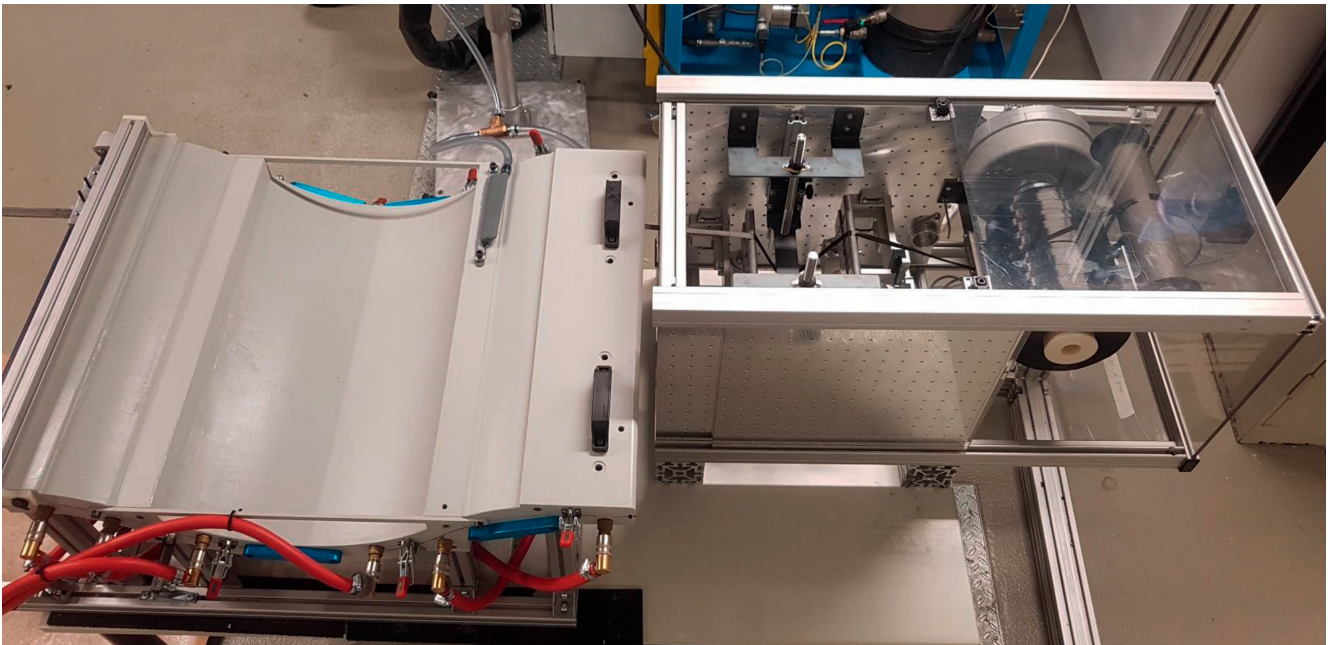


Schneller, einfacher, günstiger

Ein neues Imprägnierwerkzeug reduziert die Prozesskosten beim Wickelverfahren

Ein von der TH Köln in Zusammenarbeit mit dem Werkzeugbauer Röttger entwickeltes Werkzeugsystem erhöht die Imprägniergeschwindigkeit für Kohle- und Glasfasern auf 1,6 bis 2 m/s, ohne die Laminatqualität zu verschlechtern. Dies senkt die Herstellkosten erheblich, indem die Belegzeiten einer Wickelanlage verringert werden. Ein leichteres Handling und verkürzte Reinigungszeiten runden das System ab.



Gesamtversuchsanordnung im Faserverbundlabor der TH Köln. Links: Imprägnierwerkzeug in Doppelsinusform, rechts: Ultraschall-Faserspreizer (© TH Köln)

Die derzeit gängige Methode zur Imprägnierung von Faserbündeln beim Wickelverfahren ist die Walzenimprägnierung. Dabei werden die Rovings über eine drehende Imprägnierwalze geführt, die durch die Rotation Harz aus einem Bad zum Roving transportiert (**Bild 1**). Die Zeit, die mindestens benötigt wird, bis eine vollständige Imprägnierung erreicht werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab [1], wie zum Beispiel der Viskosität des Harzsystems und dem Imprägnierdruck (**Gleichung 1**).

