

Design des Antriebskonzepts der neuartigen Rotorflechtmaschine „D-3F“

Daniel, Denninger*; Maik, Berger*

* TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik
daniel.denninger@mb.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

Im Gegensatz zu konventionellen Maypole-Flechtern weisen Rotorflechtmaschinen nach dem Schnellflechtmaschinen System „Horn“ eine deutlich höhere Flechtgeschwindigkeit sowie eine lageparallele Flechtfadenverlegung auf. Kern der gestellten Aufgabe war es, das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von Preforms durch Überflechten aus kinematischer und antriebstechnischer Sicht zu erforschen. Die Herausforderung dabei lag in der Technologiesynthese zur Integration eines dritten Fadensystems in ein neues ringförmiges Antriebskonzept mit großer Durchgangsöffnung. Das Design der kinematisch optimalen und lageparallelen Verlegung von drei Flechtfadensystemen erfolgte in einem prozessorientierten Syntheseverfahren.

Der Beitrag zeigt die entstandene gewebeartige Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „**D-3F Geflecht**“ und den Aufbau des Synthesemodells als Entwicklungsgrundlage des Antriebskonzeptes für die neuartige Rotorflechtmaschine „**D-3F**“ (Denninger-**3F**aden).

1 Geschichte der Flechtmaschinen

Im Jahre 1748 wurde Thomas Walford aus Manchester, England, das erste Patent über eine Einrichtung zur Herstellung von Geflechten erteilt. Johann Bockmühl aus Wuppertal baute bis 1767 die vermeintlich erste Flechtvorrichtung, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System mit gestellfestem Flechtbett, aus Stahl und Eisen. Die erste industrielle Herstellung von Flechtmaschinen ist um 1880 dokumentiert und basiert auf der von Gustav Langensiepen aus Barmen patentierten „Neuerung an Klöppelmaschinen“. Barmen gilt noch heute als Wiege der Maschinenflechterei, im Speziellen des Flechtmaschinenbaus.

Gerade für die Flechterei spielte das steigende Interesse an Elektrizität sowie die Einführung des Telefons eine entscheidende Rolle bei der Weiterentwicklung der Flechtmaschinen um 1880 [Lep53]. Wissenschaftler entdeckten die physikalischen Zusammenhänge und Vorteile einer metallischen Schutzhülle zur Isolation von Kabeln; dadurch wurden deren Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit enorm gesteigert. Um der steigenden Nachfrage an Kabeln mit guter Schirmung gerecht zu werden, wurde als Alternative zum Winden auf das äußerst produktive Rotorflechtmaschinen System zurückgegriffen. Maßgeblichen Anteil an der Entwicklung geeigneter Maschinenteknik trägt Simon W. Wardwell, der 1907 eine Rotorflechtmaschine zur Fertigung von umflochtenen Kabeln patentierte und im Jahre 1909 auf den Markt brachte. Demnach stammen die ersten Rotorflechtmaschinen von der Firma **Standard Machine Works** aus Nottingham, Großbritannien, die als Vorbild für alle weiteren Entwicklungen gelten. Weitere bekannte und dokumentierte Vertreter aus Großbritannien wurden von **Larmuth** aus Salford, 1904 (s. **Abb. 1**, links und mittig), und **Dobson und Barlow**, 1900 (s. **Abb. 1**, rechts), gebaut und verkauft. [Lep53] [Dou64]

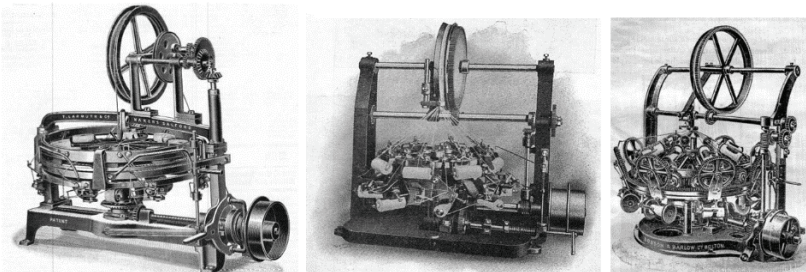


Abb. 1: Lightning (links); Rapid (mittig); Dobson & Barlow (rechts)

In den 1920er bis 30er Jahren entwickelten sich auch in Deutschland namhafte Hersteller von Rotorflechtmaschinen nach britischem Vorbild. Der bekannteste Vertreter ist Guido Horn aus Berlin-Weißensee, der Schnellflechtmaschinen nach dem System „Horn“ entwickelte.

Mit dem Beginn der kommerziellen Produktion von Kohlefasern, entwickelte sich ein weiterer Markt für technische Textilien. Leichtbauanwendungen stehen im Fokus der ressourcen- und energieeffizienten Wertschöpfung. Technische Textilien in Verbindung mit Faserverbundkonstruktionen stellen ihr Potential für Leichtbauanwendungen bereits in einer Vielzahl von Anwendungen unter Beweis. In diesem Prozess gewinnt das textiltechnologische Verfahren des Flechtens zur produktiven Verarbeitung von Verstärkungsfasern zunehmend an Bedeutung.

2 Technologie des Flechtens

Nach der DIN 60 000 [DIN60000] zählen Geflechte zum Bereich der textilen Halb- und Fertigfabrikate, die im Gegensatz zu anderen textilen Prozessen aus offenen Garnenden entstehen. Anders als beim Gewebe verkreuzen sich die biegsamen Flechtmaterialien diagonal zur Produktionsrichtung bzw. zur Warenkante, **Abb. 2**. Die diagonal zur Strukturhauptachse verkreuzten Fäden verleihen dem Geflecht sein hohes Maß an Flexibilität und die damit einhergehende gute Umformbarkeit.

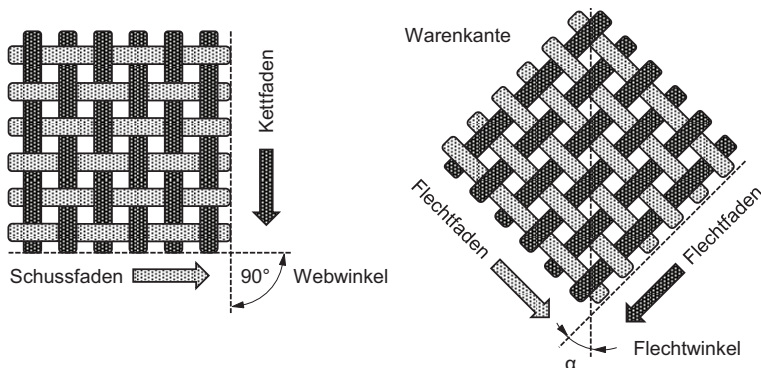


Abb. 2: Fadenverlauf bei Webfabrikaten (links) und Flechtfabrikaten (rechts)

Grundlegend wird nach der Orientierung und Anzahl der eingesetzten Fadensysteme in biaxiale und triaxiale Flechtware (s. **Abb. 3**) unterschieden. Das einfache biaxiale Geflecht besteht aus den eigentlichen

Flechtfäden, die lediglich in zwei wesentlichen Fadenorientierungen abgelegt werden. Beim Auseinanderziehen verhält sich die biaxiale Flechtware elastisch, wobei die resultierende Längenänderung eine gleichzeitige Änderung des Querschnitts zur Folge hat. In triaxial aufgebauter Flechtware wird diesem Effekt durch das Einbringen von Stehfäden (oder auch Zettelfäden), in 0° -Orientierung gegenüber der Abzugsrichtung, entgegengewirkt. Die Stehfäden werden von den Flechtfäden abgebunden und nehmen nicht aktiv am Geflecht teil. Dadurch zeichnen sich triaxiale Geflechte durch eine erhöhte Formstabilität gegenüber den biaxialen Geflechten aus. [Lep53] [Dou64]



