



Schlussbericht vom 31.05.2025

zu IGF-Vorhaben Nr. 22729 BR

Thema

Multidimensionale Nadelfehlererkennung und Modellierung (MuNaMo)

Berichtszeitraum

01.03.2023–28.02.2025

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Textil e.V.

Forschungseinrichtungen

FS 1: Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)

FS 2: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 22729 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e. V., Reinhardtstraße 14-16, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wir danken allen Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für die freundliche, engagierte Zusammenarbeit, die fachliche Unterstützung, die Bereitstellung von Materialien und Maschinenkapazitäten sowie für die rege Diskussionsbereitschaft:

- AMITRONICS GmbH, München
- Groz-Beckert KG, Albstadt
- HERO-Textil AG, Crailsheim
- HK Textil GmbH, Schnabelwaid
- IDS Innomic Schwingungsmesstechnik GmbH, Salzwedel
- Karl Mayer Stoll R&D GmbH, Reutlingen
- KARL MAYER Technische Textilien GmbH, Chemnitz
- MANN+HUMMEL GmbH, Ludwigsburg
- Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., Radebeul
- N+P Informationssysteme GmbH, Meerane
- Roth Maschenstoffe GmbH, Winterlingen
- Röcker+Köhler GmbH & Co. KG, Ofterdingen
- Strumpfwerk Lindner GmbH, Hohenstein-Ernstthal
- Terrot GmbH, Chemnitz
- pinkert-machines UG & Co. KG, Hohenstein-Ernstthal
- thoenes Dichtungstechnik GmbH, Klipphausen
- Bauerfeind AG, Zeulenroda-Triebes

Der Schlussbericht kann beim Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. ausgeliehen werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.....	1
1.1 Definition einer Demonstrator-Anwendung.....	1
1.2 Nadelfehlererkennung auf Basis von Körperschalldaten.....	3
1.3 Prozessüberwachung auf Basis maschineninterner Daten.....	7
1.4 Erweiterte Datengenerierung und Intensivierung der Auswertungen.....	11
1.4.1 Versuche zur Erkennung des Schmierzustandes.....	11
1.4.2 Überwachung des Maschinenzustandes mit Beschleunigungssensorik.....	13
1.4.3 Versuche zur Erkennung von Nadelfehlern.....	16
1.5 Verifikationsversuche.....	17
1.5.1 Prozessüberwachung auf Basis von AE-Sensorik.....	17
1.5.2 Verifikation zur Überwachung des Maschinenzustandes.....	19
1.5.3 Zusammenfassung und Ausblick.....	21
1.6 Transfer.....	22
2 Verwendung der Zuwendung.....	22
2.1 Forschungsstelle 1 (STFI).....	22
2.1.1 Wissenschaftlich-technisches Personal.....	22
2.1.2 Geräte.....	22
2.1.3 Leistungen Dritter.....	22
2.2 Forschungsstelle 2 (IWU).....	23
2.2.1 Wissenschaftlich-technisches Personal.....	23
2.2.2 Geräte.....	23
2.2.3 Leistungen Dritter.....	23
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	23
4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	23
5 Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	24
6 Durchgeführte Transfermaßnahmen.....	25
7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	26
8 Literaturverzeichnis.....	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umfrageergebnis Entwicklung der Qualifikation von technischen Mitarbeitern.....	1
Abbildung 2: Umfrageergebnis häufigste Nadelfehler und resultierende Fehlerbilder.....	2
Abbildung 3: Konstruktionszeichnung der Zylinderschloss-Halterung eines AE-Sensors.....	4
Abbildung 4: Installierter AE-Sensor an einem Zylinderschloss.....	4
Abbildung 5: Setup der Highspeedkamera.....	5
Abbildung 6: Bildanalytische Nadelklassifikation.....	5
Abbildung 7: Visuell und akustisch detektierte Nadelfehler synchronisiert.....	6
Abbildung 8: Körperschallsignale einer Zylindernadel mit verbogener Zunge sowie abbrechendem Nadelkopf im Zeitverlauf.....	6
Abbildung 9: Änderung des Körperschalleintrags der Rippnadeln (unten) gegenüber der Zylindernadeln (oben) bei erhöhtem Warenabzug.....	7
Abbildung 10: Schnittstelle zwischen Maschinensteuerung (RS485) und PC (USB-A).....	8
Abbildung 11: Abhängigkeit der Spannung (Out-voltage) von der Drehzahl (Rotation-speed).....	9
Abbildung 12: Abhängigkeit des Motorstroms (Out-current) von der Fadenspannung. Versuch 1+2 mit aktivem Fadeneinlauf, Versuch 3+4 mit passivem Fadeneinlauf.....	10
Abbildung 13: Kein Einfluss von Fadenspannung und Warenabzug auf Motorstrom (Out-current).....	10
Abbildung 14: Einfluss des Schmierzustandes auf Motorstromdaten.....	11
Abbildung 15: Gemittelte Spektren an der Ripscheibe zur Untersuchung des Einflusses der Öl-Schmierung....	12
Abbildung 16: Metriken der Machine Learning Modelle zur Klassifizierung des Schmierzustandes.....	13
Abbildung 17: Durchschnittliche Beschleunigung mit und ohne Schmierung.....	14
Abbildung 18: Exemplarische Zeitreihe der Beschleunigungen mit und ohne Beölung.....	14
Abbildung 19: Auswertung der Energieintensitäten der Beschleunigungen für Versuche mit und ohne Öl.....	15
Abbildung 20: Beispielhafte Auswertung des RMS-Wertes der Beschleunigungen.....	16
Abbildung 21: Vergleich ausgewählter Features zur Detektion von Nadelfehlern im Zylinder bei 5 rpm.....	17
Abbildung 22: Einfluss des Drehzahlanstiegs bei der akustischen Nadelfehlererkennung.....	18
Abbildung 23: Rundstrickmaschine Harry Lucas.....	19
Abbildung 24: Vergleich der Schwingungen für alte und neue Harry-Lucas-Maschine.....	20
Abbildung 25: Einfluss der Schmierung auf Schwingungen an Harry-Lucas-Maschinen.....	20
Abbildung 26: Vermehrte Ausschläge für neuen Nadelsatz an neuer Maschine.....	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsplan für ausgewählte Prozessparameter und Fehlerszenarien.....	3
Tabelle 2: Einsatz der Mitarbeiter je Kalenderjahr für Forschungsstelle 1.....	22
Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen.....	25
Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen.....	26

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Definition einer Demonstrator-Anwendung

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Definition einer Demonstrator-Anwendung“ wurden die fundamentalen Parameter und Rahmenbedingungen festgelegt. Dieses Arbeitspaket bildete die Grundlage für die Untersuchungen des Rundstrickprozesses.

Auswahl der Demonstrator-Maschine und Beispielanwendung

Gemeinsam mit den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses wurden Diskussionen zur Identifikation einer geeigneten Demonstrator-Maschine, der Gestrickbindung und des einzusetzenden Fadenmaterials geführt. Nach einer sorgfältigen Auswahl wurde die Rundstrickmaschine RH 216-I von Terrot, welche am STFI verfügbar ist, als Demonstrator-Maschine ausgewählt. Diese Wahl bot signifikante Vorteile, da sich das STFI in unmittelbarer Nähe zum Maschinenhersteller befindet, was kurze Wege für Modifikationen und eine enge Zusammenarbeit ermöglichte. Zudem ist der Maschinenhersteller Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses, was eine optimale Abstimmung und Feedback-Schleife sicherstellte. Um eine zu große Variation in den Einstellungen und den zu erwartenden Versuchsergebnissen zu vermeiden, wurde festgelegt, die Strickmaschine für alle Versuche auf Interlock-Bindung einzustellen. Als Fadenmaterial für die Strickversuche wurde Baumwollgarn Nm 60/1 verwendet.

Parallel dazu wurden unter aktiver Einbeziehung des projektbegleitenden Ausschusses für den Rundstrickprozess praxisrelevante Parameter definiert. Als Ergebnis wurden die zu fokussierenden Maschineneinstellgrößen Drehzahl, Schmierzustand, Warenabzug, Fadeneinzug und Fadenspannung identifiziert.

Definition relevanter Prozess- und Maschinenparameter

Grundlage der Identifikation relevanter Prozess- und Maschinenparameter sowie Fehlerzustände sind die industriell akuten Problemstellungen. Diese wurden in umfangreichen Diskussionen mit dem projektbegleitenden Ausschuss erörtert. Zudem wurde die Durchführung einer Online-Umfrage empfohlen. Nur so kann ein möglichst umfassendes Bild der industriellen Problemstellungen entwickelt werden. Entsprechend wurde eine Online-Umfrage zum Thema Gestrickfehler konzipiert, durchgeführt und ausgewertet. Die Befragung, die im Zeitraum von August bis Oktober 2023 stattfand, umfasste die Themenbereiche Nadelfehler, Fadenqualität, typische Gestrickfehler, Fehlerüberwachungssysteme, Schmiermittelzufuhr, Produktwechsel und Mitarbeiterqualifikation.

Die Umfrage lieferte mit insgesamt 23 Antworten (davon 8 vollständig und 6 teilweise ausgefüllt) wertvolle Erkenntnisse für das Projekt. Wie Abbildung 2 zu entnehmen, wurden als häufigste Nadelfehler gebrochene Nadelköpfe, schwergängige oder verbogene Zungen sowie gebrochene Nadelfüße identifiziert, die typischerweise zu Laufmaschen und Streifen im Ge-

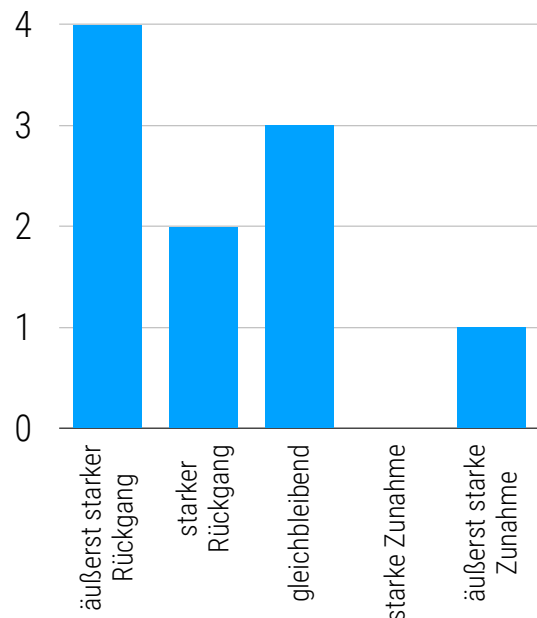


Abbildung 1: Umfrageergebnis Entwicklung der Qualifikation von technischen Mitarbeitern

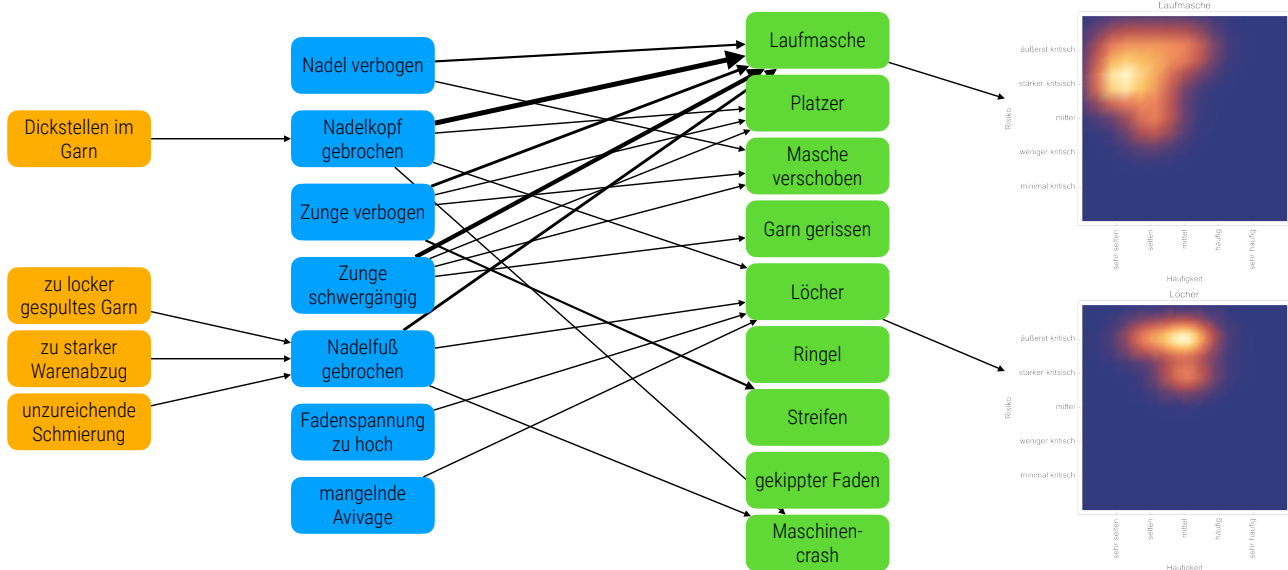


Abbildung 2: Umfrageergebnis häufigste Nadelfehler und resultierende Fehlerbilder

strick führen. Zudem wurde festgestellt, dass die Fadenqualität einen erheblichen Einfluss auf die Gestrickqualität hat und in den letzten Jahren tendenziell abgenommen hat. Die Schmiermittelzufuhr wird in der Praxis zum Teil starr gemäß Herstellervorgaben eingestellt, aber teilweise von einigen Firmen auch auf ein minimales Maß reduziert, um Kosten für die Anschaffung und Entsorgung des Öls sowie die Reinigung des Gestricks zu sparen. Eine wichtige Erkenntnis war zudem, dass ein deutlicher Rückgang der Mitarbeiterqualifikation zu verzeichnen ist (Abbildung 1).

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden konkrete Fehlerszenarien definiert und ein Versuchsraum abgeleitet, welcher Einstellbereiche für Fadeneinlauf, Warenabzug, Drehzahl und Schmierung sowie Fehlerszenarien, wie provozierte Nadelkopfbrüche oder verbogene Nadelzungen, beinhaltet.

Definition von Leistungskennzahlen und Referenzdatenaufnahme

Um die Effektivität des zu entwickelnden Assistenzsystems quantifizieren zu können, wurden in Diskussionen spezifische Leistungskennzahlen (KPIs) erarbeitet. Diese KPIs bilden die Grundlage für die Bewertung der multimodalen Prozessüberwachung und wurden in zwei Hauptkategorien unterteilt:

1. KPIs bezüglich der Prozessüberwachung auf Basis körperschallbasierter und visueller Daten,
2. KPIs bezüglich der Prozessüberwachung auf Basis maschineninterner Daten.

Als wichtige KPIs wurden im Bereich der Prozessüberwachung auf Basis körperschallbasierter Daten neben der Genauigkeit (engl. Accuracy) der Prognose von Nadelfehlerzuständen auch die Robustheit gegenüber veränderten Umgebungsbedingungen bzw. anderer Maschineneinstellungen festgelegt, sowie der Investitionsaufwand für ein derartiges System (d.h. Kosten für Sensoren, Vorverarbeitung und Auswertung der Signale).

