Technischer Beratungsdienst an der Fachhochschule Ulm
(Mitglied der Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung Stuttgart)

A U S L E G U N G D E R A R M I E R U N G E I N E S P U - R E I F E N S

A B S C H L U ß B E R I C H T

Ulm, den 28.4.84

Prof. Dr.-Ing G. Willmerding

Verwendete Formelzeichen

α	Winkel des Fadens zur Umfangsrichtung
α_g	Gleichgewichtswinkel
β	Winkel des Fadens zur Richtung der Drehachse
γ	Schnittwinkel der Meridiannormalen mit der Reifensymmetrie=achse
ds	Streckenelement des Reifenmeridians .
F_w	Schnittkraft im Wulstkabel
h	Wanddicke
K_g	Kraft pro Längeneinheit im Gürtel
$K_{\alpha F}$	Kraft im Cordfaden
L_k	Gesamtlänge der für die Herstellung der Karkasse erfoder=lichen Cordmenge einschließlich Wulstkabel
L_g	Gesamtlänge der für die Herstellung des Gürtels erforder=lichen Cordmenge
m	Fadenanzahl (paralleler Fäden) pro cm im Gürtel
m_z	" " " " " " im Zenit
n	Fadenanzahl (paralleler Fäden) pro cm in der Karkasse
n_z	" " " " " " im Zenit
N_r	Schnittkraft in Meridianrichtung bezogen auf 1 cm
N_t	" " Umfangsrichtung " " " "
N_{tKark}	" " " " " " " in der Karkasse
N_w	Kraft, die die Felge infolge der Pressung auf den Reifen in Kontaktzone mit der Felge ausübt bezogen auf 1 m
p	Luftinnenüberdruck im Reifen
r	Radius
r_o	Abstand der breitesten Stelle des Reifens zur Drehachse
r_w	Radius des Wulstkabelschwerpunktes
σ_r	Spannung in Meridianrichtung
σ_t	" " Umfangsrichtung

1. Zusammenfassung

Es wurde der von Fa. Bergougnan konstruierte Industrie= reifen der Dimension 7.00-12 rechnerisch untersucht und die Cordbewehrung so dimensioniert,daß ein ausreichender Platzdruck erzielt wird.Bei der Berechnung wurde eine einwandfreie Verankerung der Corde im PU-Elastomer voraus= gesetzt.Zur Dimensionierung wurde der rotationssymmetrische Reifen (ohne Abplattung) unter Wirkung des Innendruckes berechnet. Es stellte sich heraus,daß der von Bergougnan aufgrund der Reifenform bereits vorgegebene Querschnitt infolge seiner sehr "eckigen" Gestalt zu beträchtlichen Spannungen führt. Weiterhin zeigte sich,daß in der Seitenwand ungünstige Druckbeanspruchungen auftreten,die zu Beuleffekten führen werden.

Die Querschnittsgestalt des vorliegenden Reifens erscheint somit aus der Sicht der Beanspruchungen weniger günstig. Um dennoch einen ausreichenden Platzdruck zu erzielen,muß sehr viel mehr Reifencord als bei einer "runderen" Querschnitts= gestalt verwendet werden.Der Einsparung von PU-Elastomer durch die "eckige" Kontur steht somit ein Mehraufwand für Cord gegenüber (Bild 1).

Der sichere Sitz eines Luftreifens auf der Felge ist von großer Bedeutung für dessen Sicherheit und die Kräfte im Wulst dürfen nicht unterschätzt werden.Bei dem vorliegenden Wickelverfahren bietet sich aus verfahrenstechnischen Gründen eine tangentiale Wicklung im Wulst an (Bild 2a).

Diese tangentiale Wicklung wird jedoch sehr wahrscheinlich nicht geeignet sein,um den erforderlichen Festsitz auf der Felge zu garantieren.Es wurde daher eine Wicklung mit Wulstumschlingung vorgesehen,die einen ausreichenden Felgen= festsitz zu ermöglichen scheint.Die Einleitung der Kräfte in den Wulstbereich ist bei der Wickelart nach Bild 2b auf gleichmäßige Weise möglich.

Eine weitere Konsequenz der neuartigen Wickeltechnik ist es, daß eine Herstellung von Reifen in der "Gleichgewichts=kontur" nicht möglich ist. Ein in der Gleichgewichtskontur hergestellter Reifen weist nur Membranspannungen auf und ändert seine Querschnittsform beim Aufpunpen nur gering=fügig aufgrund der Dehnung des Cordes (Bild 3). Ein nicht in der Gleichgewichtskontur gebauter Reifen wird beim Aufpumpen seine Querschnittsform deutlich verändern. Dies ist nicht nur aufgrund der auftretenden Biegespannungen bedeutsam sondern macht auch bei der Reifenentwicklung die Vorhersage der späteren Reifenabmessungen (Breite, Durchmesser) schwierig.

Die Gleichgewichtskontur ist bei herkömmlichen Luftreifen Stand der Technik. Dennoch sollte bei dem hier vorliegenden neuartigen Reifen kein vorschnelles, negatives Urteil gefällt werden. Wichtig ist es jedoch, sich über die im Gegensatz zu herkömmlichen Luftreifen unterschiedlichen Beanspruchungen klar zu sein, damit bei der Entwicklung die auftretenden Phänomene richtig gedeutet und möglichst vorteilhaft genutzt werden können.

Die Bewicklung der von Fa. Bayer zur Verfügung gestellten Kerne bei Fa. Bolens&Schäfer ergab als wesentliches Problem, daß es nicht möglich war, die erforderliche Cordmenge zu verwenden, da dann ein Schließen der Reifenform nicht mehr möglich gewesen wäre.

Es wurde daher die Cordmenge erheblich herabgesetzt, um geeignete Kerne für die Schleuderversuche zu haben. Die auf diese Weise hergestellten Reifen werden jedoch nicht mehr über einen ausreichenden Platzdruck verfügen, so daß bei der Prüfung entsprechend vorsichtig vorgegangen werden muß!!

Eine Zusammenstellung der für die Herstellung der Armierung wesentlichen Daten ist in Tabelle 1 zu finden.

2. Beanspruchung des Reifens

Eine Beurteilung der Armierung des PU-Reifens wurde in einem Gutachten für Fa. Bayer vorgenommen /1/.Da Bergougnan dieses Gutachten verfügbar ist,kann darauf Bezug genommen werden.Insbesondere soll hier nochmals auf das Kapitel 4.2 in /1/ verweisen werden,das von grundsätzlicher Bedeutung ist.

2.1. Dimensionierung des Reifens unter alleiniger Wirkung des Innendruckes

Bei der Dimensionierung des Reifens wird allein der Lastfall Innendruck ohne Abplattung zugrunde gelegt.Dieses Vorgehen wird dadurch gerechtfertigt,daß der geforderte Platzdruck eines Reifens - er sollte ca das 4-fache des Betriebsdruckes betragen - eine extreme Belastung bedeutet und dadurch eine notwendige Forderung für die Cordfadendichte gegeben ist.Dieser Platzdruck ist auch für die Sicherheit von Bedeutung,denn bevor ein Reifen geprüft wird muß er sicher auf einer Felge ohne Gefährdung montiert werden können.

Für die Erreichung eines bestimmten Platzdruckes muß

- der sichere Sitz auf der Felge und eine ausreichende Reißkraft des Wulstkabels gegeben sein,

- die Reifenwandung die auftretenden Schnittkräfte insbesondere durch eine geeignete Bewehrung mit Cord aufnehmen können.

Die Kenntnis der Schnittkräfte in der Reifenwandung ist für diese Dimensionierung maßgebend und ihre Berechnung wird im Folgenden beschrieben.

2. Beanspruchung des Reifens

Eine Beurteilung der Armierung des PU-Reifens wurde in einem Gutachten für Fa. Bayer vorgenommen /1/.Da Bergougnan dieses Gutachten verfügbar ist,kann darauf Bezug genommen werden.Insbesondere soll hier nochmals auf das Kapitel 4.2 in /1/ verweisen werden,das von grundsätzlicher Bedeutung ist.

2.1. Dimensionierung des Reifens unter alleiniger Wirkung des Innendruckes

Bei der Dimensionierung des Reifens wird allein der Lastfall Innendruck ohne Abplattung zugrunde gelegt.Dieses Vorgehen wird dadurch gerechtfertigt,daß der geforderte Platzdruck eines Reifens - er sollte ca das 4-fache des Betriebsdruckes betragen - eine extreme Belastung bedeutet und dadurch eine notwendige Forderung für die Cordfadendichte gegeben ist.Dieser Platzdruck ist auch für die Sicherheit von Bedeutung,denn bevor ein Reifen geprüft wird muß er sicher auf einer Felge ohne Gefährdung montiert werden können.

Für die Erreichung eines bestimmten Platzdruckes muß

- der sichere Sitz auf der Felge und eine ausreichende Reißkraft des Wulstkabels gegeben sein,

- die Reifenwandung die auftretenden Schnittkräfte insbesondere durch eine geeignete Bewehrung mit Cord aufnehmen können.

Die Kenntnis der Schnittkräfte in der Reifenwandung ist für diese Dimensionierung maßgebend und ihre Berechnung wird im Folgenden beschrieben.

2.1.1. Schnittkräfte in den Reifenwandungen

Die Berechnung der Kräfte in den Wandungen des Reifens erfolgt mithilfe der Membrantheorie,die mit vertretbarem Aufwand eine erste Auslegung ermöglicht.Es wurden für die Berechnung kleine Verformungen vorausgesetzt.Damit ergeben sich folgende wesentliche Vernachlässigungen gegenüber der Wirklichkeit:

- Biegespannungen werden nicht berücksichtigt; aufgrund der Abweichung von der Gleichgewichtskontur sind sie jedoch zu erwarten,

- die Annahme kleiner Verformungen berücksichtigt nicht die möglicherweise beträchtlichen Krümmungs= änderungen,die aufgrund der auftretenden Verformungen bewirkt werden können.Diese Krümmungsänderungen führen allerdings zu einer Verringerung der Maximalwerte der Membranspannungen,so daß die erhaltenen Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen werden,

Trotz der stark vereinfachenden Annahmen konnte mit der Membrantheorie der Platzdruck von PU-Reifen ausreichend genau abgeschätzt werden.Der Fehler lag in der Regel bei maximal +- 20%.

Eine genauere Berechnung wäre mithilfe der Schalenbiegetheorie oder der Methode der finiten Elemente möglich,wenn dabei die Anisotropie der Bewehrung und das geometrisch nichtlineare Verhalten (große Verformungen) berücksichtigt wird.

Der Kosten-und Zeitaufwand wäre jedoch für eine erste Abschätzung unvertretbar hoch.Einzelheiten der Berechnungsverfahren,die eine genauere Beschreibung ermöglichen,sind in /2,3,4,5/ beschrieben.

Die Kräfte in Reifen mit elliptischem Querschnitt lassen sich auf einfache Weise anhand der in /1/ angegebenen Formeln berechnen. Da in dem hier vorliegenden Reifenquerschnitt kein elliptischer Querschnitt vorliegt, muß zur Berechnung von der Differentialgleichung ausgegangen werden.

Für die Spannung in Meridianrichtung gilt:

$$(1) \quad \sigma_r = \frac{p\,|(r_o^2 - r^2)|}{2\,h(r)\,r\,\sin\{\gamma(r_1)\}}$$

Für die Spannung in Umfangsrichtung gilt:

$$(2) \quad \sigma_t = \frac{d\gamma}{ds} + \frac{\sin\gamma}{r}$$

Dabei bedeuten:

p = Innenüberdruck
h = Wanddicke
r = Radius (Vergl. Bild 4)
r_o = Radius der breitesten Stelle des Reifens
γ = Winkel(Vergl. Bild 4)

Die für die Corddimensionierung bedeutsamen Kräfte in Meridianrichtung N_r und in Umfangsrichtung N_t ergeben sich zu:

$$(3) \quad N_r = \sigma_r\, h(r)$$

$$(4) \quad N_t = \sigma_t\, h(r)$$

Die Berechnung der Kraft N_r ist bei vorliegendem Querschnitt auf einfache Weise mithilfe der Gleichungen 1 und 3 möglich. Die Unstetigkeitsstelle für $r = r_o$ und $\alpha = 0$ wird in /2/ diskutiert.

Sie führt insbesondere, wenn mit numerischen Rechenverfahren gearbeitet wird, in der Umgebung von $r = r_o$ zu Ungenauigkeiten, da geringfügige Änderungen von r bzw γ große Änderungen der Spannung bewirken.

Wie experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, tritt jedoch an der Stelle $r = r_o$ keine sprungartige Änderung des Spannungs= zustandes auf.

Die Berechnungsergebnisse in diesem Bereich sind somit auf numerische Instablitäten infolge der näherungsweisen Eingabe der Querschnittskontur und nicht auf extreme Spannungsspitzen zurückzuführen. In den entsprechenden Diagrammen ist dieser Bereich durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.

Die Kraft N_t läßt sich nach der Berechnung von N_r ermitteln. Dazu ist allerdings der Querschnitt durch die örtliche Krümmung $d\gamma/ds$ und den Winkel γ zu beschreiben. Dies geschah in der Weise, daß mithilfe eines Computerprogramms aus den aus der Zeichnung für den Reifen 7.00-12 entnommenen Querschnittsko= ordinaten die erforderlichen Werte berechnet wurden.

Die Ergebnisse für den Reifen zeigt Bild 5 .
Der dabei zugrunde gelegte Druck beträgt p=8bar. Entsprechend der geforderten Sicherheit gegen Platzen muß bei der Dimensionierung von dem 4-fachen der Spannungen ausgegangen werden. Die Werte für die Kräfte N_r und N_t sind somit mit dem Faktor 4 zu multiplizieren.

Um die Stelle der maximalen Cordbeanspruchung zu finden, ist neben den Schnittkräften N_t und N_r auch die Fadendichte und der Fadenwinkel maßgeblich. Es muß daher für den Fadenverlauf ein Gesetz gefunden werden.

2.1.2. Verlauf des Fadenwinkels in der Karkasse

Aufgrund der Wickeltechnik, die nur einen geodätischen Fadenverlauf ermöglicht (der Faden verbindet zwei Punkte auf dem kürzesten Weg), ergibt sich folgendes Gesetz für den Fadenwinkel:

$$(5) \quad \cos\alpha \, r = \cos\alpha_z r_z$$

Dabei bedeuten:

α_z = Winkel zur Umfangsrichtung im Zenit
α = 'inkel des Fadens zur Umfangsrichtung für r
r_z = Radius im Zenit
r = Radius

Um ein Wulstkabel zu erzeugen, muß der Faden im Bereich des Wulstkabels tangential einlaufen. Der Winkel an der Stelle $r = r_w$ beträgt dann 90°.

In dem hier vorliegenden Fall beträgt der Kabeldurchmesser ca 16,3 cm (er wurde etwas größer als in Zeichn. VV-144-1 angen.) Nach Gleichung 5 erhält man dann sofort den Winkel im Zenit

$$\alpha_z = 58,3^o$$

Dieser Winkel ist für die Maschineneinstellung wichtig, und kann auf einfache Weise sofort nach der ersten Wicklung kontrolliert werden kann.

Der Winkelverlauf $\alpha(r)$ kann mithilfe von Gleichung 5 ermittelt werden und er stellt eine sehr wichtige Größe dar, die für jeden Radius r ermittelt werden kann.
Dieser Winkel ist bedingt durch das Wickelverfahren und er liegt im nicht aufgepumpten, kräftefreien Reifen vor.

