

Sachbericht – Kurzbericht

Projekttitel: Automatisierte Modellbildung und Analyse der Nonwoven-Produktion mittels Machine Learning (AutoNoM)

Projektzeitraum: 01.09.2019 - 31.12.2022

Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik (ITA)

Förderkennzeichen: 01IS19015A

Hintergrund

Maschinelles Lernen ist eine wirkungsvolle Methode, um die Produktion vieler Waren stabiler und wirtschaftlicher zu gestalten. Hauptdefizite von maschinellen Lernverfahren sind das aufwendige Auswählen und Anlernen eines passenden Modells, die fehlende Robustheit aufgrund schlechter Datenqualität oder Overfitting. Maschinelle Lernverfahren sind daher paradoxerweise insbesondere in denjenigen Branchen nicht akzeptiert, in denen die Auswirkungen von Rohstoffeigenschaften, Produktionseinstellungen und Umgebungsbedingungen auf die produzierte Produktqualität hochkomplex sind, die Produktionsanlagen erfahrungsbasiert eingestellt werden und das Potenzial Maschinellen Lernens daher besonders hoch ist.

Das durchgeführte Forschungsprojekt AutoNoM löste die Kernprobleme der automatisierten Analyse von Produktions- und Qualitätsdaten mittels maschinellen Lernens in der Produktion von Bahnwaren. Die Umsetzung erfolgte am Beispiel der Produktion von Vliesstoffen (Nonwovens), vom Faserballen bis zum fertigen Vliesstoff.

Ergebnis und Aussagen zum konkreten Nutzen bzw. Anwendungsmöglichkeiten

Produktions- und Qualitätsdaten der Vliesstoffproduktion wurden weltweit erstmals automatisiert mittels maschineller Lernverfahren zusammengeführt, aufbereitet, konditioniert und die Produktion technisch und wirtschaftlich optimiert.

Die Umsetzung der automatisierten Kurierung und Konditionierung der aggregierten Daten erfolgte dabei mit Hilfe des in der Richtlinie VDE/VDI 3714 beschriebenen Vorgehensmodells, das vom Projektpartner und Konsortialführer dieses Projektes atlan-tec Systems GmbH im VDI/VDE/GMA Richtlinienausschuss 7.24 mitentwickelt wurde. Die automatisierte Kurierung und Konditionierung beinhaltet unter anderem die Entfernung ähnlicher Datensätze unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit, Entfernung der zeitlichen Abhängigkeiten (Entzerrung), Plausibilitäts- und Redundanzfilterung. Somit wird sichergestellt, dass nur kausalrichtige Datensätze in ausreichender Güte für die Modellbildung verwendet werden, sodass die Robustheit der Verfahren enorm steigt. Das Vorgehen lässt sich standardisiert auf andere Bahnwaren wie andere Textilien (z. B.: Gewebe, Gestricke, Gewirke), Papier, Glas, Folien, etc. übertragen. Erste Gespräche mit Interessenten aus diesen Branchen finden bereits statt.

Um die beschriebenen Verfahren zur automatisierten Datenverarbeitung und automatisierten Modellierung zu ermöglichen, wurden im Projektverlauf verschiedene Anforderungen identifiziert und die notwendigen Systeme konzipiert, realisiert und implementiert. Dazu zählen beispielsweise ein optisches Messsystem zur Flächengewichtsmessung im Produktionsprozess, eine Single Source of Truth als Datensenke und ein Dashboard.

Neben der Single Source of Truth zur Datensammlung und Zusammenführung heterogener Datenquellen (z.B. SPS-Prozessdaten, BDE/MES-Daten, Qualitätsdaten), wurde das Dashboard zur Visualisierung historischer Daten und Echtzeitdaten entwickelt und implementiert. Dieses Dashboard schafft Transparenz über die Datenlage, deren Aussagekraft

und das Prozessverhalten. Es dient gleichzeitig als Anzeige der Parameter-Einstellvorgaben aus dem KI-System.

Der in diesem Projekt realisierte Demonstrator wurde als KI-basiertes Sollwertvorgabesystem auf Basis eines Softsensors/Prädiktors für die Gleichmäßigkeit des Flächengewichtes umgesetzt. In einer zukünftigen, marktreifen Form könnte dieser zu einem vollautomatischem Echtzeitorientierter (RTO) weiterentwickelt werden. Neben der Weiterentwicklung der KI-Module müssen hierfür dann beispielsweise auch zusätzlich weitere Absicherungsmaßnahmen nach VDE/VDI 3714 getroffen werden, welche den sicheren (teil)-autonomen Betrieb des Gesamtsystems gewährleisten.

Basierend auf der automatisierten Analyse von Produktions- und Qualitätsdaten wurden ein Produktionskostenmodell und ein Modell zur wirtschaftlich-technischen Gesamtoptimierung der Produktionsanlage entwickelt, um die geforderte Mindestqualität bei geringstmöglichen Produktionskosten zu erreichen. Das Modell und die Ergebnisse wurden im Projektverlauf mit den Technologen und den Maschinenführern des Anwendungspartners BNP Brinkmann evaluiert und weiterentwickelt.

Das wichtigste Qualitätskriterium bei der Herstellung von Vliesstoffen ist die Einhaltung eines konstanten Flächengewichtes. Im Vertrieb von Vliesstoffen wird durch den Kunden in der Regel ein minimal einzuhaltendes Flächengewicht vorgegeben. Prozessbedingt unterliegt das tatsächliche Flächengewicht Schwankungen von ca. 5-10 %. In der Produktion ist daher ein Sicherheitsabstand für das Flächengewicht einzustellen. Daraus resultieren entsprechend der Erhöhung des Flächengewichts erhöhte Materialkosten. Mit Hilfe der Parameter-Einstellvorgaben des realisierten Systems kann der Sicherheitsabstand zum minimal einzuhaltendem Flächengewicht reduziert werden. Dies führt zu einer Senkung der Materialkosten, der Kosten für die Produktion und Entstehung von Ausschuss. Durch das ITA wurde die Zielerreichung auf wirtschaftlicher und technischer Seite überprüft. Die Wirtschaftlichkeit der Entwicklung auf Basis der Kapitalwertmethode ist selbst bei einer Einsparung von 1,5 % des Faserverbrauchs gegeben. Aufgrund ungenauer Sensorik konnte die Erreichung der angezielten Einsparung von 4 % leider nicht überprüft werden. Jedoch gibt es zahlreiche positive Indizien, wie z. B., dass der Optimierer die Gleichmäßigkeit des Flors signifikant erhöhen konnte.

Die in diesem Projekt entwickelten Softwareinnovationen bilden die Grundlage, um die Qualitätsbewertung und Qualitätsvorhersage komplexer Produktionsprozesse unterschiedlicher Art besser optimieren zu können. Die Wirtschaftliche Verbesserung geschieht mithilfe von datengetriebenen Modellierungsverfahren, der automatisierten Kurierung und Konditionierung der Daten, dem automatisierten Auswählen, Erzeugen und Anlernen von Modellen, sowie der wirtschaftlich-technischen Optimierung der Produktion. Ein wesentlicher Vorteil der realisierten Lösung ist, dass die Aufbereitung der Daten mit den eingesetzten Werkzeugen nutzergerecht und ohne mathematische Detailkenntnisse und auch ohne die Programmierung von Skripten (beispielsweise in Python) oder Programmcodes erfolgen kann. Die Definition und Einrichtung von Regeln für die automatisierte Datenaufbereitung kann durch Domänenexperten selbst erfolgen.

Damit leistet AutoNoM einen besonderen Beitrag zur nutzergerechten Anwendung von maschinellem Lernen im Produktionsprozess. Aus dem Projekt AutoNoM ergibt sich somit ein branchenübergreifender, breiter und langfristiger Nutzen für verschiedenste Anwender des Maschinellen Lernens.