Im Bereich der maschineninternen Daten stellte sich heraus, dass die Präzision (engl. Precision) der Vorhersage des Schmierzustandes (d.h. Anteil der korrekt vorhergesagten Zustände im Verhältnis zu allen Vorhersagen) in diesem Fall besonders wichtig ist, da für ein derartiges System Fehlalarme und fehlendes Vertrauen in das Überwachungssystem als hinderlich für eine breite Nutzung des Systems angesehen werden. Ebenso stellt die Robustheit gegenüber veränderten Umgebungsbedingungen bzw. anderen Maschineneinstellungen in diesem

Fall ein wichtiges KPI dar. Neben der Vorhersage des Schmierzustandes ist auch die Prognosefähigkeit hinsichtlich Verschleiß von Maschinenkomponenten ein wichtiger KPI für die Analyse maschineninterner Daten.

Diese differenzierte Betrachtung ermöglichte eine präzise Evaluation der verschiedenen Datenquellen und deren Beitrag zur Detektion der definierten Fehlerbilder. Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes definierten Parameter, Fehlerszenarien und Leistungskennzahlen bildeten die Grundlage für die nachfolgenden Projektphasen.

1.2 Nadelfehlererkennung auf Basis von Körperschalldaten

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Prozessmodellierung und Nadelfehlererkennung auf Basis von Körperschalldaten“ wurden systematische Ansätze entwickelt, um Nadelfehler in Rundstrickmaschinen durch die Kombination von akustischen Emissionsdaten (AE) und visueller Highspeed-Überwachung zu erkennen. Die Arbeiten bauten direkt auf den Ergebnissen des vorangegangenen Arbeitspakets zur Demonstrator-Definition auf und zielten darauf ab, ein robustes Modell für die vorausschauende Fehlererkennung zu etablieren.

Erarbeitung der Messstrategie und Versuchsplanung

Zunächst wurde ein detaillierter Versuchsplan entwickelt, der die im vorherigen Arbeitspaket definierten Parameter und Einflussgrößen (Versuchsraum) berücksichtigte. Die in Tabelle 1 aufgeführten Versuche und Fehlerszenarien wurden durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsplan für ausgewählte Prozessparameter und Fehlerszenarien

Szenario	Durchführung
Fadeneinlauf zu locker, normal, straff	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einstellung passiv → 17,99 m/min 2. Einstellung aktiv → 20,32 m/min
Warenabzug zu locker, normal, straff	<ol style="list-style-type: none"> 1. Warenabzug normal (20 %) → 1 % 2. Warenabzug normal (20 %) → 80 %
Provokation von Nadelfehlern (Kopf, Zunge)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zunge einer Zylindernadel manuell verbogen 2. Zunge einer Rippnadel manuell verbogen
Schmiermittelzufuhr zu gering (unterbrochen)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Maschinenlauf mit korrekter Schmiermittelzufuhr 2. Maschinenlauf mit unterbrochener Schmiermittelzufuhr
Veränderung der Drehzahl bei laufender Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Drehzahl von 5 rpm auf 30 rpm anheben

Teil der Messstrategie war ebenfalls, geeignete Sensoren für die Körperschallaufnahme auszuwählen (AE-Sensoren VS45-H der Firma Vallen und ¼-Zoll-Mikrofon der Firma Microtech Gefell) und in die Demonstrator-Maschine RH 216-I zu integrieren. Für die Aufnahme von Körperschalldaten wurden zwei konzeptionelle Varianten für die Sensoraufnahme entwickelt: eine Rippschlossmontage und eine Zylindermontage. Beide Varianten wurden so gestaltet, dass die AE-Sensoren mit dem Maschinenkörper optimal akustisch gekoppelt sind, ohne die Struktur der Rundstrickmaschine zu modifizieren. Dazu wurden spezielle Federsysteme eingesetzt, die den Sensor gleichmäßig und sicher fixieren, Gegenpresskräfte ausgleichen und akustische Dämpfung minimieren. Abbildungen 3 und 4 zeigen exemplarisch Konstruktion und Installation des Sensors an einem Zylinderschloss.

Parallel dazu wurde ein Hard- und Software-Setup für die visuelle Highspeed-Überwachung implementiert. Diese Überwachung diente der Unterstützung der Auswertung und Synchronisation von Körperschalldaten und ma-

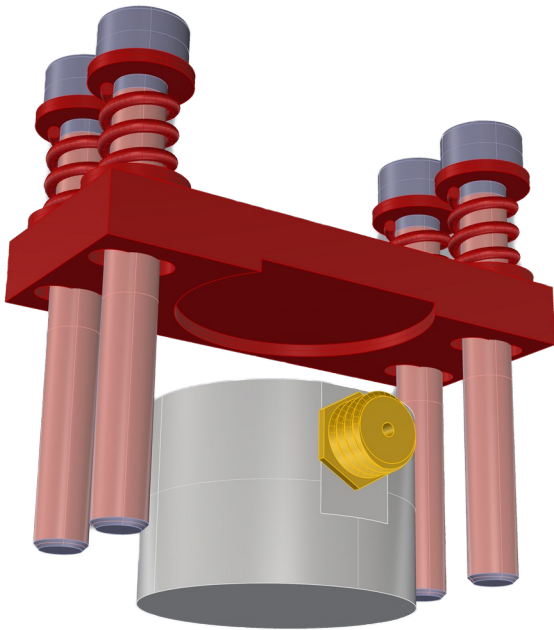


Abbildung 3: Konstruktionszeichnung der Zylinderschloss-Halterung eines AE-Sensors

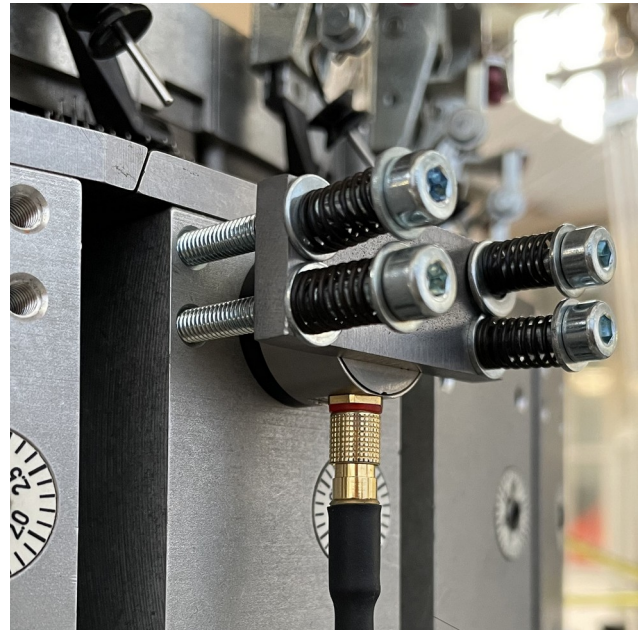


Abbildung 4: Installierter AE-Sensor an einem Zylinderschloss

schineninternen Daten. Die Region-of-Interest (ROI) der Kamera wurde so eingestellt, dass sie die Nadeln von dem Schloss beobachtet, an welchem auch der AE-Sensor befestigt war. Somit konnten die Zeitstempel fehlerhaft detektierter Nadeln mit dem Zeitstempel der Körperschalldaten abgeglichen und für ein Labeling verwendet werden. Für die Kamerainstallation waren die sorgfältige Auswahl der ROI und die Optimierung von Beleuchtung, Blendenöffnung sowie Übertragungsmodus durchzuführen, um eine maximale Framerate von 780 fps zu erreichen.

Experimentelle Datenaufnahme und Vorversuche

Mit der finalen Einrichtung des Datenerfassungs-Setups wurden Vorversuche durchgeführt, um die Anforderungen an die Datenqualität zu prüfen. Dabei wurden zunächst Bleistiftminenbruchtests durchgeführt sowie ausgewählte Fehlerszenarien wie Nadelbrüche getestet. Die Ergebnisse dieser Vorversuche dienten als Grundlage für die Anpassung der Messstrategie und stellten sicher, dass die erfassten Daten für das Training von KI-Algorithmen geeignet sind.

Parametervariation und Versuchsdurchführung

Im nächsten Schritt wurde der definierte statistische Versuchsplan systematisch umgesetzt. Dabei wurden verschiedene Fehlerszenarien, wie z. B. provozierte Nadelkopfbrüche oder verbogene Zungen, unter kontrollierten Bedingungen simuliert. Die Versuche wurden vollständig dokumentiert, und Auffälligkeiten in den Maschinenzuständen wurden protokolliert. Als Ergebnis stand eine umfassende Datensammlung zur Verfügung, die Rohdaten in hoher Qualität enthielt und eindeutig zu den durchgeführten Versuchsszenarien zugeordnet war.

Datenauswertung und Integration von KI-Methoden visueller Daten

Die Rohbilddaten der in Abbildung 5 dargestellten Highspeedkamera wurden mit einer Framerate von 780 fps aufgenommen. Durch Überführung der Einzelbilder in Filmsequenzen und Reduzierung der Framerate auf flüssig wahrnehmbare 25 fps konnte eine visuelle Analyse erleichtert werden. Ergänzend wurde ein Timer integriert, um die Zeitstempel der Echtzeit abzulesen, was für die Datensynchronisation erforderlich war. Aus einer Versuchsdauer von 127 s resultierte eine Filmdauer von 1:06:02 h. Insgesamt wurden mehr als 1,1 Mio. Bilder aufgenommen.

Um fehlerhafte Nadeln (z. B. abgebrochener Nadelkopf) in der Vielzahl der Bilder zu detektieren, wurden zwei Ansätze verfolgt:

1. Bildklassifikation mittels Machine Learning

Bei der Bildklassifikation mittels Machine Learning erfolgte das Ausschneiden des zu betrachtenden Bildbereichs, die manuelle Manipulation einzelner Bilder zur Simulation von Nadelbrüchen und das Training eines Machine-Learning-Modells mittels des Apple-Frameworks „Create ML“. Das Modell wurde mit 530 Bildern von intakten Nadeln und 70 Bildern von gebrochenen Nadeln trainiert, wobei das Training nur wenige Sekunden dauerte. Eine entwickelte CLI-Anwendung in der Programmiersprache „Swift“ ermöglichte die Anwendung des neuronalen Netzes auf alle Einzelbilder, wobei bei einem 120-sekündigen Versuch (ca. 100.000 Bilder) etwa 15 Minuten für die Klassifikation benötigt wurden (ca. 8 ms/image).

2. Bildklassifikation mittels Bildanalyse

Bei der Bildklassifikation mittels Bildanalyse wurde nach dem Ausschneiden des zu betrachtenden Bildbereichs (Abbildung 6) die Gesamtheit einer definierten Region 1 (Nadeln im Sichtfeld?) und einer definierten Region 2 (Nadelkopf vorhanden?) ermittelt. Die Entscheidung, ob eine Nadeln intakt ist oder nicht, wurde anhand eines definierten Grenzwerts getroffen. Bei einem 120-sekündigen Versuch (ca. 100.000 Bilder) dauerte die Klassifikation aller Bilder etwa 7 Sekunden (ca. 0,07 ms/image).

Ein Vergleich der beiden Ansätze zeigte, dass die bildanalysebasierte Variante aufwendiger in der Vorbereitung, jedoch durch Anpassung an eine hoch spezialisierte Situation ca. 115-mal schneller ist. Ein exemplarischer Versuch zeigte, dass alle akustisch detektierten Anomalien mit den visuell erkannten Nadelfehlern in Übereinstimmung gebracht werden konnten (Abbildung 7). Ergänzend wurden Konzepte entwickelt, um die Drehzahl und den Warenabzug mit der AE-Grundsignatur zu verknüpfen, um Zusammenhänge zwischen Maschinenparametern und akustischen Signalen zu quantifizieren.

Auswertung von Körperschalldaten

Im Rahmen der Auswertung von Körperschalldaten wurde das Potential akustischer Emissionen (AE, *Acoustic Emission*) systematisch untersucht, um kritische Maschinenzustände in Rundstrickprozessen frühzeitig zu erkennen. Der Ansatz ergänzt die Auswertung

