

Erfahrungen und Grundlagen der Wickeltechnik

**Theoretische Überlegungen zum
zentralen Wickeln von flachen geschlossenen
Warenbahnen**

Dipl. Ing. Werner Taube
Aerzen – Groß Berkel

Inhaltsverzeichnis

1. VORWORT	1
2. ALLGEMEINES	3
2.1 Definitionen	3
2.2 Geschichtliches	3
2.3 Physikalische Grundlagen beim Transport	5
2.4 Physikalische Voraussetzungen beim Wickeln	5
2.5 Einflüsse beim Wickelaufbau	8
3. SPEICHEREIGENSCHAFTEN DES WICKELS	9
3.1 Wickellänge L	9
3.2 Durchmesser Verhältnis q	12
3.3 Anzahl der Lagen w	14
3.4 Formeln für die Praxis	15
3.4.1 Berechnung der Materiallänge im fertigen Wickel	15
3.4.2 Wickeldurchmesser bei fester Materiallänge	15
3.4.2.1 Beispiel - Speichervermögen bei festem Außendurchmesser D	15
3.4.2.2 Beispiel - Speichervermögen bei festem Hülsendurchmesser d_0	16
4. AUFBAU EINES WICKELS	17
4.1 Allgemeines	17
4.1.1 Wickelmodell	17
4.1.2 Vektoren	18
4.2 Speicherung der Wickelzugkraft F	19
4.3 Lagendruck p_l	21
4.4 Wickeldruck p	26
4.5 Presskraft F_p	28
4.6 Gewichtskraft	31
4.7 Zentrifugalkräfte	34
4.7.1 Zentrifugalkraft in der Außenlage	34
4.7.2 Verlauf der Zentrifugalkraft im Wickel	40
4.8 Lagenkraft	42
4.9 Aktive und passive Schiebekräfte	46
4.9.1 Aktive Schiebekraft F_{akt}	46
4.9.2 Passive Schiebekraft F_{pas}	49
4.9.2.1 Allgemeine Definition der Haftreibung	49
4.9.2.2 Reibkoeffizient	50
4.9.2.3 Haftreibung innerhalb des Wickels	54
4.9.2.4 Passive Schiebekraft	55
4.9.3 Einfluss der Zentrifugalkraft auf die Schiebekräfte	62
4.9.4 Differenz der Schiebekräfte	63

5. ZUGKRAFTKURVEN FÜR DAS ZENTRALE WICKELN	65
5.1 Allgemeine Betrachtung	65
5.2 Mathematische Formel für hyperbolischen Verlauf	66
5.2.1 Gleichungen für das Drehmoment	66
5.2.3 Gleichungen für die Zugkraft	71
5.2.4 Praktische Anwendungen	74
5.2.5 Anwendung der Hyperbelfunktion	78
5.2.6 Wickelaufbau mit hyperbolischem Zugkraftverlauf	86
5.2.7 Abhängigkeit von Reibkoeffizient und Charakteristik	90
5.3 Programmierbare Zugkraftkurve - Kurvengenerator	94
5.3.1 Parameter	97
5.3.2 Drehmoment	98
5.3.3 Abhängigkeit von Reibkoeffizient und Formfaktor	99
5.4 Kurvenzug nach e-Funktion	102
5.4.1 Grundlage	102
5.4.2 Wickelaufbau mit e-Funktion	105
5.5 Kurvenzug nach Fibonacci oder dem Goldenen Schnitt	107
5.5.1 Grundlage	107
5.5.2 Formel für die Zugkraft nach Fibonacci	109
5.5.3 Wickelaufbau mit Fibonacci-Kurvenzug	114
5.6 Zugkraftvorgabe nach Hyperbel und Linear	116
5.7 Zugkraftvorgabe nach ‚Verbleibender Restkraft‘	118
5.8 Zugkraftvorgabe nach SIEMENS	121
5.9 Vergleich der Zugkraftkurven	125
5.9.1 Zugkraft $F = f(d)$	126
5.9.2 Drehmomente $M_d = f(d)$	128
5.9.3 Wickeldruck $p = f(d)$	129
5.9.4 Vergleich der Lagenkräfte	130
5.9.5 Differenz der Schiebekräfte im Wickel	131
5.9.5.1 Hyperbel	131
5.9.5.2 SIEMENS	132
5.9.5.3 Residual Tension	133
5.9.5.4 Kurvengenerator	134
5.9.5.5 e-Funktion	135
5.9.5.6 Fibonacci 20 Sektoren	136
5.9.5.7 Hyperbel + Linearanteil	136
5.9.6 Differenz der Schiebekräfte	137
5.9.7 Schlußbetrachtung der Zugkraftkurven	138
6. REDUZIERUNG VON LUFTEINSCHLÜSSEN	139
6.1 Allgemeines zu Lufteinschlüssen	139
6.2 Statische Betrachtung nach Hertz	140
6.2.1 Kompression mit Deformation der Warenbahn	140
6.2.1.1 Gemeinsamer Radius r	143
6.2.1.2 Resultierendes E-Modul	144
6.2.1.3 Druckkraft F	145
6.2.1.4 Druckbreite a und Drucktiefe t	146
6.2.1.5 Druckkraft als Funktion von E_1/E_2	147
6.2.1.6 Druckbreite als Funktion von E_1/E_2	148
6.2.1.7 Drucktiefe oder Abflachung als Funktion von E_1/E_2	148
6.2.2 Rollwiderstand	150
6.2.3 Druckkraft, Spannung σ_0 bei konstanter Drucktiefe t	150