Abb. 3: Biaxiales Geflecht und triaxiales Geflecht

Von besonderer Bedeutung für die Fertigung textiler Halbzeuge durch Überflechten ist die Einbringung der sogenannten Flechtkerne. Vor allem bei der Herstellung endkonturnaher Preforms kommt dabei ein eigensteifer Flechtkern als formgebendes Element zum Einsatz (vgl. auch [Bir13] [Kyo15]). Durch das Zusammenziehen des Geflechts auf der Oberfläche wird der Kern durch Reibung fixiert. Die entscheidenden flechttechnologischen Prozessparameter für die Weiterverarbeitung in Faserverbundkonstruktionen sind dabei der Flechtwinkel (elementar für die Faserorientierung der Verstärkungsfasern) und die Flechtdichte (elementar für den Faservolumengehalt des Geflechts).

Mit dem Flechtwinkel wird in der einschlägigen Literatur die Fadenorientierung der verflochtenen Fäden im Flechtprodukt beschrieben. Gemessen wird gegenüber der Längsachse des Geflechts bzw. der Richtung der Abzugsbewegung. Theoretisch liegt der Flechtwinkel zwischen 0° und 90° , während in der Praxis ein Bereich von ca. 20° bis 80° angegeben wird. Betrachtet man den Flechtwinkel α eines Flechtfadens

rein trigonometrisch in einem zylindrischen Geflecht mit bekanntem Zylinderradius R , so lässt sich ein direkter Zusammenhang mit der Schlaglänge H oder der Flechtfadenlänge L ableiten. In **Abb. 4** sind die trigonometrischen Zusammenhänge der Schraubenlinie eines Flechtfadens im Geflecht und in die Ebene abgewickelt dargestellt. [Lep53] [Kyo15]

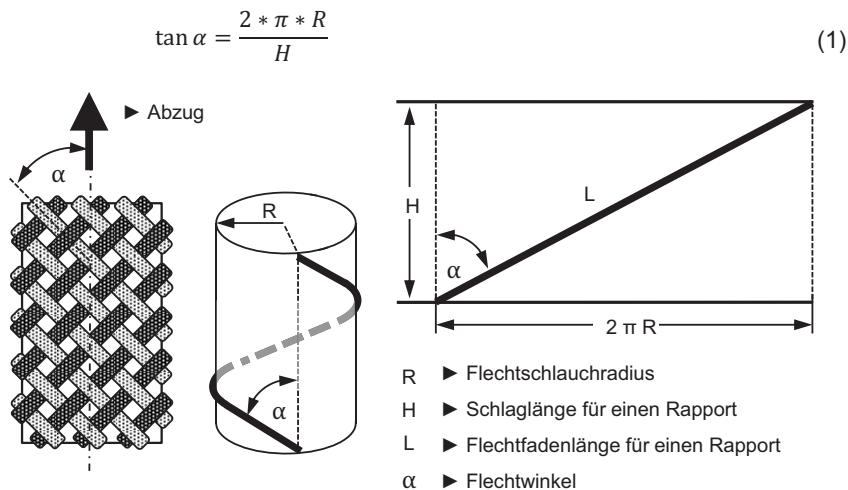


Abb. 4: Flechtwinkel

Die Flechtdichte - oder auch Bedeckungsgrad B - ist abhängig von der Anzahl der Flügelräder N_{FR} , der Fadenbreite b_{FF} , dem Zylinderradius R sowie dem Flechtwinkel α . Sie beschreibt die Anzahl von Verflechtungen auf einem Längenabschnitt und wird in der Regel über die Produktspezifikation vorgegeben. [Lep53] [Kyo15]

$$B = 1 - \left(1 - \frac{b_{FF} * N_{FR}}{4 * \pi * R * \cos \alpha} \right) \quad (2)$$

Das Verkreuzen der Flechtfäden und die resultierende Bindung des Flechtprodukts werden in der sogenannten Bindungslehre systematisiert. Die Bindung der Flechtware beschreibt die Form der Verknüpfung der Garne in der textilen Einheitszelle auf Mikroebene und hat maßgeblichen Einfluss auf die strukturmechanischen Eigenschaften, als auch die Schadenstoleranz. Ein einzelner Flechtfaden in der Flechtware

verläuft regelmäßig über und unter dem gegenläufigen Flechtfaden und weicht somit von der optimalen geradlinigen Ausrichtung ab. Durch das kontinuierliche Abbinden der Fasern untereinander wird im Schadensfall eine örtliche Delamination begrenzt und zusätzlich das verdeckte Ausbreiten eines Schadens verhindert.

Das textiltechnologische Verfahren des Überflechtens bietet hervorragende Voraussetzungen zur serientauglichen Fertigung endkonturnaher Halbzeuge oder Preforms durch das schichtweise Überflechten von formgebenden Kernen mit über die Länge des Kerns variierenden exzentrischen Querschnitten, Krümmungswechseln und Wendestellen. Entscheidender Faktor ist die gewebeartige Bindungsstruktur des Geflechts, die gegenüber dem reinen Gelegeaufbau zu einzigartigen strukturellen Eigenschaften mit hoher Schadenstoleranz, bei einer gleichzeitig großen geometrischen Gestaltungsfreiheit, führt. Herzstück der Anlagentechnik sind Rund- oder Radialflechtmaschinen, basierend auf dem Gangbahn-Flügelrad System, mit mechanisch-zwangläufiger Flechtfadenverlegung und gestellfestem Flechtbett. Die technologische Herausforderung bei der Auslegung von belastungsgerechten Preforms liegt unter anderem in der Erzeugung einer reproduzierbaren Verstärkungsstruktur, durch die definierte Ablage der Verstärkungsfasern in Richtung der angreifenden Belastungen. Das Potential der serientauglichen Fertigung von profilartigen Preforms durch Überflechten wird von K. Birkefeld [Bir13] durch folgende Merkmale charakterisiert:

- *Bei endkonturnaher Fertigung entfällt idealerweise die Konfektionierung und es entsteht kein Verschnitt bzw. Abfall.*
- *Realisierung einer hohen Prozessstabilität bei geringen Fertigungskosten, durch direkte Verarbeitung der Rovings.*
- *Die Flechtfadenablage erfolgt definiert auf inkonstanten Kernquerschnitten und erlaubt gestalterische Freiheiten, wie integrierte Elemente, Sprünge, Kegel, Krümmungen, asymmetrische Querschnitte und Ausbuchtungen.*
- *Das Überflechten ermöglicht die Herstellung von Preforms mit variablen und flexibel einstellbaren Querschnitten und annähernd freier Formgebung sowie Krümmungen.*
- *Komplexe Profilstrukturen sind ohne Delaminationseffekte realisierbar.*

3 Hinführung und Problemstellung

Die charakteristischen Vorteile des Systems „Horn“ gegenüber dem Gangbahn-Flügelrad System liegen in der abzugsidealsten Spulenanordnung und der damit verbundenen faserschonenden und lageparallelen Verarbeitung des Flechtmaterials. Gleichzeitig ist die gesteigerte Flechtgeschwindigkeit, aufgrund des rotierenden Maschinenkonzepts, für eine wirtschaftliche Serienfertigung von enormem Vorteil [Dou64]. Kern der gestellten Aufgabe war es, das Potential des Systems „Horn“ zur Herstellung von Preforms durch Überflechten aus kinematischer und antriebstechnischer Sicht zu erforschen.