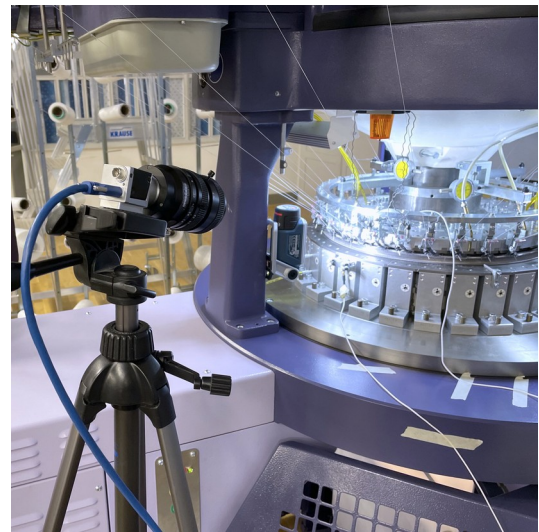


Abbildung 5: Setup der Highspeedkamera

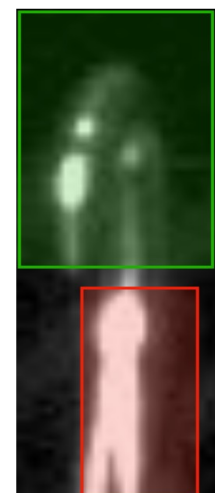


Abbildung 6: Bildanalytische Nadelklassifikation

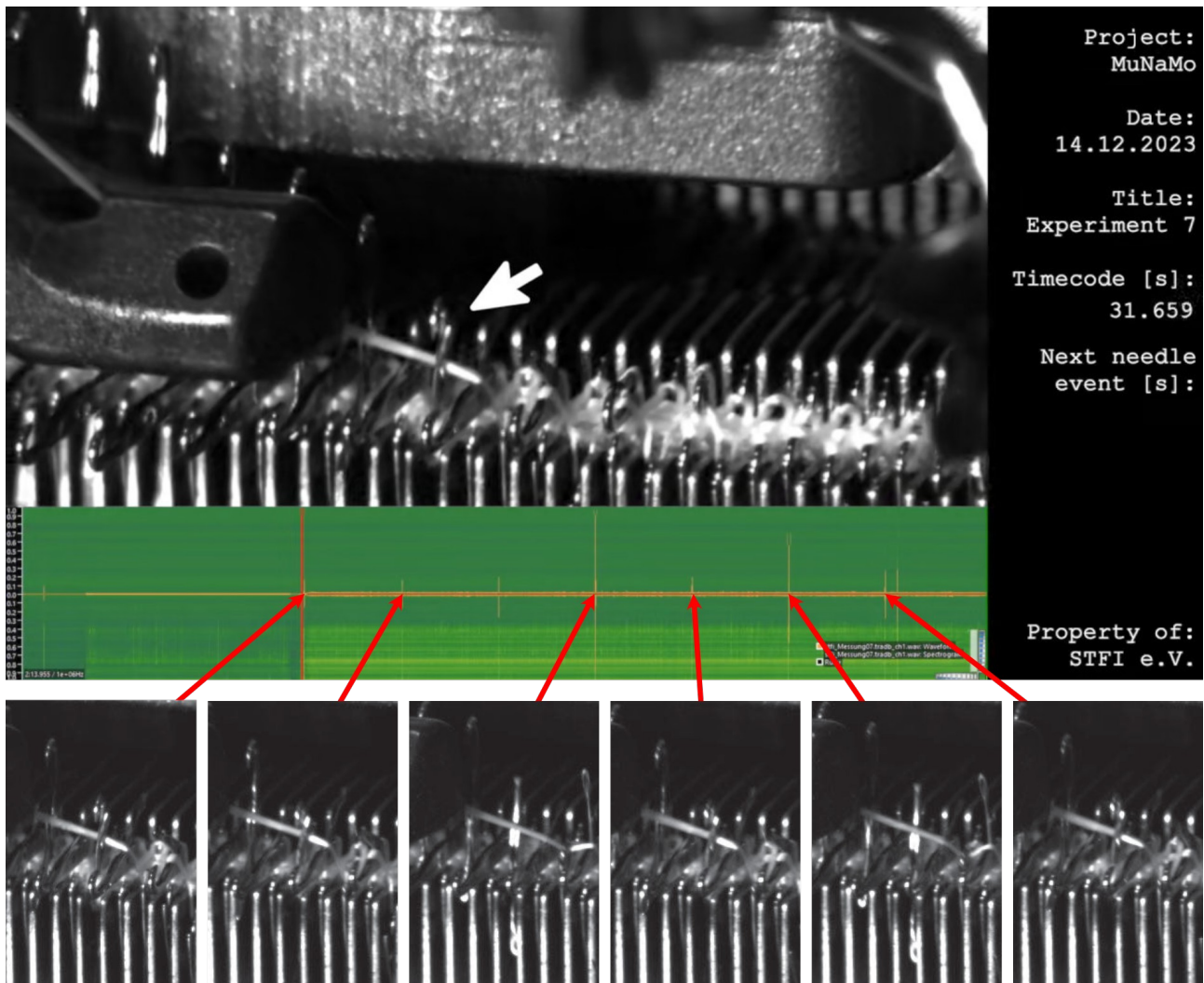


Abbildung 7: Visuell und akustisch detektierte Nadelfehler synchronisiert

maschineninterner Daten durch die Analyse strukturgebundener Schallwellen. Ziel war es, fehlerhafte Zustände wie verbogene oder gebrochene Stricknadeln sowie reduzierte Ölversorgung zu detektieren, um Produktionsausfälle und Qualitätsmängel zu minimieren.

Die Ergebnisse zeigten, dass das AE-Verfahren grundsätzlich geeignet ist, den Rundstrickprozess zu überwachen. Insbesondere wurde nachgewiesen, dass verbogene Zylindernadeln und Nadelbrüche durch die Analyse von Körperschallmustern eindeutig identifiziert werden (Abbildung 8). Die Detektion basierte dabei auf spezifischen Schallmustern, die durch mechanische Verformungen oder Bruchprozesse entstehen. Die Veränderung des Warenabzugs wirkt sich offenbar auf die Rippnadeln besonders aus, was an einem erhöhten Schallpegel gegenüber einer normalen Warenabzugseinstellung zu erkennen war (Abbildung 9). Ein Limitationsfaktor erwies sich jedoch bei der Erkennung verbogener Nadeln in

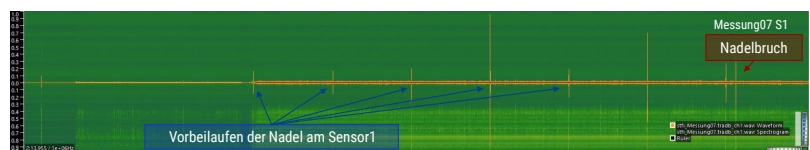


Abbildung 8: Körperschallsignale einer Zylindernadel mit verbogener Zunge sowie abbrechendem Nadelkopf im Zeitverlauf

der Rippscheibe. Die bisherigen Messungen zeigten, dass die Schallwellen in diesem Bereich nicht ausreichend aufgelöst werden konnten.

Ein weiterer Fokus lag auf der Untersuchung, eine reduzierte Ölzufuhr mittels Schallmusteränderungen zu erkennen. Die Ergebnisse zeigten, dass in den durchgeführten Tests keine signifikanten Auswirkungen auf die AE-Daten beobachtet wurden. Dies lag vermutlich daran, dass die Produktionszeiten nicht ausreichend lang waren, und der Ölfilm bei den sich bewegenden Teilen auch einige Zeit nach Reduktion der Ölzufuhr noch weitreichend vorhanden war.

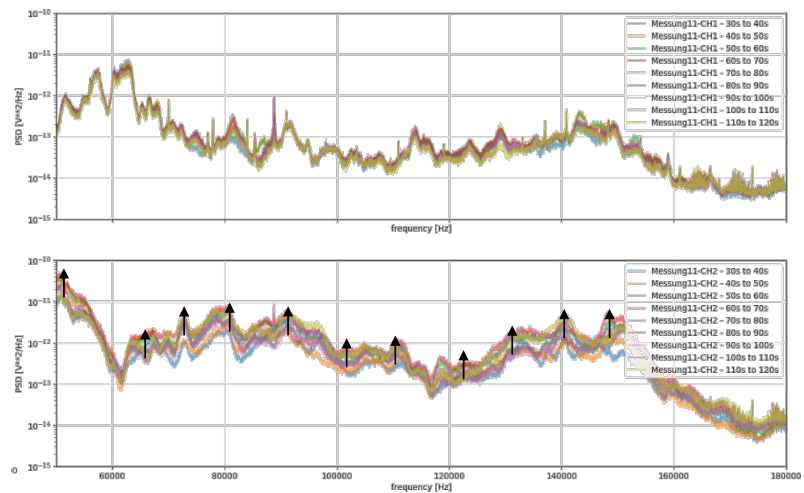


Abbildung 9: Änderung des Körperschalleintrags der Rippscheibe (oben) gegenüber der Zylindernadeln (unten) bei erhöhtem Warenabzug

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigten, dass der Einsatz von AE-Sensoren großes Potential bietet, fehlerhafte Maschinenzustände zu erkennen. Nach Diskussion und Empfehlung des projektbegleitenden Ausschusses wurde entschieden, weitere Messreihen durchzuführen. Dabei sollte einerseits die Sensoranbindung insbesondere an der Rippscheibe überarbeitet werden. Zudem sollte eine erweiterte Messreihe zur Datengenerierung erzeugt werden. Darüber hinaus wurde im Gremium festgelegt, eine garantiert zu geringe Maschinenschmierung zu provozieren.

In Verbindung mit der Aufnahme der erweiterten Messreihe sollten zudem neue Merkmale (Features) extrahiert und Mustererkennungsverfahren entwickelt werden, um die KI-Modelle zu trainieren. Dazu zählen unter anderem frequenzbasierte Kenngrößen, Energieverläufe und zeitliche Korrelationen der Schallwellen.

Zwischenergebnisse des Arbeitspaketes

Als Schlussfolgerung aus diesem Arbeitspaket stehen Slowmotion-Videos aller Versuchsszenarien mit synchronisierten Körperschalldaten, ein KI-Modell zur visuellen Nadelfehlererkennung sowie Konzepte für die Verknüpfung von Maschinenparametern mit AE-Daten bereit. Darüber hinaus wurden Körperschalluntersuchungen mit vielversprechenden Ergebnissen durchgeführt werden, welche jedoch noch zu erweitern waren.

1.3 Prozessüberwachung auf Basis maschineninterner Daten

Im Arbeitspaket „Prozessüberwachung auf Basis maschineninterner Daten“ wurde ein systematischer Ansatz entwickelt, um den Rundstrickprozess durch die Auswertung interner Maschinenparameter wie Spindeldrehzahl, Strom und Spannung zu überwachen. Ziel war es, Zusammenhänge zwischen diesen Daten und kritischen Faktoren wie Schmierzustand oder Fadenspannung zu identifizieren und so die Grundlage für eine vorausschauende Fehlererkennung zu schaffen.

Definition geeigneter Analysezyklen und Testmessungen

Zunächst wurden relevante Analysezyklen definiert, um die Veränderbarkeit der Maschinendaten in Abhängigkeit von Prozessparametern zu untersuchen. Hierbei standen Schmierungsbedingungen, Fadenspannung

und Warenabzug im Fokus. Durch Testmessungen wurde festgestellt, dass der aktuelle Ansatz zur Analyse des Warenabzugs durch Abweichungen in den Motorstromdaten nicht ausreichend sensitiv war. Als Konsequenz wurden experimentelle Versuche zur Schmierung und Fadenspannung geplant, um die Datenbasis für eine differenzierte Analyse zu erweitern.

Entwicklung eines Datenextraktionsbausteins und Schnittstelleinerweiterung

Ein zentraler Schritt war die Entwicklung der in Abbildung 10 dargestellten direkten Schnittstelle zum Umrichter des Hauptantriebs der Demonstrator-Maschine. Hierzu wurde eine RS485-Schnittstelle (über RJ45-Stecker) am Antrieb realisiert und mit einem USB-Konverter an einen PC/IPC angeschlossen. Diese Infrastruktur ermöglichte die Echtzeit-Übertragung von Spindelstrom, Spannung und Drehzahl. Der Aufbau der Schnittstelle war ein technischer Meilenstein, da er die Integration maschineninterner Daten in das multimodale Überwachungssystem des Projekts MuNaMo ermöglichte, ohne die Maschine stark modifizieren zu müssen.

Darüber hinaus wurde die Rundstrickmaschine um eine OPC-UA-Schnittstelle (Open Platform Communications Unified Architecture) erweitert. Hierbei erfolgte ein Hardwaretausch der Steuerungseinheit durch den Maschinenhersteller Terrot (im Rahmen von vorhabensbezogenen Aufwendungen der Wirtschaft), begleitet von einer Aktualisierung und Modulfreischaltung der Steuerungssoftware. Das Ergebnis war eine deutlich verbesserte Digitalisierung der Maschinensteuerung, die einen Fernüberwachungszugang und eine OPC-UA-Schnittstelle ermöglichte. Letztere ist besonders relevant, da sie die Echtzeit-Dokumentation und -Analyse von Prozessdaten über eine standardisierte, industrietaugliche Plattform sichert.

OPC-UA ist eine Weiterentwicklung des ursprünglichen OPC-Protokolls, das in den späten 1990er-Jahren eingeführt wurde. Während das ursprüngliche OPC auf der OLE-Technologie (Object Linking and Embedding) basierte, ist OPC-UA plattformunabhängig und nutzt moderne Technologien wie Web-Services und sichere Kommunikationsprotokolle [1]. Ein zentrales Merkmal von OPC-UA ist die Definition standardisierter Datenmodelle, die für über 60 Arten industrieller Geräte verfügbar sind und von der OPC Foundation über sogenannte Companion Specifications veröffentlicht werden. Diese Datenmodelle ermöglichen eine einheitliche und interoperable



Abbildung 10: Schnittstelle zwischen Maschinensteuerung (RS485) und PC (USB-A)

Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen, wie beispielsweise ERP-Anwendungen und Feldsensoren [2]. Dieser Ansatz ist in Einklang mit dem multimodalen Forschungsdesign des Projekts, da OPC-UA eine zentrale Schnittstelle für die Kombination von Maschinendaten mit externen Sensordaten darstellt.

Datenaufbereitung und Auswertung

Die erfassten Daten wurden für verschiedene Szenarien bezüglich Fadeneinzug und Schmierung aufbereitet. Generell ist die Spannung am Motor proportional zur Drehzahl, da der Frequenzumrichter der Rundstrickmaschine im U/f Betrieb und unterhalb der Nennfrequenz (50 Hz) betrieben wird, d.h. die Umrichterfrequenz und damit auch die Motordrehzahl sowie die Spannung werden in einem konstanten Verhältnis gehalten. Dies wurde durch Versuche mit variabler Drehzahl experimentell untersucht. Die Abhängigkeit der Spannung von der Drehzahl ist in Abbildung 11 dargestellt und verhält sich entsprechend linear zur Drehzahl.

Daraufhin wurde die Sensitivität und Korrelationen zwischen den elektrischen Motordaten (Spindelstrom, Drehzahl) und den festgelegten Eingangsparametern wie Fadenspannung oder Schmierungsgrad betrachtet. Dabei zeigte sich eine minimale Abhängigkeit des Motorstroms von der eingestellten Fadenspannung, welche in Abbildung 12 dargestellt ist. Die beiden Versuche mit aktivem Fadeneinlauf (1+2) und geringerer Fadenspannung führen zu einem leicht erhöhten Motorstrom im Vergleich zu den Versuchen mit passivem Fadeneinlauf (3+4) und entsprechend höheren Fadenspannungen.

