

Abschlussbericht zum Förderprojekt im BMBF-Rahmenprogramm „Intelligente Batteriezellproduktion – InZePro“

Teil 1 – Kurzbericht

Vorhabenbezeichnung: IntelliSpin – Intelligentes Electrospinning in der Zellfertigung mittels Maschinellern Lernen	
Zuwendungsempfänger: Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften	Förderkennzeichen 03XP0353B
Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter) Stephan Trattig (wissenschaftlicher Mitarbeiter)	Berichtszeitraum 01.01.2021 – 30.04.2024

Kurzzusammenfassung

Das Projekt IntelliSpin hatte zum Ziel, das Electrospinning als innovative Beschichtungstechnologie für die Lamination von Lithium-Ionen-Batterien zu untersuchen und seine industrielle Anwendbarkeit zu evaluieren. Dabei standen sowohl die Optimierung der elektrochemischen Eigenschaften der Batteriezellen als auch die Skalierbarkeit des Verfahrens für den industriellen Einsatz im Vordergrund. Durch den Einsatz des Electrospinning konnte ein neuartiges Verfahren etabliert werden, mit welchem eine präzisere und kostengünstigere Lamination von Batteriezellen möglich ist.

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts sollten zunächst die Auswirkungen der durch Electrospinning hergestellten Beschichtungen auf die elektrochemische Stabilität und Effizienz von Lithium-Ionen-Batteriezellen untersucht werden. Der Fokus lag dabei auf der Analyse, wie sich die Nanofasern auf die Leistung, Lebensdauer und Sicherheit der Batterien auswirken (Produktaspekt). Parallel dazu musste die technische Machbarkeit des Electrospinning-Verfahrens im industriellen Kontext geprüft werden. Im Vordergrund standen hierbei Anforderungen an die Produktionsprozesse, wie die Erfüllung hoher Durchsatzraten, die Sicherstellung der Prozessstabilität sowie die Kostenbewertung im Vergleich zu etablierten Beschichtungsverfahren (Produktionsaspekt).

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bestand die Aufgabe der Technischen Universität München darin, datengetriebene Methoden zu entwickeln, die bei einer möglichen Industrialisierung des Electrospinning-Verfahrens eingesetzt werden können. Ein zentrales Ziel war die Erforschung eines neuartigen Monitoring- und Steuerungssystems, das eine Inline-Überwachung des Prozesses ermöglicht. Mittels Bildverarbeitungsmethoden sollte die Prozessstabilität gewährleistet und der Einfluss verschiedener Produktionsparameter auf das Endprodukt besser verstanden und optimiert werden. Diese datenbasierte Herangehensweise sollte sicherstellen, dass der Electrospinning-Prozess robust und effizient in der industriellen Anwendung umgesetzt werden kann.

Ablauf und Ergebnisse

Das Projekt IntelliSpin war in mehrere aufeinander aufbauende Arbeitspakete (AP) unterteilt, die gemeinsam dazu beigetragen haben, die Projektziele zu erreichen. Zu Beginn des Projekts (AP1) wurde eine umfassende Anforderungsanalyse durchgeführt, um die notwendigen technischen Spezifikationen und Prozessparameter für den Einsatz des Electrospinning-Verfahrens in der Batterieproduktion zu ermitteln. In enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern wurden dabei die Anforderungen an die Produktionsumgebung, die Prozessstabilität und den Durchsatz der Anlagen definiert. Zudem wurde ein Bildverarbeitungssystem zur Prozessbeobachtung entwickelt, das es ermöglichte, relevante Merkmale für die spätere Analyse und Optimierung zu extrahieren.

Parallel dazu wurden experimentelle Untersuchungen zur Prozesskombination Electrospinning-Lamination durchgeführt (AP 2). Dabei wurden verschiedene Polymerlösungen und Prozessparameter getestet, um die Eignung für die Herstellung von Nanofaserschichten zu prüfen. Da Nanofasern mit herkömmlicher Mikroskopie kaum sichtbar sind, wurden Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (REM) genutzt, um auf Basis der entwickelten Bildverarbeitungsmethoden den Beschichtungsprozess datengetrieben zu optimieren. Darauf aufbauend konnten die Schichthomogenität und der Bedeckungsgrad der Nanofasern bestimmt werden und eine Korrelation mit der Substratgeschwindigkeit hergestellt werden.

In einem weiteren Schritt wurde der Fokus auf die Erfassung und Speicherung der Prozessdaten gelegt (AP 3). Zur einheitlichen Speicherung der Roh- und Metadaten wurden Datenmodelle entwickelt. Diese Datenmodelle ermöglichten eine strukturierte Analyse und Optimierung der Produktionsprozesse. Anschließend wurden Datenpipelines programmiert, um die gesammelten Daten effizient für weitere Analysen zur Verfügung zu stellen. Mit dem Ziel die statistischen Auswertungen basierend auf den extrahierten Prozessmerkmalen auch interaktiv durchführen zu können und somit zeitnahe Feedback bei der Entwicklung neuer Prozesskombinationen zu erhalten, wurde ein interaktives, grafisches Operator-Tool entwickelt, in dem die Auswertungen durchgeführt werden können.

Auf Basis dieser Daten wurde eine intelligente Optimierung des Spinning-Prozesses durchgeführt (AP 4). Die extrahierten Merkmale wurden sowohl für die Analyse von Bildserien eines Electrospinning-Experiments als auch für die Analyse verschiedener Versuchsdurchläufe verwendet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen konnten konkrete Optimierungsschritte abgeleitet werden, um die Effizienz und Stabilität des Prozesses weiter zu verbessern.

Abschließend wurde die Wirtschaftlichkeit der Integration des Electrospinning-Verfahrens in die großtechnische Produktion von Lithium-Ionen-Batterien bewertet.

Abschlussbericht zum Förderprojekt im BMBF-Rahmenprogramm „Intelligente Batteriezellproduktion – InZePro“

Teil 2 – Eingehende Darstellung der wesentlichen Inhalte

Vorhabenbezeichnung: IntelliSpin – Intelligentes Electrospinning in der Zellfertigung mittels Maschinellern Lernen	
Zuwendungsempfänger: Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften	Förderkennzeichen 03XP0353B
Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter) Stephan Trattig (wissenschaftlicher Mitarbeiter)	Berichtszeitraum 01.01.2021 – 30.04.2024

Eingehende Darstellung der wesentlichen Inhalte

1. Ausgangssituation und Anforderungsanalyse

Zielsetzung

Das Forschungsprojekt IntelliSpin hatte zum Ziel, das Electrospinning-Verfahren als neue Beschichtungstechnologie in die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zu integrieren. Durch das Aufbringen einer dünnen Polymerschicht zwischen Elektrode und Separator sollten die elektrochemischen Eigenschaften der Batteriezellen verbessert und die mechanische Stabilität bei der Handhabung der Zellen erhöht werden. Darüber hinaus wurden die technischen Anforderungen und die wirtschaftliche Machbarkeit des Verfahrens im industriellen Umfeld untersucht. Seitens der Technischen Universität München (TUM) nahm die Entwicklung einer neuartigen Prozessüberwachung und -auswertung durch intelligente Optimierung einen zentralen Stellenwert ein.

Kurzbeschreibung der Technologie und Bedeutung für die LIB-Produktion

Electrospinning ist ein Verfahren zur Herstellung von Nanofasern, bei dem starke elektrische Felder genutzt werden, um Polymere zu extrem dünnen Fasern zu verarbeiten und auf ein Substrat aufzubringen. In der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, dünne und homogene Schichten aus Polymer-Nanofasern zwischen Separator und Aktivmaterial einzubringen, die zur Lamination von Batteriekomponenten verwendet werden können. Für eine industrielle Anwendung müssen jedoch hohe Anforderungen an Prozessstabilität, Durchsatz und Produktionskosten erfüllt werden, um das Verfahren konkurrenzfähig zu machen.

Anforderungen an eine kamerabasierte Prozessüberwachung

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurden spezifische Kriterien erarbeitet, um die Eignung des Electrospinning-Prozesses für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Batterien sicherzustellen. Zu den zentralen Anforderungen zählten unterbrechungsfreie Hochdurchsatz-

systeme, eine stabile Prozessführung sowie die Reduktion der Prozesskomplexität. Von besonderer Bedeutung für die Technische Universität München war dabei die Entwicklung eines Monitoringsystems, das eine Inline-Überwachung der Prozessstabilität und damit schnelle Parametereinstellungen des Electrospinning-Prozesses ermöglicht. Diese Anforderungen bildeten die Grundlage für die spätere Optimierung der Prozessqualität und -stabilität, die stark auf einem fortschrittlichen Bildverarbeitungssystem zur Prozessbeobachtung basiert.

2. Systementwicklung zur Beobachtung von Electrospinning-Prozessen

Im Rahmen des Projekts IntelliSpin wurde ein System entwickelt, das eine präzise und kontinuierliche Überwachung von Electrospinning-Prozessen ermöglicht. Durch den Einsatz eines speziell entwickelten Bildverarbeitungssystems konnten kritische Prozessparameter extrahiert und analysiert werden. Dadurch war es möglich, die Stabilität und Qualität von Electrospinning-Prozessen zuverlässig zu überwachen und zu verbessern.

Hochgeschwindigkeits-Kameraaufnahmen zur Prozessüberwachung

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Prozessüberwachung des Electrospinning-Verfahrens musste das entwickelte Bildverarbeitungssystem in der Lage sein, die dynamischen und komplexen Abläufe bei Electrospinning-Prozessen zu erfassen. Dabei war die mikroskopische Auflösung als auch die Bildrate des Bildverarbeitungssystems entscheidend, um die feinen, schnell bewegten Strukturen des Prozesses zuverlässig zu detektieren. Die Kombination aus Hochgeschwindigkeitskameras und spezialisierten Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichte es, nicht nur die Position und Form von Taylor-Koni (Prozessmerkmal), sondern auch deren Veränderungen im Verlauf des Prozesses zu überwachen.

