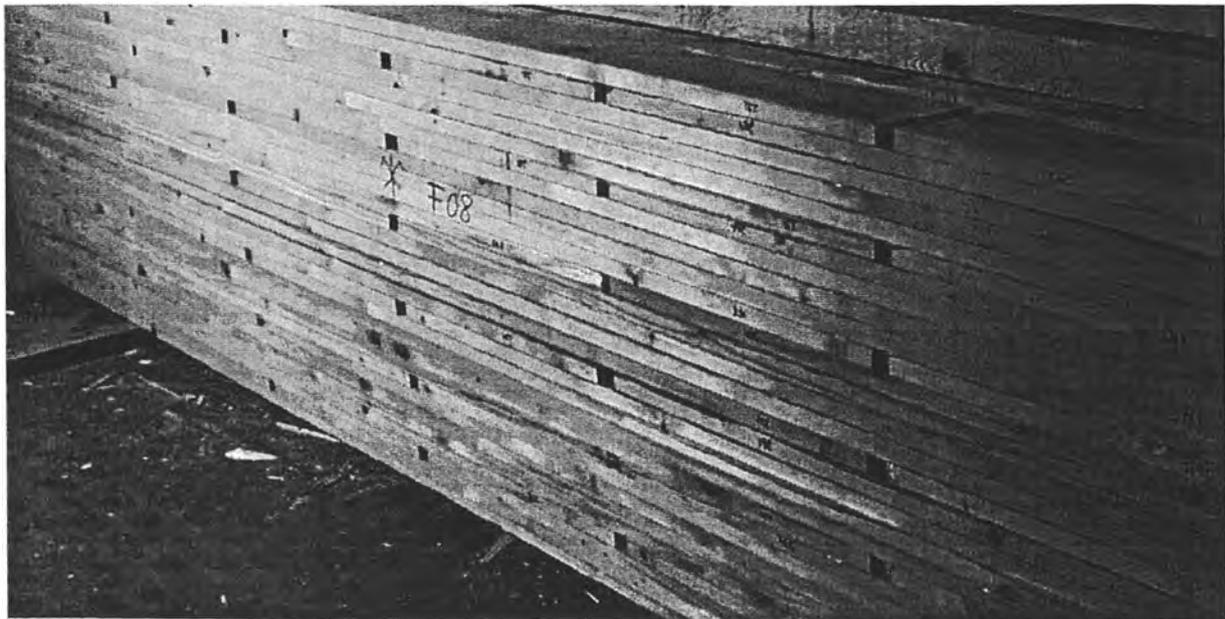


Bild E-5 Prüfkörper mit wandernd gestoßenen Lamellen



Bild E-6 Prüfkörper mit zufällig verteilten Stößen nach Erreichen der Bruchlast

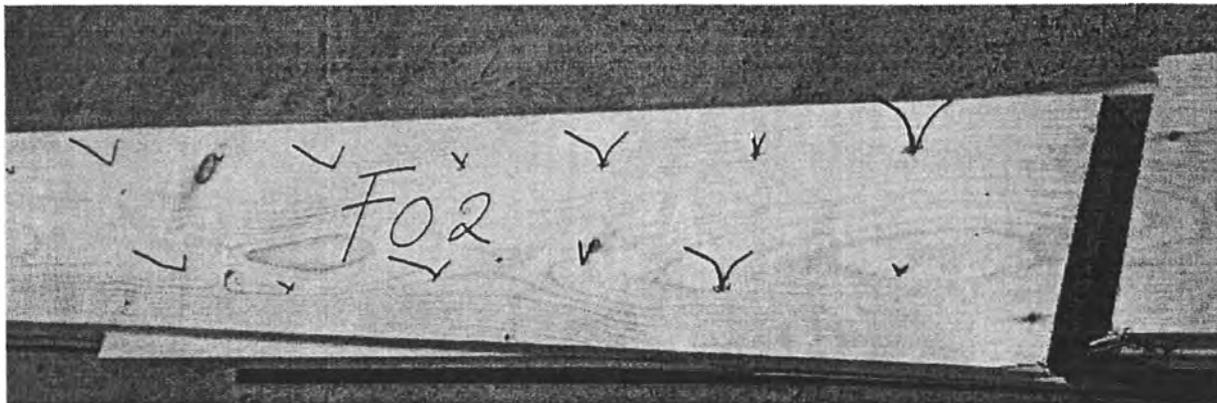


Bild E-7 geöffnete Prüfkörper

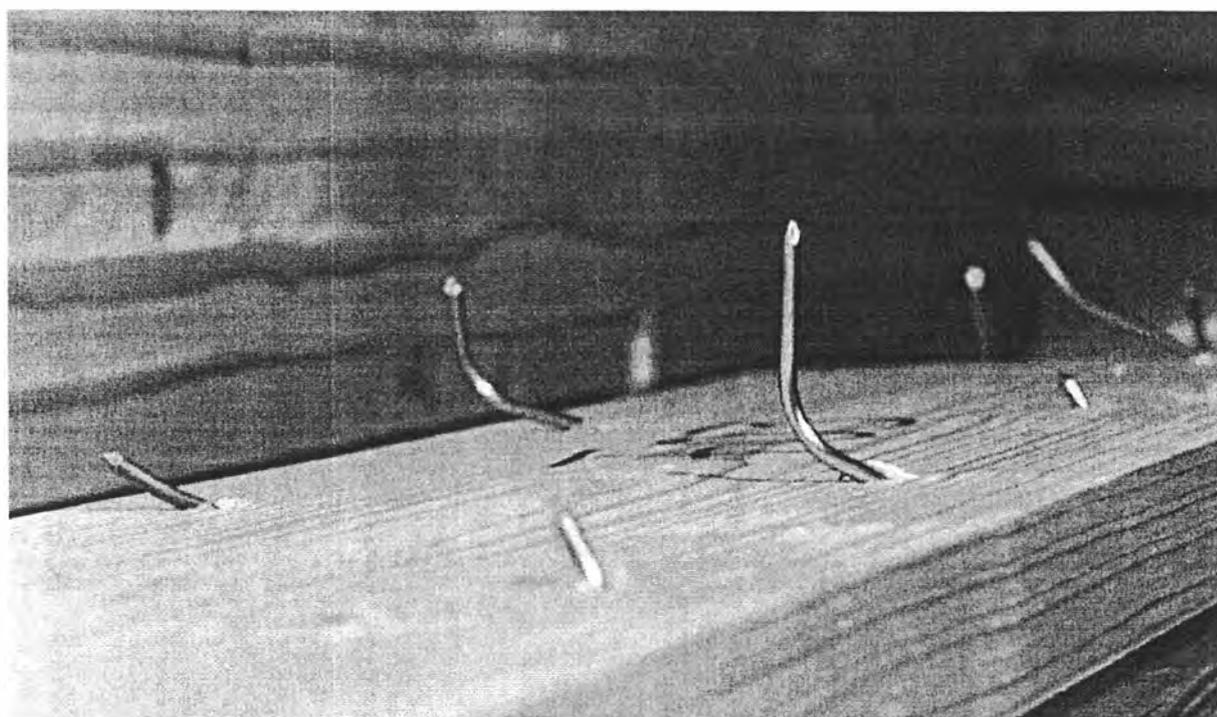


Bild E-8 Nageldetail