Wird der Reifen aufgepumt, so wird der Winkel $\alpha(r)$ bestrebt sein, den Gleichgewichtswinkel $\alpha_g(r)$ anzunehmen.
Die Differenz

$$(6) \quad \Delta\alpha = \alpha_g(r) - \alpha(r)$$

ist daher ein Maß für die Abweichung von der Gleichgewichts= kontur und damit ein Maß für die zu erwartenden Querschnitts= änderungen an der Stelle r .

Der Gleichgewichtswinkel α_g wurde in /1/ hergeleitet. Er ergibt sich zu

$$(7) \quad \alpha_g = \arctan\sqrt{N_r/N_t} \quad .$$

Er hängt damit nur von den Kräften N_r und N_t ab.
Für den Fall von Druckkräften - sie werden negativ definiert - kann der Wurzelausdruck imaginär werden. Dies bedeutet, daß aufgrund von Instabilitäten (Beulen der Wandung) ein Gleich= gewichtswinkel nicht existiert.

Es wurde für eine große Zahl von Querschnittsvarianten dieser Differenzwinkel $\Delta\alpha$ bestimmt. Es zeigte sich, daß es Bereiche des Reifens gibt, wo dieser Differenzwinkel besonders groß ist während in anderen Bereichen $\Delta\alpha = 0$ ist.

Diese Ergebnisse für den Differenzwinkel können noch nicht in ihrer Bedeutung beurteilt werden. Wenn die ersten Reifen vorliegen scheinen Verformungsmessungen am aufgepumpten Reifen hilfreich, die dann Aufschluß geben können über den Zusammenhang zwischen Verformung, Differenzwinkel und möglicher= weise auch über die auftretenden Beanspruchungen.

2.1.3. Fadendichte in der Karkasse

Die Berechnung der Fadendichte in der Karkasse erfolgt unter der Annahme, daß der Fadenwinkel sich durch den Innendruck nicht ändert. Die dann für die Fadendichte erhaltenen Ergebnisse werden auf der sicheren Seite liegen.

Für die erforderliche Fadenzahl (Anzahl der parallelen Fäden) gilt /1/:

$$(8) \quad n = N_r/(2\sin^2(\alpha)\, K_{\alpha F}) \quad ; \quad K_{\alpha F} = \text{Fadenkraft}$$

Mithilfe dieser Gleichung kann an jeder Stelle des Querschnitts die erforderliche Fadenzahl berechnet werden.

Läßt man den Bereich, in dem ein Gürtel vorhanden ist und die Umgebung des Wulstkabels, zunächst außer acht, dann erhält man für den vorliegenden Reifen eine erforderliche Fadenzahl von n=3,3/cm an der Stelle r=23,6cm.
Dabei wurde ein Winkel von 46,3° und eine Meridianschnittkraft von 6000 N entsprechend einem Platzdruck von 32bar zugrunde gelegt. Als Reißkraft des Fadens $K_{\alpha F}$ wurden 1760 N angenommen.

Im Zenit ergibt sich dann eine Fadenzahl von

$$n_z = \frac{23,6}{31}\ 3,3 = 2,5/\text{cm}$$

Bild 6 zeigt schematisch den Aufbau der ersten Karkasslage.

2.1.4. Fadendichte des Gürtels

Für den Bereich des Reifens, wo ein Gürtel vorhanden ist, sind die auftretenden Kräfte sehr genau zu berechnen, da zumindest im mittleren Bereich des Gürtels keine wesentlichen Formänderungen auftreten können.

Die Berechnung erfolgt ähnlich wie in /1/ dargestellt.
Bei einem angenommenen Platzdruck von 32 bar wirken folgende Kräfte:

$$N_r(r=31\text{cm}) = 1800 \text{ N/cm}$$
$$N_t(r=31\text{cm}) = 9880 \text{ N/cm}$$

Die Kraft im Karkasscord läßt sich dann sofort berechnen, da der Gürtelwinkel und die Meridianschnittkraft N_r bekannt sind.

Es ergibt sich:

$$K_{\alpha F} = \frac{N_r}{2 \sin^2\alpha \; n} = 492 \text{ N}$$

Die Schnittkraft N_{tkark} in der Karkasse in tangentialer Richtung ergibt sich dann zu:

$$N_{tkark} = K_{\alpha F} \cdot 2 \cdot \cos^2\alpha \cdot 2,5$$
$$N_{tkark} = 679 \text{ N/cm}$$

Die Gesamtkraft in Umfangsrichtung beträgt N_{tges}=9880 N/cm, wovon die Karkasse lediglich 679 N/cm übernimmt. Für den Gürtel verbleibt damit noch eine Schnittkraft von

$$K_g = 9200 \text{ N/cm}$$

Die erforderliche Anzahl der Fäden pro cm ergibt sich dann zu:

$$m = \frac{9200}{1760} = 5,2/\text{cm}$$

2.1.5. Dimensionierung des Wulstkabels

Obwohl bei dem vorliegenden Reifen gar kein Wulstkabel im herkömmlichen Sinne vorliegt, soll bei dieser Bezeichnung geblieben werden, da die Anhäufung der Corde im Wulstbereich dieselbe Funktion und auch ein ähnliches Aussehen hat.

Die Dimensionierung wird auch ähnlich durchgeführt, wie dies bei herkömmlichen Gürtelreifen geschieht. Die doch beträchtlichen Unterschiede im Aufbau und in der Funktionsweise dürfen jedoch keinesfalls übersehen werden.

Eine Anlehnung der Dimensionierung an herkömmliche Gürtelreifen wurde auch nur deshalb durchgeführt, weil in der Kürze der Zeit kein geeigneteres Berechnungsmodell entwickelt werden konnte.

Die vorliegende Kabelberechnung kann daher nur einen Anhaltswert darstellen, der einer experimentellen Überprüfung bedarf.

Ein herkömmliches Wulstkabel besteht aus einem Draht, der entsprechend der erforderlichen Platzsicherheit eine geeignete Anzahl von Umschlingungen aufweist. Die Cordarmierung der Karkasse ist um das Wulstkabel geschlungen und garantiert eine sichere Einleitung der Karkasskräfte in das Wulstkabel.

Bei dem hier vorliegenden Reifen besteht das Wulstkabel aus einer Vielzahl von Corden, die jeweils nur einen vergleichsweise geringen Umschlingungswinkel aufweisen, der je nach Aufbau zwischen 0° und 270° beträgt.

Auch bei der Einleitung der Kräfte der Reifenwandung in das Wulstkabel sind beträchtliche Unterschiede zum herkömmlichen Reifen zu verzeichnen.

Da die Corde im Wulstbereich eine Fadenwinkel von 0° haben - es ist verfahrenstechnisch nur ein tangentialer Fadeneinlauf möglich - ist die Abweichung zum Gleichgewichtswinkel α_g sehr groß, was mit entsprechenden Formänderungen verbunden ist.

Zur Berechnung müssen die auf das Wulstkabel wirkenden Kräfte betrachtet werden (Bild). Die Meridianschnittkraft N_r und die Pressung zwischen Felge und Wulst N_w wirken radial, die Wulstkräfte F_w müssen damit im Gleichgewicht stehen.

Eine Berechnung der Pressung N_w war wegen der sehr unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse des Wulstkabels gegenüber herkömmlichen Reifen nicht möglich. Für den Platzdruck ist dies auch von untergeordneter Bedeutung.

Das Gleichgewicht liefert dann die Beziehung:

$$F_w = N_r(r_w)\ r_w \qquad (9)$$

$N_r(r_w)$ ist die Meridianschnittkraft an der Stelle r_w, r_w der Radius des Wulstkabels. Wie in Kap. 2.1.1. gezeigt, hängt die Schnittkraft N_r von der Querschnittsgeometrie ab. Die Kabelkraft F_w ist damit auch von der Querschnittsgestalt abhängig und es kann gezeigt werden, daß bei dem vorliegenden "eckigen" Querschnitt die Kraft deutlich größer als bei "runderen" Querschnitten ist.

Für den vorliegenden Reifen ergibt sich die Kabelkraft zu

$$F_w = 90\ 000\ N$$

Der Wert für $N_r(r_w)$ wurde aus Bild 5 entnommen.
Bei einer Reißkraft von 1760 N sind dann 51 Windungen des Wulstkabels erforderlich. Ist der Umschlingungswinkel kleiner 360° so erhöht sich die Anzahl entsprechend (bei 180° wären 102 erforderl.)

2.2. Berechnung alternativer Querschnittsvarianten

Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, daß die vorliegende Querschnittsgeometrie bezüglich auftretender Spannungen ungünstig ist. Um den Zusammenhang zwischen Spannungsverteilung und Querschnittsgestalt zu zeigen, wurden mehrere Varianten berechnet.

Zur Begrenzung des Aufwands wurde lediglich die Kontur der Seitenwand analysiert. Die Ergebnisse sind in den Bildern 8 bis 17 dargestellt.

Sehr "eckige" Querschnitte - ähnlich der Bergougnan-Konstruktion - (Bild 8,9) weisen sehr hohe Umfangsspannungen auf, die teilweise auch als Druckspannungen (negative Werte!) auftreten. Druckspannungen bzw. Druckkräfte in den Wandungen des Reifens führen zu Beulen und zu ungünstigen Beanspruchungszuständen. Querschnitte mit beträchtlichen Druckspannungen sollten vermieden werden.

Wird die Seitenwand "runder", so vermindern sich die Maximalwerte der Spannungen und der Bereich, in dem Druckspannungen auftreten, wird kleiner. (Bild 10 bis 13). Bei Reifenquerschnitten gemäß der Bilder 14 bis 17 treten gar keine Druckspannungen mehr auf.

Diese Parameterstudie soll keine Vorlage für eine Seitenwand=kontur sein. Sie kann aber aufzeigen, welche Bedeutung die Querschnittsgestalt der Seitenwand hat.

Wenn der Reifen 7.00-12 verbessert werden soll, so sollte auf jeden Fall der komplette Reifen einschließlich Gürtel und auch mehrere Varianten berechnet werden. Wichtige Hinweise können auch Verformungsmessungen am aufgepumpten Reifen und selbstverständlich die Prüfergebnisse der Funktionsversuche geben.

3. Herstellung der Armierung durch Wickelversuche

Es wurden bei Fa. Bolens&Schäfer Hartschaum-Kerne mit Stahl= cord bewickelt. Dabei wurde zunächst eine Distanzlage aufge= bracht, die die Stahlcorde zur guten Verankerung im Elastomer möglichst weit von der Oberfläche des Hartschaumkernes fixieren soll (Bild 18).

Die Distanzlage wurde mit dem gleichen Winkelverlauf aufge= bracht wie die Stahlcordlage.

In einem zweiten Arbeitsgang wurde die Stahlcordlage aufgebracht (Bild 19), wobei sich herausstellte, daß der Faden der Distanzlage die Wicklung des Stahlcords beeinflußte. Dadurch traten teilweise Unregelmäßigkeiten auf.

Das Wulstkabel wurde derart hergestellt, daß nach einer bestimmten Anzahl von Fadenlagen, die rein tangential gewickelt wurden, ein Faden mit Wulstumschlingung gemäß Bild 2b gefahren wurde. Dabei baute sich das Wulstkabel auf, wobei jedoch der Wulst= bereich sehr ungleichmäßig und auch dickwandig wurde (Bild 20).

Insgesamt zeigte sich, daß die für den berechneten Platzdruck erforderliche Stahlcordmenge aus räumlichen Gründen nicht in die vorhandene Reifenform paßt.

Es wurde daher beschlossen, weitere Varianten mit stark reduzierter Cordmenge zu bauen, damit zunächst einmal gleichmäßig gewickelte Kerne zur Verfügung stehen. Dabei wird inkauf genommen, daß diese Reifen nur einen stark reduzierten Platzdruck aufweisen werden.

Bei der Aufbringung der Gürtelschicht stellten sich Schwierigkeiten durch seitliches Verrutschen des Stahlcordes ein. Ursache ist die zwar geringe aber dennoch vorhandene Neigung der zu bewickelnden Fläche.

Dies Problem ist sicherlich bis zu einer begrenzten Neigung durch Verwendung geeigneter Haftvermittler lösbar. Bei den Versuchen wurde das Problem durch eine Unterbrechung des Wickelvorgangs und manuelle Fixierung der Gürtelcorde gelöst.

Bild 21 zeigt die Aufbringung der Gürtellage auf den sonst fertig gewickelten Kern.

Die Bewicklung der Kerne war insgesamt sehr ungleichmäßig und es bedarf noch intensiver Versuche, um die Gleichmäßigkeit zu verbessen. Bei der Beurteilung darf nicht vergessen werden, daß dies die ersten Versuche waren, die mit teilweise primitiven Hilfsmitteln (z.B. Fadenspannung, die manuell geregelt wurde) durchgeführt wurden.

Der Einfluß der Distanzlage auf den Fadenverlauf der eigent= lichen Karkaßlage dürfte jedoch prinzipieller Natur sein. Hier müßte durch einen anderen Verlauf der Distanzlage oder aber ein anderes Material Abhilfe geschaffen werden (z. B. Faservlies).

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

/1/ Willmerding,G.: Armierung von PU-Reifen,Gutachten für die Bayer AG,Sparte PU-A, Oktober 1983

/2/ Flügge,W.: Statik und Dynamik der Schalen,Springer-Verlag 1962

/3/ Gall,R.: Berechnung einer toroidförmigen Schale, Diplomarbeit durchgeführt am Institut für Mechanik und Thermodynamik der Bundeswehr Hamburg,Januar 1979

/4/ Zienkiewicz,O.C.: Methode der finiten Elemente,Carl Hanser Verlag München,Wien 1975

/5/ Rothert,H.: Theorie und Berechnung von Luftreifen, Bundesministerium für For chung und Technologie, September 1980

/6/ Willmerding,G.,Ghibu,M.: Konstruktive Entwicklung von Polyurethan= reifen und Grundsatzerprobung von hierfür geeigneten Fertigungsverfahren,Bundesministe= rium für Forschung und Technologie, Projektnummer 522-7291-TV 792387

/7/ Hofferberth,W.: Zur Statik des Luftreifens,Kautschuk und Gummi 1956 Nr. 9 S. WT 125 ff

/8/ Hofferberth,W.: Zur Festigkeit des Luftreifens,Kautschuk und Gummi 1956 Nr. 9 S. WT 225 ff

TABELLE 1: Zusammenfassung der Ergebnisse für Reifen 7.00-12

Bezeichnung		Daten	Bemerkungen
Querschnitts= geometrie	Querschnitts= geometrie	-.-	Zeichnung VV-144-1 7.00-12 Bergougnan
	Modell des Querschnitts	-.-	Innenfläche des Quer= schnitts als Membran
Cordfadenverlauf in Karkasse	Fadenwinkel im Zenit	$\alpha = +-58^{o}$	Bild 6
	Fadendichte im Zenit	$n_z = 2,5/cm = 25/10$ cm	Bild 6
	Gesamtfadenlänge	$L_K =$ ca 370 m	incl. Wulstkabel
Cordfadenverlauf im Gürtel	Fadenwinkel im Zenit	$= 0^{o}$	-.-
	Fadendichte im Zenit	$m_z = 5,2/cm = 52/10$ cm	-.-
	Gesamtfadenlänge	$L_g =$ ca 100 m	-.-
Wulstkabel	Radius (mittl.) des Wulstkabels	$r_w = 16,3$ cm	abweichend von Zeichn. VV-144-1 wurde ein größerer Wert angen, da Anz. d. Fd. größer
	erforderliche Fadenzahl bei 360° Umschling.	ca 50	-.-
Cord	Betriebsdruck	p = 8 bar	nach Angabe Bergougnan
	Platzdruck	p = 32 bar	nach Angabe Dunlop
	Reißkraft des Cordfadens	1760 N	nach Angabe Bergougnan