Ausgangspunkt der Forschungsaufgabe war die Analyse der Verlegetechnik und der Antriebskonzepte marktüblicher Hebelflechtmaschinen und der eigens für den genannten Zweck entwickelten Radialflechtmaschinen (s. **Abb. 5**). Von entscheidender Bedeutung für das Design der neuartigen Verlegung waren Anhaltspunkte der Kettfadenverlegung, die sich als oszillierende und stark nichtlineare Führungsbewegungsaufgabe und die einhergehende Leistungsbeschränkung der Hebelflechtmaschinen, darstellt. [Den10] [Den11] [Den12a] [Den12b] [Den12c]

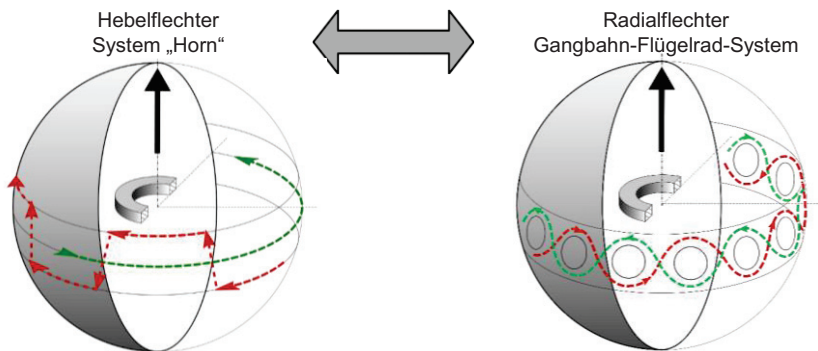


Abb. 5: Flechtsysteme im Vergleich

Vor allem der konzeptionelle Aufbau der Hebelflechtmaschinen ist ungeeignet, da hiermit in der Regel Feindraht aus zwei Flechtfadensystemen zu zylindrischen Schlauch- oder Kabelarmierungen mit konstantem Querschnitt verarbeitet werden. Ausführliche Literatur und Patentrecherchen deckten vorgeschlagene Zuführkonzepte für Stehfäden [Hor32] in Hebelflechtmaschinen und den Aufbau einer Rotorflechtmaschine mit drei Flechtfadensystemen [Kle99a] [Kle99b] zur Verarbei-

tion von Kohlenstofffaser Rovings auf. Beide Lösungskonzepte erschienen in Bezug auf die schädigungsarme Verarbeitung der Flechtmaterialien fragwürdig und zur Herstellung von Preforms ungeeignet.

Die daraus resultierende Aufgabe bestand demzufolge darin, eine Flechtvorrichtung und ein entsprechendes Flechtverfahren zum kontinuierlichen Überflechten mit drei Fadensystemen eines Flechtkerns zu entwickeln, der zur definierten Ablage der Verstärkungsfasern im Flechtpunkt multiaxial ausgerichtet und geführt werden muss. Nach den genannten Anforderungen musste die Flechtvorrichtung ringförmig aufgebaut und die systembedingte Anordnung der Spulen, in Kombination mit dem rotierenden Antrieb, beibehalten werden.

Das AiF-geförderte ZIM-Kooperationsprojekt 2022605 *„Entwicklung einer neuartigen Fadenverlegeeinrichtung für Schnellflechtmaschinen“* der Firma Kabelflechter Alfeld, muss im Rahmen der Forschungsaufgabe als ideengebend berücksichtigt werden. Die wesentlichen Aufgaben des Kooperationsprojekts bestanden in der Synthese eines neuartigen Mechanismus zur kinematisch optimalen Verlegung der Kettfäden für das neuartige Schnellflechtmaschinen System „Kabelflechter“. Ziel des Kooperationsprojekts war eine Steigerung der Flechtleistung um bis zu 50 Prozent gegenüber allen konventionellen Schnellflechtmaschinen bei geringer Schmiermittelkontamination des Flechtprodukts.

Als Lösungsansatz, um das Potenzieren von Schwingungsanregungen aufgrund auskragender Getriebeelemente zu vermeiden und die projektierte Leistungssteigerung zu erreichen, wurde der Einsatz eines geführten Fadenstellglieds mit einem aktiv angetriebenen Fadenlängenausgleich zur verschleißarmen Handhabung der Flechtfäden gewählt. Auch der Antrieb und insbesondere die konstruktive Ausführung der Gleitbahn zur Schussfadenverlegung wurden, hinsichtlich des Schmiermittelbedarfs und der resultierenden Verunreinigungen, neu ausgelegt. Um die übliche Lebensdauer einer Produktionseinrichtung bei der projektierten Drehzahl gewährleisten zu können, wurde die bewährte Gleitführung durch eine Rollenbahnführung gleichwertig ersetzt. Dazu wurden die Spulenträger auf entsprechenden Schlitten befestigt, die über Führungsflächen fliegend zwischen den normal zur Maschinenhauptachse ausgerichteten Laufrollenpaaren gelagert sind. Die Anforderung einer formschlüssigen und schlupffreien Bewegungsübertragung war jedoch funktionsrelevant, um einen definierten Abstand der Schlitten zueinander aufrechterhalten zu können.

4 Neuartige Rotorflechtmaschine „D-3F“

Die Abkürzung „D-3F“ steht für „Denninger-3Faden“.

Das Rotorflechtmaschinen System „D-3F“ ist das Ergebnis der logischen Integration von drei Fadensystemen in einem zum Überflechten geeigneten Anlagenkonzept mit tangentialer Spulenausrichtung und lageparalleler Flechtfadenverlegung.

Diese Flechtfadenverlegung führt zu einer neuen gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „D-3F Geflecht“.

4.1 Technologiesynthese und Funktionsstruktur

Ziel der Technologiesynthese war die Kombination der lageparallelen Fadenverlegung mit einem dritten Fadensystem in einem ringförmigen Antriebskonzept mit tangentialer Spulenausrichtung auf einer Hohlkugel um den Flechtpunkt. Ausgangspunkt stellte die gegengleiche Rotationsbewegung zweier Flechtfadensysteme dar, die aufgrund der konstant fortlaufenden Bewegungsform aus antriebstechnischer Sicht für eine hohe Flechtgeschwindigkeit geeignet ist. Durch die genannten Fadensysteme werden zwei einander überlagernde Schichten von Schuss- oder Legefäden mit jeweils gegengleicher Orientierung auf einem Kern abgelegt. Das dritte Flechtfadensystem ist ortsfest und stellt Kettfäden bereit, um eine Verbindung der einander überlagernden Schichten an den Kreuzungsstellen der Schussfäden zu erzielen.

Diese neuartige Flechtfadenverlegung führt zu einem neuen textiltologischen Fertigungsverfahren, mit einer neuen gewebeartigen Bindungsstruktur als Kombination aus Gelege und Geflecht bzw. Gewebe: „D-3F Geflecht“ (s. **Abb. 6**). Die Bindungsstruktur kombiniert die Eigenschaften eines Geleges aus zwei Schichten mit einer gewebeartigen Bindung. Durch die gewebeartige Bindung sind die Schichten untereinander und in ihrer jeweiligen Orientierung fixiert. In Analogie zum Flechtwinkel kann der Legewinkel der Schussfäden über die Abzugsgeschwindigkeit bereichsweise variiert und somit zur belastungsgerechten Orientierung der Verstärkungsfasern eingesetzt werden.