Die Kontaktzone (s_k) zwischen Harzfilm und Fasern wird bestimmt durch den Durchmesser der Imprägnierwalze und die Positionierung der Niederhalter. Daraus ergibt sich zusammen mit der min-

destens erforderlichen Imprägnierzeit die maximale Prozessgeschwindigkeit (**Gleichung 2**). Laut [2] liegt die derzeit maximale Imprägniergeschwindigkeit bei 1,0 m/s.

Nachteile der Walzenimprägnierung

Die Walzenimprägnierung hat jedoch einige gravierende Nachteile. So ist die Kontaktzone zwischen Fasern und Kunststoff relativ klein; der einzige Weg, sie zu vergrößern, ist, den Durchmesser der Imprägnierwalze zu erhöhen. Allerdings ist die Größe des Durchmessers durch den Bauraum der Maschine begrenzt.

Problematisch ist auch, dass es zu Verschmutzungen kommen kann, wenn Harz von der Walze spritzt, weil die drehende

Imprägnierwalze eine Zentrifugalkraft auf den Harzfilm erzeugt. Insbesondere die Niederhalter sind gefährdet, weil im Falle einer Verschmutzung dort die Fasern mit dem Halter verkleben und es in Folge dessen zu Fusselbildung kommt.

Aufgrund der relativ großen Harzmenge (oft mehrere Liter), die sich unterhalb der Trommel befinden muss, um einen Tränkefilm auf der Walze zu erzeugen, müssen Harze mit langen Topfzeiten verwendet werden. Das bedeutet lange Aushärtezeiten bei der späteren Herstellung eines Faserverbundbauteils, weil Aushärte- und Topfzeit miteinander verbunden sind. Dies stellt einen großen Kostenfaktor dar und begrenzt direkt die Produktionskapazität. Dazu kommt: Nach Fertig-

stellung des Produkts muss die im Harzbad befindliche Harzmenge als Abfall entsorgt werden.

Weiterer Nachteil: Einerseits ist eine niedrige Viskosität η der Harze wünschenswert, um die Imprägnierzeit zu verkürzen (**Gleichung 1**). Andererseits ist die Temperaturführung schwierig, weil die Bäder nur von unten beheizt werden und oben offen sind, während die Walze unbeheizt ist. Dadurch besteht eine starke Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Nicht zuletzt ist die Reinigung des Systems aufgrund der vielen Bauteile sehr aufwendig.

Diesen Nachteilen steht im Wesentlichen die Tatsache gegenüber, dass es sich bei diesem Konzept um ein bewährtes Verfahren handelt, das eine ausreichend gute Laminatqualität erzeugt.

System mit höherer Prozessgeschwindigkeit

Um eine höhere Prozessgeschwindigkeit zu erreichen, hat die TH Köln in Zusammenarbeit mit der Röttger Werkzeugbau GmbH & Co. KG, Marienheide, ein System entwickelt, das aus zwei aufeinander abgestimmten Komponenten besteht, die die einzelnen Parameter der Tränggleichung (**Gleichung 1**) beeinflussen:

- einem Ultraschall-Faserspreizer (zur Einstellung von t_R) und
- einem geschlossenen Imprägnierwerkzeug (zur Einstellung von η , Δp , r_0).

Der Faserspreizer dient, wie der Name sagt, zur Aufspreizung der Fasern und reduziert so die Dicke des Faserbündels t_R und damit den Fließweg r des Kunststoffs durch den Roving. Der Grenzfall ist erreicht, wenn alle Filamente des Rovings direkt nebeneinander liegen, was die Fläche aber sehr breit macht. Für einen 48k Kohlefaserroving – das Kürzel steht für 48000 Einzelfilamente – mit 8 μ m Filamentdurchmesser liegt die Grenzbreite bei 384 mm. In der getesteten Konfiguration (**Bild 2**) lag die erreichte Faserbreite für einen 48k Kohlefaserroving in Abhängigkeit der Fadenspannung zwischen 20 und 30 mm, was für die Imprägnierung ausreichend war.