Erfassung von Merkmalen mit einer mikroskopischen Hochgeschwindigkeitskamera

Eine beispielhafte Einzelaufnahme eines Electrospinning-Prozesses ist in **Abbildung 1** dargestellt. Zu sehen ist ein Ausschnitt des Draht-Emitters, welcher mit einer Polymerlösung beschichtet ist. Die sichtlich verformte Oberfläche der Polymerlösung prägt an einzelnen Stellen sogenannte Taylor-Koni aus. Ein typischer Taylor-Kegel (Plural: Taylor-Kegel) formt sich während des Electrospinning als Spitze auf dem Draht-Emitter und bildet die Ausgangsstruktur für die Faserproduktion. Ausgehend von den Taylor-Koni wird die Polymerlösung hin zum Substrat in Form dünner Fäden („Spinning-Jets“) beschleunigt. Diese Spinning-Jets sind in **Abbildung 1** anhand dünner, vertikaler Fäden erkennbar.

Zur Überwachung des Electrospinning-Prozesses wurde eine mikroskopische Hochgeschwindigkeitskamera (Typ Basler ac1920-155um) eingesetzt, welche die schnelle Bewegung der Taylor-Koni und die Entwicklung der einzelnen Spinning-Jets während des Prozesses verfolgt.

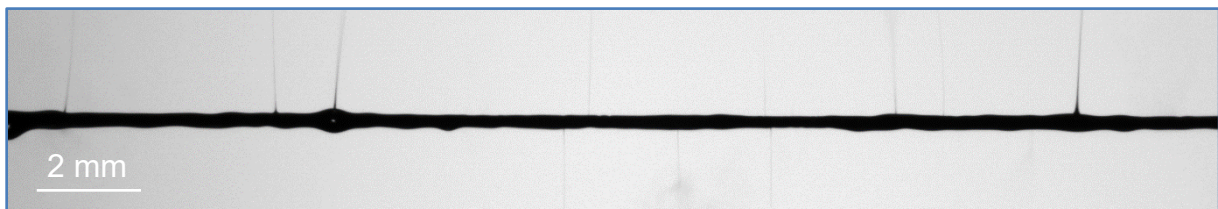


Abbildung 1: Mikroskopische Hochgeschwindigkeits-Kameraaufnahme

Um die Dynamik der Taylor-Koni und die Verformungen der Polymerlösung am Draht zu erfassen, musste die Kamera einer Aufnahmerate von über 200 Bildern pro Sekunde aufweisen. Diese hohe Bildfrequenz war notwendig, um auch kleinste Veränderungen im Prozess zu erkennen, die für die Stabilität und Qualität der Nanofasern entscheidend sind. Der Abstand

zweier Pixel beträgt in allen Aufnahmen der Prozessbeobachtung $12\ \mu\text{m}$, was die mikroskopische Natur des Prozesses verdeutlicht. In **Abbildung 1** sichtbare Bildmerkmale, die eine quantitative Bewertung der Prozessqualität ermöglichen, sind die Kontur der Oberflächenverformung der Polymerlösung am Draht (mit ausgeprägten Taylor-Koni) und die Position der von einzelnen Taylor-Koni emergierenden „Spinning-Jets“.

In **Abbildung 2** ist solch ein einzelner Taylor-Konus mit „Spinning-Jet“ detailliert dargestellt. Dieser kann einen Durchmesser von weniger als $100\ \mu\text{m}$ aufweisen. Die Auflösung des ausgewählten Kamerasystems war jedoch hinreichend genau, um Taylor-Koni und deren „Spinning-Jets“ mittels Algorithmen automatisiert zu erfassen.

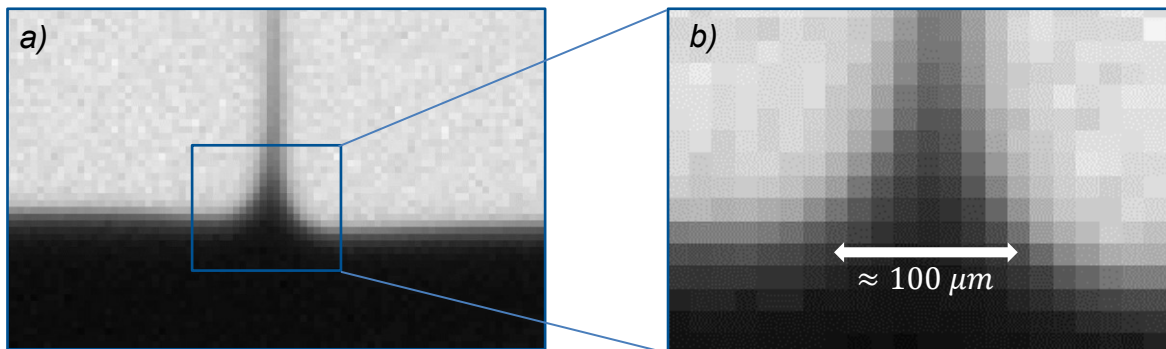


Abbildung 2: a) Taylor-Konus mit „Spinning-Jet“, b) vergrößerter Taylor-Konus

Um die komplexen Electrospinning-Prozesse präzise überwachen zu können, musste das Bildverarbeitungssystem in der Lage sein, einzelne Taylor-Koni mit einem Durchmesser von weniger als $100\ \mu\text{m}$ in den Aufnahmen deutlich sichtbar zu machen.

Entwicklung von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Merkmalsextraktion

Um die Prozessstabilität bei Electrospinning-Prozessen anhand der kamerabasierten Prozessbeobachtung zu ermöglichen, musste jede einzelne Aufnahme quantitativ ausgewertet werden. Hierfür war die Extraktion von Bildmerkmalen aus einzelnen Aufnahmen notwendig. In **Abbildung 3** ist eine einzelne Aufnahme des Electrospinning-Prozesses mit eingezeichneten, extrahierten Merkmalen dargestellt. Als primäre Merkmale wurden die obere und die untere Kante der Polymerlösung (rot) als auch erkannte Taylor-Koni mit „Spinning-Jets“ (grün) eingezeichnet.

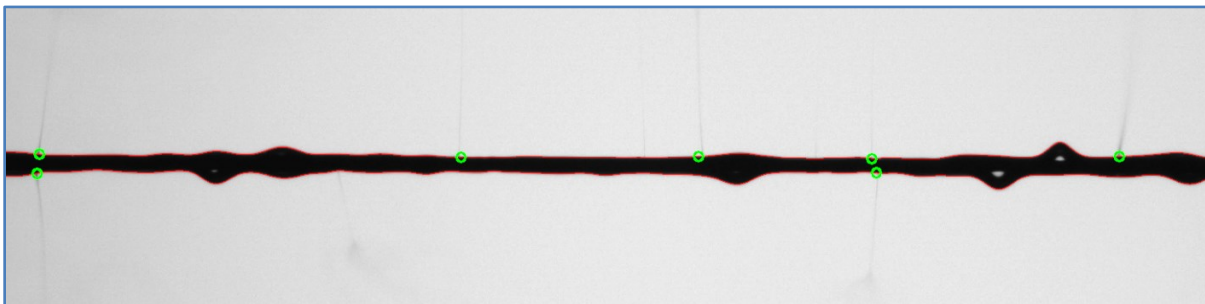


Abbildung 3: Aufnahme des beschichteten Draht-Emitters mit eingezeichneten, extrahierten Bildmerkmalen

Die Extraktion dieser Merkmale erfolgte durch speziell angepasste Extraktionsalgorithmen. Aufnahmen mussten aufwändig vorverarbeitet werden, um anschließend mit klassischen Bildverarbeitungsalgorithmen Merkmale aus den Bildmatrizen extrahieren zu können. Besonderes Augenmerk wurde bei der Implementierung der Vorverarbeitung und der Merkmalsextraktion auf eine schnelle Datenverarbeitung gelegt. Eine unverzögerte Verarbeitung der Aufnahmen („Echtzeitverarbeitung“) ist aufgrund der komplexen Berechnungen und der hohen

Datenlast (bis zu einem Gigabit pro Sekunde) nicht möglich. Es war jedoch möglich, die Aufzeichnungen sehr schnell zu verarbeiten, um kurze Feedbackzeiten bei der Prozessoptimierung zu ermöglichen. So konnte erreicht werden, dass eine Prozessbeobachtung von 2 Sekunden (entspricht 500 Einzelbildern) bereits nach ca. 20 s hinsichtlich der extrahierten Merkmale statistisch ausgewertet werden konnte.

3. Optimierung der Schichthomogenität und des Bedeckungsgrades

Die Optimierung der Schichthomogenität und des Bedeckungsgrades der Nanofaserschichten war ein zentraler Untersuchungsgegenstand im Forschungsprojekt IntelliSpin. Beide Faktoren sind für die Herstellung leistungsfähiger Lithium-Ionen-Batterien von großer Bedeutung, da sie einen direkten Einfluss auf die Qualität der beschichteten Elektroden und Separatoren haben. Die gleichmäßige Verteilung der Nanofasern sowie die gezielte Steuerung des Bedeckungsgrades sind entscheidend für die Lamination und damit für die Leistungsfähigkeit der LIB-Zellen.

Lokalisierung von Nanofasern in REM-Aufnahmen

Um den Bedeckungsgrad und die Schichthomogenität der Nanofasern auf dem Substrat bewerten zu können, müssen diese in verschiedenen Electrospinning-Experimenten verglichen werden. Dazu müssen die Positionen der einzelnen Nanofasern am Substrat aus den Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen extrahiert werden, um anschließend die Schichthomogenität und den Bedeckungsgrad quantifizieren zu können. Eine Herausforderung beim Vergleich verschiedener Aufnahmen stellen dabei vor allem unterschiedliche Belichtungseinstellungen des Rasterelektronenmikroskops und Störkonturen auf den Substraten dar.