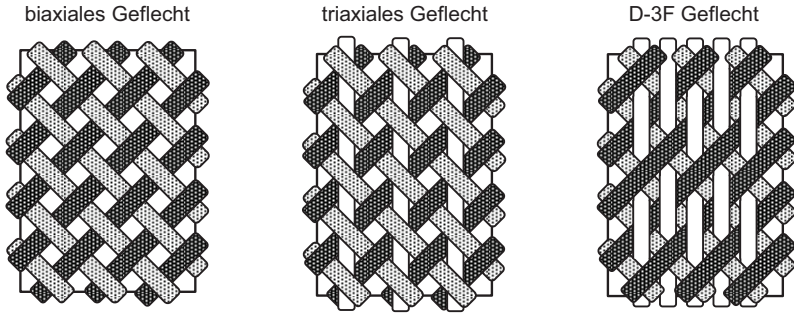


Abb. 6: Biaxiales-, triaxiales- und D-3F Geflecht

Das Rotorflechtmaschinen System „D-3F“ (s. **Abb. 7**) entspricht der logischen Kombination aller gestellten technologischen Anforderungen und deren Überführung in ein zum Überflechten geeignetes Anlagenkonzept. Zur Verlegung der Schussfäden rotieren zwei innere Fadensysteme (Schussfadensystem 1 und 2), mit tangentialer Ausrichtung der Spulennachsen hinsichtlich der Maschinenhauptachse und gegengleicher Rotationsbewegung, auf je einem Breitengrad um die Maschinenhauptachse. Die Breitengrade weisen je gegengleichen Abstand zum Flechtzentrum, axial zur Maschinenhauptachse auf. Jeder Schussfaden besitzt dadurch die gleiche freie Länge vom Fadenabzugspunkt, bis hin zum Flechtzentrum.

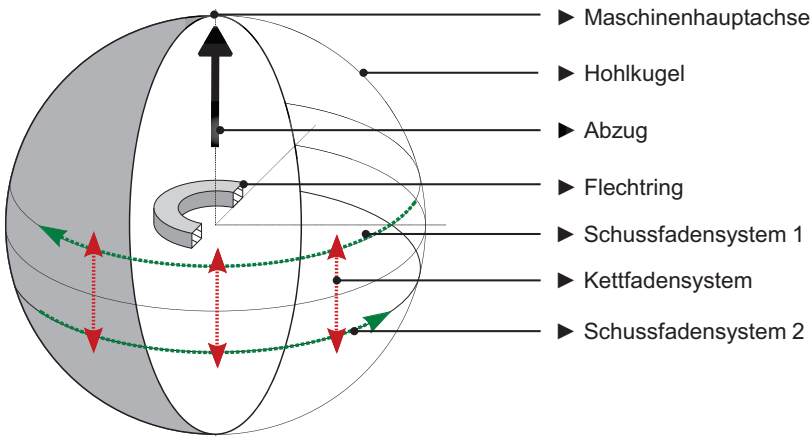


Abb. 7: Rotorflechtmaschinen System „D-3F“

Im entworfenen Anlagenkonzept werden die Schussfadenspulenträger auf Schlitten befestigt, die über Führungsflächen fliegend und in einem definierten Abstand zueinander auf einer gestellfesten Gleitbahn gelagert sind. Um die Fachbildung der Kettfäden zu ermöglichen, wurde die Gleitbahn in äquidistanten Abständen geschlitzt und die Schlitzöffnungen der gegenüberliegenden Schlitze zueinander ausgerichtet. Für die Erzeugung der neuen gewebeartigen Bindungsstruktur werden durch das dritte Flechtfadensystem Kettfäden bereitgestellt, die durch je ein Fadenstellglied vom äußeren und ortsfesten Spulenträgersatz abgezogen und oszillierend von einem tiefer gelegenen Breitengrad zu einem höher gelegenen Breitengrad verlegt werden, **Abb. 8**. Die Kettfäden bilden dadurch Fächer zum kollisionsfreien Passieren der Schussfadenspulenträger aus und werden dabei über bzw. unter die Kreuzungsstellen der Schussfäden verlegt. Das Öffnen und Schließen eines Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Schlitten nicht über die Schlitze der Gleitbahn geführt werden.

Der Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen „102014016832.8“ gemäß DPMA liegen die eingereichten Unterlagen zur Patentanmeldung mit dem Titel **„Flechtvorrichtung und Flechtverfahren zum Überflechten eines Flechkerns“** zugrunde. Die Hauptaufgabe wird laut Patentanspruch wie folgt gelöst:

- *„Mindestens einen ersten Spulenträgersatz und mindestens einen zweiten Spulenträgersatz, wobei zumindest einer der beiden Spulenträgersätze entlang einer Kreisbahn bewegbar ist, wobei zwischen den beiden Spulenträgersätzen beim Überflechten des Flechkerns eine Relativbewegung ausführbar ist, und wobei durch die Relativbewegung, die von den Spulenträgern der beiden Spulenträgersätze jeweils abgezogene Fäden als sich kreuzende Schussfäden um den Flechkern ablegerbar sind,“*
- *„Mindestens einen dritten, ortsfest angeordneten Spulenträgersatz“*
- *„Mindestens ein Stellelement, wobei die beim Überflechten des Flechkerns von den Spulenträgern des dritten Spulenträgersatzes abgewickelten Fäden, durch das mindestens ein Stellelement in eine oszillierende Auf- und Abbewegung versetzbar und dabei als Kettfäden unter Ausbildung einer Bindung abwechselnd über und unter die Kreuzungsstellen der Schussfäden verlegbar sind.“*

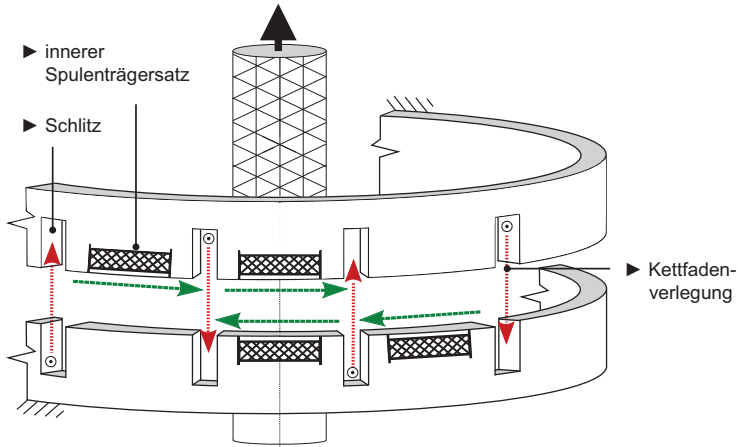


Abb. 8: Schematischer Aufbau der Rotorflechtmaschine „D-3F“

4.2 Funktionsstruktur und Funktionsprinzip

Basis für das Design der Flechtfadenverlegung mit Hilfe der prozessorientierten Mechanismensynthese war eine Funktionsstruktur zur Gliederung der prozessbestimmenden Wirkzusammenhänge in der neuartigen Rotorflechtmaschine, **Abb. 9**. Die Hauptfunktion besteht in der Kinematik der Verlegebewegung zur Funktionalisierung der neuartigen Bindungsstruktur in einem textilen Halbzeug. Demnach setzt sich der Stoffumsatz vom Verstärkungsmaterial zum textilen Halbzeug oder Preform im Wesentlichen aus dem Zuführen und dem Verlegen der Flechtfäden sowie dem Führen des Flechtkerns zusammen.