Abhängig vom Fasertyp und den spezifischen Bedingungen der verwendeten Wickelanlage, wie der Rovingzuführung oder der möglichen Fadenspannung, können folgende Parameter des Faserspreizers angepasst werden:

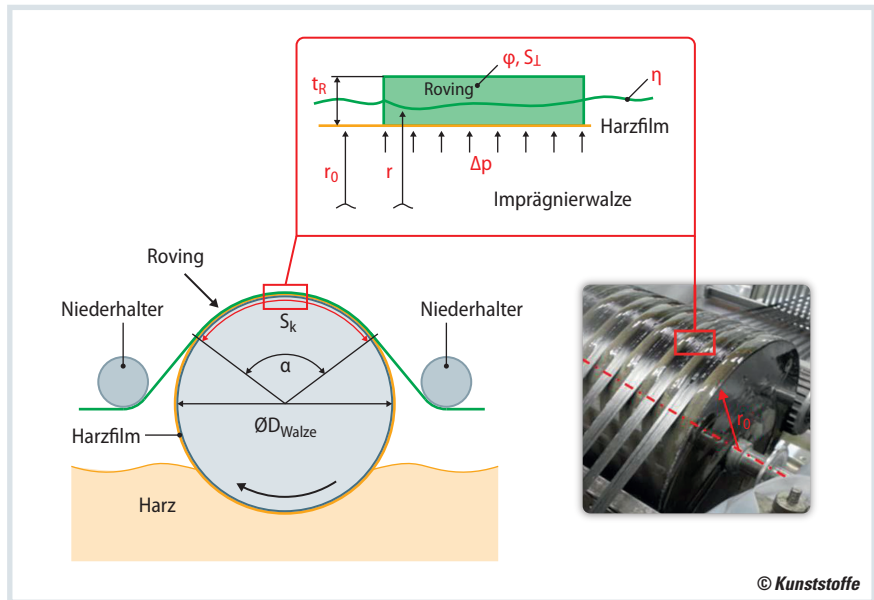


Bild 1. Links: Prinzipskizze einer Walzenimprägnierung; rechts: klassische Imprägnierwalzen-tränkung; oben: Querschnitt durch einen Roving mit Tränkparametern (Quelle: TH Köln)

- die Anzahl der Sonotroden,
 - die Anordnung der Sonotroden,
 - der Umschlingungswinkel der Fasern und
 - die Federkraft des Niederhalters.
- Dadurch wird gewährleistet, dass stets eine ausreichende Spreizung vorliegt.

Werkzeug in Doppelsinusform mit drei Imprägnierzonen

Um eine hohe Imprägniergeschwindigkeit zu erreichen, entwickelten die Projektpartner in Anlehnung an [3] ein Werkzeug in Form eines Doppelsinus, das drei Zonen mit Imprägnierdruck hat. Die drei Imprägnierzonen (**Bild 3**) wurden so dimensioniert, dass die Imprägnierlänge im neuen Werkzeug mindestens doppelt so groß ist wie die Imprägnierlänge der Walzenimprägnierung (**Gleichung 3**).

Dadurch wird gewährleistet, dass die Zeit, in der das Harz in den Roving eindringen kann, bei doppelter Abzugsgeschwindigkeit mindestens genauso groß ist wie bei der bewährten Walzenimprägnierung. Für eine Imprägnierwalze mit einem Durchmesser von 300 mm und einem Umschlingungswinkel α von 100° ergibt sich eine Länge s_k von 261 mm, während das neu konstruierte Werkzeug eine Imprägnierlänge $L_{p,ges}$ von 988 mm aufweist [4]. Die Durchmesser D der Imprägnierzonen sind allerdings deutlich größer als 300 mm, was den Imprägnierdruck Δp herabsetzt.

Laut [5] steht der Imprägnierdruck auch in Beziehung zur Fadenspannung einer Wickelanlage (**Gleichung 4**). Deshalb muss die Fadenspannung an das neue System angepasst werden. Die gesamte Werkzeuglänge L_w ist konstruktiv auf 1000 mm ausgelegt, um auch in bereits installierten Anlagen die Walzenimprägnierbäder ersetzen zu können. Die Verwendung einer Aluminiumlegierung als Werkstoff für das Werkzeug reduziert das Gewicht und gewährleistet eine gute Wärmeleitfähigkeit, was die Aufheizzeiten und die Homogenität des Temperaturfeldes positiv beeinflusst. Der komplette Innenbereich des Werkzeugs ist mit ei- ➤