KMU-innovativ-Verbundprojekt
**AutoNoM: Automatisierte Modellbildung und Analyse der
Nonwoven-Produktion mittels Machine Learning**

Projektzeitraum: 01.09.2019 - 31.12.2022

Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University,
Institut für Textiltechnik (ITA)
Otto-Blumenthal-Str. 1
52074 Aachen

Förderkennzeichen: 01IS19015A

Sachbericht
Schlussbericht
Teil II - Eingehende Darstellung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DLR Projektträger

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS19015A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Thema des Projektes	3
2	Kurzzvorstellung	4
2.1	Projektkonsortium	4
3	Durchgeführte Arbeiten und Teilergebnisse.....	5
3.1	AP 1 - Definition (zusätzlich) benötigter Daten	5
3.1.1	Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?.....	5
3.1.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen.....	5
3.1.3	Erzieltes Ergebnis	5
3.2	AP 2 - Entwicklung (optischer) Messtechnik.....	6
3.2.1	Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?.....	6
3.2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen.....	6
3.2.3	Erzieltes Ergebnis	6
3.3	AP 3 - Entwicklung eines Produktionskostenmodells der Vliesstoffproduktion.....	7
3.3.1	Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?.....	7
3.3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen.....	7
3.3.3	Erzieltes Ergebnis	7
3.4	AP 7 - Entwicklung einer Einstellhilfe zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung ...	8
3.4.1	Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?.....	8
3.4.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen.....	8
3.4.3	Erzieltes Ergebnis	9
3.5	AP 8 - Validierung der technologischen Grundlagen an Demonstratoranlage	11
3.6	AP 9 - Bewertung und Transfer der Entwicklungen	12
3.6.1	Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?.....	12
3.6.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen.....	12
3.6.3	Erzieltes Ergebnis	13
4	Finales Ergebnis und Vergleich mit den vorgegebenen Zielen	14
4.1	Teilziel automatisierte Modellbildung, Analyse und Visualisierung der Produktions- und Qualitätsdaten mittels Maschinellem Lernverfahren.....	14
4.2	Zusammenführen der heterogenen Datenquellen	15
4.3	Automatisierte Kurierung und Konditionierung der Daten	15
4.4	Wirtschaftlich-technische Gesamtoptimierung der Produktionsanlage.....	16
5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
6	Verwertbarkeit der Ergebnisse	19
7	Erfolgte Veröffentlichungen	20

1 Thema des Projektes

Maschinelles Lernen ist eine wirkungsvolle Methode, um die Produktion vieler Waren stabiler und wirtschaftlicher zu gestalten. Hauptdefizite von maschinellen Lernverfahren sind das aufwendige Auswählen und Anlernen eines passenden Modells, die fehlende Robustheit aufgrund schlechter Datenqualität oder Overfitting. Maschinelle Lernverfahren sind daher paradoxerweise insbesondere in denjenigen Branchen nicht akzeptiert, in denen die Auswirkungen von Rohstoffeigenschaften, Produktionseinstellungen und Umgebungsbedingungen auf die produzierte Produktqualität hochkomplex sind, die Produktionsanlagen erfahrungsbasiert eingestellt werden und das Potenzial maschinellen Lernens daher besonders hoch ist. Insbesondere in der Produktion hochwertiger, meist technischer Textilien in mittelständischen Unternehmen ist das der Fall. In der gesamten Textilbranche schwankt die produzierte Qualität durch die manuelle, erfahrungsbasierte Einstellung der Produktionsmaschinen.

Das durchgeführte Forschungsprojekt AutoNoM löst die Kernprobleme der automatisierten Analyse von Produktions- und Qualitätsdaten mittels maschinellen Lernens in der Produktion von Bahnenwaren. Die Umsetzung erfolgte am Beispiel der Produktion von Vliesstoffen (Nonwovens), vom Faserballen bis zum fertigen Vliesstoff.

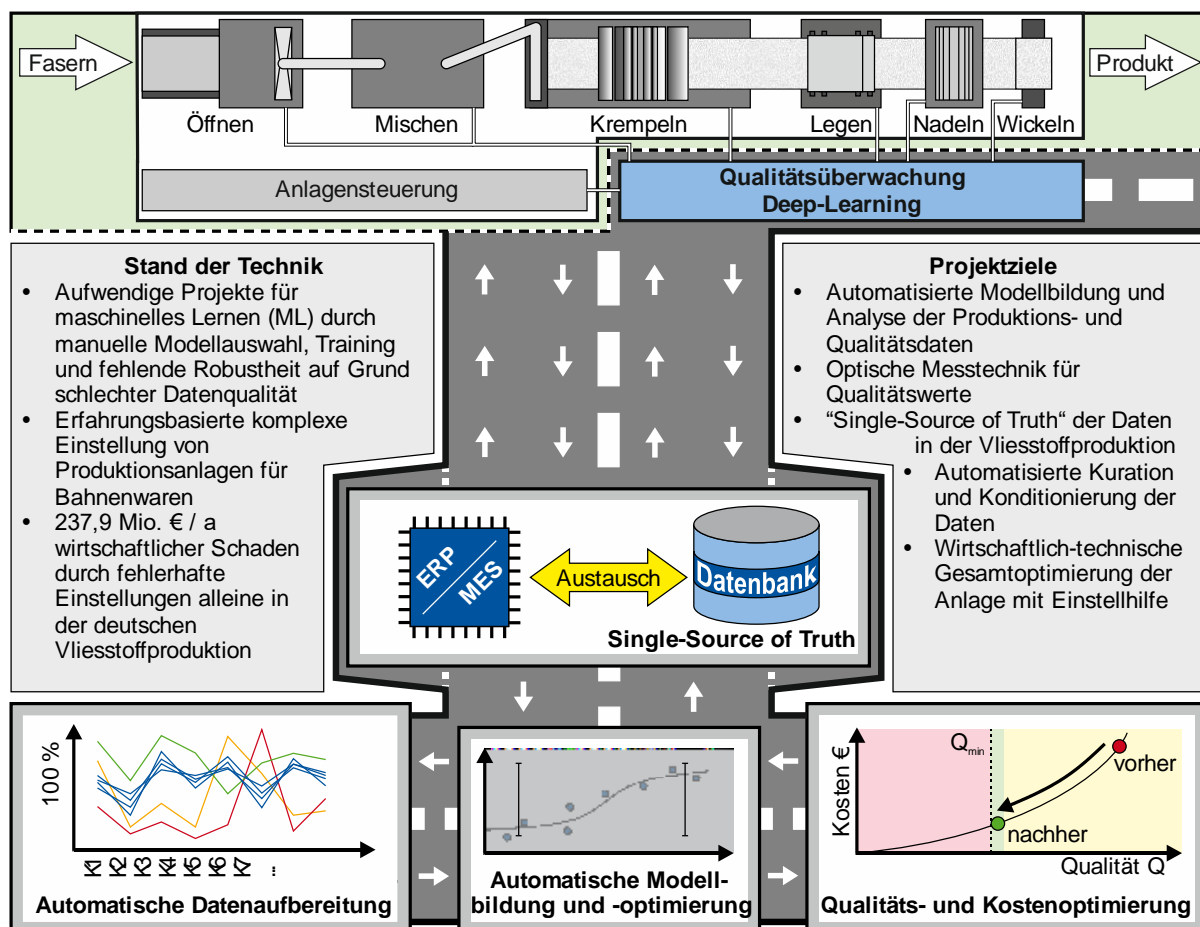








Abbildung. Schematische Darstellung des Projektes

2 Kurzvorstellung

2.1 Projektkonsortium

Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit zwischen den folgenden Projektpartnern durchgeführt.