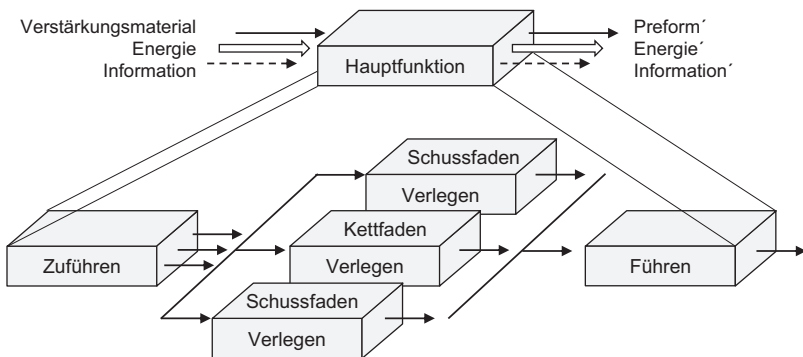


Abb. 9: Funktionsstruktur der „D-3F“

Primär wurde die Teilfunktion des Verlegens unter Vernachlässigung des Energie- und Informationsflusses betrachtet und in weitere Funktionsbausteine untergliedert. Für die Synchronisation der Verlegebewegungen und das folgende Design der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung im neuartigen Antriebskonzept bestand die Notwendigkeit zur Definition von zeitlichen und geometrischen Minimalanforderungen in Form von Prozesspunkten zur Beschreibung der Verlegebewegung.

Eine einfache Adaption der bekannten Verlegekurve der Hebelflechtmaschinen war, aufgrund der ortsfesten Anordnung des Kettfadensystems und des zusätzlichen Schussfadensystems, nicht möglich. Für die kinematisch optimale und zerstörungsfreie Verlegung der Kettfäden im System „**D-3F**“ waren die zeitlichen und geometrischen Minimalanforderungen der synchronisierten Schussfadenverlegung, die technologischen Vorgaben der neuartigen Bindungsstruktur und die konstruktiven Gegebenheiten eines ringförmigen Gesamtaufbaus mit großer Durchgangsöffnung zu berücksichtigen.

Der Flechtkopf selbst teilt sich in die beiden gegengleich rotierenden Schussfadensysteme und ein Kettfadensystem, mit je gleicher Anzahl an Schussfäden und doppelter Anzahl an Kettfäden, auf. Die Anzahl an Schlitzen entspricht der Anzahl an Kettfäden. Für die genannten technologischen Bedingungen wurden die wesentlichen Anforderungen an die Verlegung definiert:

- Gegengleiche Rotationsbewegung der Schussfadensysteme
- Positionierung und Synchronisation der Schussfadensysteme
- Definierter Abstand der Schussfadenspulen­träger zueinander
- Fliegende Lagerung der Schussfadenspulen­träger
- Relativbewegung des Fadenstellglieds zur Kettfadenverlegung
- Synchronisation der Kett- und Schussfadenverlegung

Mit dem Nachweis der grundlegenden Funktionalität im Prototyp des Kabelflechters, wurde der Lösungsansatz eines geführten Fadenstellglieds beibehalten, **Abb. 10** als Erweiterung zu **Abb. 8**. Zur verschleißarmen Handhabung der Kettfäden bestand die Aufgabe darin, einen schwingungsarmen und kinematisch optimalen Antrieb des Fadenstellglieds, unter Berücksichtigung der notwendigen Relativbewegung und

der variablen Fadenlänge, vorzusehen. Die eigentliche Leistungsbeschränkung der Kettfadenverlegung resultiert aus der Fadenlängenänderung durch die auszuführende Relativbewegung zur Fachbildung. Diese Fadenlängenänderung führt, in Verbindung mit Schwingungsanregungen, zur Beschädigung oder auch zum Riss der Kettfäden. Im entwickelten System muss die Fadenlängenänderung nicht durch ein mechanisch-zwangläufiges Ausgleichsgetriebe reguliert werden. Die ortsfeste Anordnung des Kettfadensystems erlaubt den unkomplizierten Einsatz elektronisch geregelter Kompensationseinrichtungen.

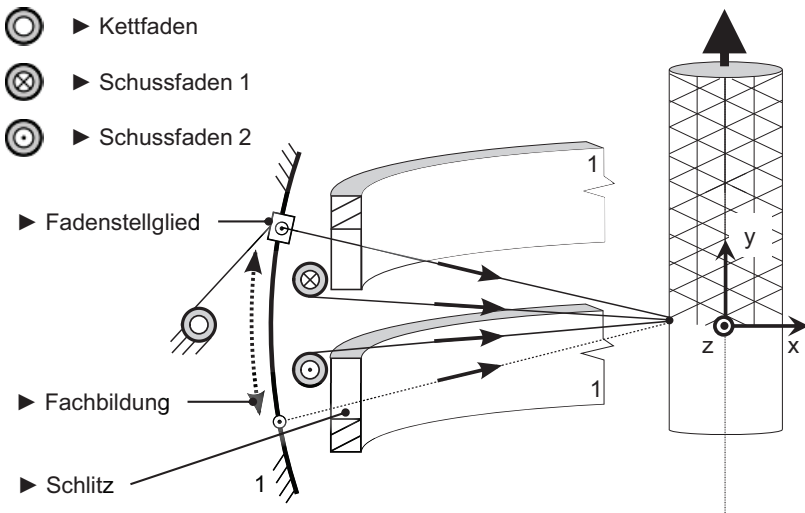


Abb. 10: Kettfadenverlegung der „D-3F“

Insbesondere die konstruktive Ausführung der Gleitbahn zur Schussfadenverlegung wurde in Form der bereits erprobten Rollenbahnführung integriert, um einen nahezu schmiermittelfreien Transport der Spulenträger zu ermöglichen. Weiterhin musste die gegengleiche Rotationsbewegung der Schussfadensysteme zueinander exakt synchronisiert und bezüglich der Schlitze in der jeweiligen Gleitbahn positioniert werden, um die zerstörungsfreie Fachbildung zu ermöglichen. Eine Relativbewegung der Kettfäden zum Öffnen und Schließen eines Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Schlitten nicht über die Schlitze der Gleitbahn geführt werden.

4.3 Eingangsgrößen des Synthesemodells

Ausgangspunkt für das Design des Antriebskonzepts der „**D-3F**“ und der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung waren die grundlegenden technologischen Randbedingungen des idealen Flechtprozesses für das geforderte Flechtprodukt. Die wesentlichen Parameter zur Beurteilung der physikalischen Machbarkeit und der Definition von Prozesspunkten resultieren aus dem Aufbau und der Anzahl der Schussfadenspulenträger sowie deren gegengleicher Rotationsbewegung und Drehzahl. Um die Anforderungen, resultierend aus den notwendigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennwerten der zu entwickelnden Kettfadenverlegung, vergleichbar zu gestalten, wurde die grundlegende Synthesemethodik für ein 8-spuliges Schussfadensystem mit den marktüblichen Flechtspulen FSP 98/100/80 aufgebaut.