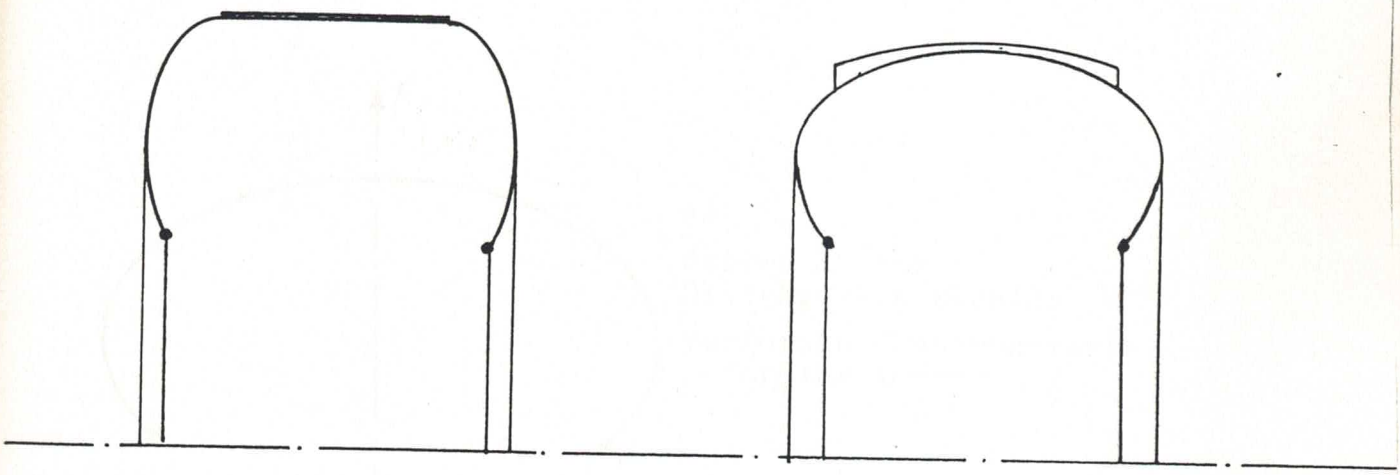


Bild 1: schematische Darstellung verschiedener Reifenquerschnitte;
links:"eckige" Kontur mit großen Spannungen und Verformungen
rechts: "runde" Kontur mit günstiger Spannungsverteilung

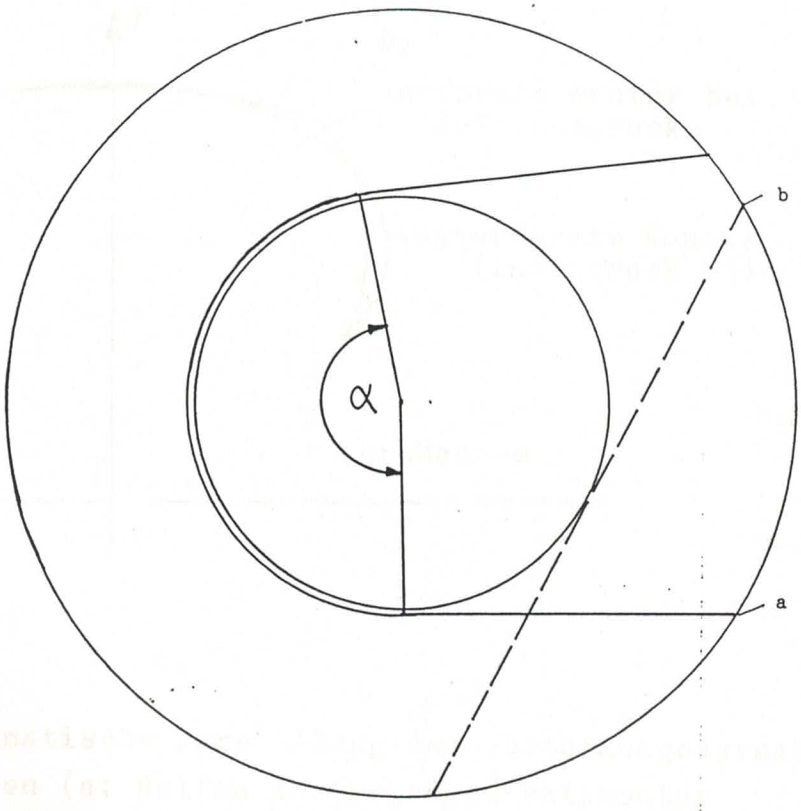


Bild 2: schematische Darstellung der Wickelarten dargestellt an einem Einzelfaden auf dem Kern in Seitenansicht (a: mit Wulstum= schlingung , b: tangentiale Wicklung)

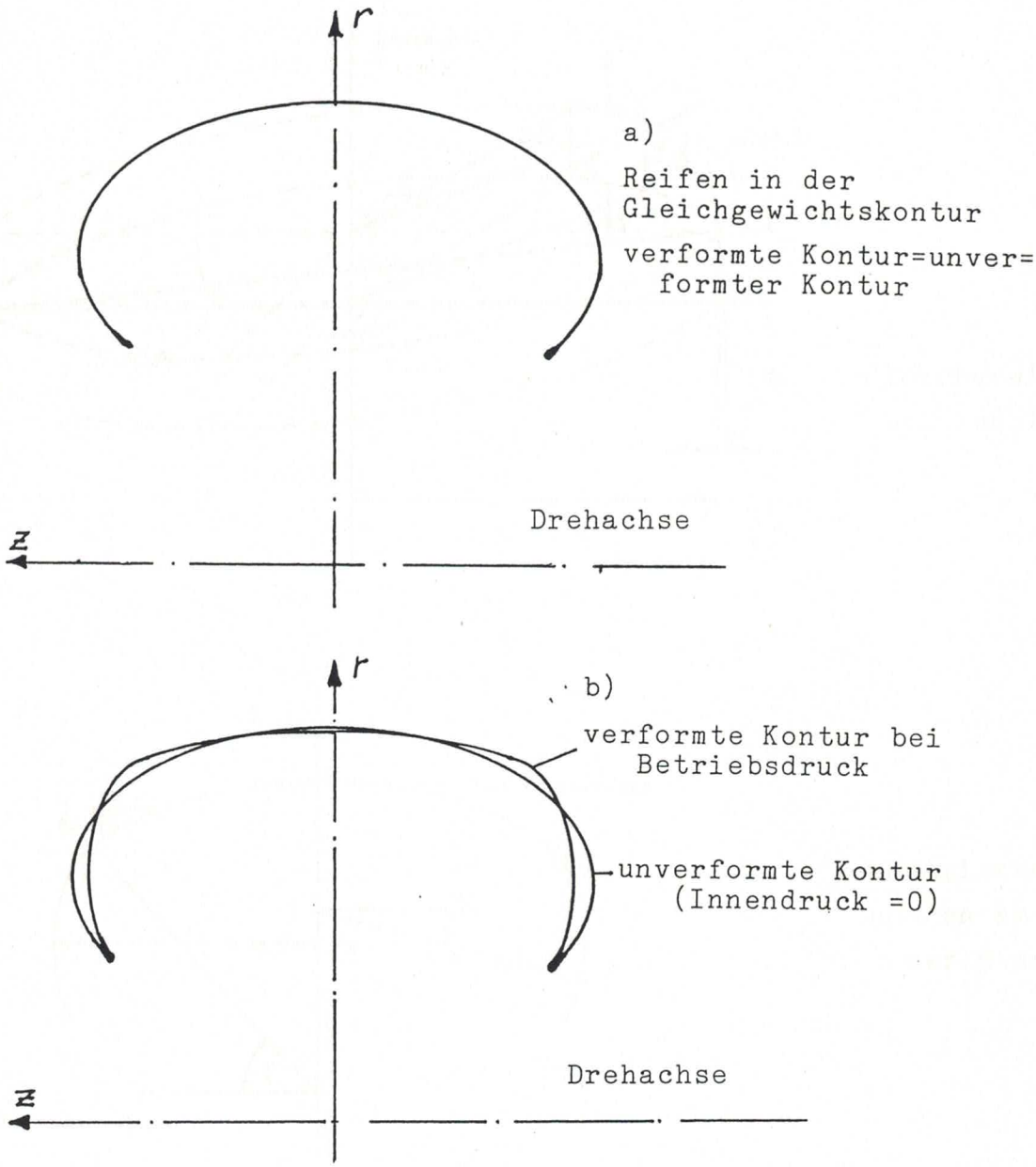
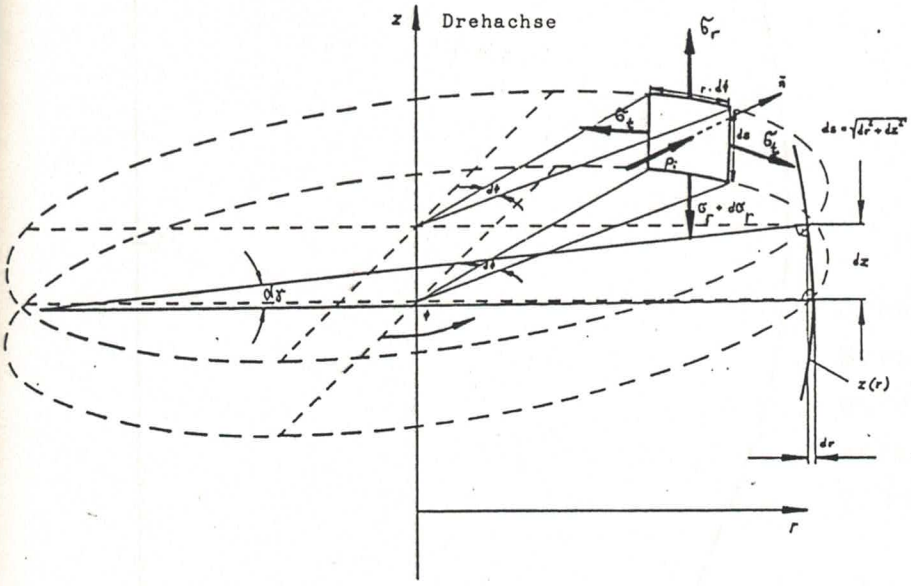
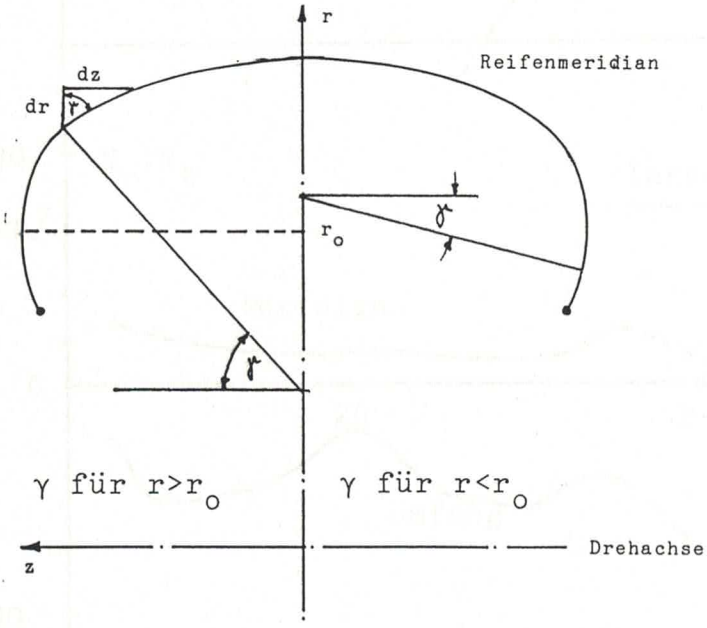


Bild 3: schematische Darstellung des Verformungsverhaltens von Luftreifen (a: Reifen in Gleichgewichtskontur b: Reifen nicht in Gleichgewichtskontur)



Gleichgewicht am Schalenelement



geometrische Bezeich=unge nungen am Reifen= meridian

Bild 4: Definition der verwendeten mechanischen und geometrischen Größen (oben: Gleichgewicht am Schalenelement;unten: geometrische Bezeichnungen am Reifenmeridian)

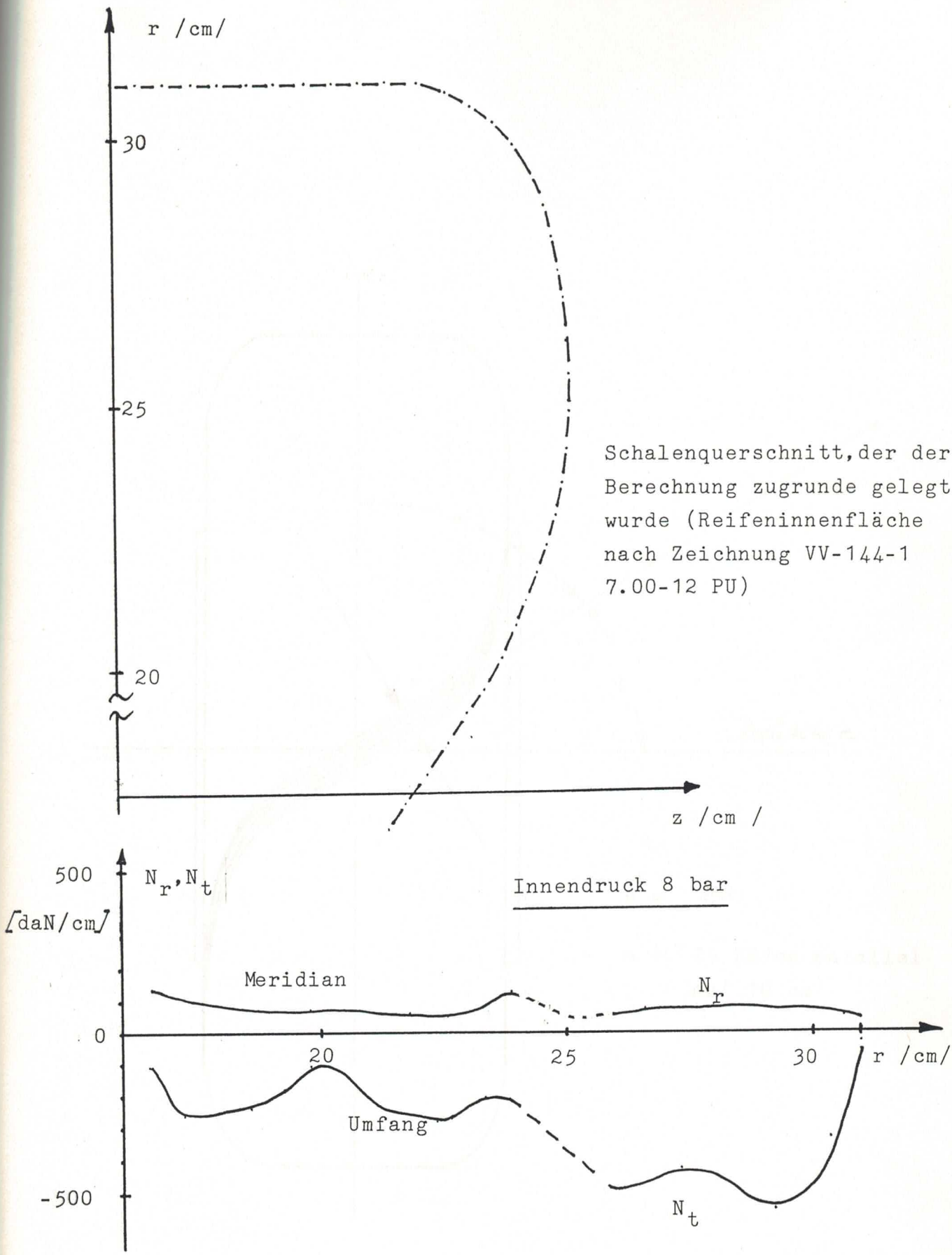


Bild 5: Reifenquerschnitt, der der Berechnung zugrunde gelegt wurde und Verteilung der Schnittkräfte N_r und N_t in Meridian-und Umfangs= richtung unter der Annahme kleiner Verformungen und Membranspannungs= zustand