Partner 1: atlan-tec Systems GmbH, Mönchengladbach (atlan-tec)	Partner 2: proCtec GmbH, Viernheim (proCtec)
 atlan-tec ® Enscheder Straße 7 41069 Mönchengladbach	 Competence in process automation Alexander-Flemming-Str. 1 68519 Viernheim
Partner 3: Axon Machine Vision GmbH & Co. KG, Bergisch Gladbach (AMV)	Partner 4: BNP Brinkmann GmbH & Co. KG, Hörstel (BNP)
 Technologie Park 32/F Friedrich-Ebert-Str. 75 51429 Bergisch Gladbach	 BRINKMANN Kreimershoek 11 48477 Hörstel-Bevergern
Partner 4: RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik (ITA)	
 Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau	 Otto-Blumenthal-Str. 1 52074 Aachen

3 Durchgeführte Arbeiten und Teilergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels werden die durchgeführten Arbeiten und die erreichten Teilergebnisse erläutert.

3.1 AP 1 - Definition (zusätzlich) benötigter Daten

3.1.1 Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

Zunächst wurde das Arbeitspaket 1, das sich auf die Definition aller benötigten Prozess- und Produktionsdaten konzentrierte, gemeinsam im Projektkonsortium bearbeitet. Verschiedene Maßnahmen wurden ergriffen, um diese Anforderung zu erfüllen: Zu Beginn des Projekts wurden Workshops durchgeführt. Während den Workshops wurde festgelegt, welche Informationen unbedingt erfasst werden müssen. Diese umfassten

- das Betriebsdatenerfassungssystem,
- Umweltdaten wie die Raumluftfeuchtigkeit und -temperatur,
- Prozessparameter aus den speicherprogrammierbaren Steuerungen,
- Energieverbräuche
- Labordaten aus der Qualitätssicherung und
- Daten über die verwendeten Stapelfasern, einschließlich Dicke, Länge und Zugfestigkeit.

Die Erfassung der Stapelfasereigenschaften ist relevant, weil diese das Ausgangsmaterial des Prozesses darstellen und einen großen Einfluss auf das finale Ergebnis haben.

3.1.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen

Die Durchführung dieser Maßnahmen erwies sich als notwendig und angemessen, um ein tiefes Verständnis für den Umfang der erforderlichen Daten und deren spezifische Anwendung in der Vliesstoffproduktion zu gewinnen. Die Erkenntnisse aus den Workshops sowie die umfassende Erkundung der Datenquellen trugen wesentlich dazu bei, ein solides Fundament für die Bearbeitung des Projekts zu legen.

3.1.3 Erzieltes Ergebnis

Als Ergebnis liegt ein Dokument vor, in dem alle relevanten Daten, deren Quellen sowie deren Verwendung definiert sind. Dieses Dokument diene als fundamentale Basis für alle zukünftigen Arbeiten an der notwendigen Infrastruktur des Projekts. Durch die klare Definition der benötigten Daten und deren Quellen ermöglicht es eine effiziente und effektive Fortsetzung der Arbeiten, die für die Digitalisierung der Vliesstoffproduktion unerlässlich sind.

3.2 AP 2 - Entwicklung (optischer) Messtechnik

3.2.1 Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

Die Aufgabe des ITA innerhalb des zweiten Arbeitspakets war es, die Eigenschaften der Stapelfasern, also des Ausgangsrohstoffes, zu untersuchen. Es wurden insgesamt 21 Faserproben aus der Produktion von BNP entnommen und im Labor des ITA untersucht. Es wurden Faserlänge, Faserdicke, Zugfestigkeit und Dehnungsverhalten gemessen. Die Messungen wurden hinsichtlich Konsistenz zwischen verschiedenen Chargen sowie Einhaltung der Faserspezifikationen untersucht.

Des Weiteren wurde eine Kalibrierungsfunktion ermittelt, mithilfe derer die Grauwerte der Kamerabilder vom Projektpartner AMV (siehe AP 2) in ein Flächengewicht des Vliesstoffes umgerechnet werden können. Für die Kalibrierungsfunktion wurde ein Regressionsmodell entwickelt, das als unabhängige Größe die Grauwerte und als abhängige Größe das manuell ermittelte Flächengewicht hat.

3.2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen

Die Laboruntersuchungen waren notwendig, um festzustellen, ob Schwankungen der Fasereigenschaften prinzipiell einen Einfluss auf den finalen Vliesstoff haben können. Da die geometrischen und mechanischen Fasereigenschaften einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Vliesstoffes haben, ist die Erfassung der Fasereigenschaften grundsätzlich lohnend. Wenn die Fasereigenschaften allerdings stets innerhalb der Spezifikationen liegen und zudem keine Schwankungen zwischen verschiedenen Chargen aufweisen, gibt es keinen Grund für deren Erfassung.

3.2.3 Erzieltes Ergebnis

Die Laboruntersuchungen haben ergeben, dass die Fasereigenschaften in 16 von 21 Fällen nicht innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen. Außerdem gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Chargen der gleichen Faser. Somit ist die Erfassung der Fasereigenschaften grundsätzlich lohnend. Es wurde eine Recherche durchgeführt, ob Messtechnik auf dem Markt verfügbar ist, mithilfe derer die Eigenschaften wirtschaftlich in einer industriellen Produktion gemessen werden können. Leider sind solche Sensoren nicht verfügbar, sodass auf die Messung der Fasereigenschaften verzichtet werden musste.

Die Erstellung der Kalibrierungsfunktion war grundsätzlich erfolgreich. Das Regressionsmodell konnte von den gemessenen Grauwerten der Kamera auf das Flächengewicht des Vliesstoffes schließen. Die Grauwerte sind jedoch auch von anderen Faktoren wie der Faserfarbe sowie der Vliesstoffdicke abhängig, weshalb für jedes Produkt eine neue Kalibrierung vorgenommen

werden müsste. Dies ist im laufenden Betrieb aufgrund des hohen Aufwandes nicht praktikabel gewesen, sodass das Flächengewicht nur mit einem hohen systematischen Fehler gemessen werden kann.

3.3 AP 3 - Entwicklung eines Produktionskostenmodells der Vliesstoffproduktion

3.3.1 Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

Die durchgeführten Maßnahmen dieses Arbeitspaketes dienten der Erstellung eines Produktionskostenmodells der Vliesstoffproduktion. Zunächst wurde eine Literaturrecherche zu der Modellierung von Gewinn und Kosten in allgemeinen Produktionsprozessen sowie textilen Prozessen durchgeführt. Gleichzeitig wurden Experteninterviews durchgeführt, um die Anwenderperspektive zu erfassen. Es wurde ein Modell ausgewählt, nach dem Gewinn und Kosten der Vliesstoffproduktion modelliert wurden. Das Modell wurde erstellt und in der Praxis validiert. Mit Expertenfeedback wurde das Modell final angepasst und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

3.3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen

Ziel des Projekts war es, eine technisch-wirtschaftliche Optimierung der Vliesstoffproduktion durchzuführen. Zu diesem Zweck muss die Wirtschaftlichkeit der Produktion bekannt bzw. berechenbar sein, da nur messbare Ziele optimierbar sind. Die durchgeführten Experteninterviews waren notwendig, um die theoretischen Ergebnisse der Literaturrecherche in der Praxis zu validieren, um deren Anwendbarkeit in einer Produktion sicherzustellen.