Die Unterschiede sind jedoch gering (2 % - 3 % des Iststroms) und die Ursache könnte auch mit veränderten Einstellungen der Maschine zusammenhängen. Aus diesem Grund wurden weitere systematische Untersuchungen durchgeführt in denen auch der Warenabzug noch einmal systematisch verändert wurde. In all diesen Versuchen konnte kein systematischer Einfluss dieser Einstellgrößen auf die Motordaten festgestellt werden. Exemplarisch dafür ist in Abbildung 13 der Motorstrom für eine Versuchsreihe bei 30 U/min dargestellt. Im Referenz-

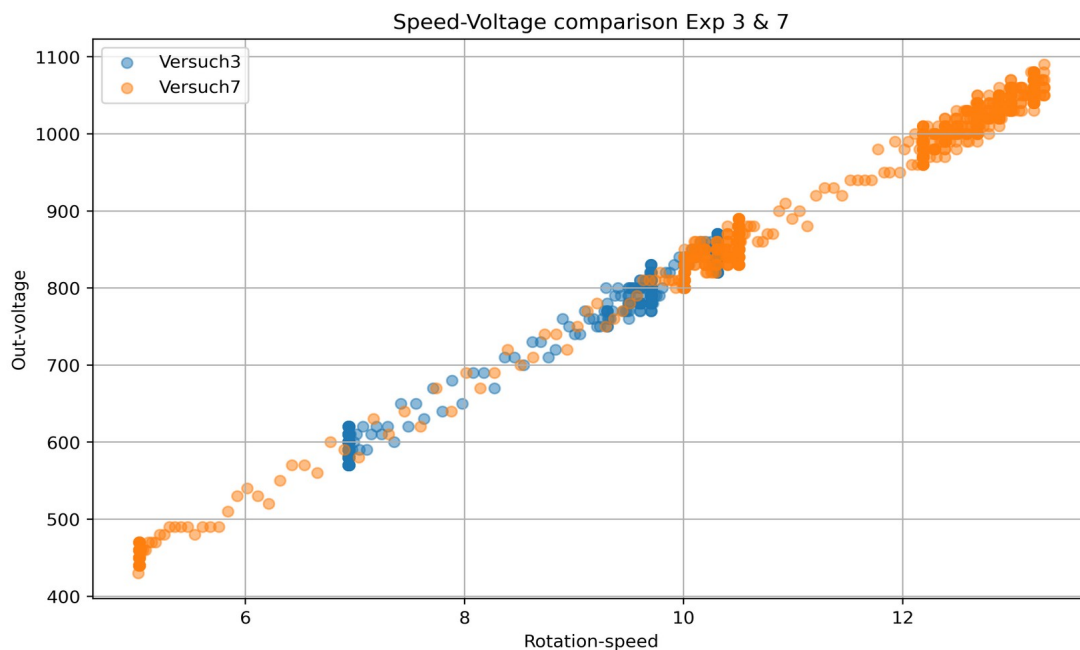


Abbildung 11: Abhängigkeit der Spannung (Out-voltage) von der Drehzahl (Rotation-speed)

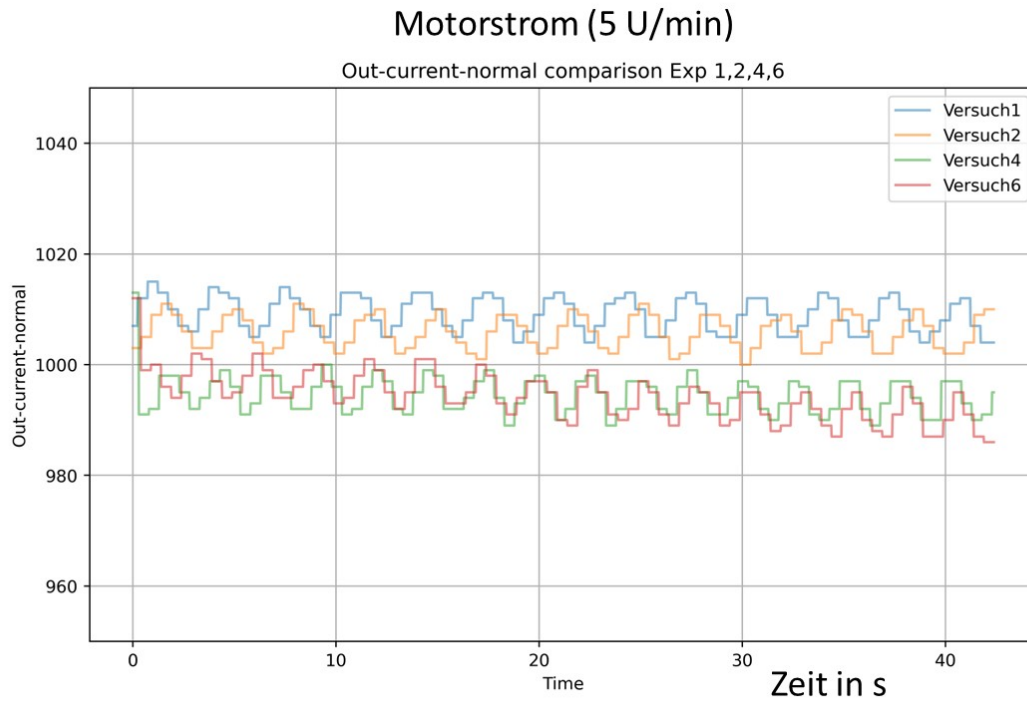


Abbildung 12. Abhängigkeit des Motorstroms (Out-voltage) von der Fadenspannung. Versuch 1+2 mit aktivem Fadeneinlauf, Versuch 3+4 mit passivem Fadeneinlauf

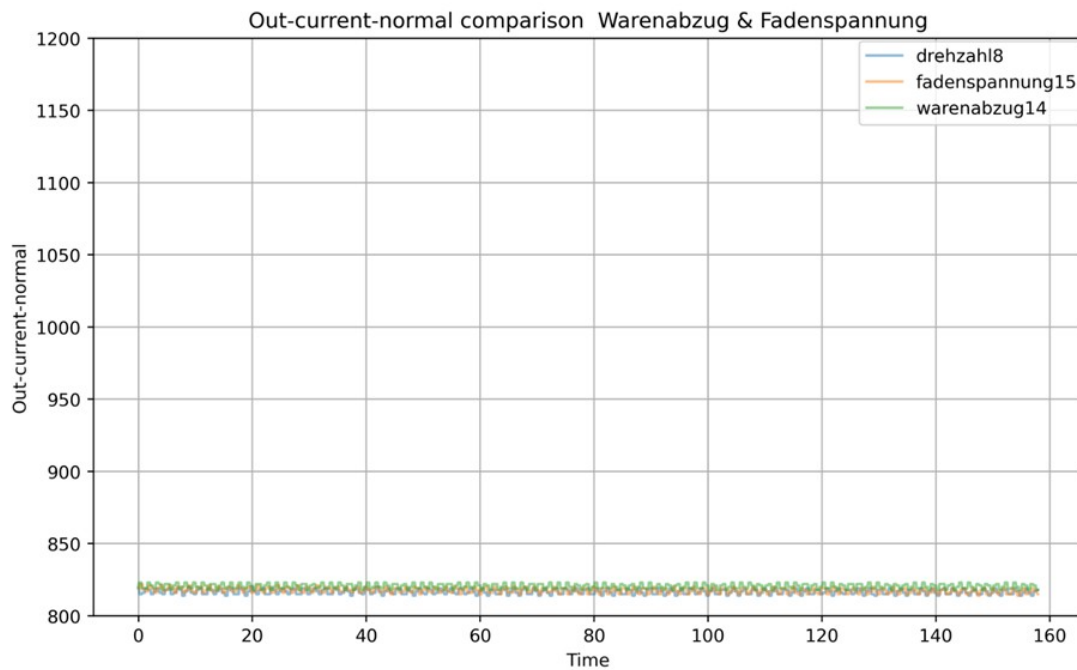


Abbildung 13: Kein Einfluss von Fadenspannung und Warenabzug auf Motorstrom (Out-current)

versuch (Drehzahl 8, blau) ist der Warenabzug auf 30 % und die Fadenspannung auf 0,05 N eingestellt. Der Motorstrom verändert sich hier z.B. nicht bei einer Erhöhung der Fadenspannung auf 0,2 N (Fadenspannung 15, orange) bzw. bei Erhöhung des Warenabzugs auf 70 % (Warenabzug 14, grün). Dies zeigte sich auch bei weiteren systematischen Versuchen mit anderen Einstellgrößen und Drehzahlen.

Zudem wurde der Einfluss der Schmierung auf maschineninterne Daten und insbesondere die Motordaten untersucht. Auch hier zeigte sich kein Einfluss des Schmierzustandes auf die Motordaten. Beispielhaft hierfür ist eine Versuchsreihe bei 10 U/min mit normaler Schmierung (Versuch 8, blau) und reduzierter Schmierung (Versuch 9, orange) in Abbildung 14 dargestellt. Der Schmierzustand mit reduzierter Schmierung wurde dabei über mehrere Stunden aufrecht erhalten. Ebenso wurden weitere Messungen durchgeführt, bei denen die Maschine ohne Schmierung „trocken“ gefahren wurde und zudem die Schlossteile gereinigt und vom Öl befreit wurden. In all diesen Fällen zeigte sich, wie in Abbildung 14 dargestellt, kein signifikanter Einfluss auf die Motordaten.

1.4 Erweiterte Datengenerierung und Intensivierung der Auswertungen

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse wurde gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss eine erweiterte Datengenerierung und Intensivierung der Auswertungen beschlossen. Dies betraf zum einen Anpassungen zu den Untersuchungen mit AE-Sensorik, da die Ergebnisse der im Vorfeld geplanten und durchgeführten Versuche insbesondere im Bereich der Rippscheibe noch einige Fragen offen ließen. Zum anderen war die Erkennung des Maschinenzustands über die maschineninternen Daten nicht wie im Antrag vorgesehen möglich. Demzufolge wurden in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss Anpassungen an den Versuchsreihen zum Schmierzustand vorgenommen. Im folgenden werden die zusätzlichen Arbeiten bzw. Anpassungen für die zwei Versuchsmethoden näher beschrieben.

1.4.1 Versuche zur Erkennung des Schmierzustandes

Um den Einfluss der Beölung bzw. Schmierung auf den Prozess und die Überwachungsgrößen zu ermitteln, war es notwendig eine signifikante Mangelschmierung zu erzeugen, ohne dabei jedoch Komponenten der Versuchsmaschine zu beschädigen oder gar ein Festfahren der Maschine zu riskieren. Hier konnten wir auf die Erfahrung des Maschinenherstellers Terrot zurückgreifen, welcher bereits Versuche mit mangelnder Schmierung durchge-

Einfluss Schmierung

- Normale Schmierung (Versuch 8)
- Reduzierte Schmierung (Versuch 9)

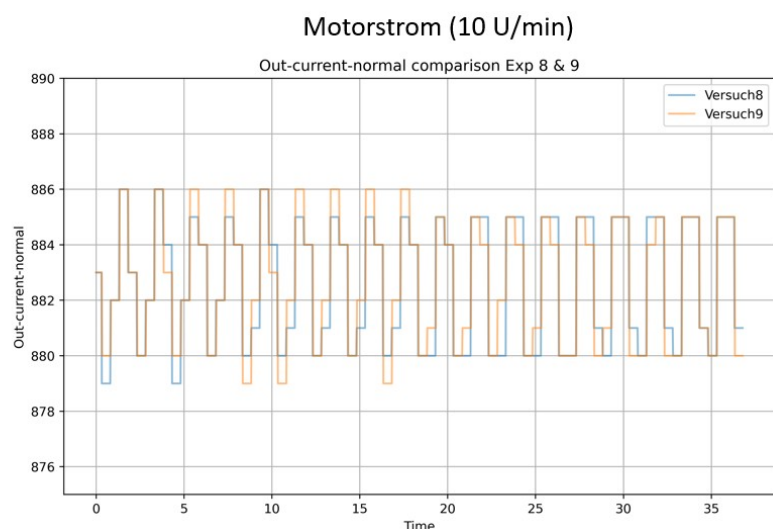


Abbildung 14: Einfluss des Schmierzustandes auf Motorstromdaten

führt hatte und als pbA-Mitglied sehr aktiv im Projekt mitarbeitete. In einem Workshop mit Terrot wurden weitere Versuche zur Untersuchung des Schmierzustandes geplant.

Der Zustand einer Mangelschmierung wurde erzeugt, indem die Ölzufuhr der Maschine vollständig abgeschaltet wurde und die Maschine einige Zeit laufen gelassen wurde. Danach wurde jedes einzelne Ripp- und Zylinder Schloss ausgebaut, manuell gereinigt und wieder eingebaut. Nach dieser gründlichen Reinigung wurden alle Überwachungssensoren (AE-Sensorik, Temperatur, Beschleunigungen, Motordaten) an der Rundstrickmaschine angebracht bzw. die Datenerfassung und das Warmlaufprogramm der Maschine gestartet. Die Maschine lief dann mehrere Stunden bei 30-35 U/min ohne Öl, wobei die entsprechenden Sensordaten (insbesondere Temperatur und Beschleunigungen) kontinuierlich überwacht wurden. Ebenso wurden in Abständen von ca. 15 min einzelne Schlossteile für eine Sichtprüfung des Ölgehalts ausgebaut. Nachdem nach einigen Stunden der Ölgehalt in der Maschine auf ein Minimum reduziert war, wurden einige Referenzversuche bei einer Drehzahl von 15 rpm durchgeführt, um den Maschinenzustand ohne Schmierung zu charakterisieren. Anschließend wurde die Ölzufuhr mit einer initialen Rate von 30 Tropfen/min (geringe Schmierung) wieder aktiviert, um den Übergang vom ungeschmierten zum geschmierten Zustand zu dokumentieren. Nach weiteren 50 min Laufzeit wurde die Ölzufuhr auf 55 Tropfen/min erhöht, welcher einer normalen Schmierung entspricht.

Die Auswertung der akustischen Emissionsdaten zeigte signifikante Unterschiede in den Amplitudenspektren, insbesondere im nicht-hörbaren Frequenzbereich, aber auch im unteren Frequenzbereich von 0-5 kHz (siehe Abbildung 15). Diese spektralen Unterschiede waren charakteristisch für die verschiedenen Schmierzustände der Maschine und lieferten wertvolle Indikatoren für die Zustandsüberwachung. Zur systematischen Analyse dieser Unterschiede wurden drei KI-Algorithmen eingesetzt und verglichen: Random Forest, Multi-Layer-Perceptron (MLP) und Support Vector Machine (SVM).

Die Leistungsbewertung der implementierten KI-Modelle erfolgte anhand etablierter Metriken wie Accuracy (Genauigkeit), Precision (Präzision), Recall (Sensitivität) und F1-Score. Bemerkenswert war, dass alle drei Algorithmen sehr ähnliche und durchweg hohe Leistungswerte aufwiesen (siehe Abbildung 16), was die Robustheit des gewählten Ansatzes unterstreicht. Die konsistent hohen Werte über alle Metriken hinweg bestätigen die Zuver-

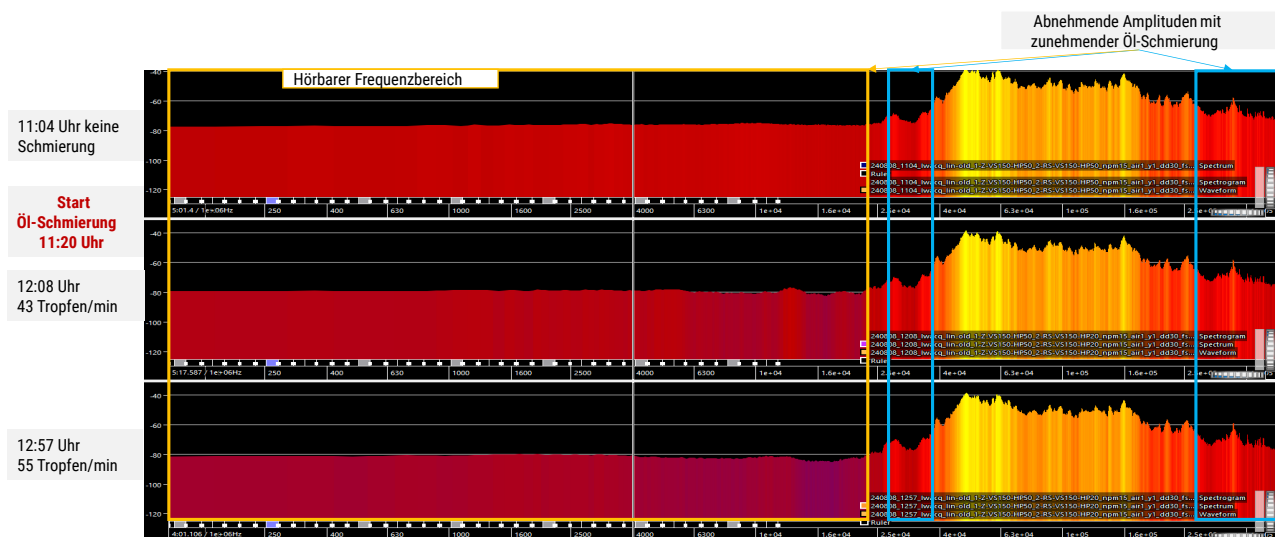


Abbildung 15: Gemittelte Spektren an der Ripscheibe zur Untersuchung des Einflusses der Öl-Schmierung

lässigkeit der Klassifikation unterschiedlicher Schmierzustände.