Im Rahmen des Forschungsprojektes IntelliSpin wurde ein Verfahren zur Lokalisierung der Nanofasern entwickelt. Das Vorgehen orientiert sich an den in **Abbildung 4** dargestellten Schritten, um variierende Nanofaserverteilungen auf Substraten in verschiedenen Experimenten zuverlässig vergleichen zu können. Aufgrund der stark variierenden Aufnahmen war ein vollautomatisiertes Vorgehen nicht durchführbar und es wurde auf ein teilautomatisiertes Verfahren zurückgegriffen.



Abbildung 4: Vorgehen zur Lokalisierung der Nanofasern im Bild

In einem ersten Schritt wurde die Verteilung der 256 Graustufen einer REM-Aufnahme über ein Histogramm bestimmt, um unterschiedlich belichtete Aufnahmen handhaben zu können. Im zweiten Schritt wurde ein Schwellenwert festgelegt und die resultierende Binärmaske ausgewertet. War der Schwellenwert passend gesetzt, mussten anschließend Störkonturen und anderweitig falsch klassifizierte Pixel entfernt werden. Da die einzelnen Fasern in der Struktur durch zusammenhängende Pixel gekennzeichnet sind, wird eine Opening-Transformation angewendet. In **Abbildung 5** sind die zuvor erläuterten Schritte exemplarisch anhand einer REM-Aufnahme von Nanofasern dargestellt.

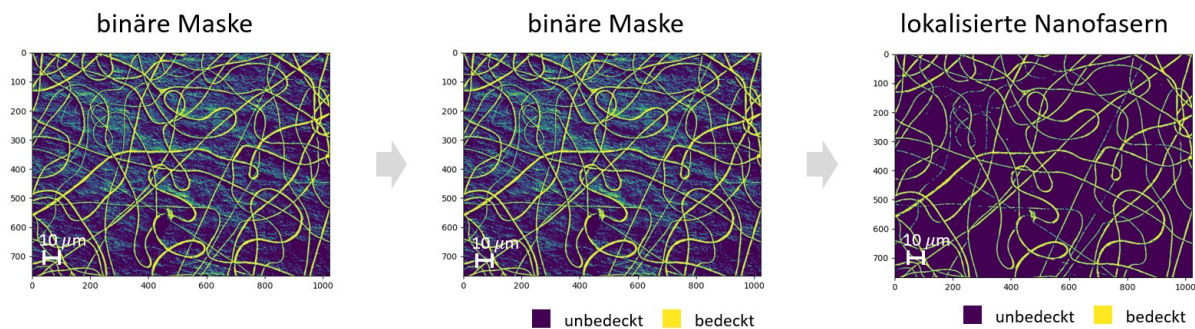


Abbildung 5: Vorgehen zur Lokalisation von Nanofasern in REM-Aufnahmen

Das entwickelte Vorgehen zur Lokalisation wurde anschließend genutzt, um die Schichthomogenität und den Bedeckungsgrad auf Basis der lokalisierten Nanofasern zu erfassen und zu optimieren.

Erfassung der Homogenität der beschichteten Nanofasern

Die Homogenität der Nanofaserschicht ist ein wichtiger Qualitätsparameter, der die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Nanofasern auf dem Substrat beschreibt. Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Homogenität der aufgetragenen Schichten stark von den gewählten Polymeren und Lösungsmitteln beeinflusst wird. Inhomogenitäten in der Faserverteilung können die Lamination beeinträchtigen, weshalb eine genaue Analyse und Kontrolle der Faserverteilung notwendig ist.

Experimentelle Ergebnisse zur Schichthomogenität

Zur Bestimmung der Schichthomogenität müssen die zuvor lokalisierten Nanofasern hinsichtlich ihrer Verteilung in der REM-Aufnahme ausgewertet werden. Die dafür im Projekt entwickelte Methode verwendet eine lokale Texturanalyse, die an statistisch ausgewählten Bildausschnitten durchgeführt wird. Bei dieser lokalen Texturanalyse wird die Korrelation benachbarter Pixel im Bildausschnitt genutzt, um einen Korrelationsindikator der Textur zu berechnen. Bei homogenen Faserverteilungen ist dieser Korrelationsindikator in verschiedenen Bildausschnitten ähnlich ausgeprägt. Bei inhomogenen Faserverteilungen zeigt der Korrelationsindikator eine klare Abhängigkeit von der Position. Dieser Umstand wird genutzt, um aus der Verteilung der lokalen Korrelations-Indikatoren mittels Standardabweichung einen Indikator für die Homogenität der gesamten Schicht zu erhalten.

In **Abbildung 6** ist diese Vorgehensweise beispielhaft dargestellt. Es wurden 10.000 zufällig ausgewählte, lokale Bildausschnitte ausgewählt und hinsichtlich der Texturkorrelation analysiert. Die Verteilung dieser Texturkorrelation ist im dargestellten Histogramm ersichtlich, wobei die homogene Faserverteilung eine Standardabweichung von $\sim 0,11$ aufweist, während die inhomogene Faserverteilung mit $\sim 0,22$ deutlich breiter ausgeprägt ist.

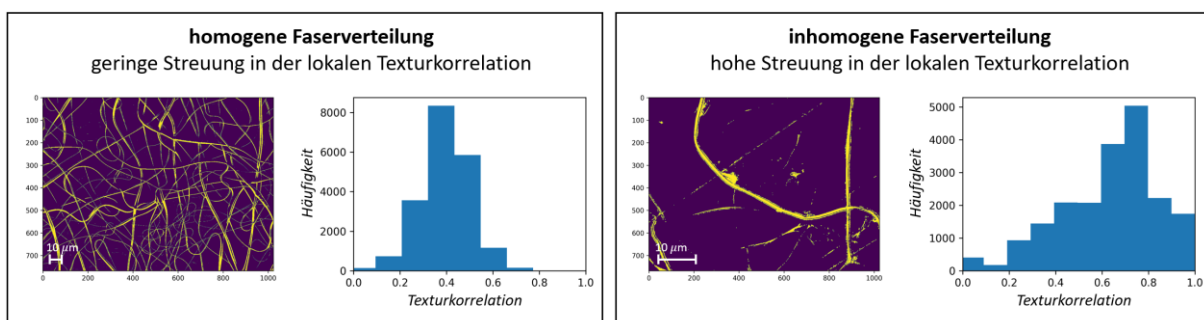


Abbildung 6: Quantifizierung der Schichthomogenität von Nanofasern

Obwohl die Homogenität der Faserschicht mit der vorgestellten Methode quantifiziert werden konnte, hat sie in der Praxis im direkten Vergleich mit dem Bedeckungsgrad eine untergeordnete Rolle gespielt. Zum einen haben Experimente gezeigt, dass der Haupteinflussfaktor auf die Schichthomogenität die Auswahl des Polymers und des Lösungsmittels ist. Andererseits haben mögliche Inhomogenitäten in der Faserverteilung nur einen geringen Effekt auf die Lamination, da diese im relevanten Maßstab ($\sim 1\text{ mm}$) immer als homogen anzunehmen ist. Abschließend wurde festgestellt, dass die Faserverteilung umso homogener ist, je höher die Schlittengeschwindigkeit (Prozessparameter) beim Electrospinning-Prozess eingestellt wird.

Erfassung und Optimierung des Bedeckungsgrades

Der Bedeckungsgrad beschreibt den Anteil der Substratoberfläche, der von den aufgetragenen Nanofasern bedeckt wird und ist ein wichtiger Parameter für die Optimierung des Electrospinning-Prozesses. In den Experimenten wurde der Bedeckungsgrad durch die Analyse von REM-Aufnahmen der Nanofasern bei verschiedenen Substratgeschwindigkeiten bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass der Bedeckungsgrad direkt mit der Substratgeschwindigkeit korreliert, was eine gezielte Steuerung des Prozesses und die Erzielung optimaler Faserbeschichtungen ermöglicht.

Analyse der Substratgeschwindigkeit und deren Auswirkungen auf den Bedeckungsgrad

In **Abbildung 7** sind REM-Aufnahmen von Nanofasern mit unterschiedlichen Bedeckungsgraden dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass der Bedeckungsgrad durch eine Anpassung der Substratgeschwindigkeit direkt beeinflusst werden kann. Die durchgeführten Experimente haben außerdem gezeigt, dass eine höhere Substratgeschwindigkeit zu einem geringeren Bedeckungsgrad führt, da pro Zeiteinheit weniger Nanofasern auf das Substrat aufgetragen werden.

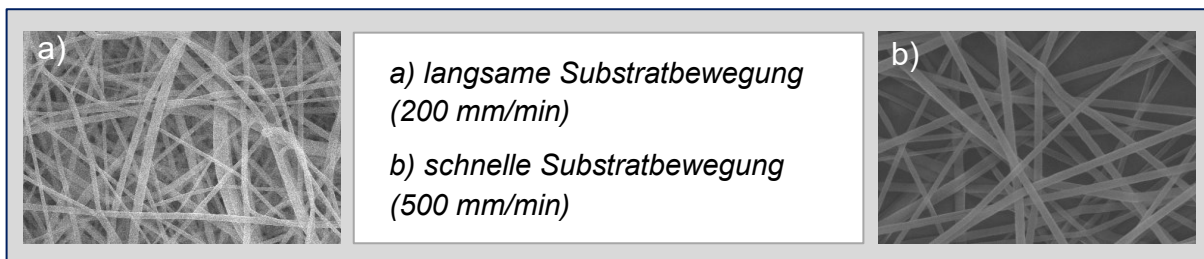


Abbildung 7: Bedeckungsgrad von PVDF in DMF bei unterschiedlichen Substratgeschwindigkeiten.

