

Steigerung der Effizienz des duroplastischen Wickelprozesses

Martin Schlottermüller, Thomas Bayerl, Ralf Schledjewski
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Kaiserslautern

Contact:
Dr.-Ing. Ralf Schledjewski
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schödinger-Straße Gebäude 58
67663 Kaiserslautern
Germany
Tel.: +49 (0)631 2017 312
Fax: +49 (0)631 2017 199
e-mail: ralf.schledjewski@ivw.uni-kl.de

**Paper submitted for oral presentation at “Verbundwerkstoffe – 15. Symposium: Verbundwerkstoffe und
Werkstoffverbunde”, 6th – 8th April 2005, Kassel, Germany**

Steigerung der Effizienz des duroplastischen Wickelprozesses

Martin Schlottermüller, Thomas Bayerl, Ralf Schledjewski
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern

1 Einführung

Druckspeichersysteme gewinnen im Automobilbau immer stärker an Bedeutung. Die zunehmende Zahl an erdgasbetriebenen Fahrzeugen und jüngste Entwicklungen in Richtung Wasserstoffspeichertechniken mit Betriebsdrücken von bis zu 700 bar stellen immer höhere Anforderungen an die Druckbehälter. Behälter für diese extrem hohen Drücke können nur dann im Fahrzeug zum Einsatz kommen, wenn sie nicht in herkömmlicher Ganzstahl-Bauweise umgesetzt werden. Zur Zeit ist die Verstärkung von Metallinern mit kohlenstofffaserbasierten Faser-Kunststoff-Verbunden die einzige Option einen Kompromiss zwischen Leichtbau und Kosten zu finden. Die Kosten für solche Behälter werden zum großen Teil von den Materialien bestimmt. Die Einflussnahme ist auf diesem Sektor begrenzt. Bessere Möglichkeiten bieten sich hier bei der Herstellung der Druckbehälter. Gefragt sind Fertigungstechnologien, die hohe Stückzahlen ökonomisch sinnvoll realisieren können. Dabei ist die duroplastische Wickeltechnik anerkanntermaßen eine etablierte Technik im Bereich der Fertigung solcher Druckbehälter. Die Senkung der Zykluszeiten gegenüber der bisher eingesetzten Fertigungstechnik für das Bewickeln von Behältern ist durch die gleichzeitige Zuführung des imprägnierten Fasermaterials an mehreren Stellen am Umfang möglich. Um die Baulänge einer Wickelanlage gering zu halten, müssen die Ablegevorrichtungen radial beweglich sein. Bisher gefertigte Ringfadenaugen weisen diese Verstellung nicht auf. Am Institut für Verbundwerkstoffe wurde eine derartig erweiterte Anlage für das Nasswickelverfahren von Wasserstoffdruckspeichern konzipiert. Die Anlage ist mit acht am Umfang verteilten Fadenablegern ausgestattet, und erlaubt somit bei gleicher Verfahrensgeschwindigkeit einen entsprechend höheren Materialausstoß im Vergleich zu herkömmlichen Wickelanlagen.

2 Anlagentechnische Voraussetzungen

Bei der Auslegung einer Wickelanlage haben sich in der Vergangenheit die folgenden Bedingungen als sinnvoll herausgestellt. Sie sollten auch bei der Konzipierung einer Mehrkopfanlage eingehalten werden. Die Bedingungen sind:

- I) Die Symmetrieachse des Fadenauges soll möglichst immer senkrecht zu der zu bewickelnden Oberflächentangente stehen.
- II) Die freie Fadenlänge (Länge zwischen Fadenaug und Wickelkern) sollte immer gleich bleiben.

Berücksichtigt man beim Wickeln obige Regeln, werden die besten Wickelergebnisse erzielt. Die Einhaltung dieser Grundsätze ist für ein einzelnes Fadenaug selbst bei komplexen Geometrien leicht zu bewerkstelligen. Bei mehreren Fadenaugen ohne radiale Vertellmöglichkeiten kann das jedoch nur bei einfachen Kernformen (wie z.B. Rohren) garantiert werden. Bei komplexen Formen,

wie beispielsweise einer isotensoiden Polkappe eines Druckbehälters, versagen die herkömmlichen Methoden. Dies liegt besonders an der starren Konstruktion konventioneller Ringfadenaugen. Um Regel I einhalten zu können, muss jeder Ablegekopf, in den ein Fadenauge integriert ist, so schwenkbar sein, dass seine Symmetrieachse senkrecht zur Oberflächentangente gedreht werden kann. Realisierbar ist dies durch ein entsprechendes Gelenk. Bild 1 zeigt die mögliche Ausführung eines solchen Gelenks.