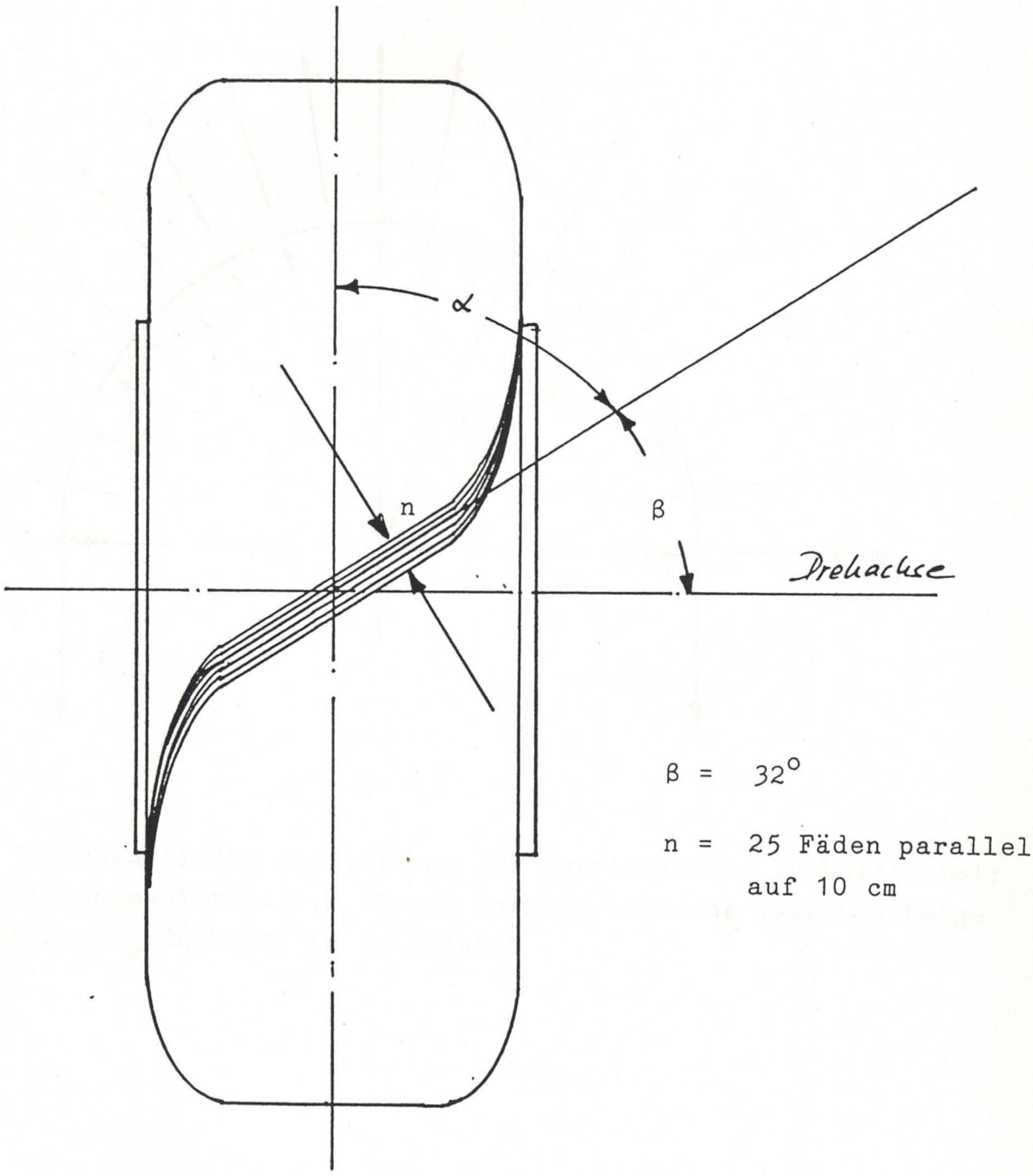


Bild 6: schematische Darstellung des Fadenverlaufs der ersten Karkaßlage auf dem Kern und Definition der Fadendichte n und Fadenwinkel α und β

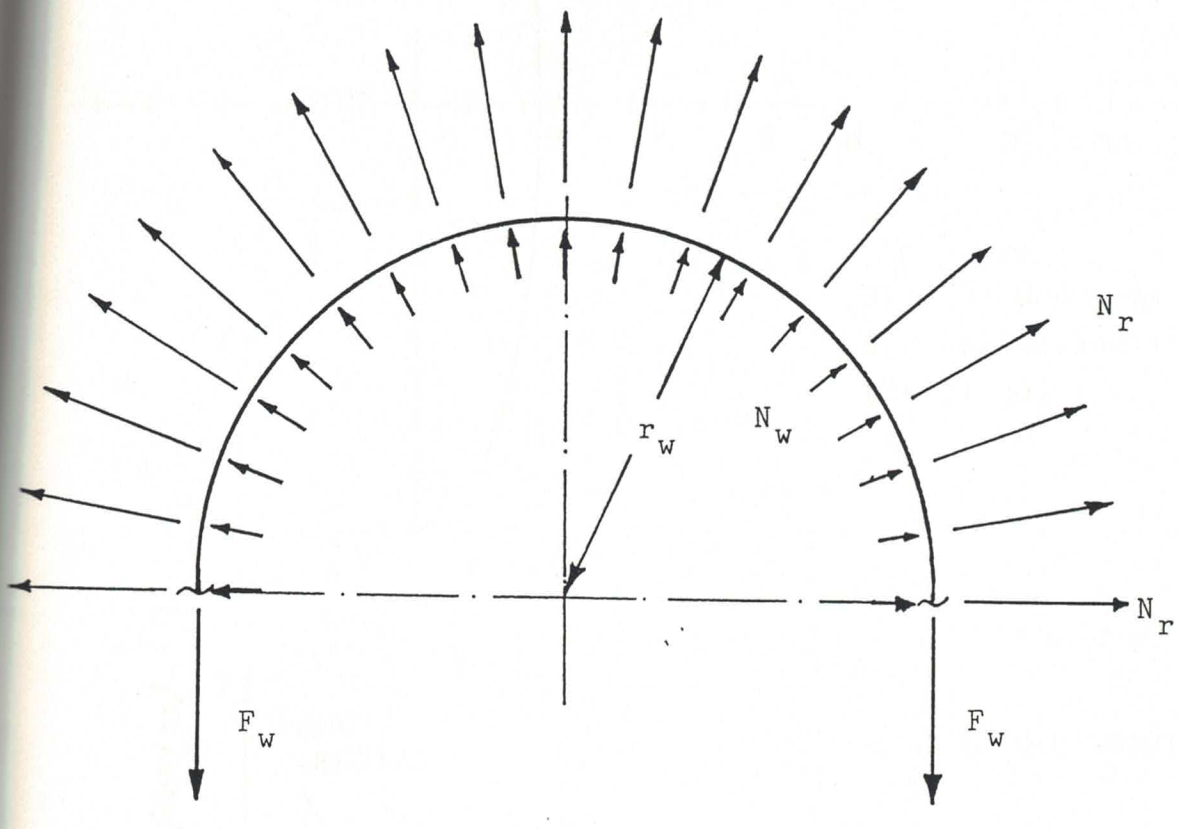


Bild 7: schematische Darstellung der Schnittkräfte am Wulstkabel; N_r=Meridianschnittkraft, N_w=Kraft infolge Pressung zwischen Felge und Reifen, F_w=Zugkraft im Wulstkabel

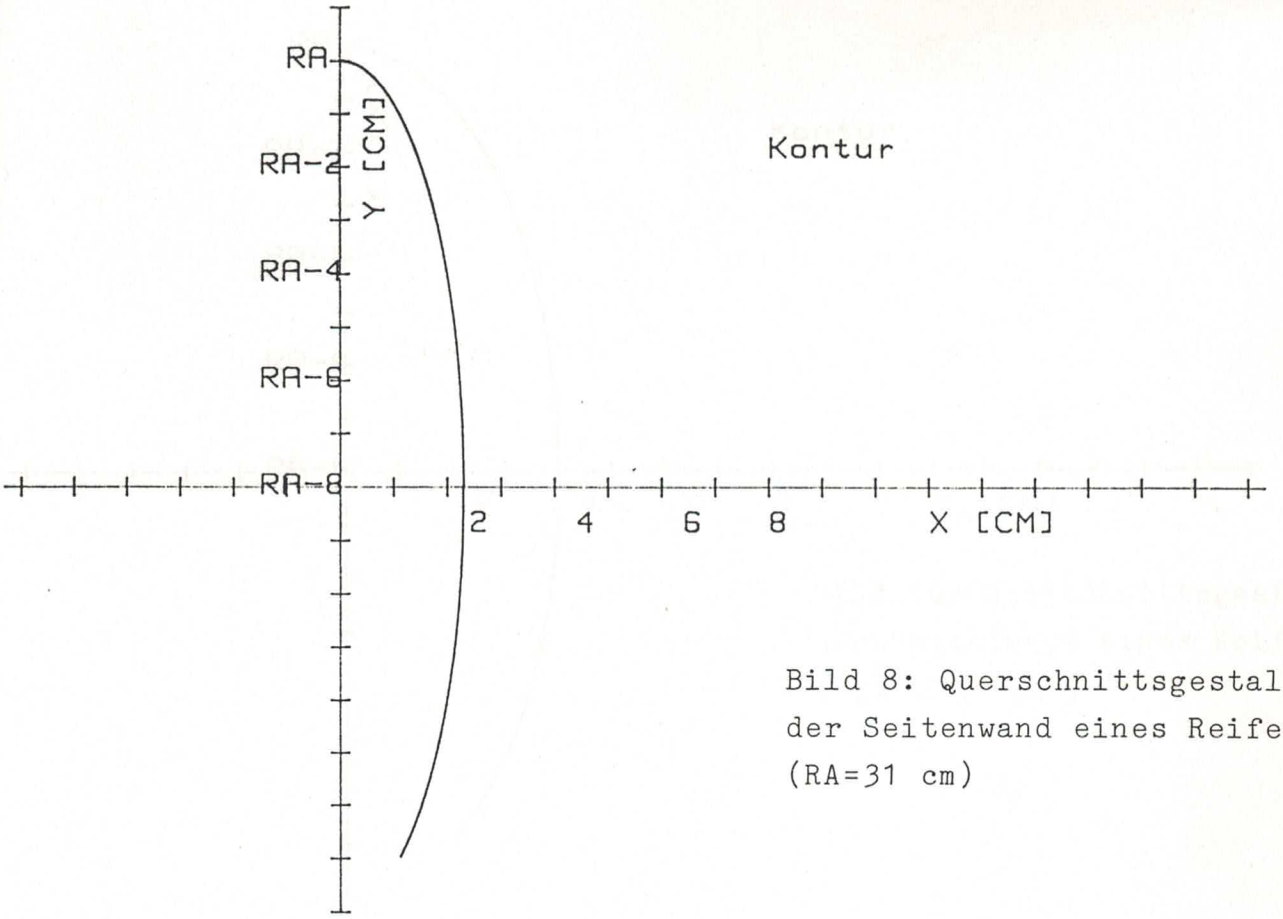


Bild 8: Querschnittsgestalt der Seitenwand eines Reifens (RA=31 cm)

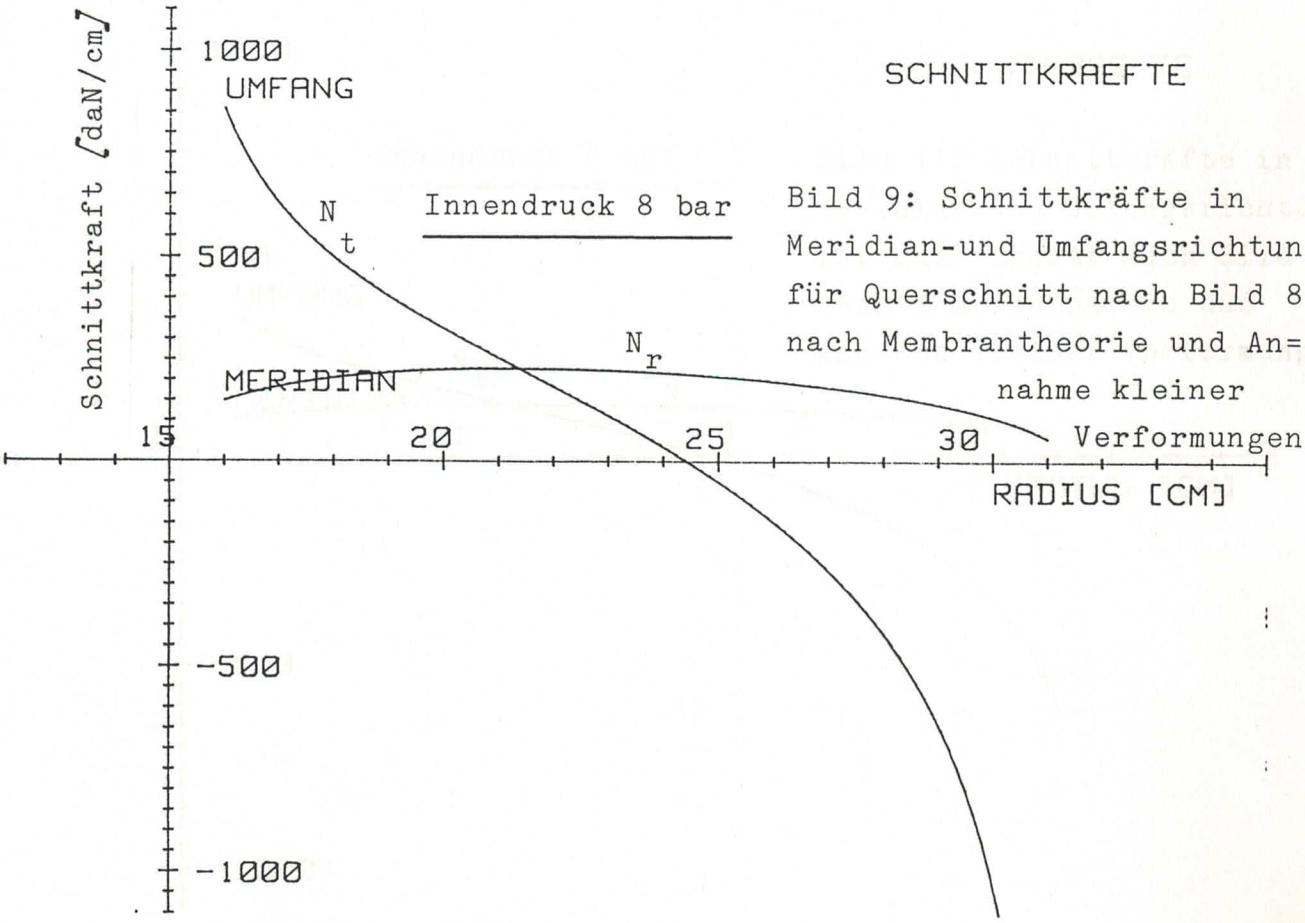


Bild 9: Schnittkräfte in Meridian-und Umfangsrichtung für Querschnitt nach Bild 8 nach Membrantheorie und Annahme kleiner Verformungen