Als zentrales Ergebnis dieser Untersuchungsphase konnte nachgewiesen werden, dass bereits mit einem einzelnen Messkanal und einer relativ kurzen Messdauer von jeweils 8 min eine zuverlässige Unterscheidung zwischen geölten und nicht geölten Prozesszuständen möglich ist. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die übrigen Randbedingungen konstant bleiben.

1.4.2 Überwachung des Maschinenzustandes mit Beschleunigungssensorik

Die in Abschnitt 1.3 beschriebenen Untersuchungen auf Basis maschineninterner Daten zeigten nicht die erhofften Ergebnisse zur Überwachung des Maschinenzustandes. Demzufolge wurde diese Überwachungsstrategie in enger Abstimmung mit dem pbA nicht weiter verfolgt und dadurch wurden auch Inhalte der FS2 (IWU) zur Implementierung der maschineninternen Datenerfassung hinfällig. Parallel ergaben jedoch die ersten Untersuchungen mittels AE-Sensorik, dass auch vergleichsweise niederfrequente Schwingungen im Bereich von 0 - 5 kHz signifikante Informationen zum Maschinenzustand und Nadelfehlern enthalten. Demzufolge wurden in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss die Inhalte von der Implementierung (AP4 des Antrags) verschoben und die frei gewordenen Kapazitäten wurden von der FS2 für zusätzliche Versuche mit einfachen Beschleunigungssensoren genutzt. Ziel dieser Untersuchungen war es, eine alternative Möglichkeit zur Überwachung von Rundstrickmaschinen zu untersuchen.

Für die Untersuchungen wurde ein triaxialer Beschleunigungssensor auf der Platte der Zylinderschlösser angebracht. Abbildung 17 zeigt die durchschnittlichen Beschleunigungen für die Versuche (2 - 26), welche während der Versuchsreihe zur Mangelschmierung aufgenommen wurden. Die Versuche 2 - 15 (grün) wurden dabei mit Standardschmierung durchgeführt, während die Versuche 17 - 26 (rot) nach Reinigung der Schlossteile und Abstellen der Ölzufuhr aufgenommen wurden. Insbesondere bei den durchschnittlichen Beschleunigungen in x-Richtung (radiale Richtung der Rundstrickmaschine) zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Schmierzuständen.

Eine weitere Erkenntnis war eine deutlich höhere Anzahl von kurzen Stößen während der Mangelschmierung, welche durch den Beschleunigungssensor erfasst wurden. Eine beispielhafte Zeitreihe für die x-Beschleunigungen für einen Versuch mit Öl (Versuch 8) und einen Versuch ohne Öl (Versuch 21) ist in Abbildung 18 dargestellt. Hier sind die lokalen Maxima (orange) und lokalen Minima (grün) der Beschleunigungszeitreihe besonders hervorgehoben. Man sieht neben den grundlegend höheren Beschleunigungen für den Versuch ohne Öl, dass zudem vermehrt starke Peaks insbesondere negativer Beschleunigungen zu beobachten sind. Diese sind charakteristisch für kurze Stöße oder Schläge, die an der Maschine auftreten. Quantitativ wurden diese Stöße durch die Anzahl der Ausreißer ermittelt, welche als Anzahl der Grenzzlinien-Überschreitungen (rot und schwarz gestrichelte Linien in Abbildung 18) definiert wurde.

Diese Anzahl der Ausreißer wurde für alle Versuchsdaten mit und ohne Beölung sowie für alle drei Messrichtungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Hier sieht man, dass für die Versuche ohne Be-

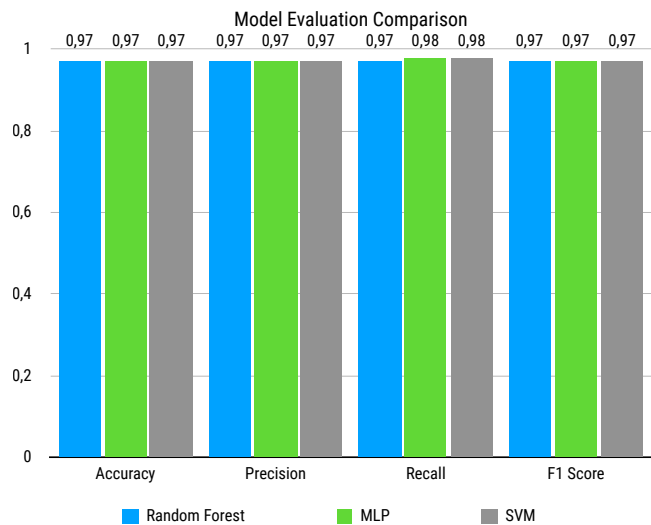


Abbildung 16: Metriken der Machine Learning Modelle zur Klassifizierung des Schmierzustandes

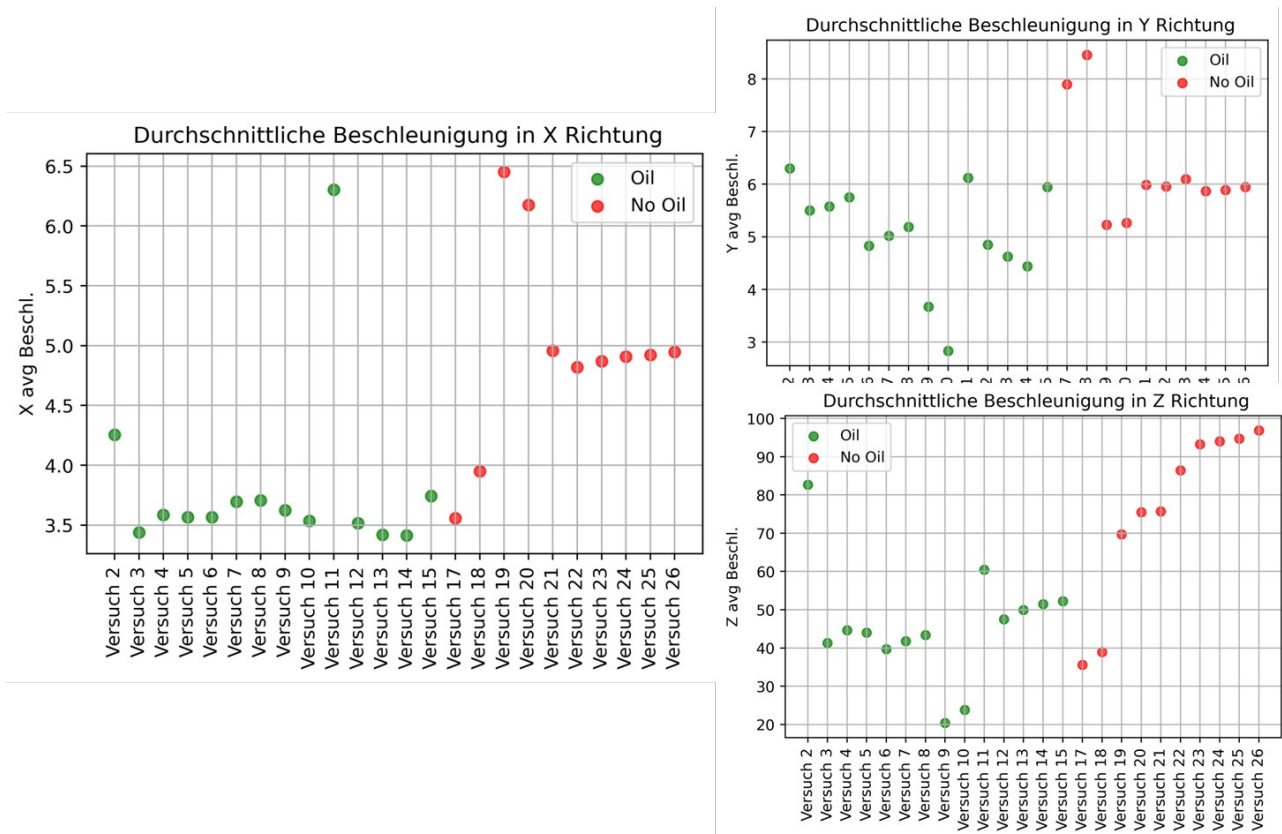


Abbildung 17: Durchschnittliche Beschleunigung mit und ohne Schmierung

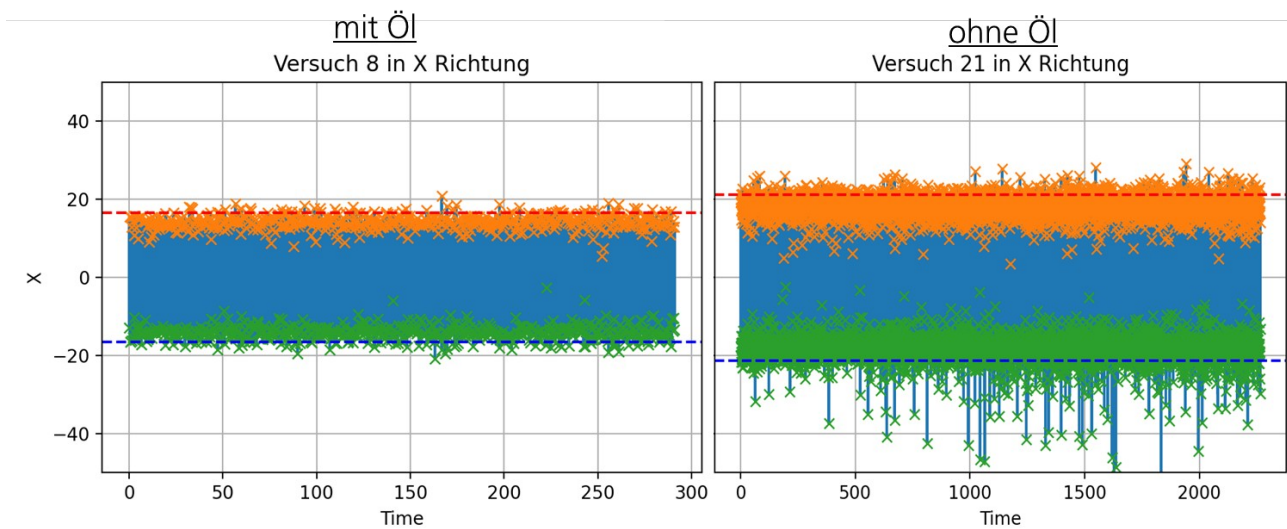


Abbildung 18: Exemplarische Zeitreihe der Beschleunigungen mit und ohne Beölung

ölung deutlich mehr Ausreißer bzw. Stöße auftreten, welche sich neben der x-Richtung (radial) auch deutlich in der z-Richtung (axial) zeigen.

In einer weiteren Versuchsreihe im August 2024 wurden dann die Energieintensitäten der Beschleunigungen in unterschiedlichen Frequenzbereichen für unterschiedliche Schmierzustände noch systematischer untersucht. Hierzu wurde eine FFT-Transformation der Beschleunigungszeitreihen durchgeführt und die Amplituden in bestimmten Frequenzbereichen aufsummiert. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den Versuch 9 ohne Öl (grün) und den Versuch 18 mit Öl (blau). In allen Frequenzbereichen und für alle Messrichtungen treten ohne Schmierung signifikant höhere Beschleunigungen auf. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch für vergleichbare Versuche.

In der weiteren Versuchsreihe zu unterschiedlichen Schmierzuständen traten ebenso wieder vermehrt Ausreißer bzw. Stöße in den Beschleunigungen auf. Für diese Versuchsreihe wurde die Auswertung hinsichtlich der Ausreißer noch weiter vereinheitlicht und auf Basis des RMS-Wert („root mean square“) der Beschleunigungen durchgeführt (siehe Abbildung 20). Zunächst wurde der RMS-Wert der Beschleunigungen ermittelt (linke Seite von Abbildung 20). Die Häufigkeit des RMS-Wertes wurde dann in einem Histogramm aufgetragen (Abbildung 20 rechts oben). Abhängig von der Häufigkeitsverteilung bzw. konkret von der ermittelten Standardabweichung wurden die Grenzwerte für Ausreißer der Verteilungen ermittelt und in Prozenten von allen RMS-Werten für die jeweiligen Messrichtungen angegeben (Abbildung 20 rechts unten). „Niedrig“ und „Hoch“ sind dabei Ausreißer die besonders niedrige oder hohe RMS-Werte außerhalb der statistisch ermittelten Grenzen darstellen. Auch für diese Auswertung ergibt sich eine deutlich höhere Anzahl an Ausreißern für alle Versuche ohne Beölung im Vergleich zu den Versuchen, welche mit normaler Schmierung bzw. leichter Schmierung gefahren wurden.