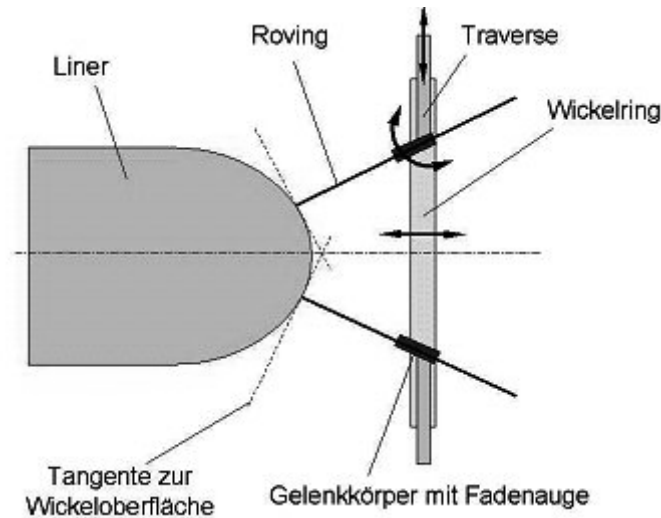


Bild 1: Ringfadenaug mit Gelenk für die orthogonale Ausrichtung des Fadenauges zur Oberflächentangente

Es ist zu erkennen, dass mit diesem Mechanismus zwar die Bedingung I zu erfüllen ist, dass aber Bedingung II einen weiteren Freiheitsgrad bedingt. In Bild 2 ist dargestellt, auf welche Weise sich die Einhaltung von Regel II auf die Bauraumlänge der Gesamtanlage auswirkt.

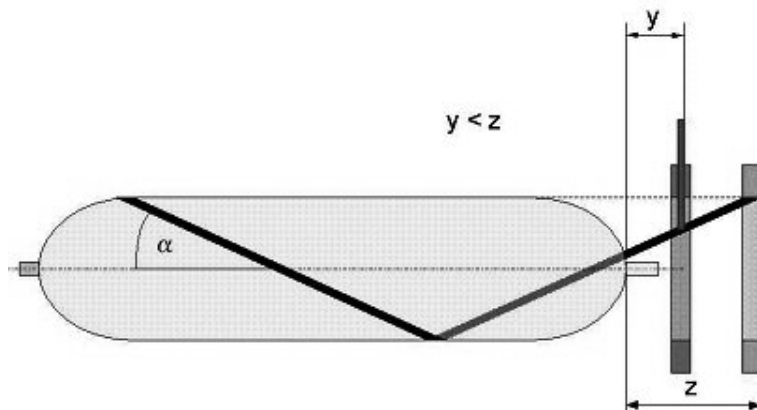


Bild 2: Verfahrweg in Längsrichtung in Abhängigkeit der freien Fadenlänge beim Wickeln

Es ist leicht zu erkennen, dass der Verfahrweg des Ringfadenauges sich von z auf y verkürzt, wenn eine radiale Zustellung und somit eine konstante freie Fadenlänge realisiert wird. Das Verhältnis ist direkt proportional.

Eine Verkürzung des Verfahrweges bedeutet aber nicht nur einen geringeren Bauraum für die Wickelanlage, sondern auch eine Verkürzung der Zykluszeit. Die entsprechende Distanz verkürzt sich bei jedem Hub auf beiden Seiten des Behälters entsprechend.

Eine deutlich größere Ersparnis an Prozesszeit kann jedoch erzielt werden, wenn die Anzahl der Fadenableger vervielfacht wird. Von der Prozesszeit her wäre eine Vollbedeckung der

Behälteroberfläche in einem Hub erstrebenswert. Das bedeutet, dass die Anzahl der Fadenableger dem Quotienten aus projizierter Breite des Rovings und Umfang des Behälters entspricht. In Bild 3 ist dargestellt, wie sich diese projizierte Breite berechnet.