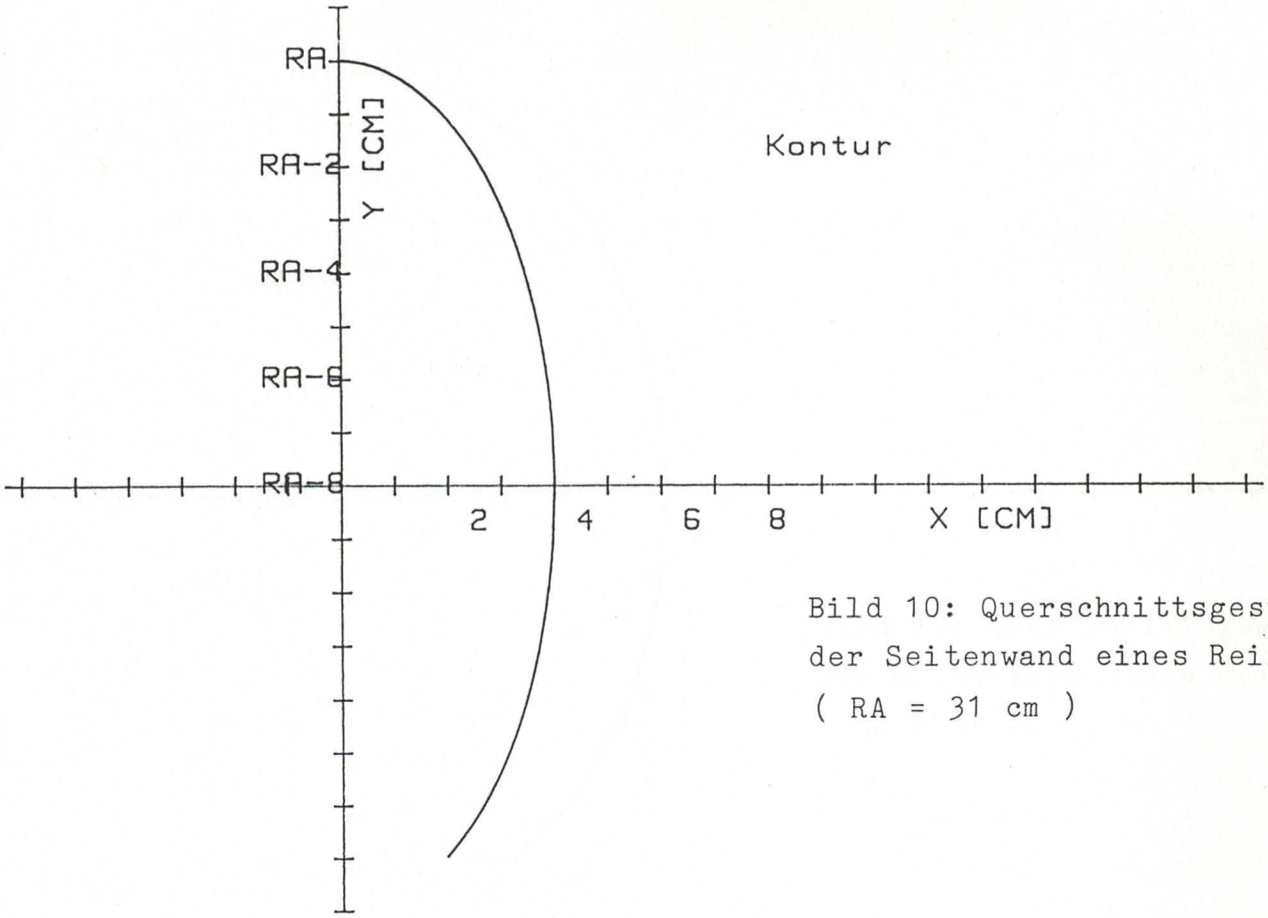


Bild 10: Querschnittsgestalt der Seitenwand eines Reifens (RA = 31 cm)

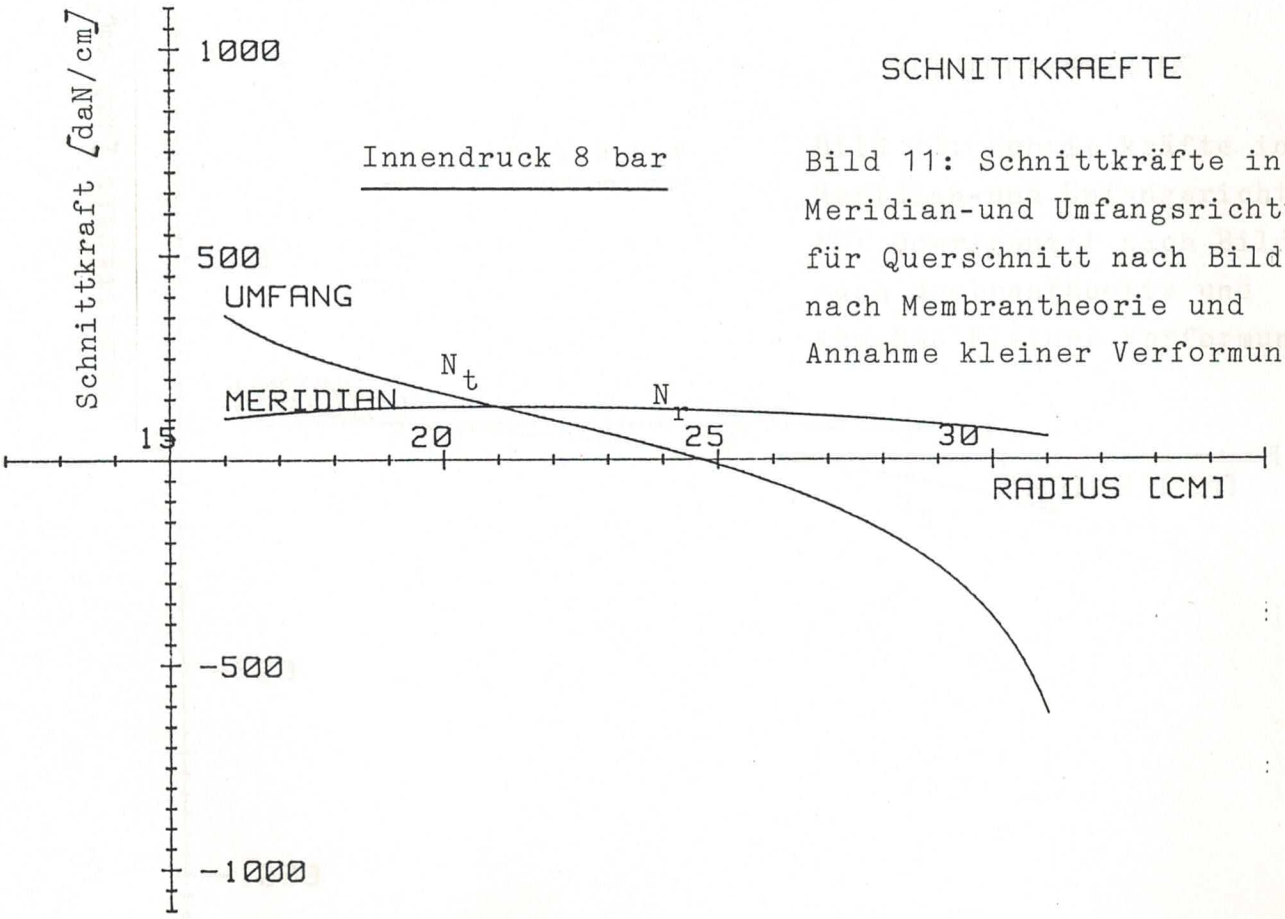


Bild 11: Schnittkräfte in Meridian-und Umfangsrichtung für Querschnitt nach Bild 10 nach Membrantheorie und Annahme kleiner Verformungen

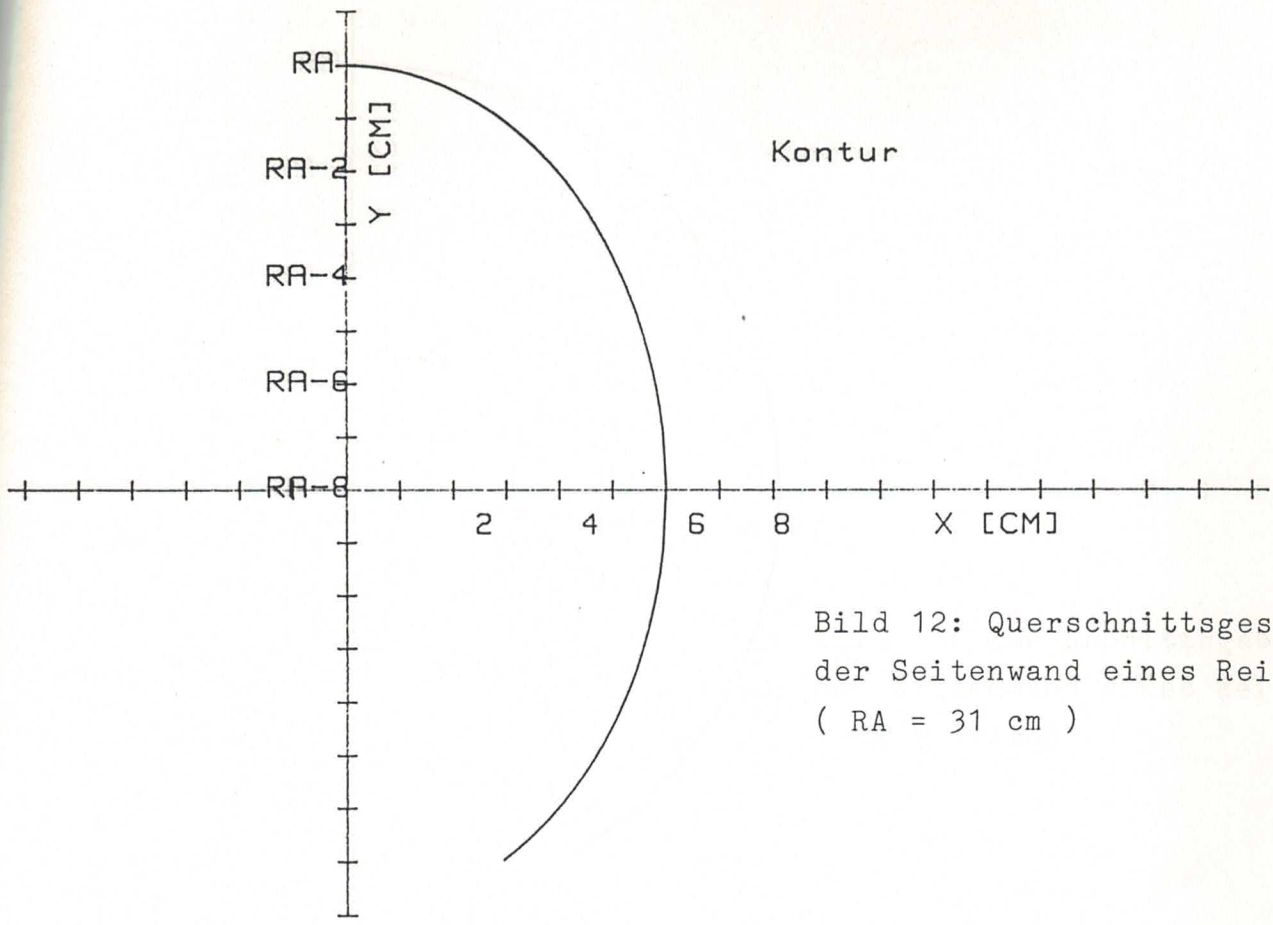


Bild 12: Querschnittsgestalt der Seitenwand eines Reifens (RA = 31 cm)

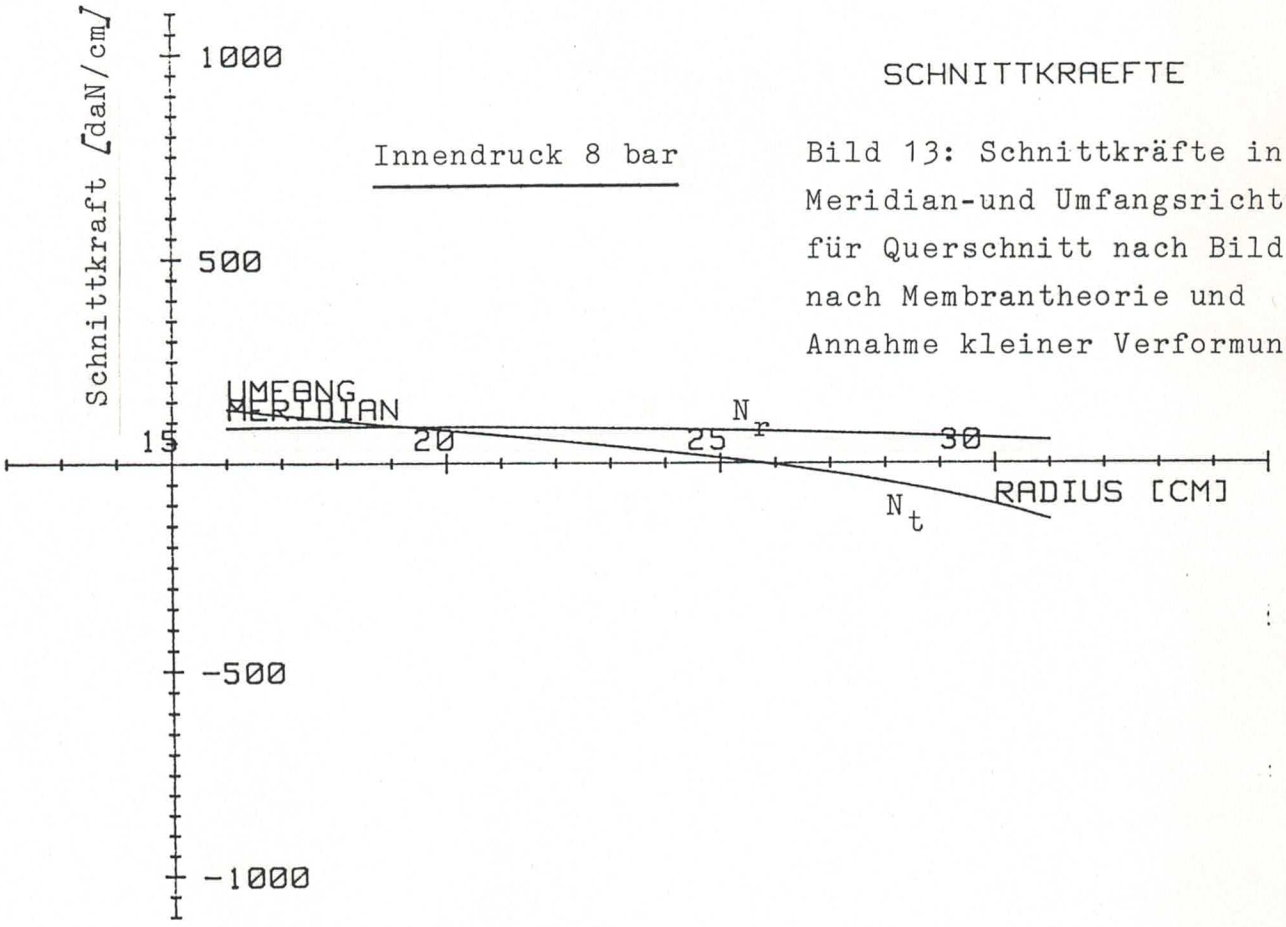


Bild 13: Schnittkräfte in Meridian-und Umfangsrichtung für Querschnitt nach Bild 12 nach Membrantheorie und Annahme kleiner Verformungen