6.3	Dynamische Betrachtung nach Grenzschichttheorie	153
6.3.1	Reynold	153
6.3.2	Schichtstärke der laminaren Strömung	155
6.3.3	Schubspannung	156
6.3.4	Quetschdruck	159
6.3.5	Anpresskraft oder Kontaktkraft F_K	160
6.4	Spalt zwischen Wickel und Druckwalze	165
6.5	Wickelhärte	167
6.6	Elektrostatische Aufladung	169
6.6.1	Allgemeines zur Elektrik	169
6.6.2	Elektrostatik in Produktionsanlagen	172
6.6.3	Entladung von Warenbahnen	172
6.6.4	Elektrostatische Aufladung	174
6.6.5	Grenzen der Hochspannung	176
6.6.6	Wirkung der statischen Aufladung	177
6.7	Auswirkungen der Kontaktkraft	179
6.8	Einfluss der Zentrifugalkraft	180
6.9	Einfluss der Anfangszugkraft	186
6.10	Einfluss des Kerndurchmessers d_0	188
6.11	Zusammenfassung zum Reibkoeffizienten	189
6.11.1	Fallbeispiel 1:	189
6.11.2	Fallbeispiel 2:	190
6.11.3	Einstellungen für die Praxis	191
7.	WICKELAUFBAU	194
7.1	Auswirkungen der Lagenkraft	194
7.2	Instabilität im Wickel	194
7.3	Sternbildung	195
7.5	Falten	196
7.6	Verblockung	197
7.7	Teleskopieren	197
7.8	Spiralisieren	198
7.10	Deformationen der Planlage	199
7.11	Änderung der Warenbreite	199
8.	MATERIALEIGENSCHAFTEN	200
8.1	Das Hooke'sche Gesetz bei Kunststofffolien	200
8.1.1	Sekantenmodul	202
8.1.2	E-Modul	204
8.2	Transport von Folien	204
8.3	Wickeln von Folien	206
8.3.1	Spezifische Zugkraft	208
8.3.2	Absolute Zugkraft nach empirischen Kurven	209
8.3.3	Spezifische Zugkraft nach E-Modul	211
8.3.4	Tabelle Wichtige Kunststoffgruppen	214