Um den Zusammenhang zwischen der Substratgeschwindigkeit und dem Bedeckungsgrad zu quantifizieren, wurden die REM-Aufnahmen der beschichteten Proben analysiert und die dabei mit Nanofasern bedeckte Fläche bestimmt. Mit Hilfe des bereits vorgestellten Bildverarbeitungsverfahrens, das zur Lokalisierung von Nanofasern in REM-Aufnahmen entwickelt wurde, konnten die Nanofasern lokalisiert und der Bedeckungsgrad berechnet werden. Die zur Bestimmung der Korrelation erforderlichen Experimente wurden bei verschiedenen Substratgeschwindigkeiten durchgeführt, um eine klare Korrelation zwischen Substratgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad zu erhalten.

Experimentelle Ergebnisse und Modellbildung zum Bedeckungsgrad

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis dieser ausgewerteten Experimente. Im linken Diagramm sind durchgeführte Experimente zur Bestimmung für den Zusammenhang zwischen Bedeckungsgrad und Substratgeschwindigkeit dargestellt. Die Bedeckungsgrade der einzelnen Aufnahmen in Abhängigkeit von der Substratgeschwindigkeit sind als blaue Punkte dargestellt. Die

Daten wurden, wie im rechten Teil der Abbildung dargestellt, aus einzelnen REM-Aufnahmen der Nanofasern extrahiert.

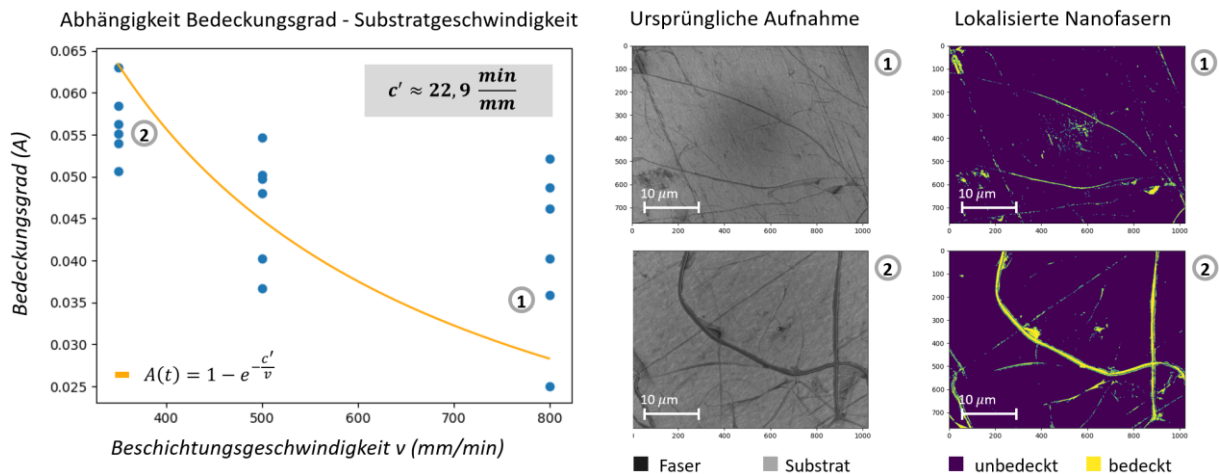


Abbildung 8: Erfassung und Optimierung des Bedeckungsgrades

Der Bedeckungsgrad wird durch die Anzahl der als bedeckt identifizierten Pixel im Verhältnis zur Gesamtzahl der Pixel im Bild bestimmt. **Abbildung 8** zeigt als Beispiel eine Probe für eine hohe Substratgeschwindigkeit (1) und eine Probe für eine niedrige Substratgeschwindigkeit (2) dargestellt.

Um die Daten für die Steuerung von Electrospinning-Prozessen nutzbar zu machen, wurden sie in ein Modell überführt. Bei der Modellbildung wird davon ausgegangen, dass der Prozess und damit der Durchsatz beim Electrospinning zeitlich konstant ist. Der Auftrag hängt somit nur von der Substratgeschwindigkeit ab. Die vereinfachte Differentialgleichung zur Bestimmung des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Zeit kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\dot{A} \sim (1 - A).$$

Dabei ist A der Bedeckungsgrad und \dot{A} die Auftragsrate der Nanofasern, d. h. der pro Zeit zusätzlich bedeckte Flächenanteil. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad nimmt die Auftragsrate ab und es steht nur noch eine begrenzte freie Fläche zur Verfügung, die neu beschichtet werden kann. Die obige Gleichung führt zu folgender grundsätzlichen Lösung:

$$A(t) = 1 - \exp(-c \cdot t),$$

wobei der Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit nur von dem freien Parameter c , dem konstanten Durchsatz beim Electrospinning, abhängt. Eine experimentelle Bestimmung des Parameters c ermöglicht die Kontrolle des Bedeckungsgrades als Funktion der Zeit. Beim drahtbasierten Electrospinning wird die Beschichtungsrate nicht durch die Zeit bestimmt, sondern durch die Substratgeschwindigkeit im Prozess. Daher muss die Formel erneut angepasst werden und führt zu folgendem Zusammenhang zwischen Substratgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad:

$$A(v) = 1 - \exp\left(-\frac{c'}{v}\right).$$

Dabei stellt der Parameter c' nun die Beschichtungsrate in Abhängigkeit von der Substratgeschwindigkeit v dar.

Die in **Abbildung 8** links orange eingezeichnete Kurve stellt eine Anpassung dieses Modells an die experimentellen Daten dar. Die Schwankung der gemessenen Bedeckungsgrade ist bei hohen Substratgeschwindigkeiten besonders groß, da hier Störkonturen einen großen Einfluss haben. Dennoch konnte mit dem Modell ein zeitabhängiger Bedeckungsgrad von $c' \sim 22,9$

min/mm ermittelt werden. Bei einer typischen Substratgeschwindigkeit von $v \sim 500$ min/mm entspricht dies einem Bedeckungsgrad von $A \sim 4,4$ %. In weiterführenden Experimenten konnte dieser im Projekt ermittelte Zusammenhang genutzt werden, um durch Einstellung der Substratgeschwindigkeit den Bedeckungsgrad der Proben gezielt zu steuern.

Die Homogenität und der Bedeckungsgrad der Nanofaser-Beschichtung konnte durch geeignete Methoden der Bildverarbeitung quantifiziert werden. Die Homogenität der Nanofaserbeschichtung lässt sich kaum durch Anlagenparameter steuern, zeigt sich jedoch auf den Skalen, welche für die Lamination relevant sind, immer homogen. Der Bedeckungsgrad der Fasern spielt für die Anwendung in der Prozesskombination Electrospinning-Lamination eine wichtige Rolle. Hier ist es durch Methoden der Bildverarbeitung und dem Aufbau eines geeigneten Modells gelungen, Schichtdicken in Zusammenhang mit der Substratgeschwindigkeit zu bringen.

4. Digitale Datenerfassung und -auswertung

Ein weiterer zentraler Aspekt des Projekts IntelliSpin war die Entwicklung eines effizienten Systems zur digitalen Datenerfassung und -auswertung für die versuchsübergreifende Optimierung von Electrospinning-Prozessen. Die Integration von Datenmodellen und Pipelines ermöglichte dabei die Erfassung, Speicherung und Auswertung der während der Versuche generierten Daten, die für eine verbesserte Steuerung und Anpassung des Produktionsprozesses notwendig waren. Darüber hinaus ermöglicht ein im Rahmen des Projekts entwickeltes Operator-Tool die Auswertung der Prozessdaten in einer interaktiven grafischen Benutzeroberfläche.

Datenmodelle für Electrospinning-Experimente

Die Grundlage für die digitale Datenerfassung bildeten speziell entwickelte Datenmodelle, die die verschiedenen Arten von Daten (Rohdaten, Metadaten und Auswertungsdaten) strukturierten. Die Rohdaten wurden aus verschiedenen Quellen wie REM-Aufnahmen oder Kamera-beobachtungen des Prozesses erfasst, während die Metadaten Informationen über die Versuchsbedingungen (z. B. Schlittengeschwindigkeit oder verwendetes Polymer) lieferten. Die durch die Verarbeitungen der Rohdaten gewonnenen Auswertungen dienten als Grundlage für weitere Prozessoptimierungen. In **Abbildung 9** ist dieses Datenmodell im Detail dargestellt.

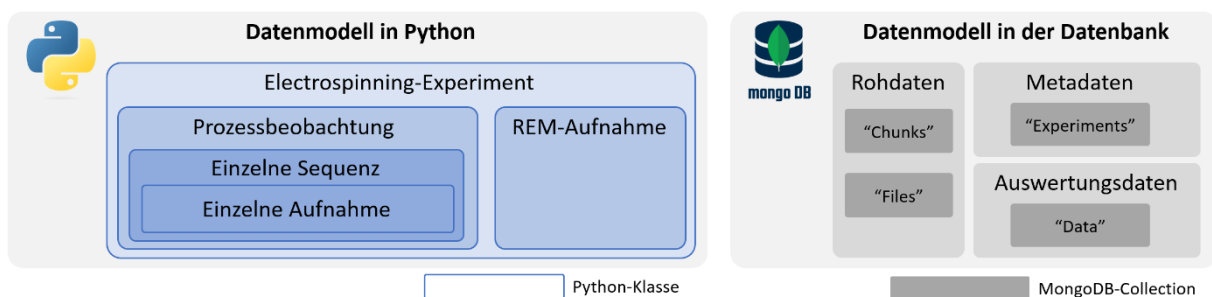


Abbildung 9: vereinfachtes Datenmodell für Electrospinning-Experimente

Zur Modellierung der im Projekt anfallenden Daten sind die in **Abbildung 9** dargestellten Datenmodelle über einen im Forschungsprojekt implementierten Datenbankhandler eng miteinander verknüpft. Dieser Datenbankhandler ermöglicht eine bidirektionale Transformation der statischen Daten in der Datenbank und der aktiven Daten im Python-Datenmodell. Dies bildet die Grundlage für die im Folgenden näher beschriebenen Datenpipelines. Die Verwaltung der Daten erfolgt über eine dokumentenorientierte Datenbank (MongoDB), in der Rohdaten, Metadaten und Auswertungsdaten in getrennten sogenannten Collections organisiert sind. Dies

gewährleistet eine klare Strukturierung und einen schnellen Zugriff auf die Daten. Jedes einzelne Electrospinning-Experiment erhält demnach ein eigenes Dokument in der „Experiments-Collection“, das über eine eindeutige ID mit den zugehörigen Daten verknüpft ist.