Mit der Spulengröße wurden neben der materialabhängigen Fadenlänge auch der konstruktive Aufbau der Spulenträger und einhergehende geometrische Eingangsgrößen definiert. Aus dem Gesamtgewicht des bestückten Spulenträgers, in Verbindung mit der geforderten Drehzahl, gehen die entscheidenden kinematischen und kinetostatischen Randbedingungen für die Anordnung und konstruktive Ausführung des Schuss- sowie Kettfadensystems hervor. Die zur Synthese relevanten Bestandteile des Schussfadensystems sind die Spulenträger, Schlitten und die geschlitzte Gleitbahn. Das Kettfadensystem besteht im Wesentlichen aus dem geführten Fadenstellglied. Diese gezielte Minimierung der Eingangsgrößen erlaubte eine schnelle Beurteilung der grundlegenden physikalischen, getriebetechnischen und konstruktiven Machbarkeit des zur Bewegungserzeugung notwendigen Antriebskonzepts und das Ableiten von Prozesspunkten zur Synthese der Kettfadenverlegeeinrichtung.

Als Bezugspunkt für das Synthesemodell wurde der ideal symmetrische Flechtspunkt, hinsichtlich der beiden Breitengrade um die Maschinenhauptachse, gleich dem Mittelpunkt **MP** als Element der Maschinenhauptachse und Koordinatenursprung, festgesetzt. Ausgehend von den idealisierten Produktvorgaben konnten die kinematischen Vorgaben an das Schussfadensystem und den Abzug festgelegt werden. Die kinematischen Vorgaben für das Kettfadensystem ergaben sich über den Aufbau des Spulenträgers. Zur Definition dieser geometrischen Ein-

gangsgrößen wurde eine zunächst großzügige Einhausung der Spule in Form eines schiefen Kegelstumpfes vorgenommen, **Abb. 11**.

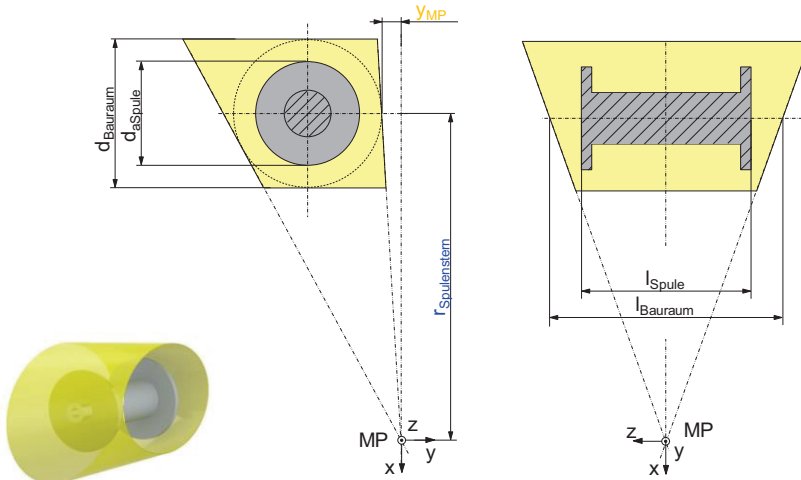


Abb. 11: Abmessungen der Spule und des Spulenträgers

Für die Einhausung war der Abstand der Spule, radial in Bezug auf die Maschinenhauptachse $r_{\text{Spulenstern}}$, funktional notwendig und axial, in Bezug auf den Mittelpunkt y_{MP} , vorläufig definiert. Der minimale, technologisch erforderliche Abstand zur Maschinenhauptachse ergab sich unter Berücksichtigung der Geometrie des Spulenträgerrepräsentanten und der Anzahl an Spulenträgern pro Schussfadensystem. In **Abb. 12** ist die Gleitbahn in verschiedenen Perspektiven zur Verdeutlichung der funktionalen Abmessungen dargestellt. Der Radius des Spulensterns muss mindestens so groß sein, dass der einhüllende Körper bei entsprechender Positionierung zwischen zwei Schlitzen angeordnet werden kann, ohne diese zu tangieren.

Die Schlitzbreite b_{Schlitz} wurde auf 20 mm festgesetzt. Der Verteilungswinkel errechnete sich über die Anzahl an zu verlegenden Kettfäden, verteilt auf 360° , zu $22,5^\circ$. Über die trigonometrische Verteilung wurde der Konstruktionsparameter für den minimalen funktionalen Abstand der Spulenträger zur Maschinenhauptachse $r_{\text{Spulenstern}}$ iterativ bestimmt.

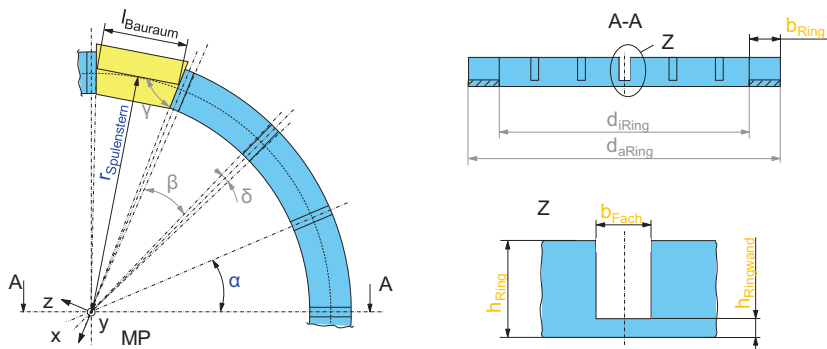


Abb. 12: Abmessungen des Rings

Mit der Forderung der min. notwendigen Relativbewegung zur Verlegung des Kettfadens und der max. möglichen Durchgangsöffnung, bei gleichzeitig kompakter Bauweise, wurde die Ausrichtung der Spulenträger auf der Gleitbahn analysiert. Grundsätzlich kamen für die Ausrichtung drei Varianten in Frage, **Abb. 13**. Zur Bewertung hinsichtlich der genannten Kriterien, wurde für jede Variante der innerste Radius $r_{iSpulenster}$, der äußerste Radius $r_{aSpulenster}$ und die Relativbewegung y_{Faden} trigonometrisch bestimmt. Dazu wurde der bekannte Mindestradius des Spulenster als Bezugsgröße für die Vorgabe der Breite des Rings b_{Ring} herangezogen. Der Überwindungspunkt $\ddot{U}P$ steht für den minimal notwendigen Abstand des Kettfadens zum Spulenträger um eine zerstörungsfreie Fachbildung zu ermöglichen.