3.3.3 Erzieltes Ergebnis

Als grundlegend bestes Verfahren zur Berechnung der Prozesswirtschaftlichkeit wurde der Deckungsbeitrag (DB) ermittelt. Der Deckungsbeitrag I berechnet den Überschuss, der sich aus dem Umsatz nach Abzug von variablen Kosten ergibt. Für den Prozess bedeutet das, dass der Verkaufswert des produzierten Produkts abzüglich der Material- und Energiekosten berechnet wird. Der Betrag wird in € pro Stunde berechnet, da die Wirtschaftlichkeit pro Zeiteinheit gefordert ist. Der Deckungsbeitrag II berücksichtigt außerdem die Fixkosten, was für eine Optimierung weniger relevant, aber für eine Abschätzung der Gesamtwirtschaftlichkeit geeigneter ist. Expertenfeedback hat ergeben, dass der DB in einem Produktionsdashboard relativ zur mittleren Wirtschaftlichkeit angegeben werden muss. Nur so hat der Maschinenführer einen Vergleich, welche Werte gut bzw. schlecht sind. Die finale Kostenfunktion lautet wie folgt:

$$DBII = K_{lm} * \frac{\dot{m}}{G * b} - K_F * \dot{m} - P * K_E - K_F$$

Mit:

- K_{lm} : (Verkaufs-)Preis pro Laufmeter in [€/m]
- \dot{m} : Fasermassenstrom im [kg/h]
- b : Produktionsbreite in [m]
- G : Flächengewicht Vliesstoff in [kg/m²]
- K_F : Einkaufspreis der Fasern in [€/kg]
- P : Leistungsaufnahme der gesamten Linie in [kW]
- K_E : Energiepreis in [€/kWh]
- K_F : Fixkosten in [€/h]

3.4 AP 7 - Entwicklung einer Einstellhilfe zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung

3.4.1 Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

Als erste Maßnahme wurden Experteninterviews bei BNP durchgeführt, um Anforderungen an die finale Systemarchitektur zu sammeln. Für die Interviews wurden ausführliche Fragebögen erarbeitet, um die Perspektive verschiedener Stakeholder am Projekt abbilden zu können. Die Interviews wurden ausgewertet, um die Ist-Situation zu erfassen sowie Anwendungsfälle für das digitale Assistenzsystem zu generieren. In Rücksprache mit BNP wurden Anwendungsfälle und Anforderungen validiert. Es wurde ein weiterer Workshop durchgeführt, um eine geeignete Optimierungsmethode für das digitale Assistenzsystem zu entwickeln.

Für die Simulation der Qualitäts- und Produktionskosten wurde mithilfe der Programmiersprache Python ein Programm entwickelt, dass auf die Daten der Single Source of Truth zugreift und daraus die Wirtschaftlichkeit des Prozesses berechnet. Das Programm wurde bei BNP in der Produktion implementiert, sodass die Wirtschaftlichkeit des Prozesses anhand des DBII stets in Echtzeit On-Line verfügbar ist.

3.4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen

Eine genaue Anforderungsermittlung sowie eine Formulierung des Soll-Zustandes sind zentrale Elemente für den Erfolg informationstechnischer Systeme. Die Anforderungsermittlung ist Grundlage für die Kollaboration aller Projektpartner, da nur so die Einzelentwicklungen als System funktionieren können.

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit in Echtzeit ist eine Grundlage für die Optimierung ebendieser. Daher waren die aufgeführten Arbeiten angemessen und notwendig.

3.4.3 Erzieltes Ergebnis

Das Ergebnis der Anforderungsermittlung ist die Erfassung des Ist-Zustandes, der in Abbildung 1 gezeigt ist.

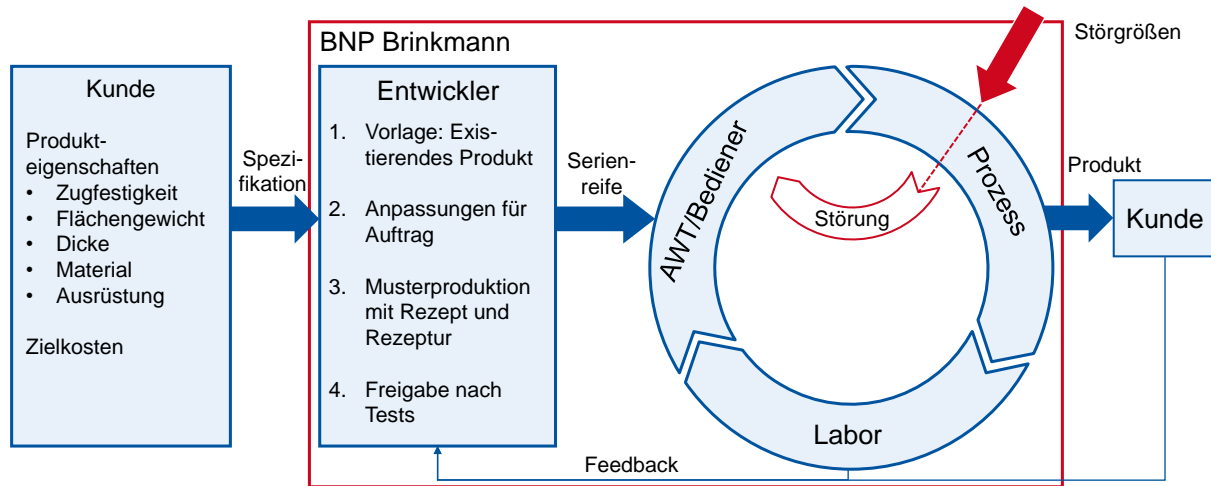


Abbildung 1: Erfassung des Ist-Zustandes

Die Grafik zeigt, wie ein Kunde mit bestimmten Anforderungen an das Unternehmen herantritt. Diese Anforderungen werden vom Entwickler geprüft und in Mustern umgesetzt. Schließlich geht das Produkt in die Serienreife und ein Bediener stellt den Prozess ein, sodass das Produkt hergestellt wird. Das Labor prüft die Qualität und gibt Rückmeldung an den Bediener. Ist die Qualität in Ordnung, wird das Produkt geliefert. Dies zeigt, dass der Fokus von AutoNoM aufgeweitet werden kann: Auch die Komplexität der Produktentwicklung kann durch Digitalisierung verbessert werden, was zukünftige Forschungsperspektiven eröffnet.

Als Soll-Zustand wurde definiert, dass dem Maschinenbediener in einem Live-Dashboard kontinuierlich Kosten und Qualität angezeigt werden müssen. Der Entwurf des Dashboards wurde durch das ITA gestaltet, während die Umsetzung durch AMV durchgeführt worden ist. Außerdem sollte eine Toolbox entworfen werden, mithilfe derer die Modelle aus AP 6 visualisiert werden können. Auf diese Weise ist für den Bediener nachvollziehbar, warum die KI eine bestimmte Entscheidung getroffen hat. Als Optimierungsansatz wurde die sogenannte „Chance-Constrained Optimization“ ausgewählt, die die stochastische Einhaltung der Produktqualität berücksichtigt. So kann eine gewisse Garantie gegeben werden, dass mit einer zu wählenden Wahrscheinlichkeit alle Produkteigenschaften eingehalten werden können.

Das Live- Wirtschaftlichkeitsberechnungstool versorgt das Dashboard mit notwendigen Daten. Die Architektur des Tools ist in Abbildung 2 gezeigt.