Die Ursache der Ausreißer bzw. Stöße bei mangelnder Schmierung stand nicht im Fokus dieser Untersuchung und wurde nicht näher untersucht. Es wird vermutet, dass es kurze Kontakte von Nadeln mit Kanten am Rand

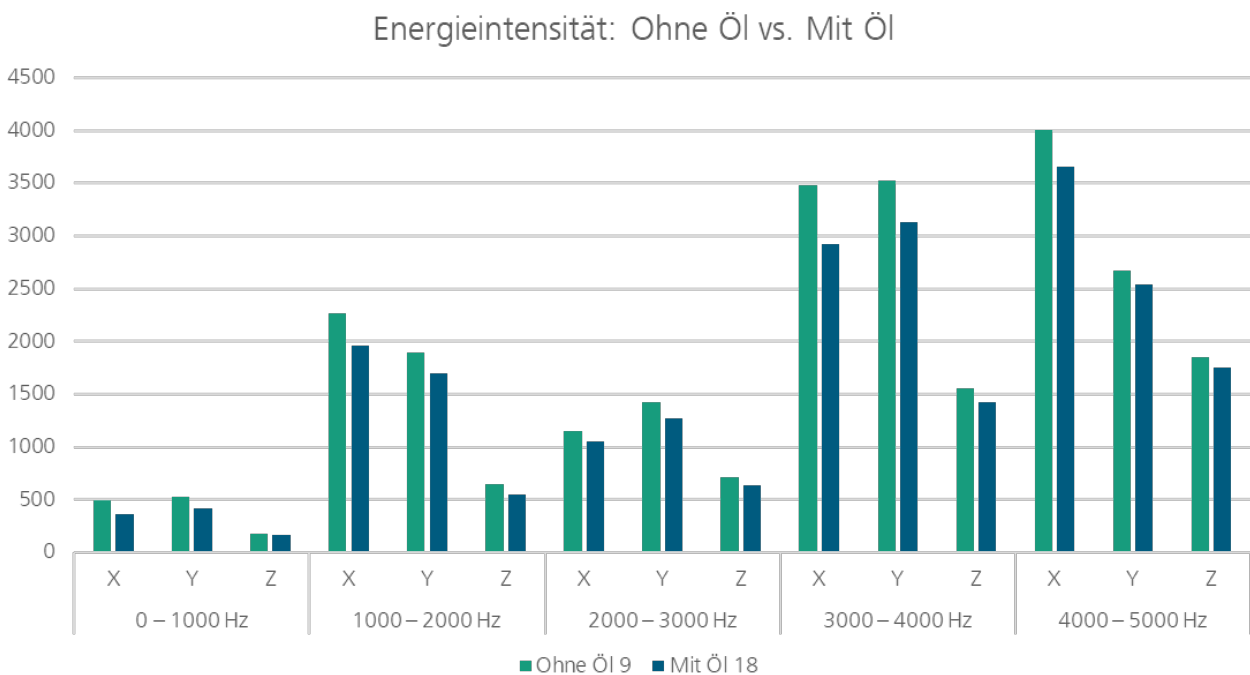


Abbildung 19: Auswertung der Energieintensitäten der Beschleunigungen für Versuche mit und ohne Öl

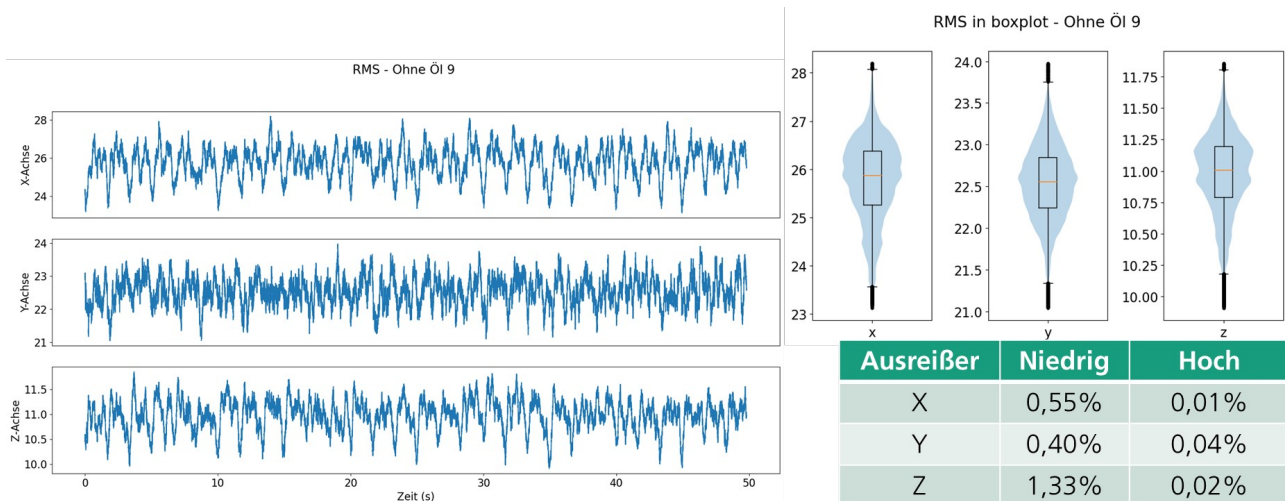


Abbildung 20: Beispielhafte Auswertung des RMS-Wertes der Beschleunigungen

der Schlossteile bzw. anderen Unebenheiten gegeben hat. Diese Vermutung wird durch ähnliche Ergebnisse an einer anderen Rundstrickmaschine unterstützt (siehe dazu Kapitel 1.5). Das erhöhte Auftreten von Stößen resultiert in einem erhöhten Verschleiß der Nadeln und Schlossteile und ggf. anderer Maschinenkomponenten. Je nach konkreter Ursache und Ausmaß der Wirkung auf die Maschine und Nadeln sind die Stöße bzw. Ausreißer tendenziell zu vermeiden und neben der Gesamtintensität der Schwingungen ein zuverlässiger Indikator für die Erkennung einer mangelnden Schmierung.

1.4.3 Versuche zur Erkennung von Nadelfehlern

Im Rahmen der erweiterten Datengenerierung wurden neben den Schmierzuständen auch systematisch Nadelfehler untersucht, insbesondere deren Detektierbarkeit bei unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten sowohl in der Rippscheibe als auch im Zylinder der Rundstrickmaschine.

Zur Detektion von Nadelfehlern wurde das aufgezeichnete Schallsignal mit verschiedenen akustischen Features analysiert. Dabei kamen vier spezifische Analysemethoden zum Einsatz: Die **spektrale Schärfe** (Feature 1), ein psychoakustischer Parameter, der denjenigen Aspekt der Klangfarbenwahrnehmung beschreibt, der mit der spektralen Hüllkurve von Schallen korreliert und angibt, ob ein Geräusch als scharf, schrill oder zischend empfunden wird, wobei der energetische Schwerpunkt im Bereich hoher Frequenzen liegt. Die **spektrale Streuung** (Feature 2) beschreibt die Ablenkung und Verteilung von Schallwellen unterschiedlicher Frequenzen durch Wechselwirkung mit Objekten oder Medien, wobei die Schallenergie in verschiedene Richtungen gestreut wird und sich dadurch das Frequenzspektrum des ursprünglichen Signals verändert. Das **Peak Spektrum** (Feature 3) identifiziert dominante Frequenzkomponenten im Schallsignal und ist besonders nützlich für die Erkennung von tonhaltigen Geräuschen oder Verzerrungen, wie sie bei Nadelfehlern auftreten können. Die **ASD-Funktion** (Amplitude Spectral Density, Feature 4), stellt die Verteilung der Signalenergie über das Frequenzspektrum dar und reagiert besonders empfindlich auf strukturelle Veränderungen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten eine deutliche Differenzierung nach Einbauort der Nadeln. Im Zylinder konnten Nadelbrüche zuverlässig detektiert werden. Auch verbogene Zylindernadeln waren bei ausreichendem Grad der Verbiegung zuverlässig erkennbar. Abbildung 21 illustriert den Vergleich der Features 2, 3 und 4 für eine vorbeilaufende verbogene Nadel und einen Nadelbruch.

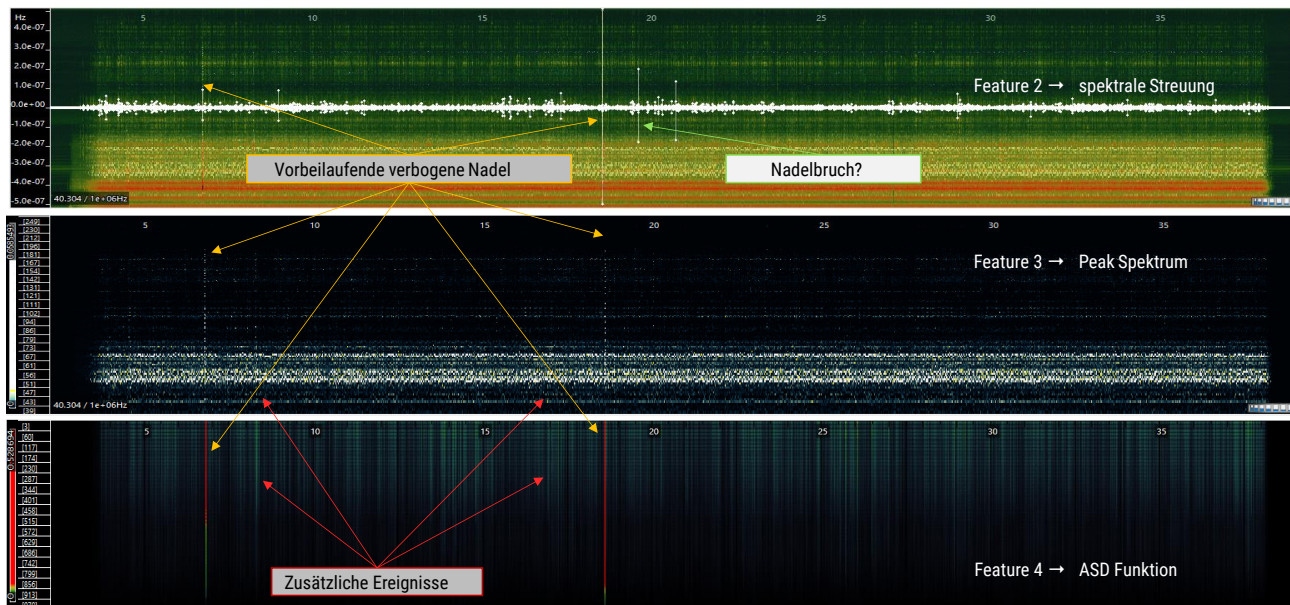


Abbildung 21: Vergleich ausgewählter Features zur Detektion von Nadelfehlern im Zylinder bei 5 rpm

Bei Nadeln in der Rippscheibe waren die Ergebnisse differenzierter zu betrachten. Verbogene Nadeln konnten teilweise detektiert werden, jedoch war die Signifikanz der Messergebnisse nicht durchgängig gegeben. Für zuverlässigere und statistisch belastbare Ergebnisse in diesem Bereich ist eine größere Datenbasis erforderlich.

Eine wichtige Erkenntnis der Untersuchungen betraf den Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf die Detektierbarkeit von Nadelfehlern. Bei Drehzahlen über 15 rpm wurde festgestellt, dass der Energieeintrag des Grundsignals der Maschine zu groß wird, um Nadelfehlerereignisse zuverlässig aus dem Gesamtsignal herauszufiltern. Diese Limitierung ist für die praktische Anwendung der entwickelten Methodik von Bedeutung, da industrielle Rundstrickmaschinen typischerweise mit deutlich höheren Drehzahlen betrieben werden. Um die Grenzen der entwickelten Detektionsmethoden genauer zu bestimmen, wurde im Rahmen von Verifikationsversuchen eine finale Messreihe mit höheren Drehzahlen durchgeführt.

1.5 Verifikationsversuche

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Validierungsversuche“ wurden die in den vorangegangenen Projektphasen etablierten Methoden zur Nadelfehlererkennung im Rundstrickprozess abschließend überprüft und unter realistischen Bedingungen validiert. Ziel war es, die Robustheit der Überwachungsansätze unter realistischen Randbedingungen zu erproben sowie deren Grenzen zu bestimmen und Handlungsfelder für zukünftige Optimierungen zu identifizieren.

1.5.1 Prozessüberwachung auf Basis von AE-Sensorik

Erweiterung des Versuchsplans und Fokus auf die Rippscheibe

Aufbauend auf den Ergebnissen der erweiterten Datengenerierung wurde ein finaler Versuchsplan erstellt, der gezielt die Erkennung von Nadelfehlern in der Rippscheibe adressierte. Dabei lag ein besonderer Fokus auf der Intensivierung der Mustererkennungsmethoden, um die spezifischen Schallmuster von Fehlerereignissen in diesem Bereich zuverlässiger zu identifizieren. Ergänzend wurden jeweils die Grundplatte der Zylinderschlösser

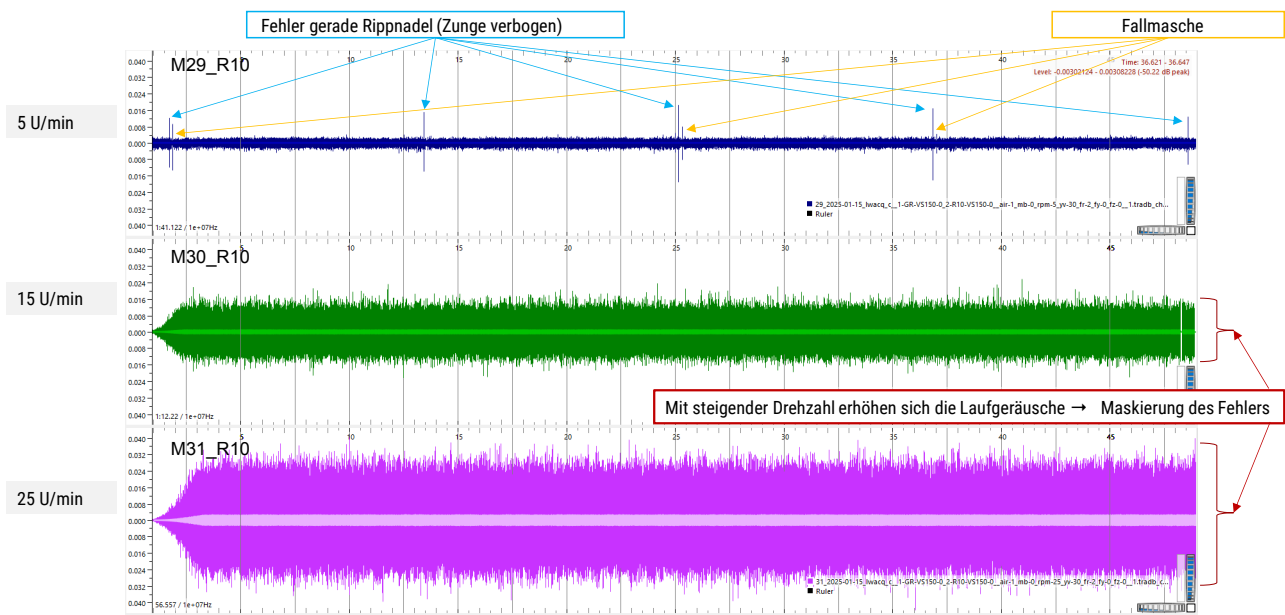


Abbildung 22: Einfluss des Drehzahlanstiegs bei der akustischen Nadelfehlererkennung

bzw. der RippSchlüssel als neue Messpositionen für die AE-Sensoren bestimmt. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Platzierung der Sensoren unmittelbar am Strickschloss deutlich bessere Erkennungsergebnisse lieferte als die Positionierung auf der jeweiligen Grundplatte. Dies unterstreicht die Bedeutung einer optimalen Sensoranbindung für eine präzise Fehlerdetektion.

Nachweis der Erkennbarkeit minimaler Nadelberührungen

Ein weiteres zentrales Szenario dieser Validierungsphase war die gezielte Provokation von minimalen Berührungen zwischen Zylinder- und Rippnadeln, wenn Zylinder und Ripp Scheibe nicht optimal zueinander eingestellt sind - einem in der Industrie häufig auftretenden Fehlerfall, welcher zu erheblichen Maschinenschäden führen kann, z.B. bei der Umstellung der Maschine von Interlock- auf Feinripp-Bindung oder umgekehrt. Die Ergebnisse bestätigten, dass solche Berührungen mittels Körperschallanalyse eindeutig detektiert werden konnten.