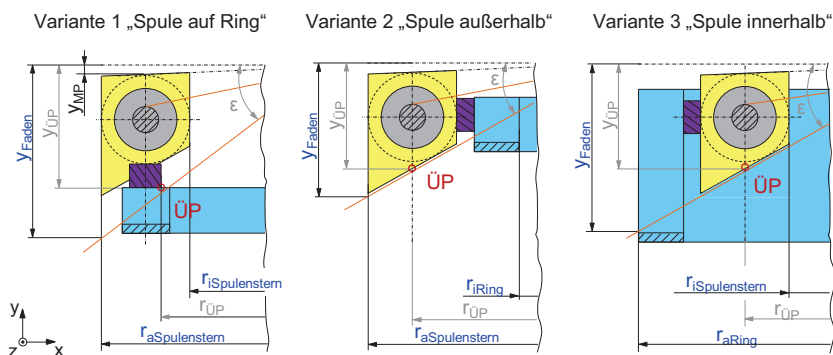


Abb. 13: Variantenvergleich der Führung des Spulenträgers

Über den vertikalen Abstand $y_{\text{ÜP}}$ und den jeweiligen Radius an diesem Punkt $r_{\text{ÜP}}$, konnte der Fadenabzugswinkel ϵ und die Relativbewegung y_{Faden} berechnet werden. Die Vergleichskriterien aller drei Varianten sind in **Tabelle 1** aufgeführt und nach ihrer Priorität absteigend sortiert. Der Variantenvergleich mit dem bekannten Mindestradius des Spulensterns $r_{\text{Spulenstern}}$ als Bezugsgröße ergab für „Variante 2“ die kleinste notwendige Relativbewegung. Der ebenfalls kleinste innere Radius relativiert sich im Hinblick auf die trigonometrischen Zusammenhänge. Eine Vergrößerung des inneren Radius führt lediglich zu einer Verkleinerung des Fadenabzugswinkels.

Tabelle 1: Variantenvergleich

	Variante 1 Spule auf Ring	Variante 2 Spule außerhalb	Variante Spule in- nerhalb
Fadenweg [mm]	220.088	139.865	169.596
innerster Radius [mm]	444.528	324.528	444.528
äußerster Radius [mm]	564.528	564.528	684.528

Der einhüllende Körper des Spulenträgers wurde um die Betrachtung des Schlittens als Transportelement zur Bewegungsübertragung erweitert. Auch der Schlitten darf nicht mit dem Kettfaden kollidieren und musste demzufolge mit den signifikanten Abmessungen seiner Breite $b_{\text{Schlitten}}$ und Höhe $h_{\text{Schlitten}}$ in den schiefen Kegelstumpf integriert werden. Für die eindeutige Beschreibung der Zuordnung des Schlittens zum Ring wurden die Breite des Schlittens $b_{\text{Schlitten}}$ und die Parameter x_s sowie x_b benötigt. Der Ring selbst wurde über die Höhe h_{Ring} und die Breite b_{Ring} definiert und mit der entsprechenden Anzahl und Verteilung der Schlitze versehen. Die Tiefe des Schlitzes richtet sich nach der Position des Schlitzes und wurde für die zerstörungsfreie Fachbildung mit zusätzlichem Spielraum in die Ringgeometrie projiziert.

4.4 Aufbau des Synthesemodells und Synchronisation

Im ersten Schritt wurde das Synthesemodell mit den bereits bekannten Eingangsgrößen und Abmessungen der gewählten „Variante 2“ (s. **Abb. 14**) als kombiniertes CAD- und MKS Modell umgesetzt. Der parametrische Aufbau erlaubte ein iteratives Vorgehen bei der Konkretisierung der vorläufig definierten Grundkörper und demnach einen fließenden Übergang zur direkten Weiterentwicklung und Entwurfskonstruktion. Die in Wechselwirkung stehenden Bauteile konnten im Synthesemodell schrittweise angepasst und synchronisiert werden.

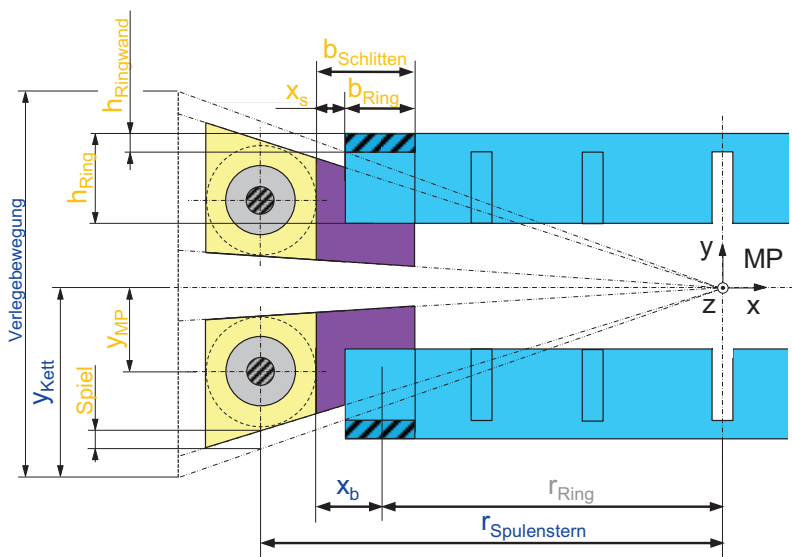


Abb. 14: Schussfadensysteme nach Variante 2

Ausgangspunkt für das Design der kinematisch optimalen Kettfadenverlegung war die grundlegende Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung, um die direkte Kollision der Kettfäden mit den Schussfadenspulenrägern oder anderen Hindernissen zu vermeiden. Ziel dieser Synchronisationsaufgabe war im weitesten Sinne ein Bewegungsschaubild und die einhergehende kinematische Beschreibung der technologiebedingten Bewegungsaufgabe. Entscheidende Voraussetzung der zerstörungsfreien Fachbildung ist die exakte Synchronisation der gegengleichen Rotationsbewegung der Schussfa-

densysteme zueinander und deren Positionierung bezüglich der Schlitzze in der jeweiligen Gleitbahn. Die Relativbewegung der Kettfäden zum Öffnen und Schließen eines Faches erfolgt in den Zeitfenstern, in denen die Schlitten zwischen den Schlitzzen geführt werden.

Im entstandenen Synthesemodell wurden die Flechtfäden vereinfacht mit Stabelementen abgebildet, um Kollisionstests ausführen zu können. Diese vereinfachte Variante der kinematischen Prozesssimulation erlaubte auch die idealisierte Abbildung des Flechtwinkels und der Flechtdichte. Reibungsbehaftete Gleitvorgänge an den Kontaktstellen beim Zusammenziehen des Geflechts sowie bei der Ablage auf dem Flechtkern wurden nicht berücksichtigt, da die Synthesemethodik auf die zerstörungsfreie und kinematisch optimale Kettfadenverlegung, zur Vermeidung von Schwingungsaufprägungen auf den Faden ausgerichtet war. In **Abb. 15** ist das Synthesemodell zur Synchronisation der Verlegebewegungen dargestellt.

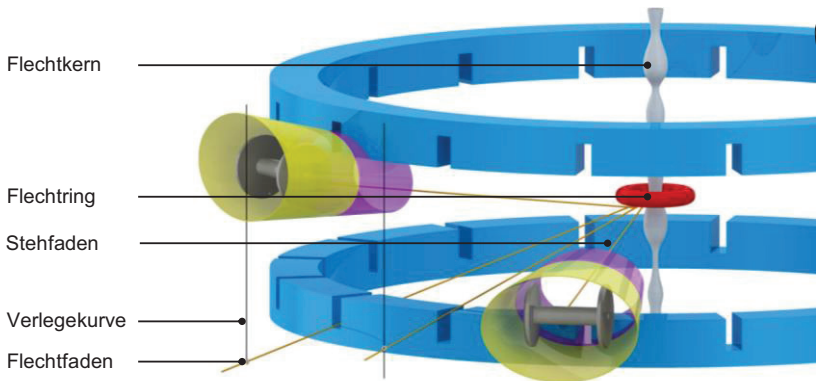


Abb. 15: Synthesemodell zur Synchronisation der Verlegebewegungen

Für die grundlegende Synchronisation der Kettfadenverlegung mit der Schussfadenverlegung wurden zunächst Positionsvorgaben in das Synthesemodell implementiert. Die gezielte Beeinflussung der Positionsvorgaben führte zum gezeigten Bewegungsschaubild, **Abb. 16**.