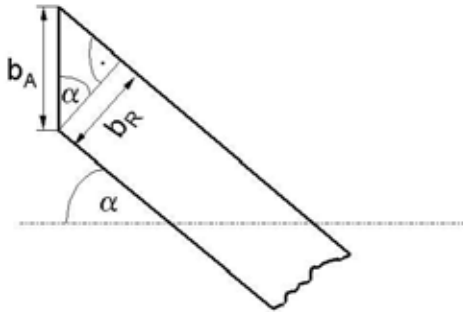


Bild 3: Projizierte Bandbreite am Umfang eines Druckbehälters

Dabei wird der Wickelwinkel α gegen die Behälterlängsachse aufgetragen, so dass sich in Bild 3 die projizierte Breite b_A in Umfangsrichtung ergibt. Sie kann mit der Ablegebreite des Rovings b_R aus $b_R/\cos \alpha$ berechnet werden. Teilt man den Umfang durch die Ablegebreite b_A , so ergibt sich die für einen definierten Wickelwinkel notwendige Anzahl an abzulegenden Rovings und entsprechend der Fadenableger. Es wird deutlich, dass eine Vollbedeckung nur in seltenen Fällen sinnvoll ist, zumal sie für jeden Wickelwinkel neu optimiert werden muss.

Die Rovings weisen in der Regel eine Ablegebreite von einigen Millimetern bis hin zu 20 mm auf. Für größere Behälter ergibt sich so schnell eine sehr hohe Anzahl von benötigten Fadenablegern. Der Bauraum für einen Fadenableger und die geschilderten Verstellmechanismen ist aber nicht beliebig klein. Es gibt einen minimalen Radius, bei dem die Fadenableger aufgrund ihrer Abmessung aneinander stoßen. Dieser gibt die realisierbare Anzahl der Fadenableger in Abhängigkeit von der benötigten freien Fadenlänge vor. Für die Untersuchungen an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH kam auf diese Weise eine Ableger-Anzahl von 8 zustande. Mit jedem Ableger sollen jeweils 3 Rovings mit 12 k (12.000 Einzelfilamente) abgelegt werden. Mit diesem Aufbau kann eine deutliche Steigerung der Ablegerate erreicht werden. Als Maßstab gilt hier eine normale Wickelanlage, bei der mit einem Ableger 10 Rovings auf einmal abgelegt werden. Bei gleicher Wickelgeschwindigkeit kann so die 2,4-fache Menge an Material abgelegt werden.

Der Wickelwinkel kann genau wie beim normalen Wickeln in den bekannten Grenzen zwischen Rutschen und Überlappung eingestellt werden. Er ist von der Behältergeometrie abhängig. Nach der sogenannten Clairault'sche Bedingung ergibt sich der Wickelwinkel als Funktion von Äquatordurchmesser und Polöffnungsdurchmesser für die geodätischen Bahnen – der kürzesten Verbindung zwischen zwei Punkten auf einer gekrümmten Fläche. Abweichungen von diesen Bahnen führen durch die Abzugskraft bei den mit relativ niedrig viskosem Harz getränkten Rovings zum Rutschen hin zu der geodätischen Bahn. Die Clairault'sche Bedingung besagt, dass der Abstand eines Punktes auf der Oberfläche (Radius) multipliziert mit dem Sinus des Wickelwinkels konstant bleibt. Auf diese Weise lässt sich der Wickelwinkel für den gesamten Behälter bestimmen. Ausgangspunkt dieser Rechnung ist die Tatsache, dass an der Polöffnung ein Wickelwinkel von 90° herrscht, da hier der Punkt erreicht ist, an dem der Wickelwinkel das Vorzeichen – also auch die Richtung – wechselt. An dieser Stelle gibt die Restöffnung des Anschlussstutzens den kleinsten Radius vor, der bewickelt werden muss. Hier gilt:

$$y_p \sin 90^\circ = \text{const. und somit} \\ y_p = \text{const.}$$

(1)