Geschwindigkeitsabhängigkeit der Fehlererkennung

Ein kritischer Limitationsfaktor, der sich in den Validierungsversuchen klärte, war die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Nadelfehlererkennung. Während bei Drehzahlen ≤ 15 rpm eine zuverlässige Detektion von Nadel Fehlern in der Ripp Scheibe gelang, stiegen bei höheren Drehzahlen die Laufgeräusche Maschine so stark an, dass sie Fehlerereignisse maskierten und diese nicht mehr eindeutig vom Grundsignal getrennt werden konnten (Abbildung 22). Die Maskierungseffekte stellen eine technische Herausforderung dar, da industrielle Rundstrickmaschinen typischerweise mit deutlich höheren Drehzahlen betrieben werden.

Zusammenfassung der AE-Analysen

Die umfassenden Körperschallanalysen bestätigten, dass die Körperschallanalyse grundsätzlich geeignet ist, Nadelbrüche und verbogene Nadeln im Rundstrickprozess zu erkennen. Die Erkennungsgrenzen hängen jedoch stark von drei Faktoren ab:

1. **Art des Fehlers:** Während Nadelbrüche und stark verbogene Zungen eindeutig detektiert werden konnten, war die Erkennung leicht verbogener Nadelzungen nur unter speziellen Bedingungen möglich.
2. **Drehzahl:** Bei Geschwindigkeiten über 15 rpm sind Fehlerereignisse aufgrund von Maskierungseffekten nicht mehr zuverlässig detektierbar.
3. **Sensorpositionierung:** Die direkte Platzierung der Sensoren am Strickschloss erwies sich als deutlich effizienter als die Positionierung auf der Grundplatte.

Für eine robuste Fehlererkennung wurden als Mindestanforderung ein AE-Sensor pro Nadelbahn definiert. Am Beispiel der Demonstratormaschine Terrot RH-216 I sind entsprechend 4 Sensoren erforderlich: 2 AE-Sensoren an je einem geraden und einem ungeraden Zylinderschloss sowie 2 Sensoren an je einem geraden und einem ungeraden Rippschloss. Im Dauerlaufbetrieb konnten zudem systematische Abweichungen vom Normalzustand erfolgreich detektiert werden, darunter:

- **Schmierzustandsunterschiede:** Ungeölte, mangelhaft geölte und geölte Prozesse ließen sich eindeutig voneinander unterscheiden.
- **Nadelschleifen:** Mechanische Spannungsänderungen durch Nadelkontakte verursachten messbare Impulse, die das AE-System aufzeichnete.

1.5.2 Verifikation zur Überwachung des Maschinenzustandes

Zur Verifikation der Überwachung des Maschinenzustandes auf Basis von Beschleunigungssensorik (ursprünglich im Antrag geplant über maschineninterne Sensorik) wurden Versuche an Rundstrickmaschinen beim pbA-Mitglied thoenes Dichtungstechnik GmbH durchgeführt. Gemessen wurden Schwingungen in drei Raumrichtungen an zwei Harry-Lucas-Rundstrickmaschinen zur Herstellung technischer Textilien (siehe Abbildung 23). Die Maschinen waren baugleich, wobei eine neuere Maschine und eine ältere Maschine untersucht wurden. Die Maschinen haben jeweils 25 Nadeln und wurden zum Verstricken von Monofilament eingesetzt. Beim Strickvorgang rotiert die komplette Baugruppe inklusive Rollen und Material mit bis zu 250 U/min. Untersucht wurden typische Geschwindigkeiten von 120 U/min und 200 U/min. Der triaxiale Beschleunigungssensor wurde an der Unterseite des nicht rotierenden Zylinders befestigt. An beiden Maschinen wurden dann identische Versuche durchgeführt und ausgewertet. Konkret wurden der Einfluss der Schmierung, Einflüsse durch die Nadeln sowie der Zustand der Lagerung (neue vs. alte Maschine) und der Einfluss von Unwuchten untersucht.

Generell zeigte sich, dass die Grundintensität der Schwingungen an der älteren Maschine stärker ist, als an der neuen Maschine. Dies ist insbesondere der Fall, wenn sich die Rundstrickmaschine ohne Rollen und Filament dreht. Dafür exemplarisch sind in Abbildung 24 die radialen Schwingungen an der alten und neuen Maschine für eine Drehzahl von ca. 200 U/min (80 %) dargestellt. Bei leeren Rollen (ohne Filament) sind die Schwingungen an der alten Maschine (Abbildung 24 links, blaue Kurve) ca. um das doppelte höher, als die Schwingungen an der neuen Maschine (Abbildung 24 links, rote Kurve). Nicht mehr ganz so eindeutig verhält es sich mit vollen Rollen und Filament. Hier führt insbesondere die durch die Fadenspannung erzeugte Kraft auf die Nadeln vor allem an der neuen Maschine (Abbildung 24 rechts, rote Kurve) zu einem wesent-



Abbildung 23: Rundstrickmaschine Harry Lucas

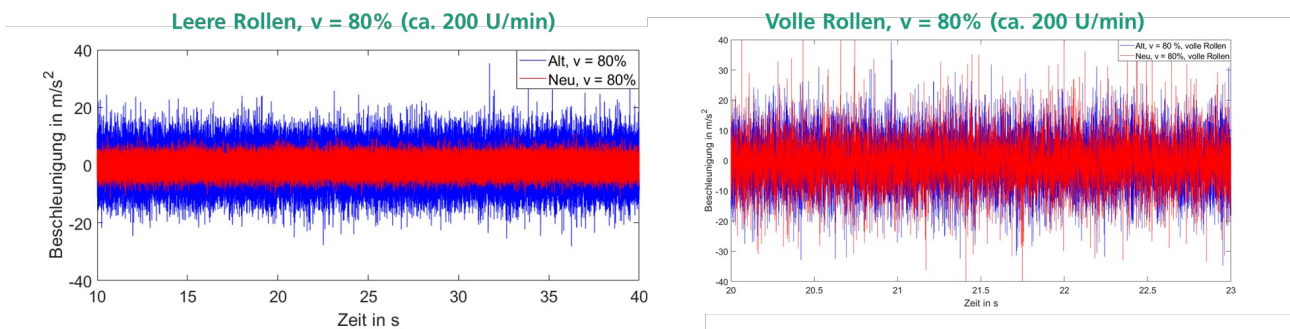


Abbildung 24: Vergleich der Schwingungen für alte und neue Harry-Lucas-Maschine

lich unruhigeren Lauf mit vielen Ausschlägen. Diese Ausschläge sind vergleichbar mit den Ausreißern, die auch an der Terrot-Strickmaschine am STFI beobachtet werden konnten.

Die Ansätze zur Überwachung der Schmierung konnten ebenso verifiziert werden. Im Gegensatz zur Durchlaufschmierung mit Öl an der Terrot-Rundstrickmaschine sind die Harry-Lucas-Rundstrickmaschinen mit Fett geschmiert. Zur Verifikation wurden Schwingungsdaten vor und nach einer frischen Schmierung aufgenommen und verglichen. Das Ergebnis ist exemplarisch in Abbildung 25 dargestellt und bestätigt die im Versuchsfeld erzielten Erkenntnisse (vgl. Abschnitt 1.4.2). Für alle Geschwindigkeiten reduziert sich die Schwinggeschwindigkeit um ca. 10 % - 15 % nach einer frischen Schmierung, d.h im Mittel sind die auftretenden Schwingungsamplituden nach einer frischen Schmierung geringer. Ebenso sieht man besonders bei niedrigeren Geschwindigkeiten (vgl. Abbildung 25 links), dass sich die Anzahl der Ausschläge nach einer frischen Schmierung signifikant reduziert. Auch diese ist analog zu den Beobachtungen an der Terrot-Rundstrickmaschine welche in Abschnitt 1.4.2 beschrieben wurden.

Abschließend wurde noch der Einfluss der Nadeln auf die Ausschläge bzw. Ausreißer der Beschleunigungen untersucht. Während an der alten Maschine nahezu keine Ausschläge zu beobachten waren und diese sich demzufolge auch nicht mit einem neuen Nadelsatz änderten, war an der neuen Maschine ein klarer Einfluss des Nadelsatzes auf die Schwingungen zu erkennen. Eine beispielhafte Zeitreihe ist in Abbildung 26 dargestellt. Neue Nadeln führen zu deutlich mehr Ausschlägen in den Schwingungsamplituden. Diese treten für neue Nadeln nahezu einmal pro Umdrehung auf und unterstützen die Vermutung, dass die Schläge bzw. Ausreißer mit einem Anstoßen der Nadeln an Unebenheiten bzw. Unterbrechungen der Schlosskurven zusammenhängen. An der al-

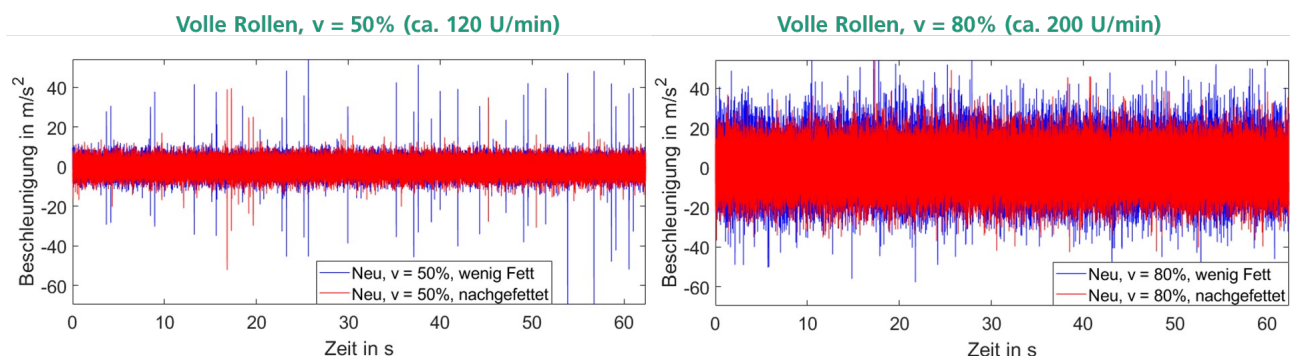


Abbildung 25: Einfluss der Schmierung auf Schwingungen an Harry-Lucas-Maschinen

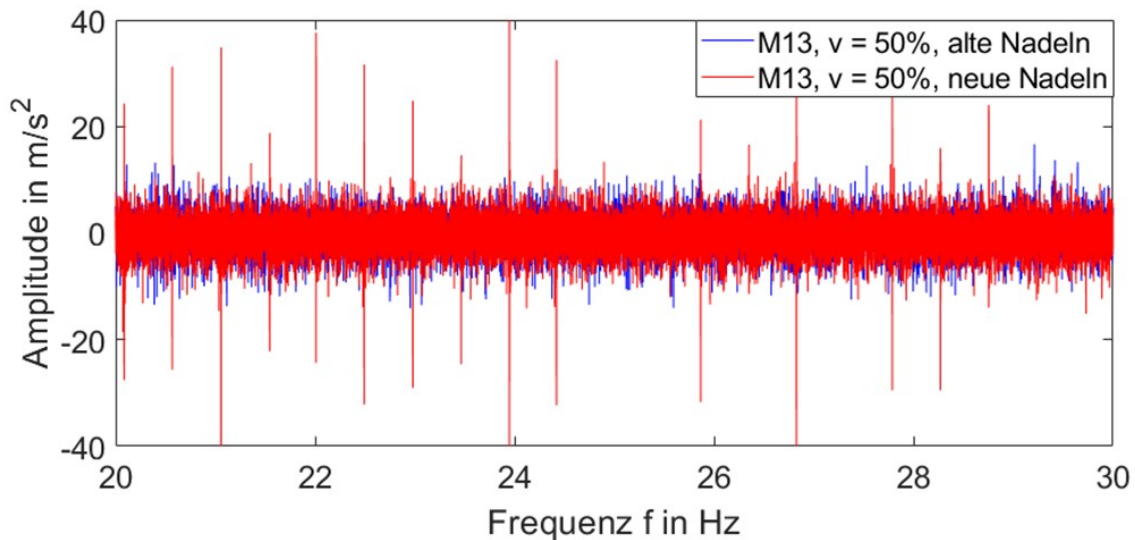


Abbildung 26: Vermehrte Ausschläge für neuen Nadelsatz an neuer Maschine

ten Maschine treten kaum Ausschläge auf, da die Schlosskurven perfekt eingefahren sind, während sich die Häufigkeit der Ausschläge an der neuen Maschine insbesondere bei neuen Nadeln deutlich erhöht.

1.5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Validierungsversuche bestätigen zunächst die im Vorfeld durchgeführten Versuche bezüglich der Überwachung des Maschinenzustandes. Der Schmierzustand kann gut über Beschleunigungssensorik sowie AE-Sensorik überwacht werden. Zusätzlich zu den Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass auch Einflüsse der Lager bzw. neuer und alter Nadelsätze einen Einfluss auf die Schwingungen an Rundstrickmaschinen haben und entsprechend mit Beschleunigungssensoren überwacht werden können. Offen bleiben die genaue Ursache und Auswirkungen von kurzen Stößen, welche vermutlich durch ein „Anecken“ der Nadeln entstehen. Insbesondere ist deren Auswirkungen auf die Lebensdauer von Nadeln und Schlossteilen unklar und sollte ein Gegenstand für zukünftige Untersuchungen sein. Neben der Überwachung konnte in jedem Fall an verschiedenen Rundstrickmaschinen eindeutig gezeigt werden, dass die Schmierung zu einer Reduktion von Schwingungen und zu einer Reduktion der Anzahl von Ausschlägen führt.

Im Bereich der Überwachung mit AE-Sensorik wurden mehrere Handlungsfelder für zukünftige Entwicklungen identifiziert:

1. **Sensorik und Positionierung:** Gezielte Anpassungen der Sensorik (z. B. Materialien, Frequenzbandbreite) sowie eine Optimierung der Sensorpositionierung können die Erkennungsgrenzen verfeinern.
2. **Transiente Filter:** Die Intensivierung der Entwicklung transienter Filter ist erforderlich, um die Fehlererkennung unter praxisnahen Bedingungen (Drehzahlen > 35 rpm) zuverlässiger zu machen. Dabei handelt es sich um spezielle Filterverfahren, die zur Erfassung und Analyse von kurzzeitigen, vorübergehenden Schwingungsereignissen (Transienten) in Festkörpern eingesetzt werden, um schnelle Signalveränderungen präzise zu detektieren und auszuwerten.
3. **Mustererkennung und Feature-Extraktion:** Für die Erkennung leicht verbogener Nadeln in Zylinder und Rippscheibe sind intensivere Mustererkennungsmethoden sowie die Berechnung spezifischer Features

(z. B. frequenzabhängige Kenngrößen oder zeitliche Korrelationen) erforderlich, um die Sensitivität der KI-Modelle zu steigern.

Diese Erkenntnisse unterstreichen, dass die Körperschallanalyse ein vielversprechendes Werkzeug für eine vorausschauende Wartung im Rundstrickprozess darstellt, jedoch durch technische Optimierungen und algorithmische Fortentwicklungen an industrielle Anforderungen angepasst werden muss.