Datenpipelines zur Integration verschiedener Datenquellen und Auswertungen

Neben zu der zentralen statischen Datenbank wird in Python ein dynamisches Datenmodell verwendet, das eine flexible Handhabung und Verarbeitung der Daten ermöglicht. Dieses Modell erlaubt es, Daten zur Laufzeit zu verändern, um beispielsweise Datenverarbeitungsaufgaben oder Analysen effizient durchzuführen. Die Verwendung eines solchen aktiven, objektorientierten Datenmodells als Datenpipeline bietet den Vorteil, dass Datenobjekte nach Bedarf angepasst und direkt manipuliert werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Datenpipeline ist die Integration der Datenquellen in eine einheitliche Datenbank, um eine zentrale, langfristige Speicherung und übergreifende Analysen zu ermöglichen. Diese Integration erleichtert die kontinuierliche Optimierung und Weiterentwicklung der Electrospinning-Prozesse durch detaillierte und zugängliche Datenauswertungen.

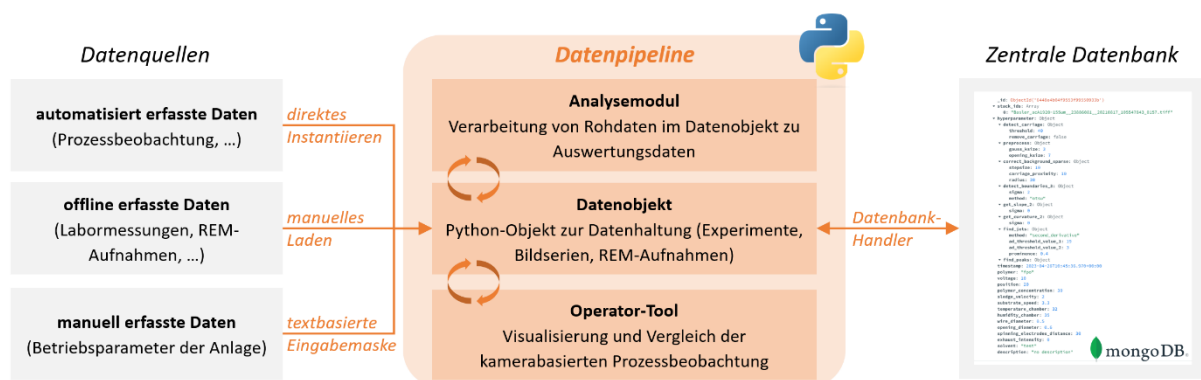


Abbildung 10: Datenpipeline zur Verarbeitung und Speicherung

In **Abbildung 10** ist die Rolle des Python-Frameworks als Datenpipeline dargestellt. Die Datenquellen werden entsprechend dem Datenmodell als Datenobjekte in Python beschrieben. Wird nun ein neues Experiment mit neuen Einstellungen durchgeführt, werden die daraus resultierenden Roh- und Metadaten der Datenquellen als Datenobjekte erzeugt. Dies kann durch direkte Instanziierung, manuelles Laden oder über eine textbasierte Eingabemaske erfolgen. Die nun in der Python-Laufzeit vorhandenen Datenobjekte werden analysiert und dabei Auswertungsdaten erzeugt. Abschließend werden alle Datenobjekte über einen Datenbankhandler in der statischen, zentralen Datenbank (MongoDB) gespeichert und stehen dort persistent für spätere versuchsübergreifende Analysen zur Verfügung.

Interaktive Detailauswertung der Bildsequenzen im Operator-Tool

Eine besondere Herausforderung stellte die hohe Datenrate (250 Bilder pro Sekunde) der Kameraaufnahmen dar. Um die erfassten Daten effizient zu verarbeiten und die daraus resultierende Detailanalysen direkt darstellen zu können, wurde ein interaktives Operator-Tool entwickelt. Dieses ermöglichte eine schnelle und präzise Analyse der Bildsequenzen, indem einzelne Merkmale extrahiert und auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden konnten.

Drahtbasierte Electrospinning-Prozesse finden auf nahezu mikroskopischer Skala und mit hoher Geschwindigkeit statt. Die bei nadelbasierten Electrospinning-Prozessen als relevant er-

achtete Geometrie der Taylor-Koni kann nicht erfasst werden, da sich diese entlang des Drahtes bewegen. Für den industriellen Einsatz von Electrospinning-Prozessen ist vor allem die Prozessstabilität relevant. Diese kann durch eine Betrachtung der Dynamik der Taylor-Koni und der Kante der Polymerlösung am Draht bewertet werden, wofür bereits zuvor grundlegende Algorithmen zur Merkmalsextraktion erstellt wurden.

Das Operator-Tool kann Datenobjekte über das Python-Framework erstellen, das als Datenpipeline fungiert. Dazu werden Metadaten, Rohdaten und Analysedaten aus der zentralen Datenbank geladen. Die Auswahl der darzustellenden Electrospinning-Experimente erfolgt in der Eingabemaske, die in **Abbildung 11** dargestellt ist. Anhand der Eingabeparameter wird dann in der zentralen Datenbank nach ausgewerteten Experimenten gesucht. Zwei getrennte Eingabemasken (links und rechts) ermöglichen dabei die Auswahl von zwei unterschiedlichen Experimenten, die miteinander verglichen werden sollen. Auf diese Weise können Prozessbeobachtungen von Electrospinning-Experimenten vergleichend gegenübergestellt und die Bildmerkmale analysiert werden.

Da bei Electrospinning-Prozessbeobachtungen eine große Menge an Bildmaterial zu analysieren ist, muss sichergestellt werden, dass die Algorithmen zur Merkmalsextraktion korrekt ausgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde die in **Abbildung 12** dargestellte interaktive Detailanalyse entwickelt. Diese ermöglicht eine schnelle Überprüfung einzelner Bilder einer Bildsequenz, um eine eventuell fehlerhafte Merkmalsextraktion zu identifizieren und gegebenenfalls Parameter der Algorithmen anzupassen. Eine korrekt durchgeführte Merkmalsextraktion war entscheidend für später durchgeführte, versuchsübergreifende Datenanalysen.

The screenshot shows the IntelliSpin web interface. At the top, there are tabs for 'Home' and 'Info'. The main area is divided into two columns, each representing a different experimental setup for comparison. Each column contains a list of parameters with input fields and dropdown menus. The left column has pre-filled values, while the right column has 'Select...' options. Below the parameter lists are buttons for 'Get Data'. At the bottom of each column, there are dropdowns for 'Experiment' and 'Image Stack', each with a 'Select Experiment' or 'Select Image Stack' button. A 'View Imagestack in Detail' button is also present. At the very bottom, there is a 'Feature Selection' dropdown menu.

Abbildung 11: Eingabemaske zur Auswahl zu vergleichender Datensätze (Operator-Tool)

Das Tool wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes konzipiert und programmiert. Es basiert auf Open-Source-Software wie der Bildverarbeitungsbibliothek *OpenCV* und dem Visualisierungs-Framework *Dash* und ist direkt mit dem Python-Framework als Datenpipeline verknüpft.

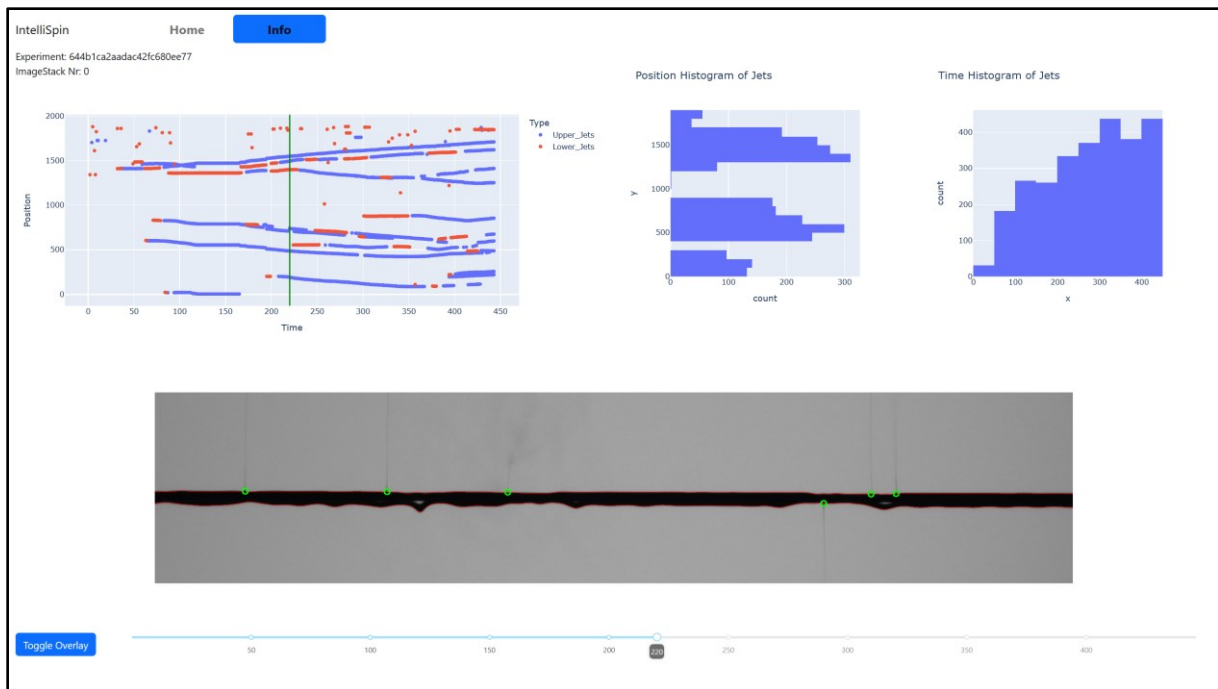


Abbildung 12: Detailanalyse (interaktiv) einer einzelnen Bildsequenz (Operator-Tool)

5. Statistische Analysen von extrahierten Merkmalen

Um Electrospinning-Prozesse datenbasiert optimieren zu können, war eine detaillierte Analyse der Prozessdaten notwendig. Dazu wurden die Aufnahmen der Prozessbeobachtung einer Bildverarbeitung mit Merkmalsextraktion und anschließenden statistischen Analyse unterzogen. Diese Analysen tragen wesentlich zu Prozessoptimierungen bei Electrospinning-Prozessen bei, da damit die zum Teil äußerst umfangreichen Versuche zur Optimierung von Prozessparametern stark reduziert werden konnten.