gleichzeitig gilt aber auch

$$y_R \sin \alpha = \text{const.} \quad (2)$$

Beide Bedingungen leiten sich aus der Clairault'schen Bedingung her. Aus der Gleichsetzung ergibt sich:

$$\sin \alpha (y) = y_p / y_R \quad (3)$$

Der Wickelwinkel α wird also durch das Verhältnis von Polöffnungsradius zu Äquatorradius bestimmt, wenn man keine Hilfsmittel einsetzt, die ein Abweichen von der geodätischen Bahn ermöglichen. Er ist an die Behältergeometrie gebunden. Abweichen von der geodätischen Bahn ist in gewissen Grenzen möglich. Will man einen Wickelwinkel realisieren, der von dem berechneten abweicht, so kann man den Polöffnungsradius der Wicklung von der des Behälters abweichen lassen. Ein Vorgehen, das allerdings nur bei einem größeren Radius der Bewicklung gegenüber der Behälteröffnung durchführbar ist.

Das sich einstellende Wickelmuster weist beim Einsatz mehrerer Fadenaugen eine geringere Anzahl von Kreuzungspunkten auf. Weniger Umlenkungen der Fasern an diesen Kreuzungspunkten führen zu zwei Effekten. Zum einen steigt die Zugfestigkeit des Laminats, da die Fasern in geringerem Maße einer kombinierten Zug-/Biegebeanspruchung unterliegen, zum anderen sinkt die Schubfestigkeit, da die Lagen untereinander nicht mehr so stark miteinander „verwoben“ sind. Beide Effekte sind in ihren Auswirkungen allerdings begrenzt, so dass sich nur graduelle Unterschiede zu konventionell hergestellten Behältern ergeben sollten.

Bei Umfangwicklung sind die Unterschiede zu Anlagen mit einem Ableger deutlicher. Entsprechend einer achtgängigen Schraube hat eine Anlage mit acht Ablegern eine höhere Steigung, sprich einen geringeren Wickelwinkel (oder die Rovings überlappen sich). Kann man üblicherweise von 88° als Winkel für eine Umfangslage ausgehen, so stellen sich hier eher Winkel von 70° ein (in Abhängigkeit vom Behälterdurchmesser und verwendetem Roving).

Es ist also unerlässlich, die Anlage auf die herzustellenden Bauteile hin anzupassen. Die Universalität einer herkömmlichen Portalwickelanlage wird hier zu Gunsten der für einen speziellen Einsatzzweck optimierten Anlage mit niedrigeren Zykluszeiten eingeschränkt.

3 Wickelanlage mit mehreren Fadenablegern

Für den vorliegenden Fall wurde eine Anzahl von acht Fadenablegern ausgewählt. Der Rahmen, der die Zustellarme aufnimmt hat eine Breite von 400 mm und gibt somit den maximalen Durchmesser vor, der noch bewickelt werden kann. Die einstellbare freie Fadenlänge wurde durch radiales Verfahren der Arme realisiert. Da sich die acht Arme immer synchron verstellen sollen, wurde der Antrieb über einen Zahnriemen umgesetzt. Mittels des Zahnriemens und eines Servomotors können die mit Zahnstangen versehenen Arme ihre freie Fadenlänge der Kontur des Behälters jederzeit anpassen. In Bild 4 sieht man die montierte Anlage an einem Portalsystem. Das bisher umgesetzte Prinzip soll noch durch die Umlenkungen an den Enden der Arme erweitert werden, wobei die Einstellung des Winkels an diesen Umlenkungen idealerweise durch die Fadenabzugskraft selbst eingestellt werden sollte. Vor dem Hintergrund des Steuerungsaufwandes und des begrenzten Bauraumes scheint eine geregelte Ansteuerung der Umlenkungen nicht sinnvoll.