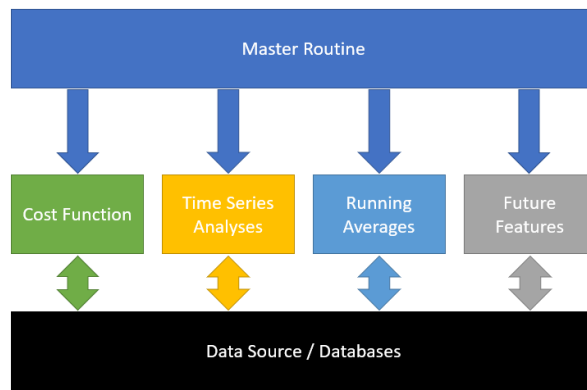
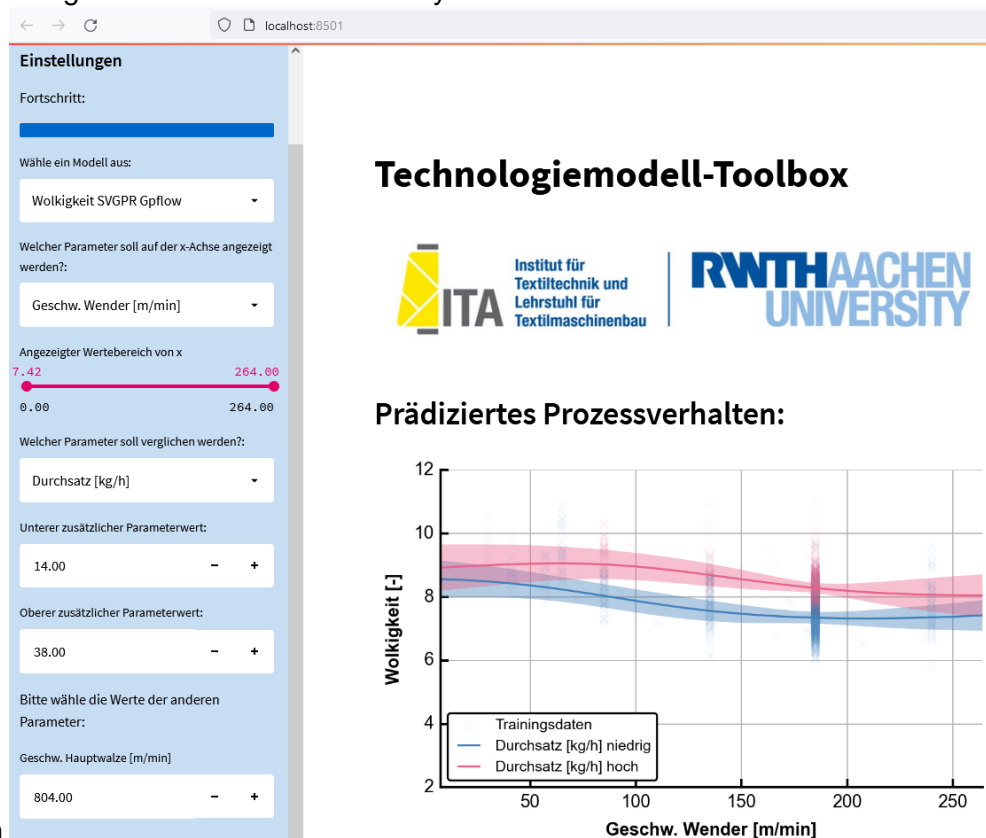


Abbildung 2: Architektur des Wirtschaftlichkeitsberechnungstools

Die Architektur des Tools ist in der Lage, Daten aus der Single Source of Truth zu extrahieren und auf deren Basis die Wirtschaftlichkeit inkl. Sollwerten zu berechnen. Das Werkzeug ist außerdem so ausgelegt, dass es in Zukunft erweitert werden kann.

Die Toolbox zur Anzeige der KI-Modelle wurde in Python mit dem Framework Streamlit erstellt.



Die Toolbox ist in

Abbildung 3 zu sehen.

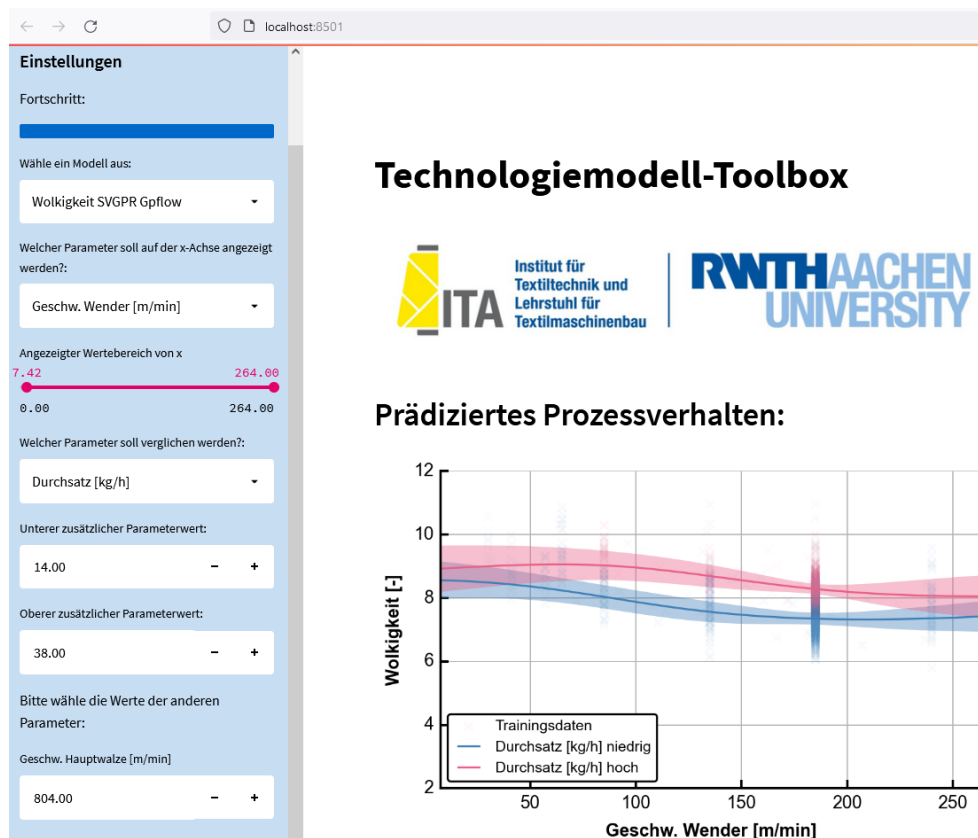


Abbildung 3: Toolbox zur Anzeige der KI-Modelle

Die Grafik zeigt am linken Rand alle verwendeten, relevanten Prozessparameter, die der Benutzer frei wählen kann. Im Diagramm wird daraufhin das prädizierte Prozessverhalten in Abhängigkeit eines frei wählbaren Prozessparameters ausgegeben.

Die Implementierung der automatischen Qualitäts- und Produktionskostensimulation in der Produktion verlief in erfolgreicher Zusammenarbeit mit dem Projektpartner atlan-tec. Die genauere Beschreibung ist in deren Bericht zu finden.

3.5 AP 8 - Validierung der technologischen Grundlagen an Demonstratoranlage

Die Validierung der Entwicklungen geschah unter der Leitung des Projektpartners BNP. Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführten Arbeiten umfassen die Überarbeitung der Kostenfunktion, des Dashboards sowie der automatischen Optimierung. Da die Ergebnisse Teil der anderen Arbeitspakete sind, wird an dieser Stelle nicht im Detail darauf eingegangen. Einige beispielhafte Ergebnisse sind:

- Anpassungen im Dashboard, sodass nicht die absolute, sondern die relative Wirtschaftlichkeit angezeigt wird. So werden keine brisanten Daten offen im Technikum zur Schau gestellt. Außerdem hat der Bediener stets einen Vergleich, ob der Prozess besser oder schlechter als im Durchschnitt läuft.

- Die Modellierungs-Toolbox wurde nicht als hilfreich akzeptiert, da diese im aktuellen Stadium noch zu abstrakt ist, als dass diese sinnvoll in einer Produktionsumgebung eingesetzt werden könnte. Dies bietet arbeitswissenschaftliche Perspektiven für anschließende Forschungsprojekte: Wie kann eine grafische Benutzeroberfläche für ein ML-Modell so gestaltet werden, dass das Personal sinnvolle Informationen in einem angemessenen Format geliefert bekommt?
- Es wurden Pilotversuche mit der automatischen Optimierung von atlan-tec durchgeführt. Das System konnte erfolgreich in die Produktion integriert werden.