Statistische Auswertungen von extrahierten Bildmerkmalen an Bildserien

Die Analyse der über Bildserien hinweg extrahierten Merkmale ermöglicht es, zeitabhängige Phänomene im Electrospinning-Prozess zu identifizieren. Diese Beobachtungen liefern wertvolle Informationen zur Stabilität des Prozesses und dessen Eignung für den späteren industriellen Einsatz. Durch die quantitative Auswertung dieser Bildmerkmale kann die Zahl der notwendigen Versuche zur Charakterisierung des Prozessergebnisses in frühen Entwicklungsstadien reduziert werden, da die Anzahl aufwändiger REM-Aufnahmen reduziert werden.

Extraktion relevanter Merkmale zur Optimierung des Electrospinning-Prozesses

Die zuvor in Kapitel 2 vorgestellte Extraktion der Merkmale der Prozessüberwachung wird für die statistische Auswertung von Electrospinning-Prozessen erneut aufgegriffen. Dabei sind zentrale Merkmale des Prozesses, wie die Position der Oberfläche der Polymerlösung als auch der Position der Spinning-Jets von besonderem Interesse. Diese Merkmale können als Indikatoren für die Beurteilung der Prozessstabilität genutzt werden.

Intensitätsanalyse am Draht-Emitter

Eine Intensitätsanalyse der Bildserie gibt einen ersten Eindruck vom Prozessgeschehen, das mit einer gewöhnlichen Bildbetrachtung nicht erkennbar ist. **Abbildung 13 (a)** zeigt eine daraus resultierende Heatmap. Bereiche mit häufigeren Grauwertänderungen in den Aufnahmen der Prozessbeobachtung werden dabei wärmer dargestellt als Bereiche mit wenigen Änderun-

gen. Die häufigen Änderungen an der Oberfläche der Polymerlösung führen zu einer deformierten Kante der Polymerlösung, die in **Abbildung 13** zu sehen ist. Diese Deformation der Polymerlösung führt in der Prozessbeobachtung zu einer wärmeren Darstellung in der Heatmap. Somit kann die Heatmap als erster Indikator für die Dynamik der Polymerlösung im Electrospinning-Prozess angesehen werden.

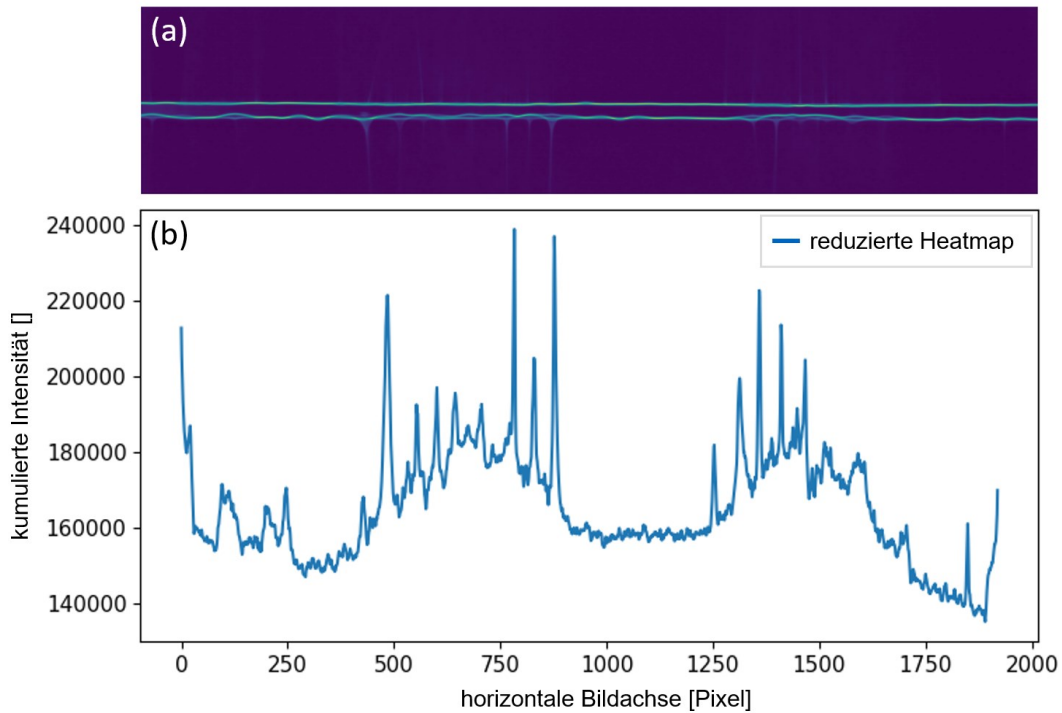


Abbildung 13: Teilbild (a) zeigt eine sogenannte Heatmap der Prozessbeobachtung. Diese wurde aus vielen Einzelaufnahmen wie in Abbildung 3 dargestellt, berechnet. Teilbild (b) zeigt die Reduktion dieser Heatmap auf ihre horizontale Komponente (Position auf dem Draht) durch das Aufsummieren der Spaltenwerte.

In **Abbildung 13 (b)** wurde die Heatmap auf ihre horizontale Komponente reduziert. Positionen entlang des Drahtes, die besonders starke Änderungen in der Heatmap aufweisen, zeigen einen hohen Intensitätswert. Dieser wird durch die Bewegung der Kante sowie durch die entstehenden Jets verursacht und ergibt sich aus der Summe der Spaltenwerte der Heatmap. Sowohl die Heatmap als auch deren Summenwerte werden als prozessbeurteilende Features betrachtet.

Auswertungen der in den Aufnahmen detektierten Spinning-Jets als Merkmale

Als zweites relevantes Merkmal einer Einzelaufnahme geben die Spinning-Jets einen Einblick in das für den Nanofaser-Auftrag relevante Verhalten der Polymerlösung am Draht. In **Abbildung 14** sind diese als Merkmale für eine Bildserie eines Electrospinning-Experiments dargestellt. Zu sehen sind mehrere horizontal verlaufende Kurven, die jeweils einen einzelnen Spinning-Jet repräsentieren. Zur Unterscheidung sind die Spinning-Jets, die auf der Oberseite des Drahtes zu sehen sind und diejenigen, die auf der Unterseite zu sehen sind, farblich unterschiedlich markiert.

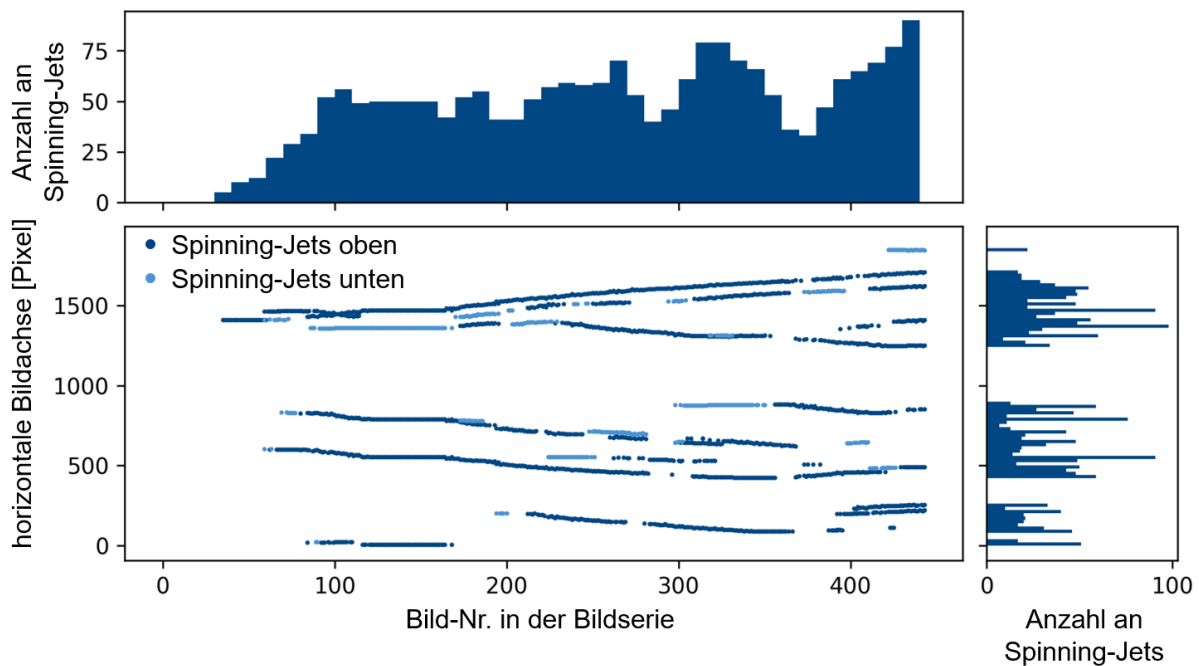


Abbildung 14: Entwicklung von Spinning-Jets im Prozess in Abhängigkeit der Position an der horizontalen Bildachse