Bild 4: Mechanik einer Wickelanlage mit 8 Fadenablegern

Ein weiterer Faktor, der die Zykluszeiten von Wickelanlagen begrenzt, ist ihre diskontinuierliche Arbeitsweise. Insbesondere der Wechselvorgang, wenn ein Behälter fertig bewickelt ist, stellt eine hohe Totzeit in der Fertigung dar. Um diesen Nachteil zu überwinden sollte eine Mehrkopfwickelanlage so ausgelegt werden, dass sie als Wickelstraße mit einer entsprechenden Anzahl an Fadenablegern hintereinander entlang der Fertigungsstraße postiert die gewünschte Bedeckung umsetzen kann. Dabei durchläuft der zu bewickelnde Körper die Anlage. Ist der hohe Anlageninvest nicht gerechtfertigt, so besteht die Möglichkeit, eine semikontinuierliche Anlage zu bauen. Bei dieser bewegt sich im Gegensatz zu der kontinuierlichen der Fadenableger wie bei einer konventionellen Anlage. Sie kann aber mit einem neuen zu verstärkenden Behälter bestückt werden, während der Wickelvorgang noch läuft. Ist ein Behälter fertiggestellt, so werden die Rotationsachsen des fertigen und des neuen Behälters gekoppelt und der Wickelvorgang setzt sich über die Verbindungsstelle hinweg fort auf den neuen. Die Achsen werden wieder entkoppelt und der Wickelvorgang des neuen Behälters nimmt seinen Lauf. Auf der Verbindungsachse, die nur mit einer Lage bewickelt wurde, werden die Rovings durchtrennt und der fertiggestellte Behälter kann entnommen werden. Auf diese Weise entfällt nicht nur die reine Montagezeit als Totzeit an der Anlage, sondern insbesondere muss die deutlich höhere Anzahl an Rovings nicht wieder auf dem neuen Behälter fixiert werden. Bild 5 stellt ein solches semikontinuierliches Konzept dar. Man kann die beiden Teile der Anlage erkennen, die beim Wechsel entsprechend gekoppelt werden. Die Stützen in der Mitte werden beim Verfahren des Ringwickelauges entfernt und die Koppelung der beiden Drehachsen übernimmt für kurze Zeit auch eine tragende Funktion. Hat sich das Fadenaug über die Trennstelle auf den anderen Behälter bewegt, werden die Stützen wieder ausgefahren und der Vorgang setzt sich in der beschriebenen Form fort. In der Darstellung ebenfalls zu sehen, ist ein Behälter der beim Beginn der Fertigung als Anwickelhilfe gedacht ist. Auf ihm werden lediglich die ersten Rovings befestigt. Der Wechsel auf den ersten echten Behälter erfolgt sobald dies möglich

ist. Auf diese Weise befindet sich die Einlaufphase der Imprägnierung nicht im Laminat des Druckbehälters.