3.6 AP 9 - Bewertung und Transfer der Entwicklungen

3.6.1 Verwendung der Zuwendung: Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?

Es wurden insgesamt zehn Veröffentlichungen mit Ergebnissen des Projekts publiziert, darunter vier Vorträge auf Konferenzen, fünf Artikel in Fachmagazinen und eine Veröffentlichung mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung. Eine Auflistung befindet sich in Kapitel 7.

Des Weiteren wurde die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit des Projekts sowie die Anschlussfähigkeit für andere Industrien untersucht. Basierend auf den Analyseergebnissen wurden weitere Maßnahmen außerhalb des Projektes AutoNoM durchgeführt, um die Ergebnisse weiter zu verwerten.

Die Versuche zur Validierung des finalen Assistenzsystems wurden wissenschaftlich begleitet, wobei Daten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufgezeichnet worden sind. Basierend auf den Daten wurde die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Es wurde die Kapitalwertmethode als Basis der Berechnungen gewählt.

3.6.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Maßnahmen

Die Veröffentlichungen auf Konferenzen und Fachmagazinen dienen der Verbreitung der Ergebnisse aus AutoNoM vor einem großen Fachpublikum. Auf diese Weise können die Ergebnisse eine Breitenwirkung erzielen und den Stand der Technik der Industrie wirkungsvoll vorantreiben.

Es ist wichtig, die Ergebnisse des Projekts in Folgeprojekten zu verarbeiten, damit der Transfer der Entwicklungen kontinuierlich fortgeführt werden kann.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist das zentrale Werkzeug, um zu überprüfen, inwiefern die Projektziele erreicht worden sind. Die Ziele gelten erst dann als vollständig erreicht, wenn die definierten Kennzahlen erreicht worden und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems gegeben sind.

3.6.3 Erzieltes Ergebnis

Eine zentrale Schlussfolgerung aus der Bewertung und dem Transfer ist, dass nicht nur die Ergebnisse selbst, sondern auch die gemachten Erfahrungen während des Projektes einen Wert für die Industrie darstellen. Gespräche mit verwandten Projektgremien und unabhängige Studien haben gezeigt, dass die Digitalisierung von Unternehmen inklusive der Einführung von KI ein komplizierter Vorgang mit mehreren zum Erfolg notwendigen Komponenten ist. Viele Projekte bleiben hinter den ursprünglich gesetzten Zielen, dennoch wird die Gesamtentwicklung als überwiegend positiv bewertet. Die zur Umsetzung notwendigen Komponenten sind:

- Eine digitale Unternehmensstrategie, um KI sinnvoll zur Unterstützung einsetzen zu können;
- Agiles Projektmanagement, um die komplexen Entwicklungen mit vielen beteiligten Personen leiten zu können;
- Eine solide Datenbasis sowie die Infrastruktur, um diese erfassen zu können.
- Ein Abgleich, inwieweit das gesetzte Ziel mit den im Unternehmen vorhandenen Voraussetzungen umsetzbar ist.

Das ITA beteiligt sich in dem vom BMBF geförderten Netzwerk „Mittelstand digital Zentrum smarte Kreisläufe“. Im Rahmen des Netzwerks nutzt das ITA die Erfahrungen aus AutoNoM, um KMU bei der Qualifikation, Konzipierung und Umsetzung von Digitalisierungsprojekten zu helfen. Im Rahmen des Vorhabens „Modellfabrik Papier“ werden die Erfahrungen in die Papierindustrie transferiert, um diese bis 2050 klimaneutral zu gestalten.

Die finalen Veröffentlichungen sind in Kapitel 7 aufgeführt. Die Veröffentlichungen haben die Ergebnisse einem Fachpublikum zugänglich gemacht.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden in Kapitel 4 diskutiert.

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit wird in Kapitel 6 sowie in Teil III des Abschlussberichtes diskutiert.

4 Finales Ergebnis und Vergleich mit den vorgegebenen Zielen

Im Folgenden wird die Zielerreichung diskutiert, deren objektive Überprüfung Aufgabe des ITA im Rahmen von AP 9 war. Es wird zunächst die Erreichung der Teilziele diskutiert, um anschließend zu bewerten, ob das Gesamtziel auf technischer sowie auf wirtschaftlicher Seite erreicht worden ist.

4.1 Teilziel automatisierte Modellbildung, Analyse und Visualisierung der Produktions- und Qualitätsdaten mittels Maschinellem Lernverfahren

Dieses Teilziel wurde größtenteils erreicht. Die Modellbildung erfolgte sowohl durch den Projektpartner atlan-tec als auch durch das ITA. Mithilfe der Modelle ist das Prozessverhalten vorhersagbar, was eine Grundlage der Optimierung ist. Die Modelle bilden nicht nur ab, mit welchen Einstellungen das Prozessverhalten signifikant beeinflusst werden kann, sondern geben eine quantitative Abschätzung des Ergebnisses.

Abbildung 4 zeigt solche Zusammenhänge in Form einer Korrelationsgrafik.

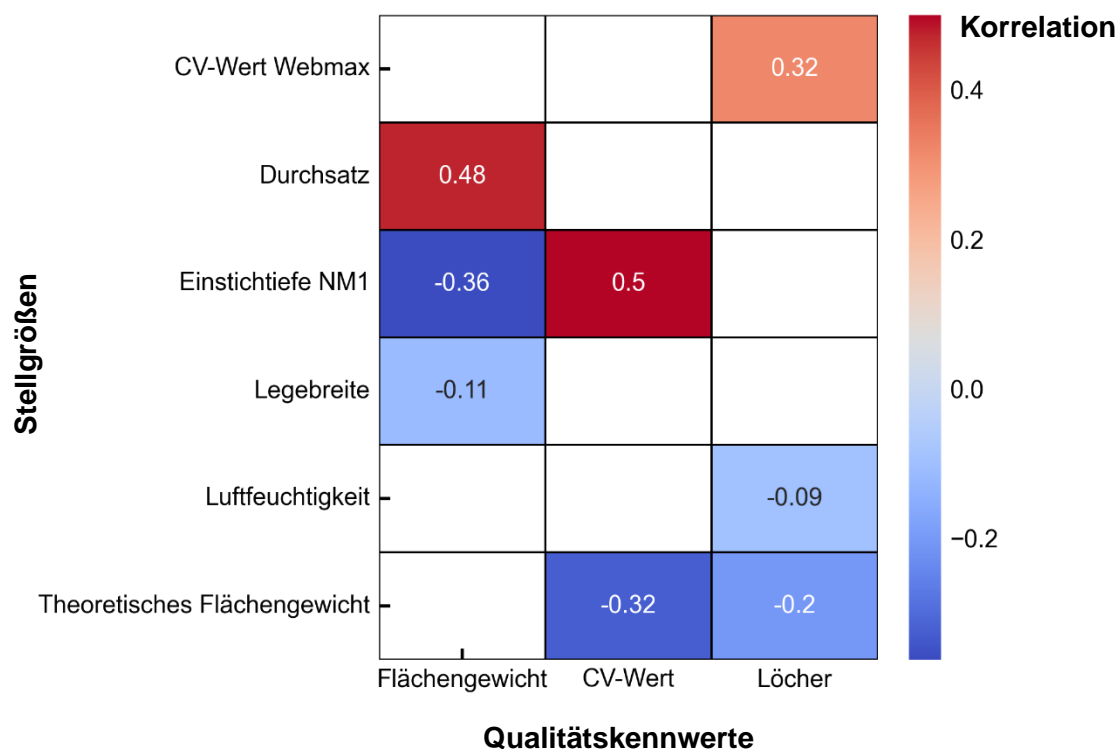


Abbildung 4: Einflussgrößen auf wichtige Prozessparameter in Form einer Korrelationsgrafik. Felder mit einem Koeffizienten $< 0,05$ wurden weiß eingefärbt.