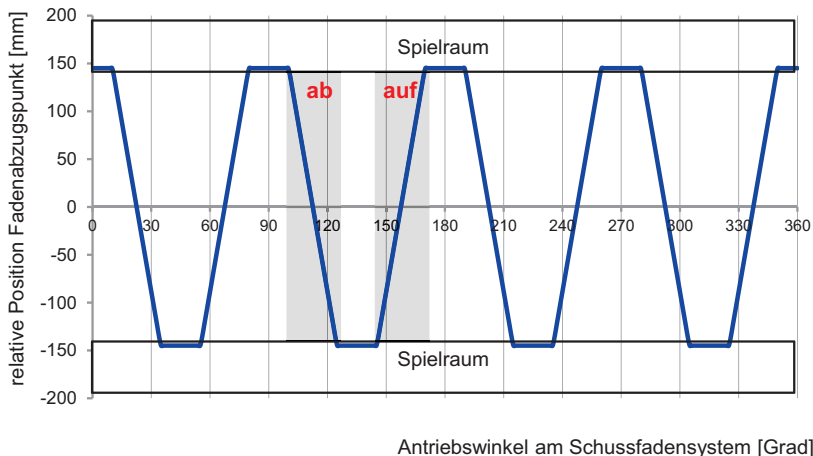


Abb. 16: Synchronisierte Kettfadenverlegung

Demnach setzt sich die notwendige Verlegebewegung aus vier Verlegezyklen für einen Umlauf der Schussfadensysteme zusammen. Der Absolutwert der Relativbewegung zur zerstörungsfreien Fachbildung wurde gemäß der ermittelten Relativbewegung auf ca. 300mm festgesetzt. In Verbindung mit der geforderten Verlegefrequenz ergaben sich erste kinematische Anhaltspunkte für die Auswahl der mechanisch-zwangläufigen Getriebebestruktur zum Antrieb der Fadenstellglieder.

Die Visualisierung der neuartigen Bindungsstruktur erfolgte über das Mapping der Flechtfadenspfade auf dem Flechtkern, wie in **Abb. 17**.

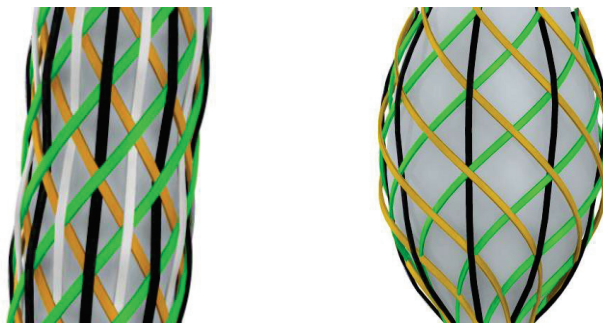


Abb. 17: D-3F Geflecht auf zylindrischem (links) und konvexem (rechts) Querschnitt

5 Zusammenfassung

Ausgehend von der technologischen Zielstellung, wurde die Technologiesynthese zur Kombination der lageparallelen Fadenverlegung mit einem dritten Fadensystem in einem ringförmigen Antriebskonzept gezeigt. Nachfolgend bestand die Notwendigkeit der Synchronisation der Fadenverlegung mit Hilfe von zeitlichen und geometrischen Minimalanforderungen der neuartigen Bindungsstruktur. Als Basis für das Design der Kettfadenverlegung wurden Prozesspunkte in einem Bewegungsschaubild definiert. Ausgehend von den ermittelten Prozesspunkten konnte ein Synthesemodell für die folgende iterative Mechanismensynthese, unter Berücksichtigung der kinematischen Prozessabbildung in einem kombinierten CAD- und MKS-System, aufgebaut werden.

Zur Realisierung der kinematischen Anforderungen wurde Bewegungsdesign in enger Verknüpfung mit der Maßsynthese, einer mechanisch-zwangläufigen Getriebestruktur zum Antrieb der Fadenstellglieder, betrieben. Dieser Syntheseprozess wurde unter Berücksichtigung der kinematischen Prozesssimulation zur direkten Abbildung und Beurteilung der grundlegenden Prozessfunktionalitäten durchgeführt. Das Bewegungsdesign und die entstandene Entwurfskonstruktion der Rotorflechtmaschine „**D-3F**“ werden im Vortrag gezeigt.

Literatur

- [Bir13] BIRKEFELD, K.: *Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten*. Dissertation, Universität Stuttgart - Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Stuttgart 2013
- [DIN60000] Textilien – *Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Vertrieb GmbH, Stand 1987
- [Den10] DENNINGER, D.; BERGER, M.: *Einsatz von Pro/E-MCAD-Strategien zur integrativen Entwicklung des "Kettfaden" - Antriebssystems einer Rundflechtmaschine*. 12. Bayerreuther 3D-Konstrukteurstag, Bayerreuth 2010-09-29
- [Den11] DENNINGER, D.; BERGER, M.; HEINE, A.: *Entwurf und Auslegung eines neuen nichtlinearen Antriebskonzeptes mittels Creo Element Pro*. 3. Saxon Simulation Meeting, Chemnitz 2011-04-19

- [Den12a] DENNINGER, D.; BERGER, M.; EMMERICH, W.: *Kinematischer Entwurf und optimale Auslegung neuer hochdynamischer Antriebsbaugruppen für Wirk- und Flechtmaschinen*. 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz 2012-03-14, S. 103-110 - ISBN 978-3-9812554-7-8
- [Den12b] DENNINGER, D.; BERGER, M.; HEINE, A.: *Kinematic Design and Ideal Dimensioning of New Highly Dynamic Drive Assemblies for Knitting and Braiding Machines*. XI. International Conference on the Theory of Machines and Mechanics, Liberec (CZ) 2012-09-04
- [Den12c] DENNINGER, D.; BERGER, M.; HEINE, A.: *Strukturvergleich und Maßsynthese nichtlinearer Antriebskonzepte zur Erzeugung von Raumkurven für Flechtmaschinen - Ganzheitliche Getriebeauslegung am Beispiel einer Schnellrundflechtmaschine nach dem Maschinensystem Horn*. 16. VDI GetriebeTagung Bewegungstechnik, Nürtingen 2012-09-11
- [Dou64] DOUGLASS, W. A.: *Braiding and Braiding Machinery*. Cleaver-Hume-Press Ltd., London 1964
- [Hor32] HORN, G.: *Rundflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt kreisenden Spulenreihen*. Patentschrift, Horn, G., Reichspatentamt, 1932-08-17 – DE000000557008A
- [Kle99a] KLEIN, J. T.; et al: *Braided fabric and method of forming*. US-Patent, Auburn University, United States Patent Office, 1999-05-04 – US5899134
- [Kle99b] KLEIN, J. T.; et al: *Rotably driven braiding machine with third yarns carried and delivered by stationary carriages about a braiding point*. US-Patent, Auburn University, United States Patent Office, 1999-06-22 – US5913959
- [Kyo15] KYOSEV, Y.: *Braiding Technology for Textiles*. Elsevier, 2015 – ISBN 978-0-85709-921-1
- [Lep53] LEPPERHOFF, B.: *Die Flechterei*. 3.Aufl. Eugen G. Leuze-Verlag, Saalgau 1953