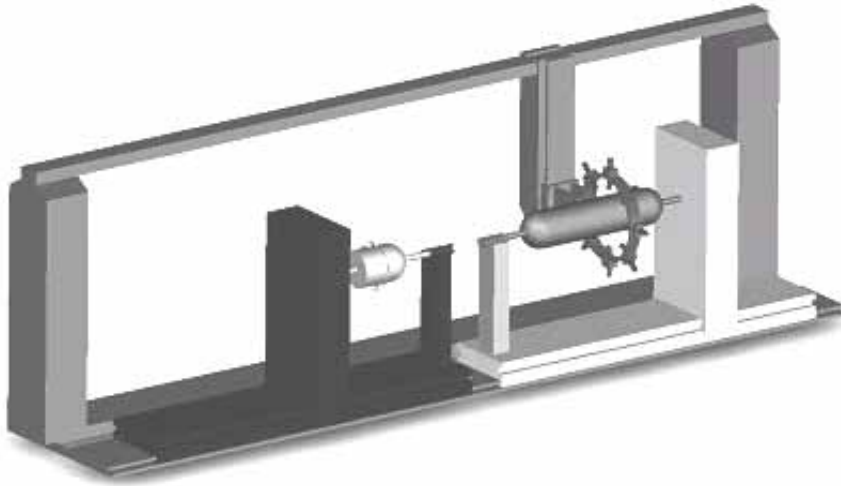


Bild 5: Semikontinuierliches Anlagenkonzept

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, vor welchem Hintergrund die Anforderungen an den Wickelprozess entstehen und welche Randbedingungen für eine Steigerung der Materialablegerate für ein System mit mehreren Fadenablegern bestehen. Es existieren Einschränkungen beim Wickelwinkel, wenn man eine Überlappung der Rovings vermeiden will. Um die Zykluszeiten weiter zu senken wurde eine semikontinuierlich Anlage vorgestellt, die den Wechsel des zu bewickelnden Behälters beschleunigt. Eine Bewertung von Nutzen und Kosten für eine solche Anlage muss für den Einzelfall erfolgen. Sie hängt in hohem Maße von den folgenden Faktoren ab. Zum einen muss geklärt werden, welche unterschiedlichen Geometrien hergestellt werden sollen. Zum anderen spielt die Stückzahl pro Jahr eine bedeutende Rolle. Letztlich sollte bedacht werden, ob eine spezialisierte Maschine die Anforderungen an die Flexibilität eines Betriebes nicht zu stark einschränkt. Angesichts der eingangs erwähnten absehbaren Stückzahlen bei einer breit angelegten Markteinführung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge rechtfertigt sich die Investition für das vorgestellte Konzept.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der Europäischen Union für die gewährte finanzielle Unterstützung im Rahmen des Verbundprojekts „StorHy“ (Vertragsnummer: SES6-CT-2004-502667) bedanken.


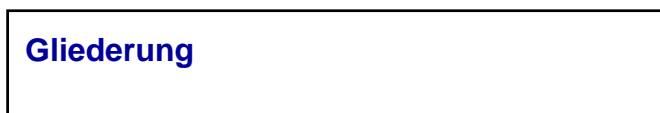


Steigerung der Effizienz des duroplastischen Wickelprozesses

M. Schlottermüller, T. Bayerl, R. Schledjewski

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schrödinger-Str. 58
67663 Kaiserslautern
Germany
www.ivw.uni-kl.de

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Schl 1



Gliederung

- **Motivation für die Effizienzsteigerung**
- **Theorie eines Mehrfachablegers**
- **Kann eine Vollbedeckung in einem Wickeldurchgang erreicht werden?**
- **Anwickeleinheit**
- **Wechselanlage**
- **Ausblick**

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Schl 2

Motivation für die Effizienzsteigerung



- **Steigende Nachfrage nach Druckbehältern für den Automobilsektor**
- **Herkömmliche Drucktanks (~ 350 bar)**
 - ↪ Erdgasdrucktanks wie sie bereits zur Anwendung kommen.
 - ↪ Wasserstoffdrucktanks für erste Vorserienfahrzeuge
- **Hochdrucktanks für die Wasserstoffspeicherung**
 - ↪ Druckniveau 700 bar Betriebsdruck
 - ↪ Berstdruck ~ 2100 bar
- **Druck kann nur noch durch Kohlenstofffaser- Verstärkung bei akzeptablem Gewicht erreicht werden.**
- **Versuche mit Typ III und Typ IV Behältern laufen**
 - ↪ Typ III: Stahlliner mit Kohlenstofffaserverstärkung
 - ↪ Typ IV: Kunststoffliner mit Kohlenstofffaserverstärkung

Motivation für die Effizienzsteigerung



- **Tanks werden z. Zt. von den Firmen Dynetek und Quantum zur Serienreife gebracht**
 - ↪ Dynetek: Typ III
 - ↪ Quantum Typ IV

Dynetek



Quantum



Motivation für die Effizienzsteigerung

- Bisherige Fertigung auf herkömmlichen Wickelanlagen mit einer Fadenzuführung pro Kern
- Ablegerate (Material pro Zeit) begrenzt
- Zykluszeiten zu lang
- Automatisierungsgrad zu gering, besonders beim Behälterwechsel



Theorie eines Mehrfachablegers

- Um die Ablegerate zu erhöhen, bieten sich die folgenden Maßnahmen an:
 - Steigerung der Wickelgeschwindigkeit
 - ↪ Die Anlagen laufen heute bereits mit Geschwindigkeiten von 1-2 m/s. Bei höheren Geschwindigkeiten kann keine vollständige Imprägnierung mehr gewährleistet werden
 - Mehr Rovings mit einem Kopf ablegen
 - ↪ Die Anlagen laufen heute bereits mit bis zu 10 Rovings nebeneinander. Die sich einstellende Bandbreite limitiert aber ab einem gewissen Betrag den Wickelwinkel zu stark
 - Mehrere Ablegeköpfe am Umfang verteilt
 - ↪ Wird heute noch selten angewandt. Die Anlagen sind nur bei hohen Stückzahlen und konstanten Behälterdurchmessern wirtschaftlich