Wie die Abbildung zeigt, gibt es klare Korrelationen zwischen Stellgrößen sowie den wichtigen Qualitätskennwerten am Prozess. Die Ziele Modellbildung und Analyse waren somit erfolgreich und erlauben es dem Unternehmen, ihre eigenen Prozesse mithilfe datenbasierter Ansätze besser zu verstehen und zu kontrollieren.

Die Visualisierung der Daten erfolgte durch den Projektpartner AMV in Zusammenarbeit mit dem ITA. Dank der Visualisierung sind die Prozesse hinsichtlich Qualität und Kosten stets transparent für den Maschinenbediener einsehbar.

Allerdings konnten nicht alle zentralen Qualitätsdaten sensorisch erfasst werden. Zu Beginn des Projekts wurde angenommen, dass das Flächengewicht des Vliesstoffes aus den Grauwerten der Kamera hergeleitet werden kann. Dies stellte sich als Fehlannahme heraus, da zur Umrechnung der Grauwerte in das Flächengewicht eine aufwändige Kalibrierungsfunktion hergeleitet werden muss, was in einer laufenden Produktion nicht praktikabel ist. Es konnte eine allgemeingültige Kalibrierungsfunktion hergeleitet werden, deren Genauigkeit jedoch nicht ausreichend war, da sie ohne zusätzliche Daten systematische Fehler aufweist. Außerdem konnten die Laborwerte nicht in die Datenbank eingepflegt werden, da die Erfassung der manuellen eingetragenen Zeitstempel aufwändiger war als angenommen. Somit sind nicht alle Prozessgrößen für eine Optimierung verfügbar, was in Tabelle 1 zusammengefasst ist.

Tabelle 1: Erfassung wichtiger Prozessgrößen

Kennwert	Ausprägung	Ergebnis
Fasermassenstrom	Freier Parameter	Erfasst und modelliert
Leistungsaufnahme	Zielgröße (modelliert)	Erfasst und modelliert
Anlagenverfügbarkeit	Zielgröße (modelliert)	Erfasst
Flächengewicht (Mittelwert + Streuung)	Zielgröße (modelliert)	Kein geeigneter Sensor
Qualitätskennwerte optisch	Zielgröße (modelliert)	Erfasst und modelliert
Qualitätskennwerte Labor	Zielgröße (modelliert)	Erfassung zu ungenau

4.2 Zusammenführen der heterogenen Datenquellen

Das Zusammenführen der heterogenen Datenquellen war erfolgreich. Details sind den Abschlussberichten der Partner atlan-tec und ProCtec zu entnehmen. Lediglich die Erfassung der Labordaten war nicht erfolgreich, wie im vorigen Abschnitt erläutert.

4.3 Automatisierte Kurierung und Konditionierung der Daten

Die automatisierte Kurierung und Konditionierung der Daten waren erfolgreich. Details sind dem Abschlussberichten des Partners atlan-tec zu entnehmen.

4.4 Wirtschaftlich-technische Gesamtoptimierung der Produktionsanlage

Die Gesamtoptimierung kann auf Basis der vorliegenden Daten nicht vollständig bewertet werden. Das Ziel war es, insgesamt 4 % des verwendeten Fasermaterials während der Produktion einzusparen. Ein zentraler Erfolgsfaktor für die Optimierung ist die Messung des Flächengewichts, dessen Varianz minimiert sowie dessen Mittelwert näher an die Spezifikation gelegt werden sollte. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, war die sensorische Erfassung des Flächengewichts im Produktionsumfeld nicht praktikabel, sodass keine finale Überprüfung der Zielerreichung stattfinden kann. Es gibt positive Indikatoren wie in Abbildung 5 gezeigt, die darauf hinweisen, dass eine Optimierung dennoch vielversprechend ist.

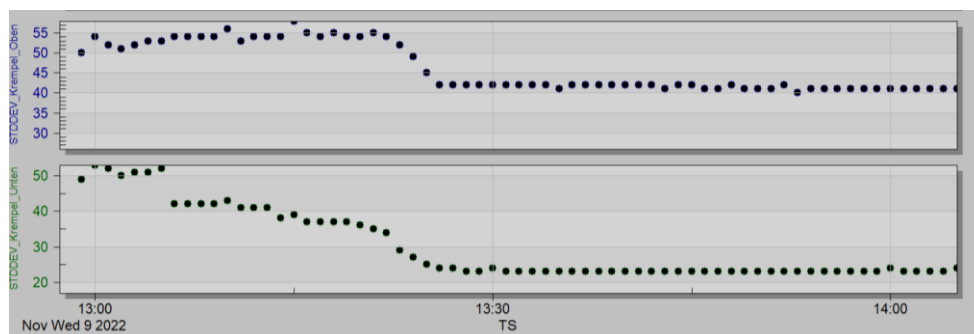


Abbildung 5: Verlauf der Florgleichmäßigkeit ab oberen (oben) und unteren Abnehmer (unten)

In Abbildung 5 ist der Verlauf der Gleichmäßigkeit während des Pilotversuchs gezeigt. Der Versuch begann um 13:00. Bereits nach 30 Minuten, um 13:30, konnte der durch den Partner atlan-tec implementierte Optimierungsalgorithmus die Florgleichmäßigkeit um 23,2 % verbessern.

Die Abbildung zeigt, dass die Florgleichmäßigkeit erhöht, bzw. dessen Varianz minimiert werden konnte. Diese Optimierung erlaubt es, das Flächengewicht näher an die Toleranzgrenze zu legen, da es theoretisch eine geringere Streuung aufweist. Aufgrund der fehlenden Messbarkeit des Florgewichts kann die Effektivität dieser Maßnahme nicht bewertet werden. Die Bewertung könnte mithilfe manueller Methoden stattfinden, in dem das Flächengewicht im Labor bestimmt wird. Für diese Maßnahmen war jedoch zum Ende des Projekts keine Zeit mehr vorhanden, sodass die finale Effektivität aufgrund mangelhafter Datenlage nicht bewertet werden kann.

Die technischen Voraussetzungen zur Fasereinsparung und zur Ermittlung der Menge der Fasereinsparung wurden jedoch geschaffen, da Sensoren für die Echtzeit-Messung des Flächengewichts frei auf dem Markt verfügbar sind.

Da die finale Einsparung des Flächengewichts unbekannt war, wurde die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit der Einsparung als Variable durchgeführt. Dies bedeutet, dass die minimale Einsparung berechnet wurde, mit der eine Investition in die entwickelte Technologie lohnend ist. Zur Bewertung wurde die Kapitalwertmethode ausgewählt, die eine

initiale Investition gegen mit einem Kalkulationszinssatz diskontierte, in Zukunft zu erwartende Zahlungsströme aufrechnet. Es wurde mit den folgenden Werten gerechnet:

- Hardwarekosten Neuimplementierung: 132.000 €
- Personalkosten Neuimplementierung: 17.826 €
- Laufzeit: 24 Monate

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 6 gezeigt.