9. KUNSTSTOFFE	215
9.1 Einführung	215
9.1.1 Normung und Kennzeichnung von Kunststoffen	215
9.1.3 Aufbau und Verhalten	216
9.1.4 Eigenschaften	216
9.2 Wichtige Thermoplaste	217
9.2.1 Polyamide PA	217
9.2.2 Polyacetalharze POM	217
9.2.3 Lineare Polyester PET/PBT (Polyalkylenterephthalate)	217
9.2.4 Polycarbonat PC	218
9.2.5 Modifizierte Polyphenylenether PPE	218
9.2.6 Polyacrylate PMMA	218
9.2.7 Polystyrol PS	219
9.2.8 Styrol-Butadien SB	219
9.2.9 Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat SAN	219
9.2.10 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate ABS	219
9.2.11 ASA (Luran S).	220
9.2.12 Celluloseabkömmlinge CA, CP und CAB	220
9.2.13 Polysulfone PSU/PES	220
9.2.14 Polyphenylensulfid PPS	220
9.2.15 Polyamide PI	220
9.3 Polyolefine	222
9.3.1 Polyethylen PE	222
9.3.2 Polypropylen PP	222
9.3.3 Polyvinylchlorid PVC	223
9.3.3.1 Weichmacherfreies PVC (PVC-U) (oder Hart-PVC).	223
9.3.3.2 Weichmacherhaltiges PVC (PVC-P) (oder Weich-PVC).	223
9.4 Fluorhaltige Kunststoffe	224
9.4.1 Polytetrafluorethylen PTFE	224
9.4.2 Fluorhaltige Thermoplaste	224
9.5 Duroplaste	224
9.5.1 Allgemeines	224
9.5.2 Phenolharze PF	224
9.5.3 Aminoplaste MF, UF	225
9.5.4 Ungesättigte Polyesterharze UP	225
9.5.5 Epoxidharze EP	225
9.6 Kunststoffschäume	226
9.6.1 Expandierbares Polystyrol EPS	226
9.6.2 Thermoplastschaumguß TSG	226
9.6.3 Weiche RSG-Schäume auf Basis PUR.	226
9.7 Elastomere	226
9.7.1 Gummi	227
9.7.2 Naturkautschuke NR	227
9.7.3 Styrol-Butadien-Kautschuke SBR (Buna).	227
9.7.5 Polychloroprenkautschuke CR	228
9.7.6 Acrylnitril-Butadien-Kautschuke NBR	228
9.7.7 Acrylatkautschuke ACM.	228
9.7.8 Butylkautschuke IIR	228
9.7.9 Ethylen-Propylen-Kautschuke EPM, EPDM	228
9.7.10 Fluorkautschuke FKM	229
9.7.11 Press- und giessbare Polyurethanelastomere PUR	229
9.7.12 Thermoplastisch verarbeitbare Elastomere (TPE).	229

10.	ANHANG	230
10.1	Griechische Buchstaben	230
10.2	Formelzeichen	231
10.3	Formelsammlung	233
10.4	Allgemeine Tabellen.	238
10.4.1	Physikalische Konstanten	238
10.4.2	Einheitensysteme	239
10.4.3	Umrechnung SI- auf MKS-System	240
10.4.4	Umrechnung von f p s- in das SI-System	241
10.4.5	Überschlagswerte vom m kp s- in das SI-System	242
10.4.6	Römisches Zahlensystem	242
10.4.7	Große Zahlenwerte	242
10.4.8	Vorsätze für Einheiten	243
10.5	Literaturverzeichnis	244

Um also viel Lauflänge in einem Wickel zu speichern, ist es wesentlich günstiger den Außendurchmesser D zu erhöhen und den Kerndurchmesser d_0 nicht zu verändern. Die mechanische Stabilität von Wickelhülsen und/oder Wickelwellen setzen hier eine normale physikalische Begrenzung.

4. Aufbau eines Wickels

4.1 Allgemeines

Wie kann überhaupt ein Wickel entstehen, ohne dass die einzelnen Lagen aufeinander reiben und sich dabei gegeneinander verschieben und der Wickelaufbau dadurch instabil wird?