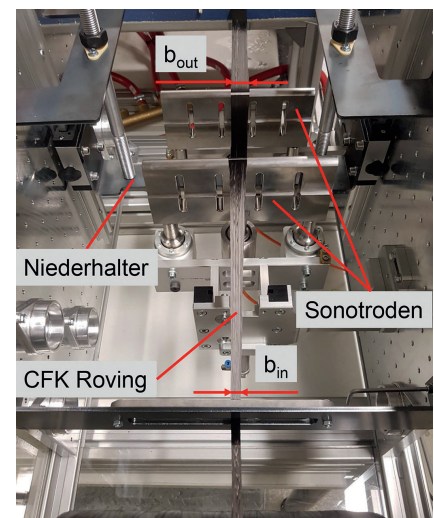


Bild 2. Faserspreizer mit durchgeführtem 48k Kohlefaserroving (© TH Köln)

Bild 3. Fertiggestelltes Imprägnierwerkzeug in Doppelsinusform mit angeschlossenen Heizschläuchen und Spannverschlüssen (© TH Köln)

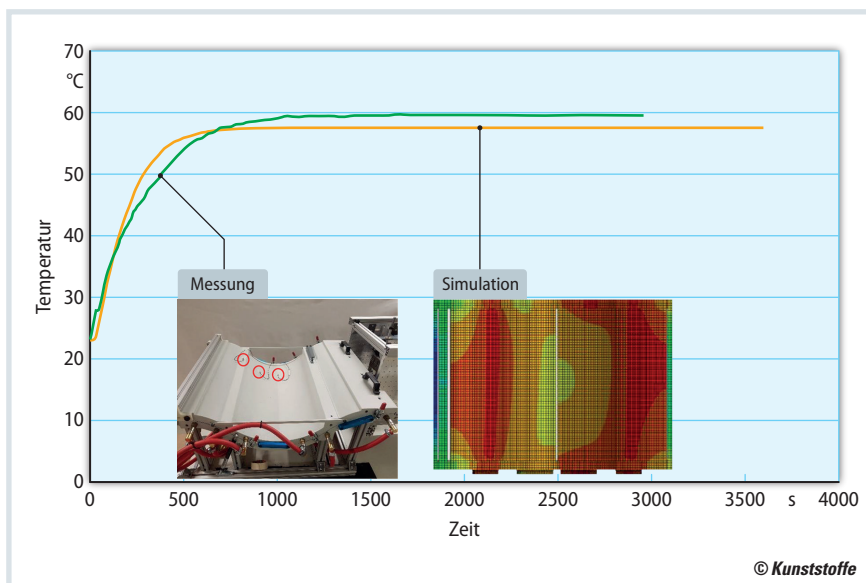
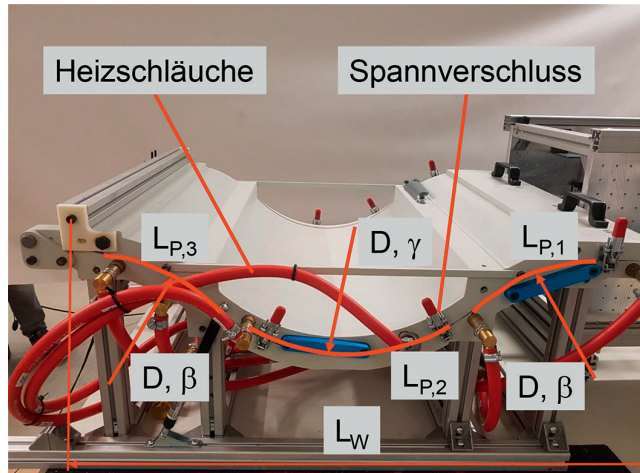


Bild 4. Vergleich der Aufheizkurven an zwei verschiedenen Stellen (die dritte wurde nicht ausgewertet) auf der Oberseite des Werkzeugs. Berechnung und Versuch stimmen gut überein. Die Wassertemperatur beträgt 60 °C. Bereits nach 10 min Aufheizzeit ist das Werkzeug einsatzbereit (Quelle: TH Köln)

indem man das Harzsystem auf die Temperatur aufheizt, bei der die Zielviskosität vorliegt.

Im Gegensatz zu den offenen Imprägnierbädern der Walzenimprägnierung, bei denen eine homogene Temperaturverteilung schwerlich zu erreichen ist, wird das neu entwickelte Werkzeug durch ein flüssiges Medium (Wasser oder Öl) aufgeheizt, das sowohl die Ober- als auch die Unterseite durchströmt. Während der Auslegung wurde zur Optimierung der Temperaturverteilung im Werkzeug eine Co-Simulation als Fluid-Struktur-Kopplung (fluid-structure interaction) mit dem FEM-Programm Abaqus (Anbieter: Dassault Systèmes) durchgeführt.