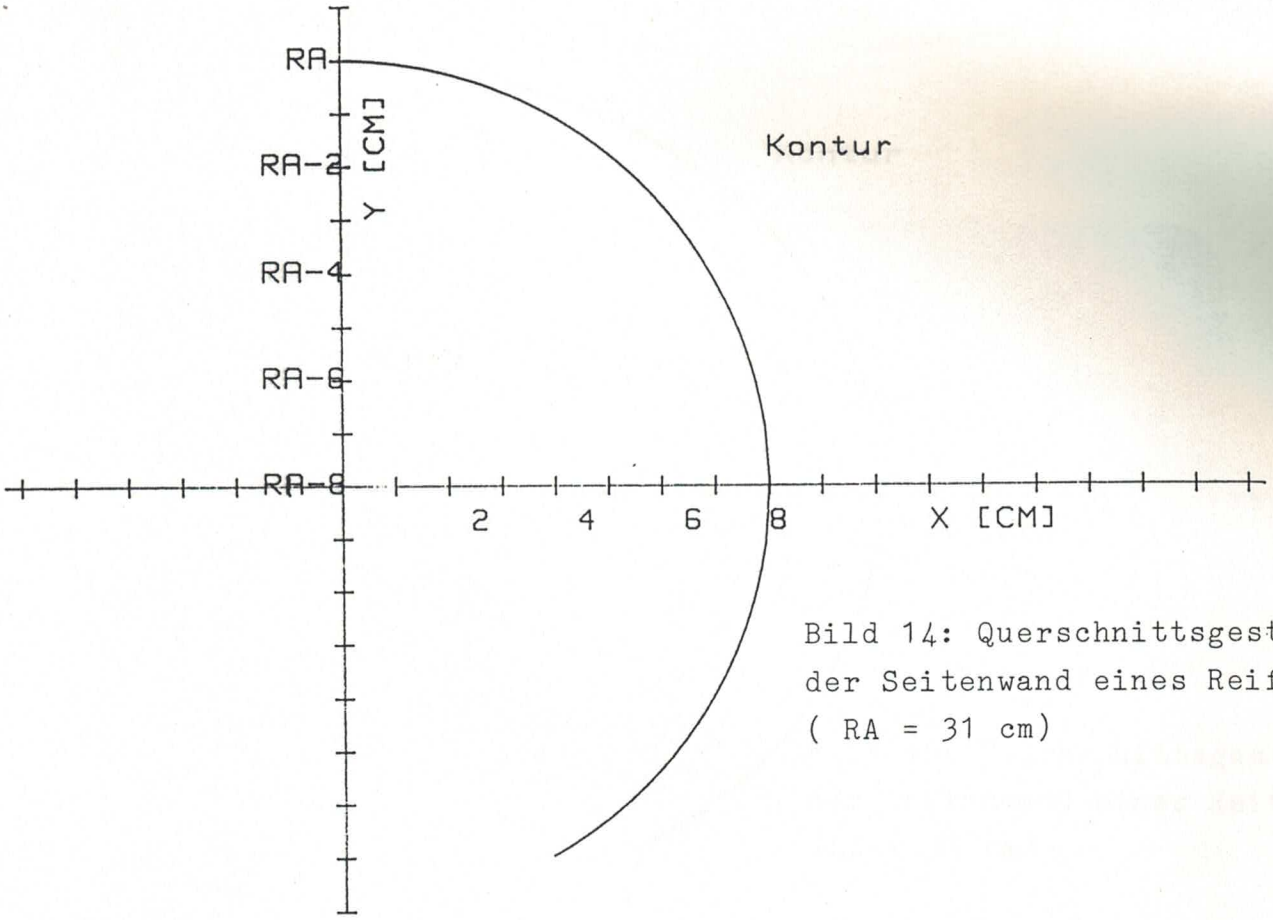
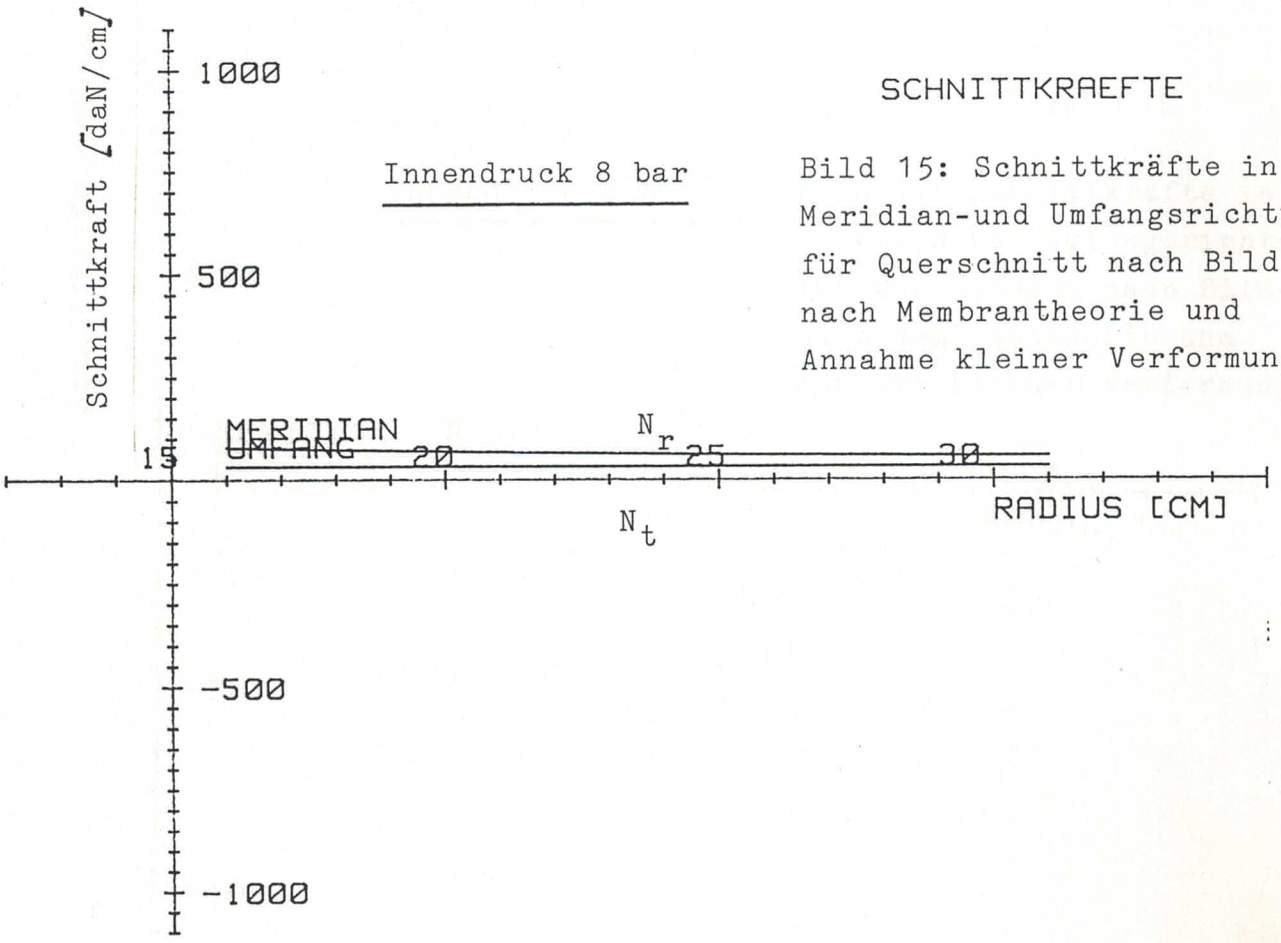


Bild 14: Querschnittsgestalt der Seitenwand eines Reifens (RA = 31 cm)



SCHNITTKRAEFTE

Bild 15: Schnittkräfte in Meridian-und Umfangsrichtung für Querschnitt nach Bild 14 nach Membrantheorie und Annahme kleiner Verformungen

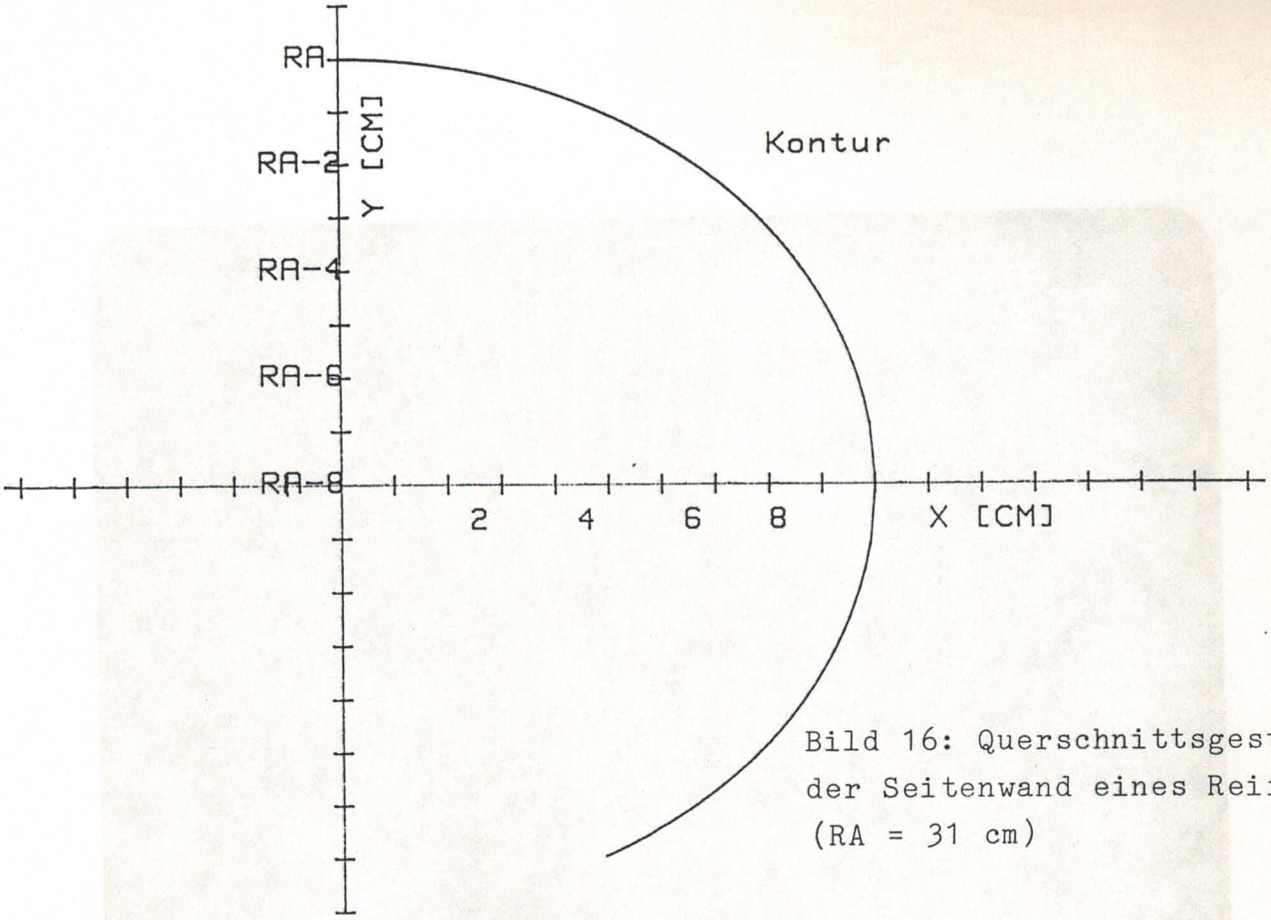


Bild 16: Querschnittsgestalt der Seitenwand eines Reifens (RA = 31 cm)

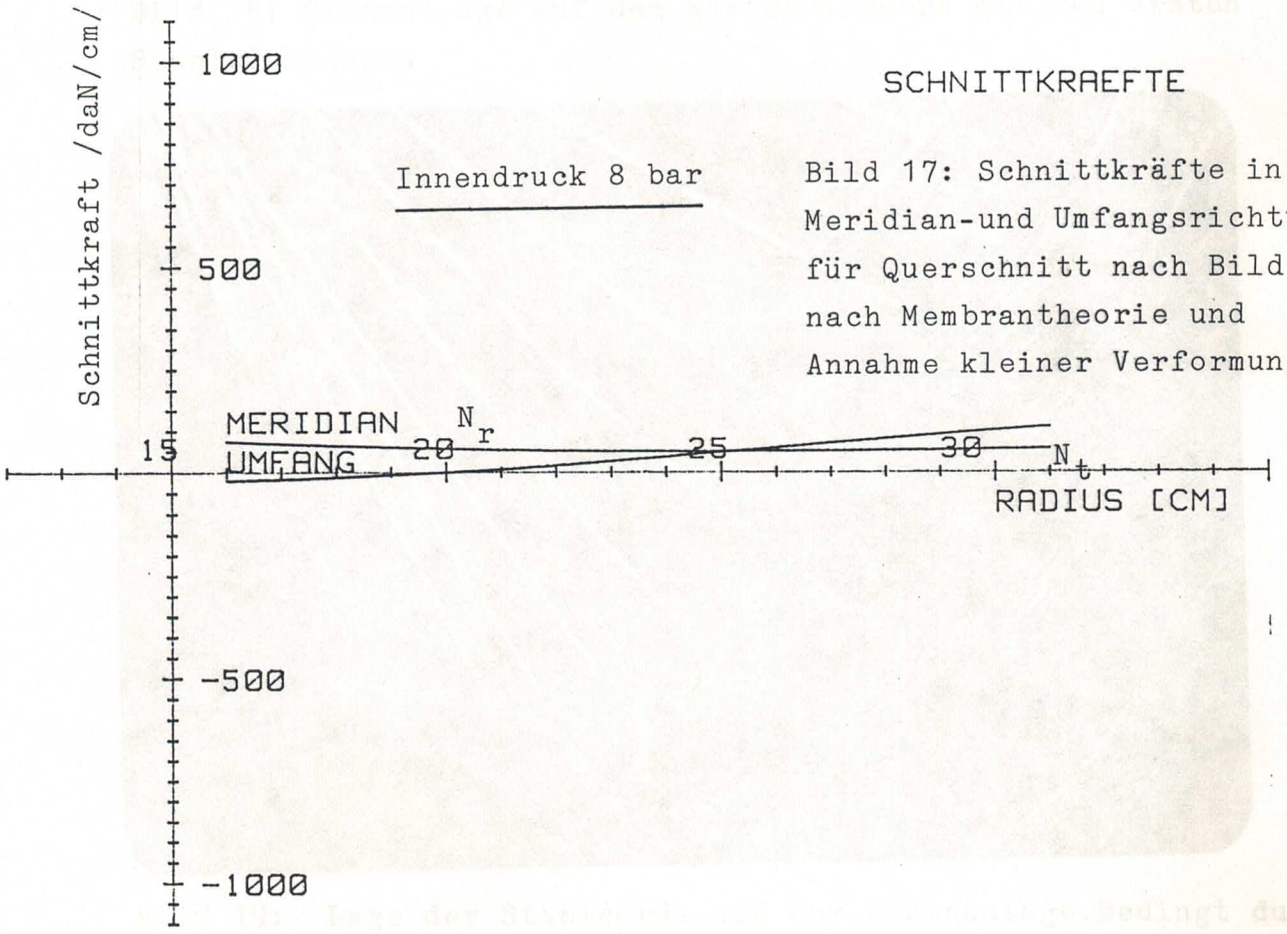


Bild 17: Schnittkräfte in Meridian-und Umfangsrichtung für Querschnitt nach Bild 16 nach Membrantheorie und Annahme kleiner Verformungen