Versuchen wir den Vorgang des Aufwickelns in möglichst kurzer Form ohne Formeln und Mathematik zu beschreiben:

Auf einen Wickelkern befestigen wir eine flache Warenbahn so, dass eine feste Verbindung zwischen der Kernoberfläche und der flachen Warenbahn entsteht. Der Wickelkern wird um seine Längsachse gedreht und dabei die Warenbahn aus der geraden Form in eine Kreisbahn gezwungen und um den Wickelkern gelegt. Wird aus dem Zentrum ein Drehmoment in den Wickel eingeleitet und dabei die Warenbahn von einem Festpunkt festgehalten, so entsteht in der Warenbahn eine Zugkraft. Je nach Größe des Drehmomentes ist diese Zugkraft zusätzlich von dem Abstand oder Radius zwischen Wickelzentrum und Auflaufpunkt der Warenbahn abhängig.

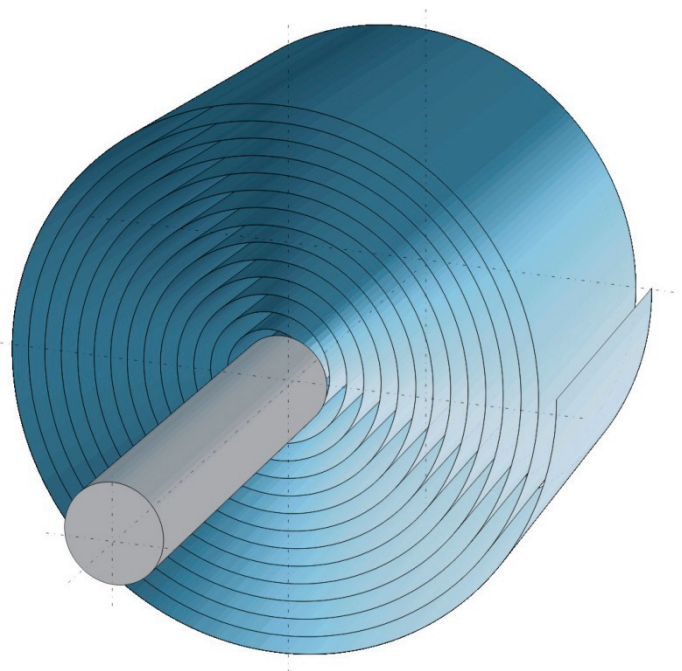


Abbildung 4-1

4.1.1 Wickelmodell

Wie kann jetzt das Drehmoment gesteigert werden, ohne dass sich die Zugkraft in den aufgewickelten Lagen ändert? Das zentral eingeleitete Drehmoment M_d muss über alle Lagen vom Kern bis zur letzten Lage am Umfang übertragen werden. Dabei darf die Warenbahn nicht zusätzlich mit einer Längenänderung belastet werden. Eine zusätzliche Änderung der Länge in einer Lage erfordert eine Erhöhung der Zugkraft innerhalb dieser Lage. Dieses würde als Folge zu Überdehnungen in der Warenbahn oder gar zu undefinierten Zugkräften führen. Beim Abwickeln würde sich das in einem zerstörten Material zeigen.

Wie können also Kräfte innerhalb des Wickels übertragen werden, ohne dass die Warenbahn in Wickel- oder Drehrichtung zusätzlich zur Wickelzugkraft belastet wird?

Um hierfür eine Antwort zu finden, müssen wir uns gedanklich zwischen die Lagen begeben und die dort herrschenden Kräfte betrachten. Kräfte lassen sich besser als Vektoren beschreiben und in Formeln einbinden.