Theorie eines Mehrfachablegers



Eine Anlage mit mehreren Ablegeköpfen sollte die nachfolgenden Forderungen erfüllen:

- **Bedingung I:** Die Symmetrieachse des Fadenauges soll möglichst immer senkrecht zu der zu bewickelnden Oberfläche sein
- **Bedingung II:** Die freie Fadenlänge (Distanz zwischen Fadenauge und Wickelkern) sollte immer gleich bleiben

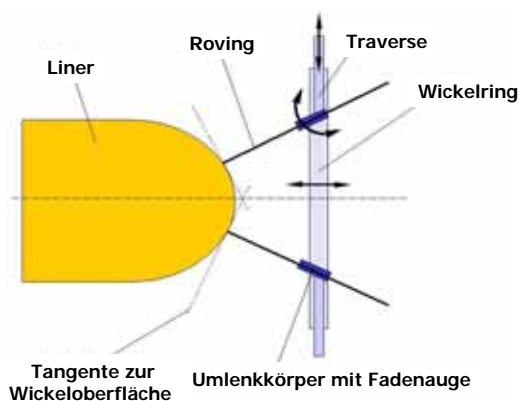
Außerdem sind die folgenden Punkte wünschenswert:

- **Modulare und kompakte Bauweise der Imprägniereinheit(en)**
- **Automatisierung des Anwickelprozesses**

Theorie eines Mehrfachablegers



Bedingung I: Symmetrieachse des Fadenauges senkrecht zur zu bewickelnden Oberflächentangente

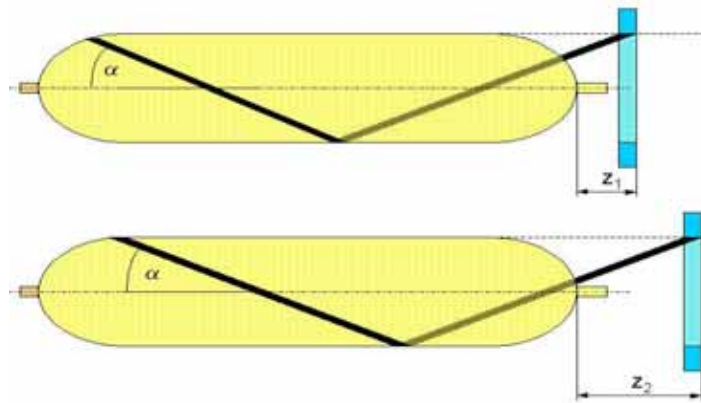


Durch die Umlenkungen wird der Roving entsprechend definiert auf der Oberfläche abgelegt. Besonders bei breiteren Bändern entstehen so keine Verwerfungen

Theorie eines Mehrfachablegers



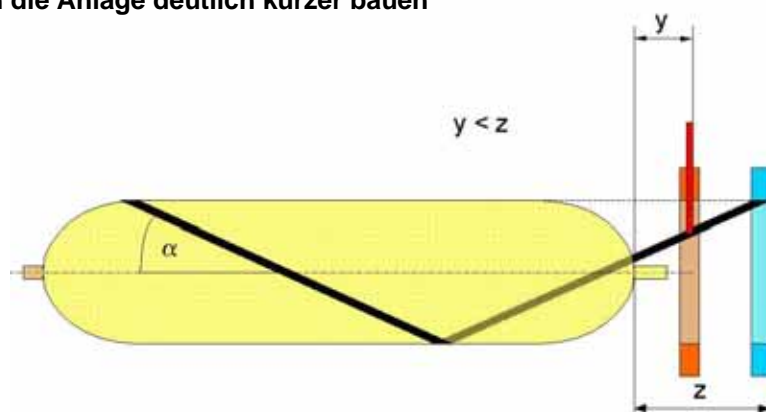
Bedingung II: Gleich bleibende freie Fadenlänge
Je nach Polöffnungsdurchmesser stellt sich eine Anlagenverfahrstrecke z ein



Theorie eines Mehrfachablegers



Der Verfahrweg der Anlage kann erheblich verkürzt werden, wenn das Ringfadenauge über eine radiale Verstellung verfügt. Auf diese Weise kann die Anlage deutlich kürzer bauen



Kann eine Vollbedeckung in einem Wickeldurchgang erreicht werden?