Ein typischer Effekt, der bei Electrospinning-Experimenten auftritt, sind lokale Unterschiede in der Anzahl der entstehenden Spinning-Jets entlang der horizontalen Bildachse (y-Achse). In **Abbildung 14** ist dieser Effekt vor allem zwischen den Pixelwerten 950 bis 1200 zu erkennen. Ursache hierfür sind lokale Anhaftungen durch ausgetrocknete Polymere am Draht, die zu einer für die Entstehung von Spinning-Jets ungünstigen lokalen elektrischen Feldverteilung führen. Dieses unerwünschte Verhalten kann durch gezielte Analyse der Aufnahmen bereits im Entwicklungsstadium erkannt und durch systematische Optimierung reduziert werden. Statistische Kenngrößen sind dabei die Verteilung der Spinning-Jets entlang der horizontalen Bildachse (rechtes Histogramm in Abb. 13). Die für den Durchsatz des Electrospinning-Prozesses relevante, statistische Größe ist die Verteilung der Spinning-Jets über die einzelnen Aufnahmen einer Bildserie (oberes Histogramm in Abb. 13).

Vergleichende statistische Auswertungen von mehreren Bildserien

Durch den Vergleich von Electrospinning-Aufnahmen, die auf verschiedenen Experimenten mit variierenden Parametern basieren, konnten korrelierende Eigenschaften aufgezeigt werden. Die Gegenüberstellung verschiedener Experimente ermöglicht zudem Einblicke in das Verhalten und mögliche Optimierungen von Electrospinning-Prozessen.

Durchsatz des Spinning-Prozesses in Abhängigkeit der Spannung im Prozess

In **Abbildung 15** sind die Auswertungen über mehrere Electrospinning-Experimente dargestellt. Dabei wurde die Spannung über diese Experimente sukzessive erhöht, um die Bildung von Spinning-Jets zu beobachten. Die Abbildung zeigt, dass die Anzahl der Spinning-Jets deutlich mit der angelegten Spannung im Prozess korreliert. Daraus folgt, dass für einen optimalen Auftrag von Nanofasern notwendig, eine möglichst Steile Kurve erforderlich ist. Eine zu hohe Spannung im Prozess führt nicht zwangsläufig zu einer steileren Kurve. Neben der Spannung kann durch die Analyse auch der Beschichtungszeitpunkt durch den Schlitten bestimmt werden. Eine zu starke Abnahme der Polymerlösung am Draht führt zu einem Abflachen der Kurven in **Abbildung 15**, so dass eine erneute Beschichtung erforderlich wird.

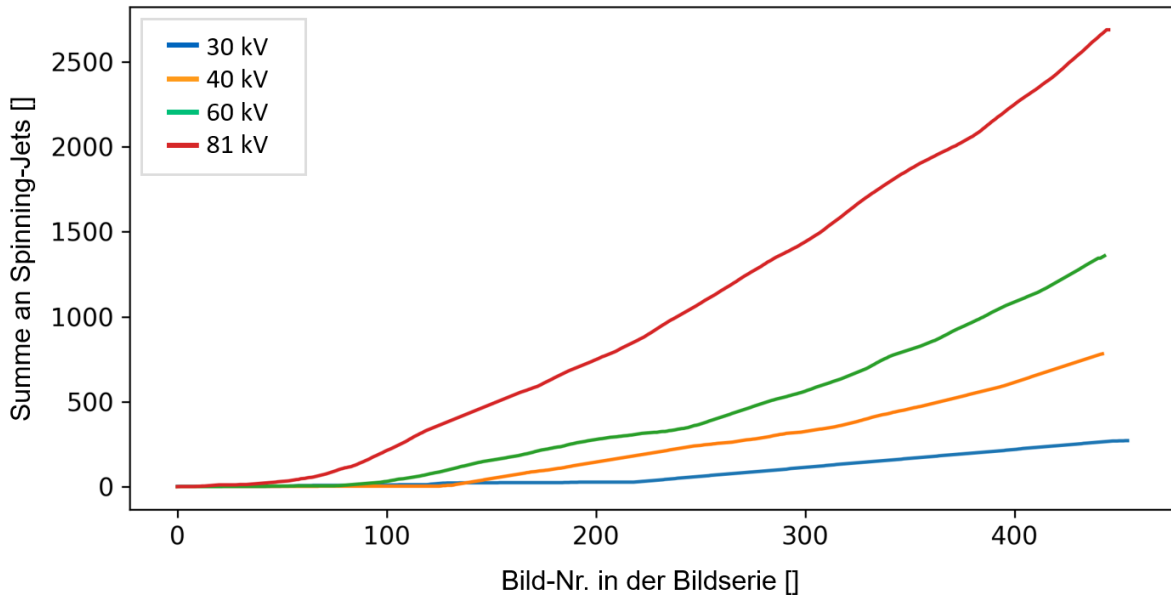


Abbildung 15: Anzahl der Spinning-Jets über eine Bildserie hinweg in Abhängigkeit der angelegten Spannung im Prozess.

Analyse der Schichtdicke der Polymerlösung bei Electrospinning-Prozessen

Neben der angelegten Spannung gibt auch die Position der Kamera relativ zum Draht Anschluss über die Stabilität des Electrospinning-Prozesses. Durch die Durchführung von Prozessbeobachtungen an mehreren Stellen des Drahtes kann sichergestellt werden, dass lokal kein unerwünschtes Prozessverhalten auftritt. Diese Prozessbeobachtungen sind in **Abbildung 16** dargestellt. Dabei ist die mittlere Schichtdicke der Polymerlösung entlang des Drahtes über eine Prozessbeobachtung aufgetragen, wobei verschiedene Kamerapositionen entlang des Drahtes gewählt wurden. Die ähnlich ausgeprägten Kurven lassen auf einen ähnlich hohen Abtrag an Polymerlösung pro Drahtabschnitt schließen, da dieser mit der Abnahme der mittleren Schichtdicke der Polymerlösung auf dem Draht korreliert. Lediglich an der Kameraposition bei 155 mm (violette Kurve) ist eine systematische Abweichung zu erkennen. Diese Abweichung könnte auf eine nicht ausreichend gut ausgeführte Positionierung der Öffnung der Polymerzufuhr am Schlitten zurückzuführen sein.

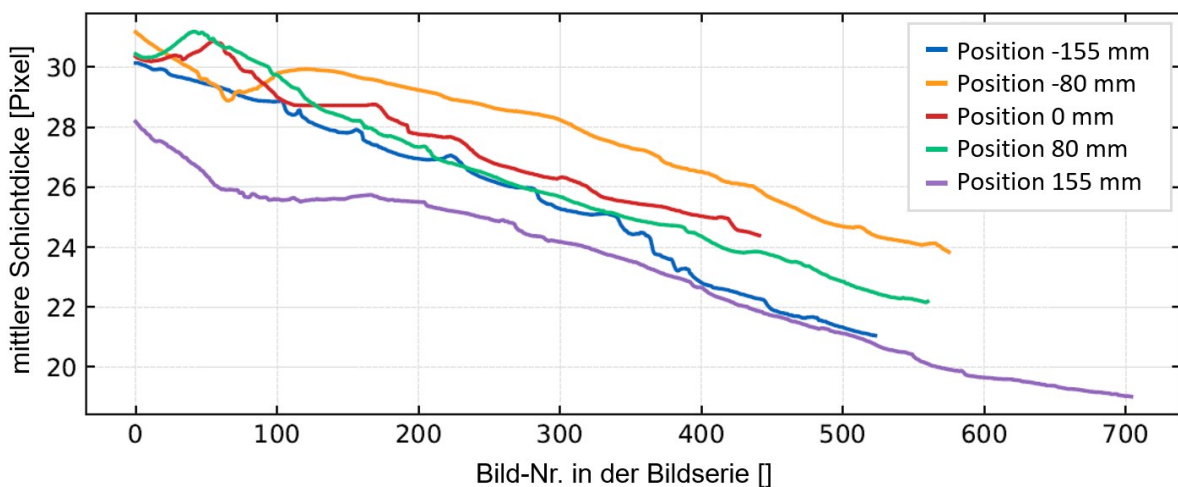


Abbildung 16: Abnahme der mittleren Schichtdicke der Polymerlösung über eine Bildserie hinweg bei unterschiedlicher Positionierung der Kamera entlang des Drahtes

Klassifikation von Taylor-Koni

Um ein besseres Verständnis für die Entwicklung von Spinning-Jets und deren Beziehung zur angelegten elektrischen Spannung zu erhalten, wurde eine Klassifizierung der extrahierten Merkmale vorgenommen. Diese Klassifikation ist in **Abbildung 17** dargestellt. Dabei werden die Taylor-Koni hinsichtlich ihrer absoluten Krümmung und der Prominenz gegenübergestellt.