4.1.2 Vektoren

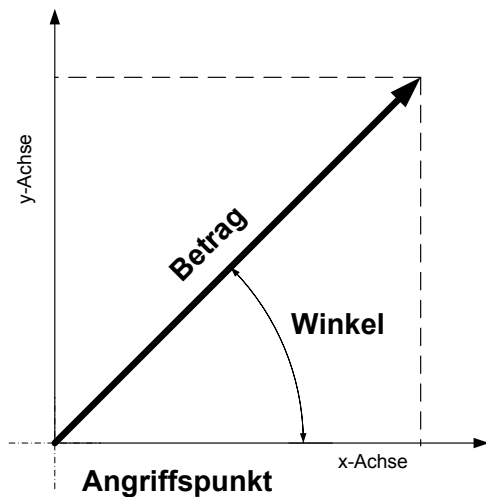


Abbildung 4-2

Zur Betrachtung von Kräften ist die Betrachtungsweise mit Vektoren sehr hilfreich. Dabei ist ein Vektor die zeichnerische Darstellung einer physikalischen Größe, die mit Hilfe der Mathematik durch einen Pfeil und einen Angriffspunkt dargestellt wird und damit nach Richtung (Winkel) und Betrag festgelegt ist (Beispiele für Vektoren sind Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kräfte usw.). Die Darstellung von Vektoren ist in der Ebene (zweidimensional) und im Raum (dreidimensional) möglich. In der Ebene lässt sich der Vektor in einem Koordinatensystem durch einen Winkel zwischen der x- und y-Achse beschreiben, im Raum sind dazu zwei Winkel, einer zwischen x- und y-

Achse und einer zwischen x- und z-Achse, notwendig.

Jeder Betrag eines Vektors lässt sich mit dem Winkel in die Komponenten der x-Achse und der y-Achse zerlegen. Diese horizontalen und vertikalen Abschnitte lassen sich addieren und subtrahieren, da sie in einer Wirkrichtung liegen.

Der Betrag des neu gebildeten Vektors ergibt sich nach dem Satz von Pythagoras aus der Wurzel der Quadratsumme der x-Abschnitte und y-Abschnitte der Achsen.

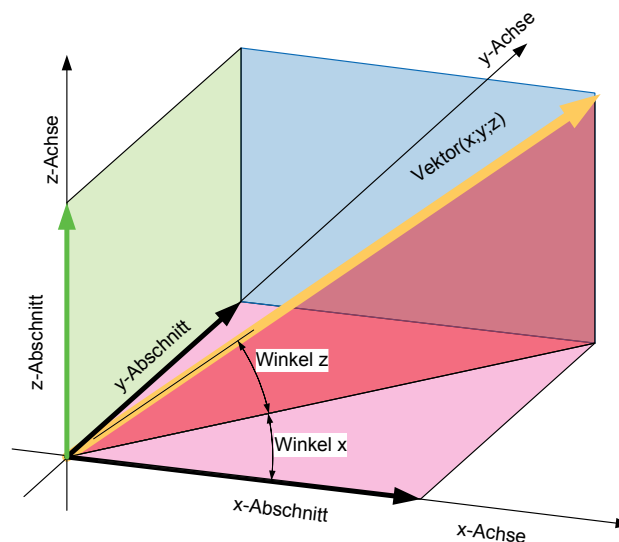
$$x - \text{Achse} = \text{Betrag} \cdot \cos \text{Winkel}$$