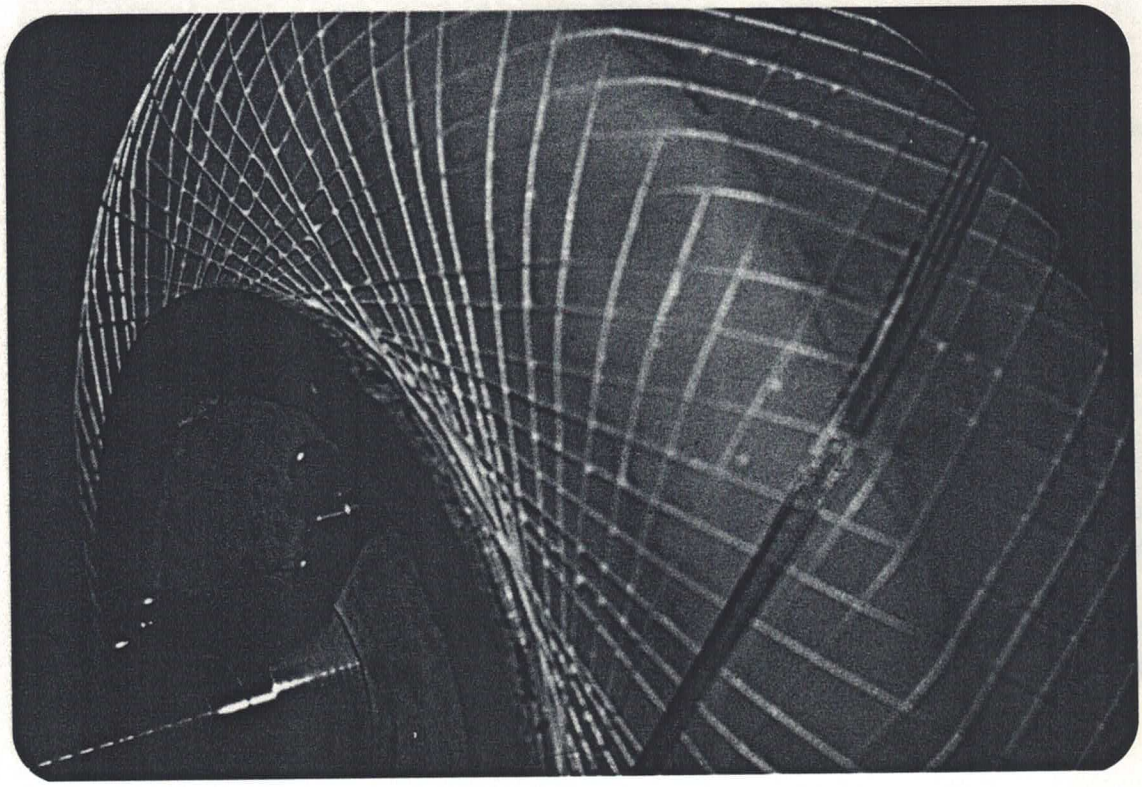


Bild 18: Distanzlage auf dem Hartschaumkern mit den ersten Stahlwicklungen

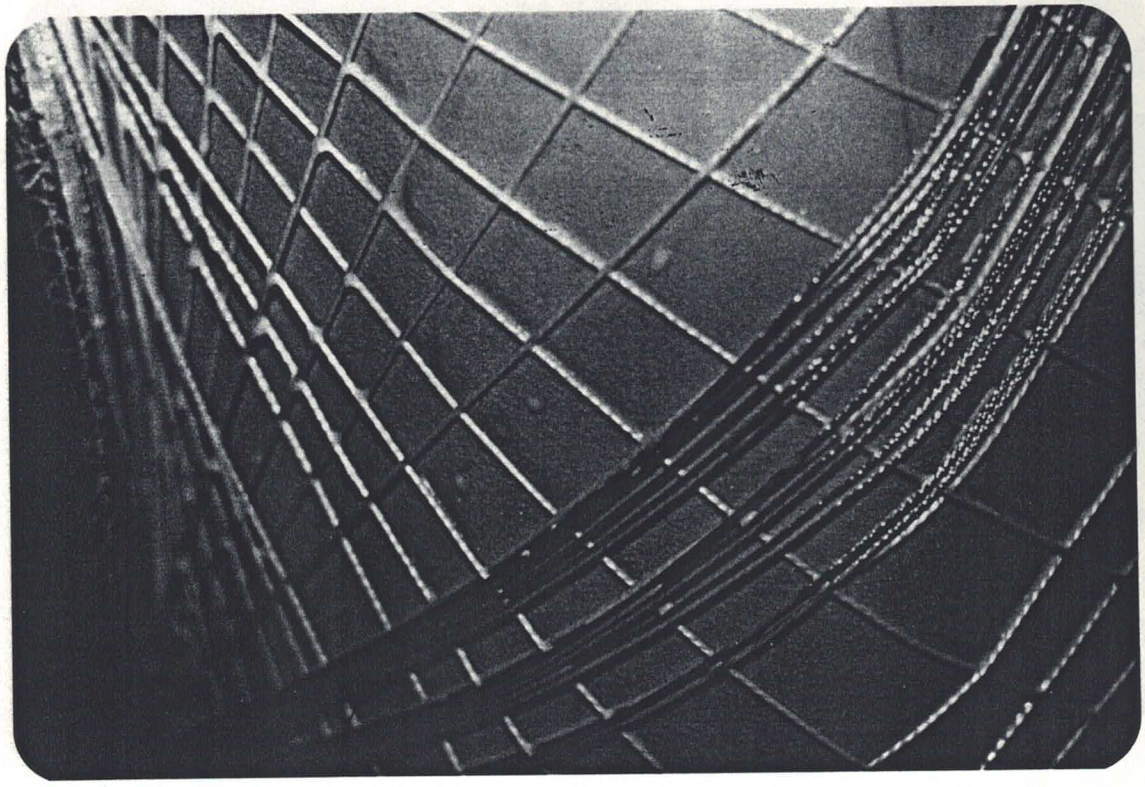


Bild 19: Lage der Stahlcorde auf der Distanzlage. Bedingt durch den Einfluß der Fäden der Distanzlage wurde der Fadenabstand der Stahlcorde ungleichmäßig

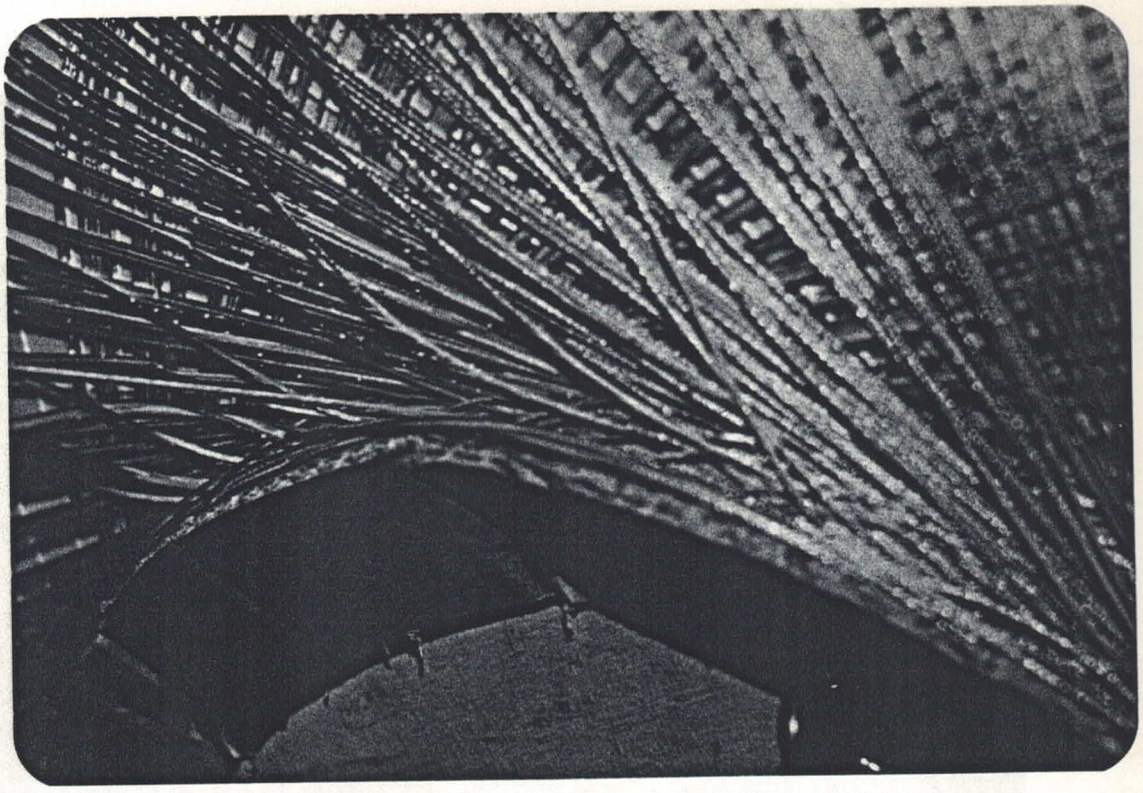


Bild 20: Ansicht der Stahlcorde im Wulstbereich, wo sehr unterschiedliche Fadenspannungen und ein ungleichmäßiger Fadenverlauf feststellbar waren

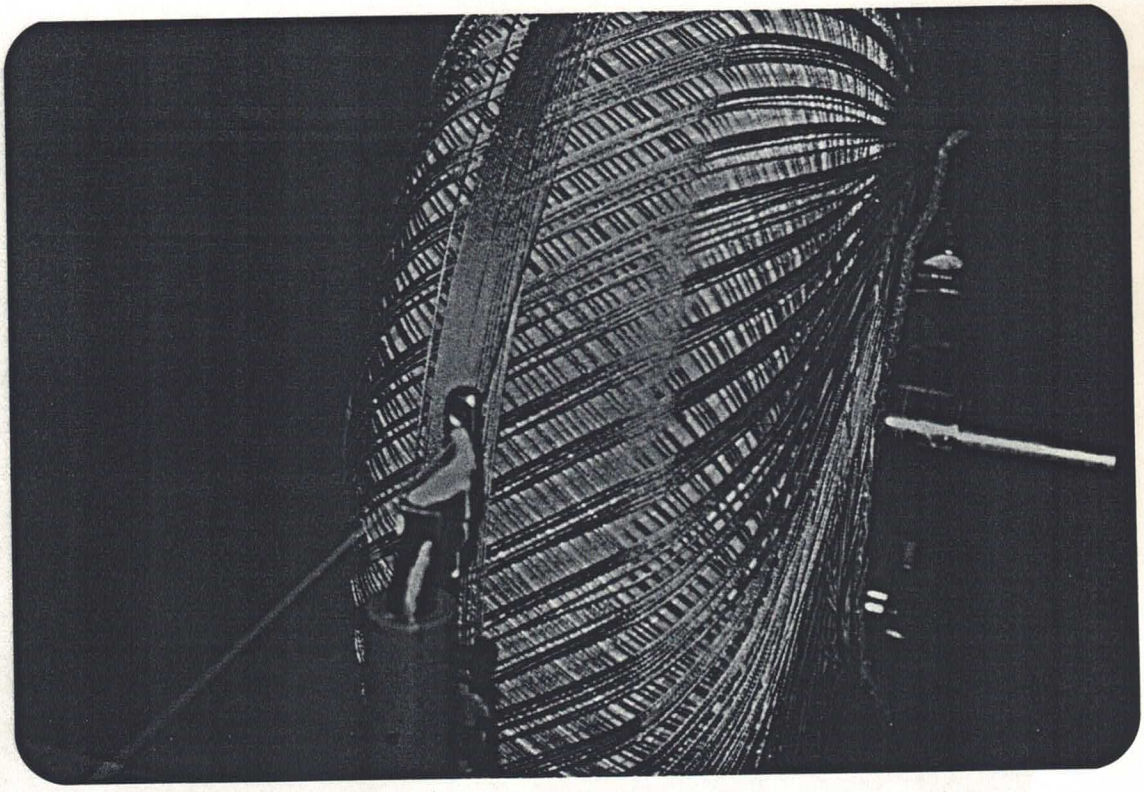


Bild 21: Ansicht der fertig gewickelten Karkasslage, auf die im letzten Arbeitsgang der Gürtel aufgewickelt wird.