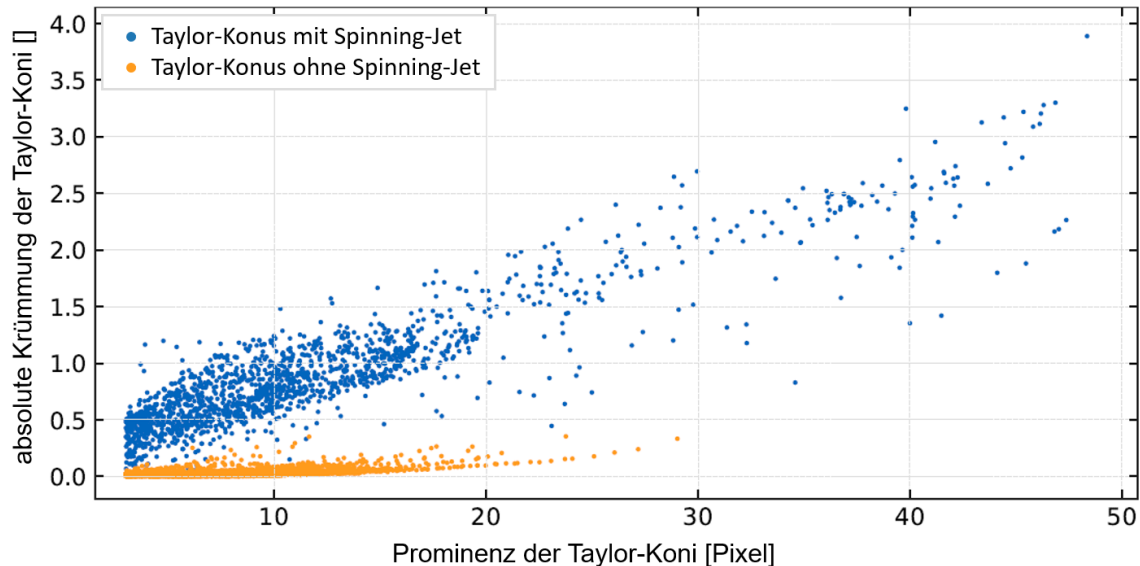


Abbildung 17: Klassifikation von Taylor Koni mit Spinning-Jet (blau) und ohne (orange) anhand der lokalen Krümmung am Draht sowie der Prominenz der Taylor-Koni

Die Prominenz beschreibt die Höhe eines einzelnen Taylor-Konus im Verhältnis zu benachbarten Taylor-Koni entlang des Drahtes. Sie dient somit als Maß für die ausgeprägte Form des betreffenden Taylor-Konus. Die absolute Krümmung beschreibt konkret die Form des jeweiligen Taylor-Konus. Es ergeben sich eindeutige Cluster, die in **Abbildung 17** farblich markiert sind. Diese Klassifizierung ermöglicht es, einzelne Taylor-Koni hinsichtlich der Ausprägung eines Spinning-Jets zu identifizieren. Auf diese Weise ist es möglich, Spinning-Jets anhand der vorliegenden Krümmung mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, ohne aufwändige Bildverarbeitungsalgorithmen zur Merkmalsextraktion einzelner Spinning-Jets anwenden zu müssen.

6. Wirtschaftlichkeitsbewertung der Prozesskombination Electrospinning-Lamination

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Prozesskombination Electrospinning-Lamination wurden eigens entwickelte Berechnungsmodule in Python implementiert. Im Rahmen der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden zwei Hauptzielgrößen untersucht: Zum einen die Gesamtkosten, die durch die Implementierung des Electrospinning-Verfahrens in einer großtechnischen Batterieproduktion mit einem Jahresdurchsatz von 10 GWh entstehen. Zum anderen wurde ein Kostenvergleich zwischen der konventionellen Laminationsmethode und der Lamination unter Verwendung des Electrospinning-Verfahrens durchgeführt. Der durchgeführte Kostenvergleich basiert auf der exemplarischen Betrachtung einer oder mehrerer Zellen mit einer Kapazität von einer Kilowattstunde.

Kostenmodell zur skalierten Beschichtung durch Electrospinning-Prozesse

Im Rahmen der Untersuchung der wirtschaftlichen Machbarkeit der Prozesskombination Electrospinning-Lamination wurde eine detaillierte Kostenabschätzung durchgeführt. Da die für eine skalierte Zellproduktion relevanten Parameter nicht öffentlich verfügbar sind, wurden zwei Modellrechnungen durchgeführt, die sich in ein konservatives und ein progressives Szenario unterteilen lassen. In beiden Szenarien wird die Zellproduktion einer Gigafactory mit einem Jahresdurchsatz von 10 GWh betrachtet. Nach dem Kostenmodell *ProZell* müssen dafür Separatoren mit einer Gesamtfläche von ca. 64 Mio. m² pro Jahr beschichtet werden. In beiden Fällen wurde ein Preis von 0,90 € pro m² für einen herkömmlichen, nicht-laminierbaren Separator angenommen. Diese Annahme wurde durch Experteninterviews im Rahmen der Projektdurchführung ermittelt. Durch die Optimierung der Electrospinning-Experimente im Labor konnte die optimale Nanofaser-Beschichtung für Electrospinning-Prozesse mit 0,5 g pro m² ermittelt werden.

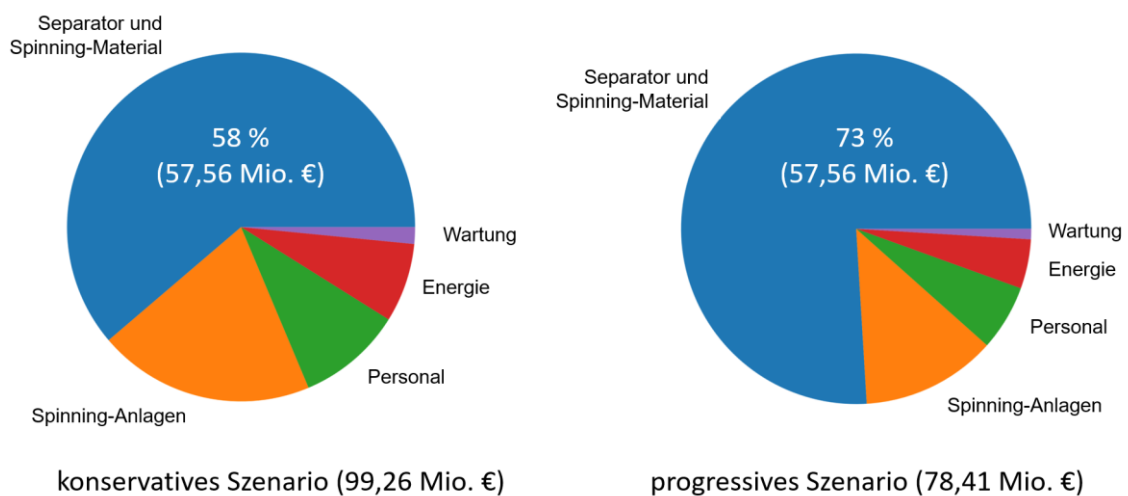


Abbildung 18: Progressives und konservatives Szenario für die Gesamtkosten einer Beschichtung mit Nanofasern durch Electrospinning am Beispiel einer Zellproduktion mit einer Kapazität von 10 GWh pro Jahr.

Die oben genannten Grundparameter bestimmen die Abschätzungen im Rahmen des Kostenmodells und führen zu einem Bedarf von 54 Electrospinning-Anlagen im konservativen Szenario bzw. 27 Electrospinning-Anlagen im progressiven Szenario. In **Abbildung 18** sind die Gesamtkosten für die Separator-Beschichtung im konservativen und im progressiven Szenario gegenübergestellt. Im konservativen Szenario betragen die Gesamtkosten 99,26 Mio. €, im progressiven Szenario 78,41 Mio. €. Der größte Anteil entfällt auf die ursprünglichen Kosten für den zu beschichtenden Separator aus (57,56 Mio. €). Eine detaillierte Übersicht über die geschätzten Kosten im für die Produktion ist in Tabelle 1 dargestellt.

Das Berechnungsmodell wurde in der Programmiersprache Python implementiert und kann angepasst werden, wenn einzelne Parameter wie die Kosten der Separatoren oder der tatsächliche Durchsatz einer industriellen Electrospinning-Anlage genauer quantifiziert werden können. Insgesamt lässt sich jedoch schlussfolgern, dass die Beschichtung mittels Electrospinning zu einer Kostensteigerung von 63 % (konservatives Szenario) bzw. 32 % (progressives Szenario) im Vergleich zu konventionellen, nicht laminierbaren Separatoren führt. Unter Berücksichtigung des geringen Kostenanteils der Separatoren an einer Lithium-Ionen-Batterie sowie der gegebenen Vorteile der Lamination erweist sich die Prozesskombination Electrospinning-Lamination somit als wettbewerbsfähig.

Table 1: Kosten des Einsatzes von Electrospinning am Beispiel einer Zellproduktion mit einer Kapazität von 10 GWh pro Jahr.

Kosten	konservatives Szenario	progressives Szenario
Separator (64 Mio. m ²)	~57,56 Mio.	~57,56 Mio.
Anschaffung der Spinning-Anlagen	~18,90 Mio.	~9,45 Mio.
Personalkosten Betrieb	~9,18 Mio.	~4,59 Mio.
Stromkosten	~6,90 Mio.	~3,45 Mio.
Personalkosten Wartung	~1,46 Mio.	~0,73 Mio.
Gesamtkosten	~94,00 Mio.	~75,78 Mio.

7. Zusammenfassung

Das Projekt IntelliSpin hat gezeigt, dass das Electrospinning-Verfahren erfolgreich in die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Batterien integriert werden könnte. Es bietet signifikante Vorteile durch die präzise und gleichmäßige Beschichtung der Separatoren, was zu verbesserten elektrochemischen Eigenschaften und erhöhter mechanischer Stabilität führt. Eine innovative kamerabasierte Prozessüberwachung ermöglichte eine beschleunigte Auswertung von Taylor-Koni und Spinning-Jets im Prozess, wodurch die Prozessstabilität und -qualität deutlich verbessert werden konnte. Die entwickelte Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt, dass die Kombination von Electrospinning und Lamination trotz höherer Anfangskosten langfristig wettbewerbsfähig sein kann. Insgesamt liefert das Projekt wertvolle Erkenntnisse zur Prozessoptimierung und zeigt eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Laminationsverfahren auf.