$$y - \text{Achse} = \text{Betrag} \cdot \sin \text{Winkel}$$

$$\text{Betrag} = \sqrt{(x - \text{Achse})^2 + (y - \text{Achse})^2}$$

Formel 4-1

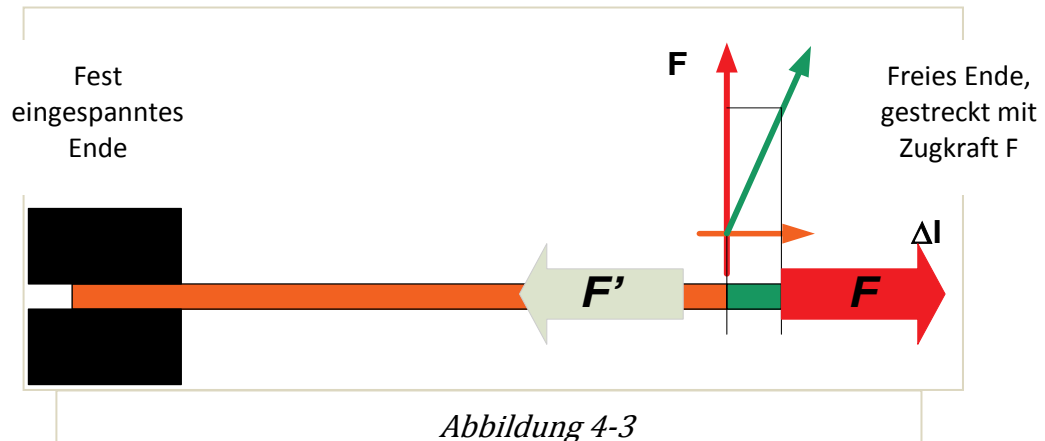
Die gesamte Theorie zum Aufbau eines Wickels lässt sich mittels solcher Vektoren leichter erklären.



4.2 Speicherung der Wickelzugkraft F

Wird eine flache Warenbahn an einem Ende fest eingespannt und am freien Ende mit einer Zugkraft F belastet, so können die dabei entstehenden Kräfte durch Vektoren dargestellt werden. Dieser Zugkraft F muss eine gleich große, aber entgegengesetzt wirkende Kraft F' gegenüber- stehen.

Solange die Vektoren der Kräfte F und F' nach dem Betrag gleich groß und in der Richtung entgegengesetzt sind, ist dieses Kräftesystem in Ruhe. Wird die Kraft F gesteigert, so wird im gleichen Maß die Gegenkraft F' gesteigert, wobei die Warenbahn proportional zur Größe der Kraft mit einer Längenänderung Δl gestreckt wird.



Damit sind die ersten Vektoren am Wickel die Wickelzugkraft F und ihre Gegenkraft F' . Durch die Wirkung der Zugkraft F wird die Warenbahn gestreckt oder gedehnt. Wird die Zugkraft F wieder Null, so wird auch die Streckung oder Dehnung mit der Längenänderung Δl in der Warenbahn wieder Null. Je stärker die Warenbahn gezogen wird, desto länger wird die Warenbahn und gleichzeitig schmaler und dünner, denn rein physikalisch erfolgt die Längenänderung bei gleichem Volumen der Körper vor und nach dem Strecken.

Die Warenbahn darf durch die Zugkraft F nur soweit gestreckt werden, wie sie nach dem Lösen der Zugkraft wieder in die ursprüngliche Länge zurückkehrt. Solange dieses gegeben ist, spricht man von einem elastischen Verhalten der Warenbahn. Kehrt die Warenbahn nicht mehr auf die ursprüngliche Länge zurück, so spricht man von einer plastischen Verformung der Warenbahn. Eine plastische Verformung der flachen Warenbahn darf aber auf keinen Fall beim Wickeln durch die Zugkräfte erfolgen und deshalb müssen die Zugkräfte in bestimmten Grenzen gehalten werden. Etwas anderes ist das gezielte Recken von Folien, das für das Wickeln ungeeignet ist und wir hier nicht behandeln.

Bereits für den Transport einer flachen Warenbahn sind Kräfte erforderlich. Betrachten wir den Transport einer Warenbahn von einem Festpunkt zu einem nächsten Festpunkt. Dabei wird ein Festpunkt wie folgt definiert: Ist die Umfangsgeschwindigkeit einer Walze unter dem Einfluss von Zugkräften am Umfang gleich groß der Geschwindigkeit der transportierten Warenbahn, so bildet die Walze einen Festpunkt. Der Festpunkt ist ein Maß für die Geschwindigkeit der transportierten Warenbahn unabhängig von den in der Warenbahn auftretenden Zugkräften.

Aus der Physik wissen wir: „Ohne Kraft kann nichts bewegt werden“.