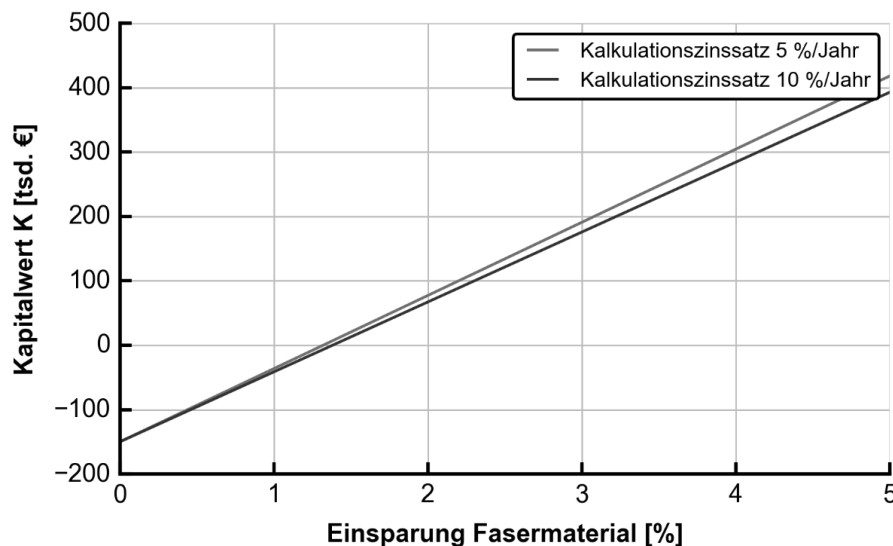


Abbildung 6: Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit der Kapitalwertmethode

Die Abbildung zeigt, dass der Kapitalwert bereits bei einer erwarteten Einsparung von unter 1,5 % positiv ist. Die Investition ist also selbst dann wirtschaftlich, wenn die ursprünglichen 4 % nicht erreicht werden.

Trotz der nicht gemessenen Wirtschaftlichkeit hebt der Anwendungspartner BNP die positiven Effekte der Entwicklung hervor und bewertet diese insgesamt als gelungen. Zu den positiven Effekten gehören eine verbesserte Transparenz und Protokollierung der Prozesse, wodurch Entscheidungsträger im Unternehmen stets mit für sie relevanten Informationen versorgt werden. Außerdem konnte die Gleichmäßigkeit des Krempelflors durch die Optimierung verbessert werden. Insgesamt bieten die Entwicklungen also einen großen Mehrwert für den Anwendungspartner.

Insgesamt ist die Zielerreichung des Projekts positiv zu bewerten. Sämtliche Teilziele wurden entweder erreicht oder es wurden stellvertretende Indikatoren mit positivem Effekt auf die Prozessführung beobachtet. Die Wirtschaftlichkeit ist selbst bei einer partiellen Einhaltung der gesetzten Ziele gegeben. Die finale Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit konnte zwar aufgrund zeitlicher Beschränkungen sowie mangelhafter Datenbasis nicht bewertet werden, jedoch wurden Indikatoren aufgezeigt, die eine zuversichtliche Einschätzung erlauben.

5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (>10.000 €) eingegangen.

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises ist die Beschaffung des Simulationsrechners. Der Simulationsrechner musste angeschafft werden, weil maschinelles Lernen leistungsfähige Rechenhardware voraussetzt. Alle Entwicklungen des ITA konnten nur mithilfe des angeschafften Simulationsrechners implementiert werden. Im Folgenden befindet sich eine tabellarische Auflistung der Beschaffungen:

Name	Datum	Lieferant	Position	Betrag
Simulationsrechner	27.02.2020	Alsterarbeit	F0850	12.256,22 €
Monitor für am Programmierung Simulationsrechner	03.05.2021	Office Partner GmbH	F0843	439,90 €

6 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse aus AutoNoM wird von allen Projektpartnern als hoch eingestuft. Im Folgenden wird auf die Perspektive des ITA eingegangen.

Die Arbeit an AutoNoM hat aufgezeigt, dass bei Digitalisierungsprojekten immer auch auf die speziellen Anforderungen der betreffenden Industrie eingegangen werden muss. Richtlinien zur Einführung von KI in der Industrie wie die VDI 3417 gehen etwa davon aus, dass alle physikalischen Prozessgrößen (z. B. Drücke, Temperaturen etc.) einfach messbar sind. Dies ist in der Textiltechnik nicht der Fall. Dank AutoNoM können wir die Anforderungen der Textilindustrie hinsichtlich der Verwendung automatisierten maschinellen Lernens nun deutlich präziser formulieren und können in weiteren Projekten darauf eingehen. Durch die Erfahrungen aus diesem Projekt konnte die Einstiegsschwelle für Unternehmen aus der Textilindustrie in die Verwendung von KI herabsetzen. AutoNoM dient hierbei als Referenzprojekt. Insbesondere die bessere Planbarkeit durch Erfahrungswissen ermöglicht es Dritten, eine schnelle und günstige Implementierung bei Textilunternehmen durchzuführen. Das ITA unterstützt die Digitalisierung der Textilindustrie im Rahmen des Mittelstand digital Kompetenzzentrums smarte Kreisläufe, in dem es Qualifikationsmaßnahmen, Konzeptionierungen und Umsetzungsprojekte anbietet. Bei diesem Vorhaben greift das ITA wesentlich auf die Ergebnisse dieses Projekts zurück.

Ein weiterer Ausblick ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bahnenwaren, wie z.B. Textile Flächen, Papier, Glas, Folien. Die Übertragbarkeit auf andere Bahnenwaren innerhalb der Textilindustrie (wie z. B. Gewebe) ist gegeben, sodass die Erfahrungen aus AutoNoM in anderen Projekten des ITA verwendet werden. Das ITA hat im Rahmen des Mittelstand digital Zentrums bereits ein Projekt mit einem Hersteller chemisch verfestigter Vliesstoffe umgesetzt, sodass auch die Übertragbarkeit auf andere Vliesstoffarten gegeben ist. Insbesondere die Übertragbarkeit auf die Papierindustrie ist aufgrund der Ähnlichkeit der Prozesse sehr vielversprechend: Bei beiden Prozessen handelt es sich um stationäre Fließprozesse und bei beiden werden Fasern als Ausgangsmaterial zu einem Flor zusammengeführt. Die entwickelte Optimierungsmethode zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit, die Sensorik für die Erfassung relevanter Zielgrößen und die Visualisierung durch von Dashboards können grundsätzlich nach einigen Anpassungen auch auf die Papierindustrie übertragen werden. Die Papierherstellung ist wegen dem notwendigen Trocknungsvorgang ein energieintensiver Prozess, weshalb Einsparungen beim Energieverbrauch als primäres Ziel zu sehen sind. Die Prädiktion des Energieverbrauchs ist bei AutoNoM gelungen, sodass die Voraussetzungen vielversprechend sind. Das ITA ist Teil des Konsortiums „Modellfabrik Papier“, das sich eine CO₂-neutrale Papierproduktion bis 2050 zum Ziel gesetzt hat.

7 Erfolgte Veröffentlichungen

Im Folgenden sind die im Rahmen von AutoNoM erfolgten Veröffentlichungen tabellarisch aufgelistet:

Datum	Name des Herausgebers	Typ	Ggfs. Titel
6/21	ADDITC 2021	Poster auf Konferenz	Projektvorstellung AutoNoM
9/21	EUTT 5 th European Industry and Research Exchange	Vortrag auf Konferenz	AI-driven optimization of the nonwoven production
10/21	Texdata magazine	Fachartikel	Nonwovens and Artificial Intelligence: An Optimal Combination?
11/21	Unitex Magazine	Fachartikel	Nonwovens and Artificial Intelligence: A perfect match?
02/22	Elsevier Advances in Industrial and Manufacturing Engineering	Beitrag zu Journal mit wiss. Qualitätssicherung	Interpretable failure risk assessment for continuous production processes based on association rule mining
5/22	EDANA Nonwovens Innovation Academy	Vortrag auf Konferenz	Machine Learning (ML) for nonwovens production
5/22	Nonwovens Trends	Fachartikel	Digitalisation for the nonwovens industry
9/22	Textil Plus	Fachartikel	Digitalisierung für KMU der Vliesstoffbranche
11/22	Melliand international	Fachartikel	Data-driven Quality Management
12/22	ADDITC 2022	Vortrag auf Konferenz	Standardized and methodological introduction of Machine Learning to the textile industry