Behältervorgaben

Behälterradius
Polöffnungsradius

$y_{\ddot{A}} = 150 \text{ mm}$
 $y_p = 52 \text{ mm}$



$$\sin \alpha_{\ddot{A}} = \frac{y_p}{y_{\ddot{A}}}$$

Filamentanzahl

Breite

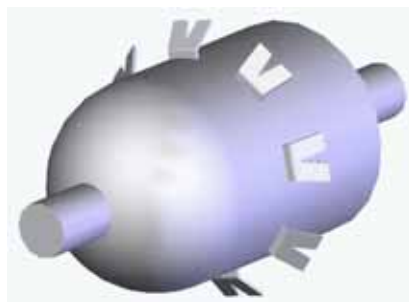
ben. Fadenaugen

6 K	2 mm	465
12 K	5 mm	186
24 K	9 mm	104

Anwickeleinheit

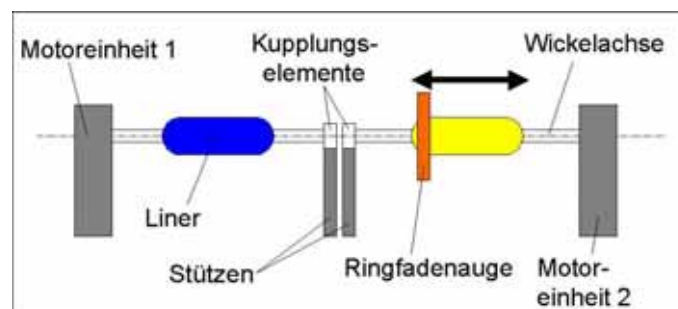


- Das erste Befestigen von vielen Rovings am Umfang des Wickelkörpers ohne weitere Hilfsmittel ist zeitintensiv
- Die Rovings werden deshalb mittels Klemmvorrichtungen auf dem Behälter fixiert



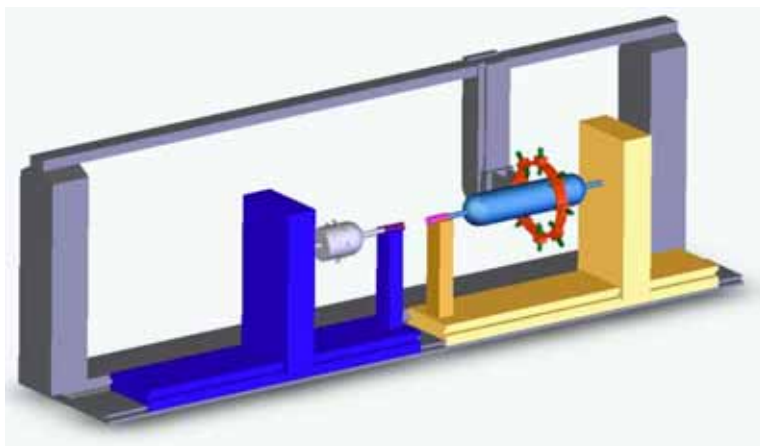
Wechselanlage

- Jeweils ein Behälter wird bewickelt, auf der anderen Seite wird die Anlage bestückt
- Erneutes Anwickeln wird vermieden in dem eine einzelne Lage über die Verbindungsachse hinüber auf den anderen Behälter gewickelt wird, dann wird die Verbindung (und die Lage) getrennt



Wechselanlage

- Die Wechselanlage kann an einer normalen Portalanlage montiert werden



Ausblick

- **Das Konzept wurde in einem ersten Prototypen umgesetzt**
- **Erste Versuche verliefen erfolgreich**
- **Eine weitere Steigerung der Ablegerate ist auch gegenüber einer 3-Spindelanlage möglich**



Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der Europäischen Union für die gewährte finanzielle Unterstützung im Rahmen des Verbundprojekts „StorHy“ (Vertragsnummer: SES6-CT-2004-502667) bedanken.