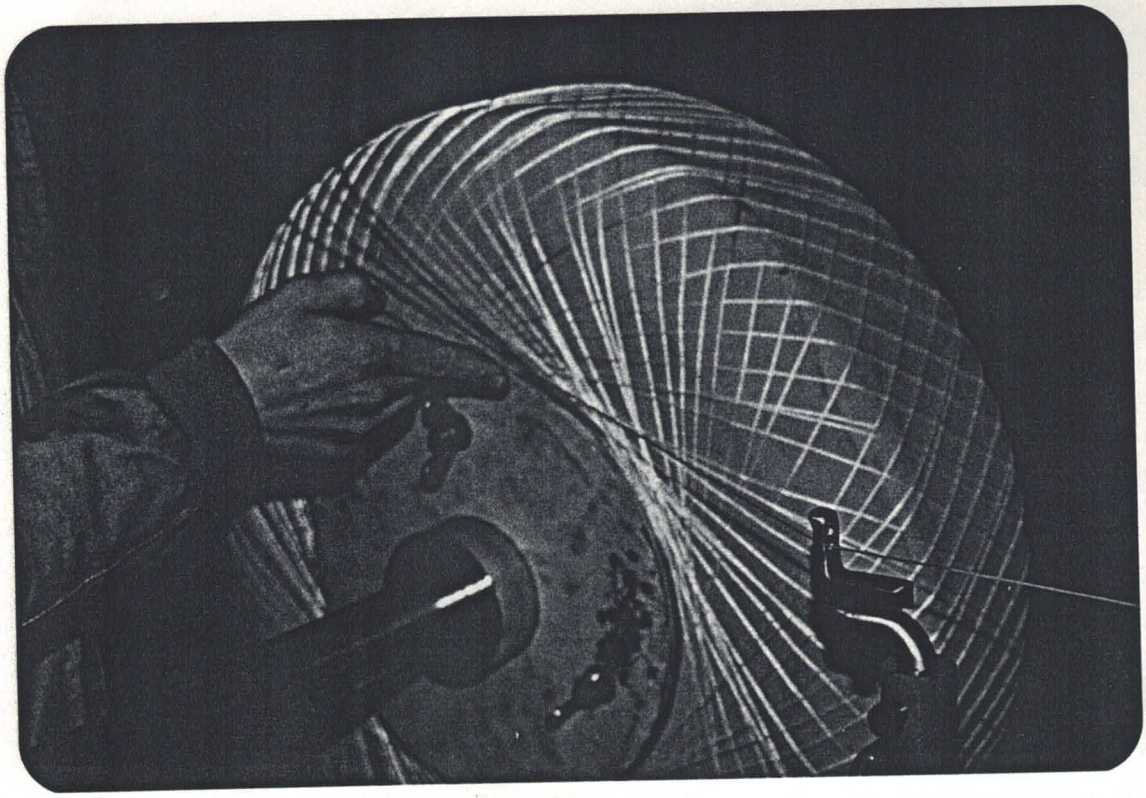


Bild 22: Wicklung der ersten Stahlcorde in einem Vorversuch mit geringer Fadendichte auf den Kern mit Distanzlage

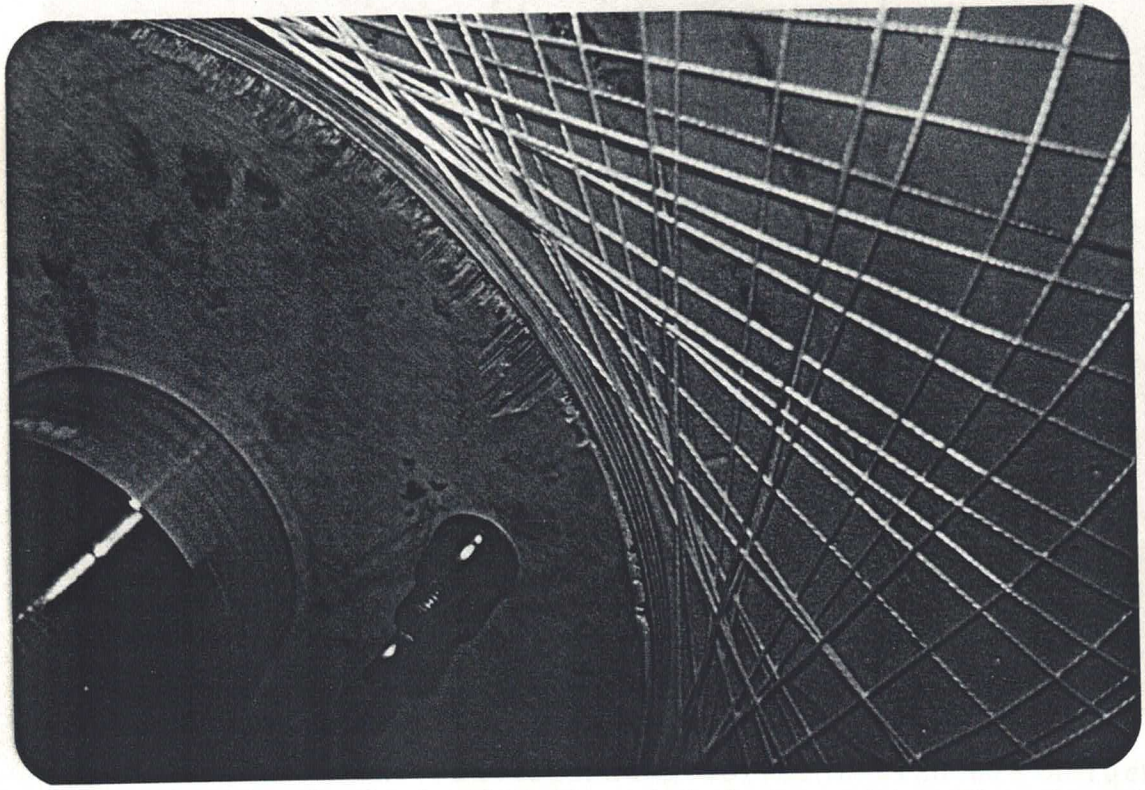


Bild 23: Die Corde im Wulstbereich legen sich nebeneinander (!) ab; die nächste Wicklung droht vom Kern abzurutschen

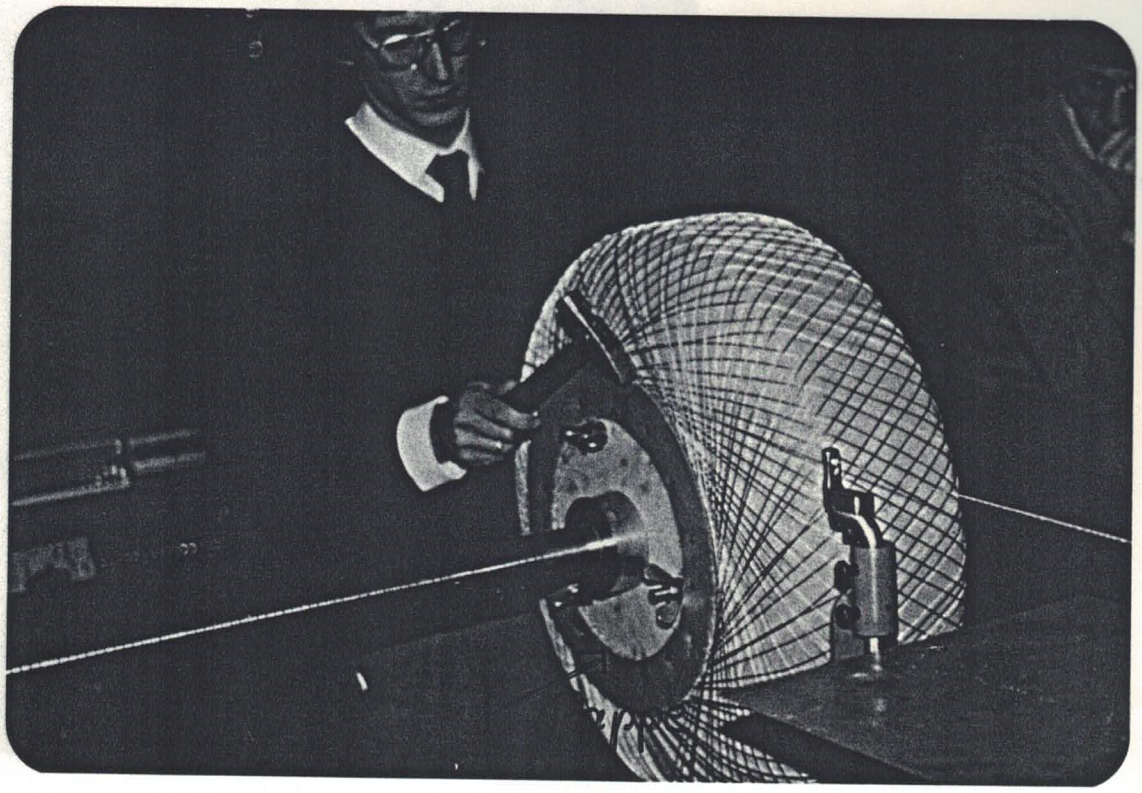


Bild 24: Vermeidung des Abrutschens des Cordes durch ein aufgena= geltes Stück Pappe und zusätzliche manuelle Führung

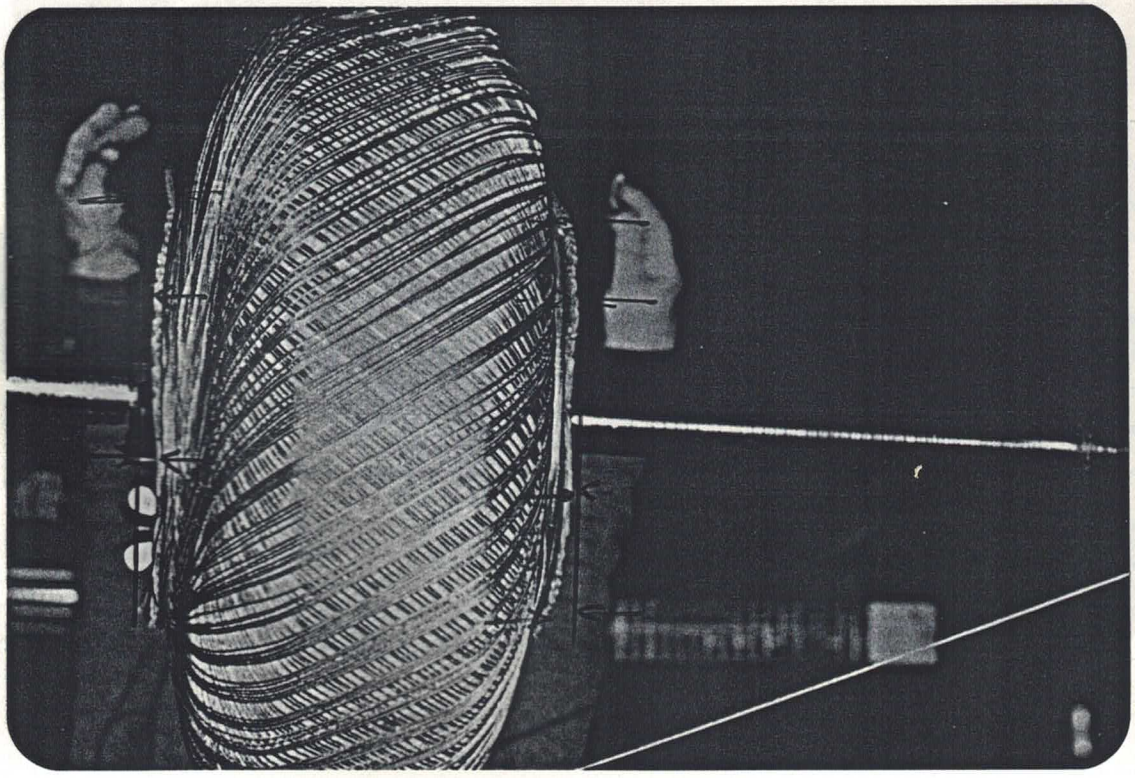


Bild 25: Durch die Fadenspannung verformt sich die aufgenagelte Pappe und führt zu einem ungleichmäßigen Fadenaufbau

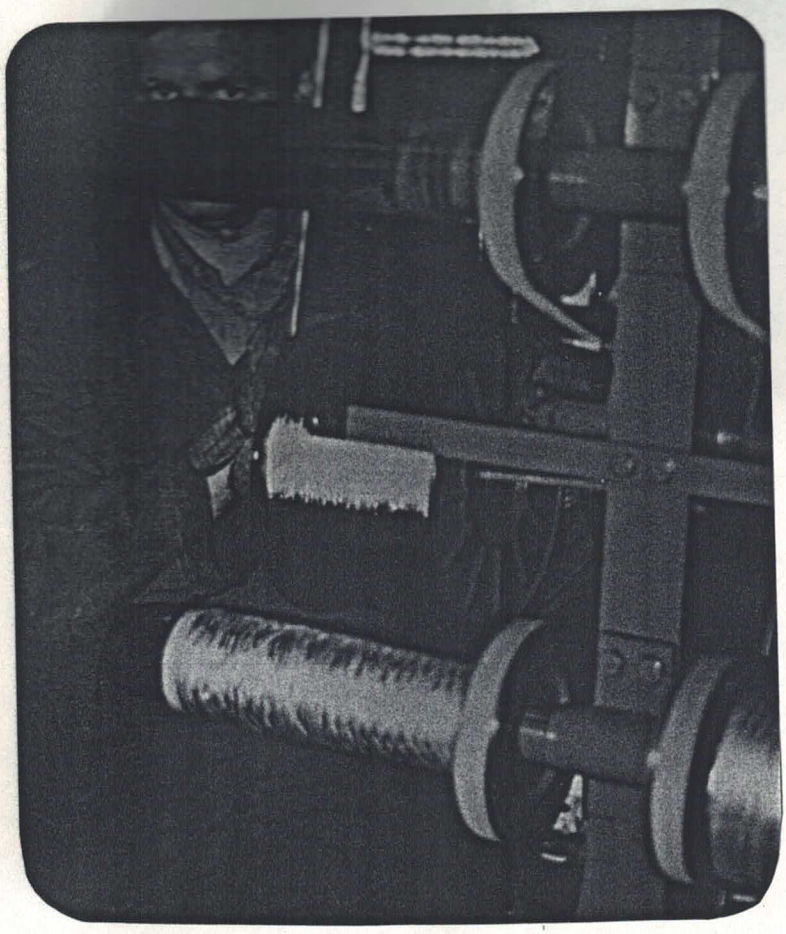


Bild 26: manuelle Abbremsung des Cordfadens

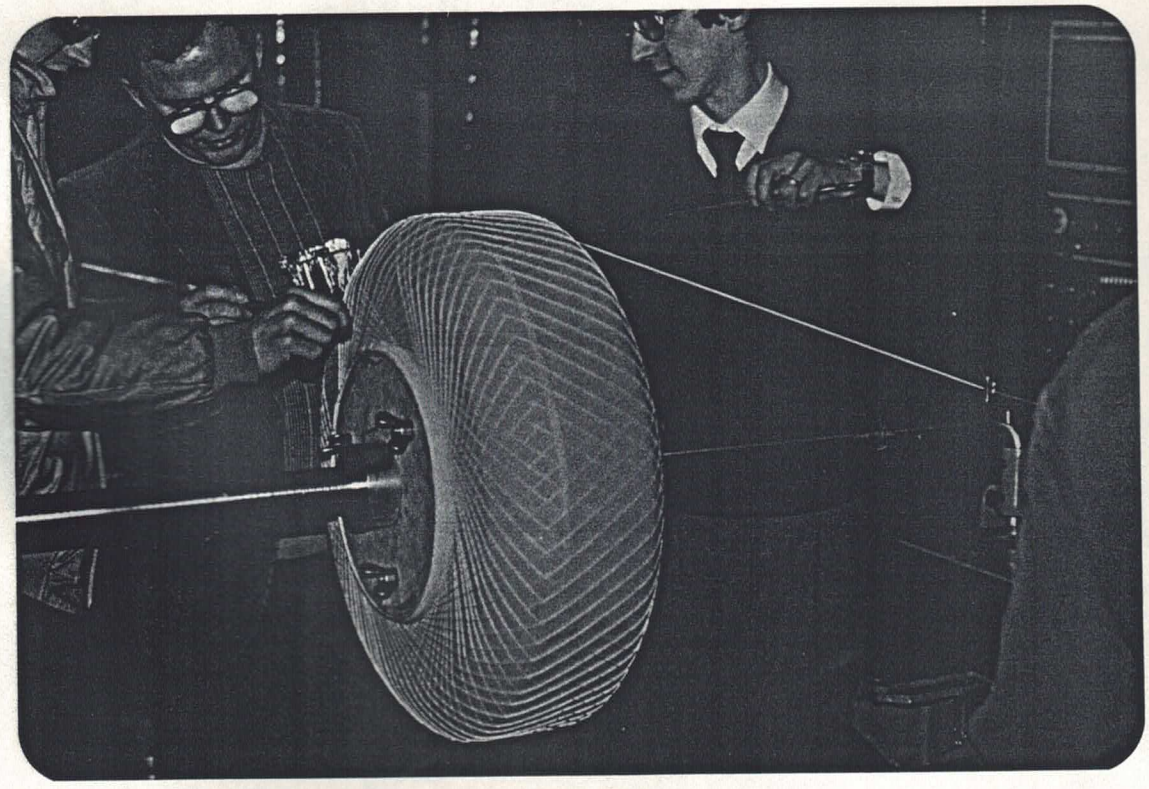


Bild 27: manuelles Aufbringen von Haftvermittler während der Wicklung der Distanzlage