Die zum Transport in der Warenbahn wirkende Kraft F lässt sich bestimmen aus:

- der Geschwindigkeitsdifferenz Δv innerhalb der Strecke
- dem E-Modul E der Warenbahn und
- der Querschnittsfläche A der Warenbahn

Dabei ist die Geschwindigkeit der einlaufenden Warenbahn immer kleiner als die der auslaufenden Warenbahn. In einer Formel zusammengefasst ergibt sich (Ableitung siehe Formel 8-3 und folgende):

$$v_{aus} = v_{ein} \left(1 + \frac{F}{E \cdot A} \right)$$

Formel 4-2

und daraus ergibt sich die Zugkraft F mit

$$F = \left(\frac{v_{aus}}{v_{ein}} - 1 \right) \cdot E \cdot A$$

Formel 4-3

Die Vektoren der Kraft F und der Geschwindigkeit v haben die gleiche Richtung. Solange in der Formel für die Zugkraft F der Quotient der auslaufenden zur einlaufenden Geschwindigkeit größer 1 ist, ist auch die Richtung positiv, d. h. in Richtung vom Einlauf zum Auslauf. Wird der Quotient kleiner 1, so wird das Ergebnis negativ und die Kraft in der Warenbahn kehrt die Richtung gegenüber der Laufrichtung der Warenbahn um.

Wir wissen nun, dass sich unter dem Einfluss des Vektors Zugkraft F die Länge l der Warenbahn um die Länge Δl verändert. Gleichzeitig bildet sich zur Zugkraft F in der Warenbahn eine Gegenkraft F' .

Beide Kräfte F und F' sind nach dem Betrag gleich groß und sind in der Wirkrichtung um 180° gedreht, also genau entgegengesetzt.

Außerhalb des Wickels wird die Warenbahn mit der Zugkraft F gespannt. Wird die Warenbahn in eine Lage des Wickels gezwungen, so wird diese Zugkraft F' durch die gespannte Länge in einer Lage des Wickels eingespeichert.

Da wir uns im elastischen Bereich der Warenbahn bewegen, möchte die Warenbahn wieder die ursprüngliche Länge annehmen und sich dazu zusammenziehen.

Will man jetzt eine solche Lage im Wickel mehr spannen, also die bereits vorhandene Länge vergrößern, so muss als erstes die innere Zugkraft F' überwunden werden, denn nur größere Zugkräfte als die bereits vorhandene Zugkräfte F' können eine weitere Änderung der Länge hervorrufen.

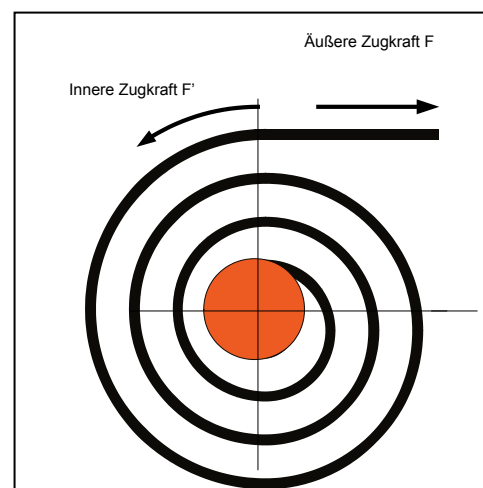


Abbildung 4-4

Größere Kräfte für die eingespeicherte Zugkraft F' , die beim Wickeln durch die Wickelzugkraft F erzeugt wurde, sind nicht erwünscht. Würde sich beim Wickelvorgang die Zugkraft F' innerhalb der Warenbahn undefiniert erhöhen, so wäre die Spannung in der Warenbahn unabhängig von der Zugkraft F und damit eine Beeinflussung des Wickels durch die Wickelzugkraft F nicht gegeben. Unter solchen Umständen könnte nicht mit reproduzierbaren Werten gewickelt werden!

Die Übertragung der Drehmomente von innen nach außen muss also ohne eine zusätzliche Längenänderung der eingewickelten Warenbahnen erfolgen. Es müssen sich andere Kräfte aus den vorhandenen physikalischen Gegebenheiten bilden, die für die Übertragung der Drehmomente und Kräfte verantwortlich sind.