Vergleich zwischen Messung und FEM

Die Strömungsbedingungen des Heizmediums und damit der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Medium und Werkzeugwand wurden in einer CFD-Analyse berechnet und an eine FEM-Temperaturfeldberechnung in jedem Zeitschritt übergeben. Daraus lassen sich der Wärmestrom und folglich das Aufheizen des Werkzeugs sowie das parallele Abkühlen des Heizmediums berechnen. Ziel war es, ein Temperaturfeld zu erzeugen, das in einem Bereich zwischen 50 und 80 °C Wassertemperatur einen Unterschied von maximal $\pm 2,5$ °C hat.

Zur Validierung des Modells wurden Versuche mit einem wasserdurchströmten Aluminiumrohr durchgeführt und an fünf Stellen die Temperatur über der Zeit aufgezeichnet. Der direkte Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Temperaturmessung über der Zeit am Werkzeug und der FEM-Berechnung (Bild 4). Das Ziel eines homogenen Temperaturfeldes konnte erreicht werden, die Aufheizzeit bis zur Soll-Temperatur beträgt lediglich 20 min [6].

Kurze Rüstzeit

Das Werkzeug verfügt an jeder Seite über drei Schnellverschlüsse, die sich von Hand öffnen und schließen lassen und den Anpressdruck der Werkzeughälften auf die Dichtschnüre sicherstellen. Dadurch sind Leckagen im Betrieb ausgeschlossen. Das Öffnen und Schließen des Werkzeugs wird durch zwei seitlich ange-

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Patrick Tichelmann ist seit 2015 Professor am Institut für allgemeinen Maschinenbau der Fakultät 10 an der TH Köln; patrick.tichelmann@th-koeln.de

B.Sc. Juri Bayer ist seit 2018 am selben Institut wissenschaftlicher Mitarbeiter; juri.bayer@th-koeln.de

B.Sc. Nils Eisler ist dort seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter; nils.eisler@th-koeln.de

Service

Digitalversion

Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2019-09

ner verschleißfesten Anti-Haftbeschichtung versehen – dies verhindert das Anhaften von Harz und erleichtert die Reinigung.

Beheizung von zwei Seiten, damit die Viskosität passt

Ein weiterer wichtiger Tränkparameter aus Gleichung 1 ist die Viskosität des Harzes η , die bei allen gängigen Kunststoffen für das Wickelverfahren von der Temperatur und der Zeit abhängt (Gleichung 5). Aus diesem Grund sind alle Harzbäder beheizt und die Verarbeitungszeit eines Harzsystems begrenzt. Ziel ist es, die Viskosität eines bestimmten Harzsystems auf einen für die Imprägnierung geeigneten Wert zu bringen. Dies wird erreicht,

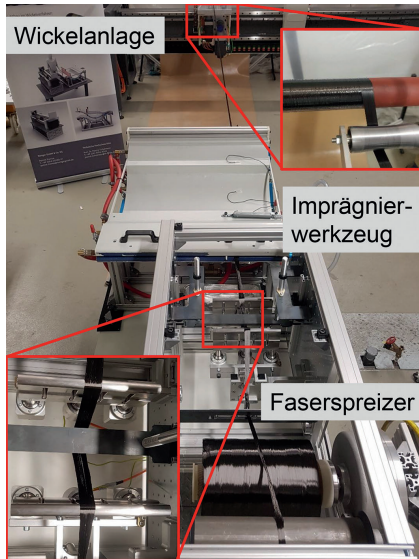


Bild 5. Versuchsanordnung mit Faserspreizer und Imprägnierwerkzeug. Die Detailaufnahmen zeigen einen imprägnierten Roving sowie die gewickelten Probekörper (© TH Köln)

brachte Gasfedern erleichtert und lässt sich von einem Mitarbeiter in weniger als 40 s durchführen. Die Rüstzeit ist im Vergleich zur Walzenimprägnierung, wo der Roving über mehrere Rollen eingefädelt werden muss, deutlich verkürzt, weil dieser mit wenigen Handgriffen durch das offene Werkzeug gezogen werden kann.

Endet eine Rovingspule während eines laufenden Wickelprozesses, werden häufig die neuen Spulen mit Knoten an die Enden der alten Spule angeknüpft. Diese Knoten müssen während der Produktion durch das Werkzeug geführt werden. Ein dafür konstruierter Öffnungsmechanismus erlaubt es, den Tränkpalt um das benötigte Maß zu vergrößern, indem das Imprägnierwerkzeug leicht geöffnet wird. Es lassen sich zwölf Rovings parallel verarbeiten.

Einfache Reinigung des Harzbads ohne Demontage

Alle Harzbäder müssen in bestimmten Intervallen gereinigt werden. Dafür werden die Harzbäder derzeit auseinandergebaut und alle Komponenten händisch oder maschinell gereinigt. Bei hartnäckigen Harzresten kommt häufig Aceton zum Einsatz. Um die Reinigung zu erleichtern, wird bei der Walzenimprägnierung meist eine Folie in die Harzbäder eingelegt, die nachher entsorgt wird. Im Gegensatz da-

zu muss das neue Imprägnierwerkzeug nicht auseinandergebaut werden. Der Mitarbeiter muss das Werkzeug lediglich öffnen und kann es wegen des geringen Harzeinsatzes leicht mit einem Lappen auswischen. Mit einem mit Lösungsmittel getränkten Tuch lassen sich kleine Harzreste danach mühelos entfernen, eine Folie wird nicht benötigt. Der gesamte Vorgang dauerte in den Versuchsreihen für einen Mitarbeiter ca. 20 min, bevor das Werkzeug wieder einsatzbereit war.

Neben der leichteren Reinigung hat der geringe Materialeinsatz einen weiteren Vorteil: Es entsteht nahezu kein überschüssiges Harz, das nach Prozessende entsorgt werden muss. Bei der herkömmlichen Walzenimprägnierung entstehen hingegen je nach Bauart 2 bis 3 kg Kunststoffabfall. Der Imprägnierspalt des Werkzeugs ist 2 mm groß und die Harzzuführung kann von oben oder unten oder an beiden Stellen gleichzeitig im Roving-Einzugsbereich des Werkzeugs erfolgen.

Am Ende der Versuchsreihen (Bild 5) zeigen Mikroskopaufnahmen der im-

prägnierten Rovings einen zufriedenstellenden Porengehalt, der unter 3% liegt. Weitere Untersuchungen werden derzeit durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Anlagenkonfigurationen zu testen. Festigkeitsversuche an Zug-Druck-Torsionsprobekörpern sollen verschiedene Faser-/Matrixkombinationen charakterisieren.

Fazit

Das neu entwickelte Imprägnierwerkzeug erreicht in Kombination mit einem Ultraschall-Faserspreizer eine höhere Imprägniergeschwindigkeit als die derzeit im Einsatz befindlichen Systeme. Es verfügt über eine angepasste Temperaturführung, besteht aus weniger Bauteilen und kann wesentlich schneller unter geringerem Ressourceneinsatz gereinigt werden. Bei einem Spulenwechsel können Knoten durch das Werkzeug geführt werden, und der Harzverbrauch sinkt durch den konstruktionsbedingt geringeren Harzeinsatz. ■

$$(1) \quad t_{\min} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\eta \cdot (1-\varphi) \cdot r_0}{S_{\perp} \cdot |\Delta p|} \cdot \left[2 \cdot \left(1 + \frac{t_R}{r_0} \right)^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{t_R}{r_0} \right) - \left(1 + \frac{t_R}{r_0} \right)^2 + 1 \right]$$

r_0 : Radius der Imprägnierwalze; η : Viskosität des Harzsystems;
 φ : Mikrofaservolumenanteil; S : Permeabilität des Faserbündels;
 p : Imprägnierdruck; t_r : Dicke des Rovings

$$(2) \quad v_{\max} = \frac{\hat{a} \cdot D_{\text{Walze}}}{2 \cdot t_{\min}}$$

\hat{a} : Kontaktwinkel zur Walze; D_w : Walzendurchmesser

$$(3) \quad L_{p, \text{ges}} \geq 2 \cdot s_k$$

$L_{p, \text{ges}}$: Imprägnierlänge im neuen Werkzeug;

s_k : Imprägnierlänge bei einer Walzenimprägnierung

$$(4) \quad \Delta p = \frac{4 \cdot F_{\text{Faden}} \cdot \sin a}{D \cdot a} \cdot \frac{180^\circ}{b \cdot \pi}$$

D : Durchmesser der Imprägnierzonen im neuen Werkzeug;
 F_{Faden} : Fadenspannung; b : Rovingbreite

$$(5) \quad \eta = \eta(T, t)$$

η : Viskosität des Harzes