4.3 Legendruck p_L

Legen wir eine mit der Zugkraft F gestreckte Warenbahn auf einen Zylinder oder einen Wickelkern und vollenden eine Umschlingung von 360° , so wird die gestreckte Warenbahn in eine geschlossene Lage gezwungen.

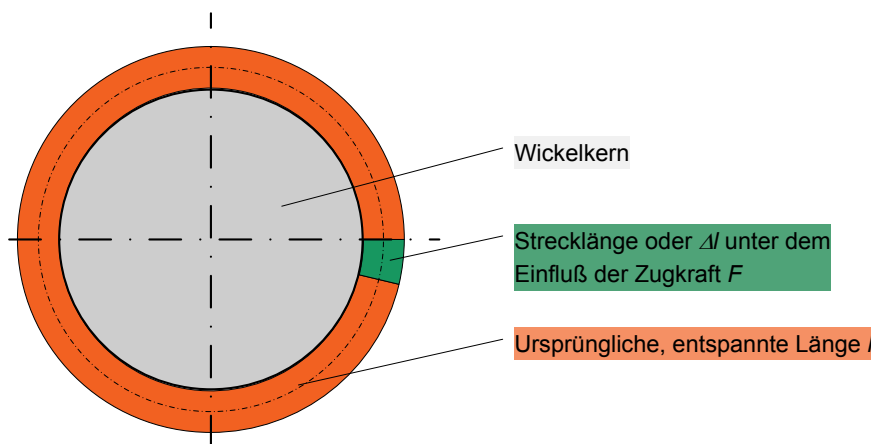


Abbildung 4-5

Stellen wir uns nun vor, dass die Warenbahn in der gestreckten Länge $L + \Delta l$ exakt dem Umfang des Wickelkerns entspricht und ferner die Länge zu einem geschlossenen Rohr zusammengefügt wird, so kann sich die Warenbahn nicht mehr entspannen, sie kann nicht mehr ihre ursprüngliche Länge

annehmen und die Zugkraft F' wird in der geschlossenen Lage eingespeichert. Die in die Ringform gezwungene Warenbahn müsste sich zum Entspannen auf ihre ursprüngliche Länge L in dem aktuellen Durchmesser verringern. Da sich aber hier schon der Wickelkern befindet, kann die Warenbahn nur einen Druck p in Richtung des kleineren Durchmessers abgeben. Es entsteht damit eine Flächenpressung p an einer gewölbten Fläche.

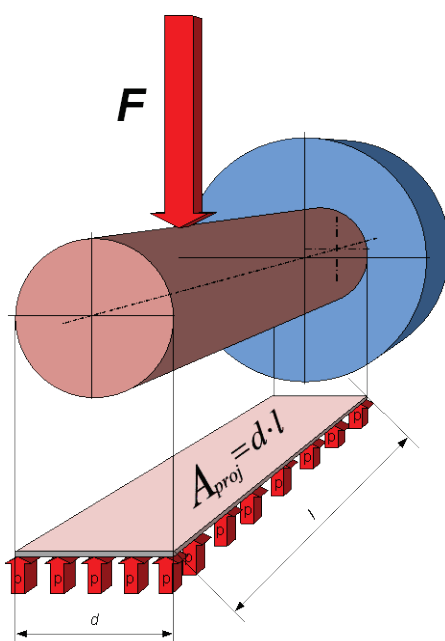


Abbildung 4-6

Schwieriger als bei ebenen Flächen sind die Pressungsverhältnisse an der gekrümmten Oberfläche von Lagerzapfen, Bolzen und Nieten. Die Normalkräfte F auf die Berührungsflächen sind hier statisch unbestimmt.

Wie in der Abbildung 4-6 gezeigt, denkt man sich deshalb einen Mittelwert für den Druck p gleichmäßig über der Flächenprojektion A_{proj} verteilt und rechnet dann mit der Flächenpressung nach Formel 4-4.