1.6 Transfer

Der Transfer der Forschungsergebnisse erfolgte und erfolgt antragsgemäß. Detaillierte Maßnahmen sind in den Kapiteln 5, 6 und 7 dargestellt.

2 Verwendung der Zuwendung

2.1 Forschungsstelle 1 (STFI)

2.1.1 Wissenschaftlich-technisches Personal

Im Bereich des wissenschaftlich-technischen Personals kamen für die Bearbeitung des Projektes 3 Mitarbeiter zum Einsatz, für welche insgesamt 18,4 Personenmonate abgerechnet wurden. Die Verteilung der Personenmonate auf die Kalenderjahre ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Einsatz der Mitarbeiter je Kalenderjahr für Forschungsstelle 1

Jahr	Personenmonate
2023	7,25
2024	9
2025	2,15
Summe	18,4

2.1.2 Geräte

Die Anschaffung der beantragten Geräte (Spezialrechner und Highspeedkamera) erfolgte nach Ausschreibung. Die Highspeedkamera kam in den Arbeitspaketen 2, 3 und 6 zum Einsatz. Der Spezialrechner kam seit Arbeitspaket 2 durchgehend zum Einsatz. Ohne die aufgeführten Geräte wäre die Projektbearbeitung erheblich eingeschränkt bzw. nicht möglich gewesen, sodass deren Anschaffung zwingend erforderlich war.

2.1.3 Leistungen Dritter

Teil der Projektarbeit waren Untersuchungen zur akustischen Erfassung von Nadelfehlern beim Rundstrickprozess und deren Auswertung. Dabei sollten spezifische Geräusche schleifender oder kollidierender Nadeln von den Hintergrundgeräuschen der normalen Produktion getrennt werden. Darauf aufbauend waren KI-Algorithmen zu entwickeln, welche es ermöglichen, aus den Körperschalldaten charakteristische Muster für schleifende bzw. kollidierende Nadeln zu erkennen.

Das STFI ist weder personell noch anlagentechnisch in der Lage, die notwendigen Körperschalldaten effizient zu erfassen. Daher wurde ein Unterauftrag an die Firma AMITRONICS Angewandte Mikromechatronik GmbH Engineering, München, vergeben. Das Unternehmen ist spezialisiert auf derartige Untersuchungen und besitzt um-

fangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der akustischen Zustandserfassung, insbesondere auch bei textilen Herstellungsprozessen.

Die Durchführung des Projektes wäre ohne die effiziente Erfassung der Körperschalldaten durch einen Partner mit entsprechend hoher Expertise nicht möglich gewesen.

2.2 Forschungsstelle 2 (IWU)

2.2.1 Wissenschaftlich-technisches Personal

Im Bereich des wissenschaftlich-technischen Personals gab es leichte Änderungen im Vergleich zum Einzelfinanzierungsplan des Antrags. Aufgrund der Verschiebung der Arbeitsinhalte hin zu explorativen Arbeiten und dafür weniger technischen Implementierungsaufgaben wurden weniger wissenschaftliche Hilfskräfte und weniger wissenschaftlich-technisches Personal der Kategorie HPA B statt im Antrag angegeben eingesetzt. Dafür stieg der Anteil der Mitarbeit von wissenschaftlich-technischen Personal im Projekt. Die insgesamt 26,54 Personenmonate verteilen sich auf 23,14 Personenmonate für wissenschaftlich-technisches Personal der Kategorie HPA A, 2 Personenmonate für wissenschaftlich-technisches Personal der Kategorie HPA B und 1,4 Personenmonate für Hilfskräfte.

2.2.2 Geräte

Wie im Antrag beschrieben wurden keine Geräte angeschafft.

2.2.3 Leistungen Dritter

Leistungen Dritter wurden wie im Antrag erwähnt nicht in Anspruch genommen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In Übereinstimmung mit dem Arbeitsplan konnten die im Projekt durchzuführenden Arbeitspakete und Aufgaben erfolgreich bearbeitet werden. Deren positive Bearbeitungsergebnisse haben zur Erreichung des Forschungsziels geführt. Der dafür getätigte Aufwand war notwendig und angemessen. Innerhalb der Projektbearbeitung waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

Die von den Forschungsstellen 1 (STFI) und 2 (IWU) erzielten Arbeitsergebnisse entsprechen den im Projektantrag formulierten Aufgaben und rechtfertigten die geplanten, eingesetzten und abgerechneten Leistungen.

Die angeforderten Fördermittel wurden für die geplanten Arbeiten verausgabt.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die im Projekt erzielten Erkenntnisse und das Knowhow zu den technologischen Zusammenhängen im Bezug auf Nadelfehlererkennung und Überwachung des Maschinenzustandes ermöglichen eine zeitnahe Nutzung für industrielle Anwendungen. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass sich AE-Sensorik für die Überwachung von Nadelfehlern prinzipiell eignet. Ebenso konnte die Überwachung des Maschinenzustandes insbesondere des Schmierzustandes auf Basis von Beschleunigungssensorik bzw. AE-Sensorik nachgewiesen werden. Im Bereich

der Sensorik konnten Art und Lage bzw. Befestigung der Sensorik untersucht werden sowie deren Tauglichkeit für die Überwachung nachgewiesen werden. Edge-PCs bzw. im Allgemeinen Rechen-technik zur Auswertung von Beschleunigungsdaten sind u.a. von den Firmen des pbA IDS Innomic und MMF bereits verfügbar. Für die Auswertung von Sensordaten aus Körperschallsensoren bietet u.a. die Firma Amitronics (pbA-Mitglied) entsprechende Systeme an. Durch die Intensivierung der Mustererkennung, der Berechnung geeigneter Features und die Entwicklung von transienten Filtern ist eine weitere Optimierung der Fehlererkennung bei verbogenen Nadeln in Zylinder und Rippscheibe unter praxisnahen Bedingungen (Drehzahl > 35 U/min) möglich. Mit gezielten Anpassungen in Sensorik, Positionierung, Filtertechniken und Datenauswertung ist das AE-Sensorik-System damit zukünftig in der Lage noch zuverlässigere Ergebnisse zu liefern – auch bei höheren Drehzahlen und bei sehr geringen Verformungen von Nadelzungen .

Auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse können nach einer Transfer- und Produktentwicklungsphase neuartige Überwachungssysteme am Markt platziert werden. Entsprechendes Interesse wurde dabei im pbA sowohl von Produzenten als auch Herstellern von Strick- bzw. Wirkmaschinen signalisiert.

Neben der Möglichkeit die Ergebnisse direkt für Anbieter von Sensor- und Überwachungslösungen in ein eigenes Produkt zu überführen, sind die Erkenntnisse ebenfalls für Hersteller von Textilmaschinen sowie ggf. Nadelhersteller sowie für Anwender bzw. Produzenten interessant. Die gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Schmierung auf die Beschleunigungen und demzufolge den Verschleiß von Maschinenteilen und Nadeln kann direkt für Produzenten insbesondere KMU für Anpassungen von Schmiereinstellungen bzw. der Vorgehensweisen zur Schmierung genutzt werden. Weitere Nutzungsmöglichkeiten bestehen außerdem auf Seiten der Maschinenhersteller, welche die Überwachungssysteme einerseits direkt in die Infrastruktur der Maschine integrieren können bzw. die Erkenntnisse auch zur Weiterentwicklung der Maschinen nutzen können.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Zur Nutzung für die Wirtschaft wurden verschiedene Maßnahmen zum Wissenstransfer in die Wirtschaft durchgeführt. Zunächst wurden alle Zwischen- und Endergebnisse in den pbA-Sitzungen präsentiert. Teilergebnisse und Neuigkeiten bzw. eine Projektübersicht wurden auf Social-Media-Plattformen (u.a. LinkedIn) veröffentlicht und von den Accounts der Forschenden sowie der Forschungsstelle beworben. Über LinkedIn wurde zudem auch unmittelbares Interesse von weiteren Firmen (u.a. Groz-Beckert, Bauerfeind) am Projekt gewonnen, welche das Projekt im weiteren Verlauf auch aktiv unterstützt haben. Weiterhin wurden Gäste, Forschungspartner und insbesondere interessierte Industrieunternehmen im Rahmen von Besuchen der Forschungsstellen auf das Projekt aufmerksam gemacht und den interessierten Partnern Teilergebnisse präsentiert.

Die in Kapitel 1.1 erwähnte Umfrage zu Erfahrungen mit typischen Problemen bei Rundstrickmaschinen wurde sowohl den Mitgliedern des pbA als auch weiteren Unternehmen der Verteiler des STF1 und des IWU mit der Bitte um Unterstützung des Projektes zur Verfügung gestellt. Nicht zuletzt wurde die Umfrage auf LinkedIn gepostet. Sie stellte eine wichtige bidirektionale Transfermaßnahme dar, da sie nicht nur der Datenerhebung für das Forschungsprojekt diente, sondern gleichzeitig als Sensibilisierungsinstrument für die angesprochenen Unternehmen fungierte. Durch die gezielte Ansprache der Industriepartner über die etablierten Verteilernetze bei der Forschungsinstitute konnte das Bewusstsein für die Projektinhalte und deren praktische Relevanz in der Wirtschaft geschärft werden. Die Unternehmen erhielten dabei bereits in der Erhebungsphase Einblicke in die Problemstellungen und Lösungsansätze des Projekts, was den Grundstein für weiterführende Kooperationen und den späteren Transfer der Forschungsergebnisse legte.

Ein weiterer bedeutender Baustein des Wissenstransfers war die Erstellung eines Videobeitrags, der die Projektbearbeitung sowie die zentralen Forschungsinhalte dokumentiert. In diesem Video werden der industrielle Kontext, die Problemstellung und die entwickelten Lösungsansätze anschaulich dargestellt. Zur besseren Verständlichkeit komplexer Funktionsweisen wurden neben Realaufnahmen auch animierte Sequenzen eingesetzt. Das Video wurde sowohl auf dem YouTube-Kanal des STFI als auch auf LinkedIn veröffentlicht und hat dort ein breites Interesse erzielt, wie die zahlreichen Aufrufe und positiven Rückmeldungen eindrucksvoll belegen.

Eine Übersicht über die während des Projektes durchgeführten Transfermaßnahmen ist in Abschnitt 6 dargestellt.

Nach Projektlaufzeit wurden die Projektergebnisse vom STFI auf der INTEC-Messe in Leipzig präsentiert. Zudem sind Präsentationen auf Tagungen geplant und eine Veröffentlichung der abschließenden Projektergebnisse auf der Homepage des STFI, in Blog-Beiträgen sowie auf weiteren Plattformen geplant. Zudem ist ein weiterer LinkedIn-Beitrag zum Projektabschluss bzw. den Präsentationen der Ergebnisse geplant. Alle noch geplanten Transfermaßnahmen sind in Abschnitt 7 aufgeführt.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
Information der Unternehmen im pbA	Unterstützung der aktiv beteiligten pbA-Mitglieder für die Projektidee; Involvieren der Wirtschaft	STFI, hybrid: 1. Sitzung des pbA	11.05.2023
Veröffentlichung	Allgemeine Verbreitung des Forschungsthemas	Forschungsstelle 1: • Newsveröffentlichung auf der Website des STFI ¹	27.04.2023
		Forschungsstelle 2: • Verbreitung der LinkedIn-Beiträge • Vorstellung bzw. Präsentation des Projektes und der Methoden an interessierte Forschungspartner bzw. Gäste	08/2023
Umfrage	<ul style="list-style-type: none"> weitere Interessenten finden Bearbeitung von AP1 – Parameterdefinition 	LinkedIn ²	08/2023

1 <https://www.stfi.de/aktuelles/meldungen/meldungen-detailseite/projektbeginn-munamo>

2 https://www.linkedin.com/posts/saechsisches-textil-forschungs-institut_stfi-forschung-wissenschaft-activity-7095692129527574528-EJw9?utm_source=share&utm_medium=member_desktop_FEED%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse

Diskussion und Vorstellung ausgewählter Projektergebnisse mit pbA-Mitgliedern	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung der aktiv beteiligten pbA-Mitglieder für die Projektidee • Involvieren der Wirtschaft 	Bilaterale Kommunikation (Email, Telefonate)	fortlaufend
Information der Unternehmen im pbA	Unterstützung der aktiv beteiligten pbA-Mitglieder für die Projektidee; Involvieren der Wirtschaft	IWU, hybrid: 2. Sitzung des pbA	15.03.2024
Information der Unternehmen im pbA	Unterstützung der aktiv beteiligten pbA-Mitglieder für die Projektidee; Involvieren der Wirtschaft	STFI, hybrid: 3. Sitzung des pbA	30.10.2024
Projektvideo	Information der breiten Öffentlichkeit über Projekt	LinkedIn ³ YouTube-Kanal ⁴	04.10.2024
Information der Unternehmen im pbA	Abschlusspräsentation und Beratung zu weiterem Vorgehen mit aktiv beteiligten pbA-Mitglieder; Involvieren der Wirtschaft	STFI, hybrid: 4. Sitzung des pbA	02/2025

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Neben den bereits durchgeführten Transfermaßnahmen sind nach der Projektlaufzeit noch weitere Transfermaßnahmen geplant. Diese sind in 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
INTEC-Messe	Informationen zum MuNaMo-Projekt für interessierte Firmen	Messgelände Leipzig – Stand des STFI	11.- 14.03.2025
Tagung der Internationalen Föderation der Wirkerei- und Strickereifachleute e.V. (IFWS) Landessektion Deutschland	Vortrag zu den Ergebnissen von MuNaMo für teilnehmende Mitglieder des IFWS e.V.	Mitgliederversammlung des IFWS e.V. am STFI	22.- 24.06.2025
Blogbeitrag im Blog	Information für interessierte	Veröffentlichung im Blog des	06/2025

3 [https://www.linkedin.com/posts/saechsisches-textil-forschungs-institut_forschung-wissenschaft-innovation-activity-7270364451667640320-5wDX?](https://www.linkedin.com/posts/saechsisches-textil-forschungs-institut_forschung-wissenschaft-innovation-activity-7270364451667640320-5wDX?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAEWNEJABebbiYmnztVspOArhw7xscrEpuVk)

4 <https://www.youtube.com/watch?v=ZeaiKjfcvZs>

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
https://www.kognitive-produktion.de/	Leser; Involvieren der Wirtschaft	Fraunhofer IWU	
Vortrag im Rahmen einer Tagung	Veröffentlichung von Projektergebnissen und Involvieren der Wirtschaft	10. Sächsischer Tag der Automation	25.06.2025
Veröffentlichung zusammengefasster Ergebnisse	Information für interessierte Leser; Involvieren der Wirtschaft	Veröffentlichung in Jahresberichten des STFI und auf Homepage	06/2025
LinkedIn-Beitrag zum Projektarbeit	Verbreitung der Ergebnisse in Social Media; Involvieren der Wirtschaft	LinkedIn-Beitrag mit Verweis auf Veröffentlichungen (z.B. IFWS-Tagung) und Projektberichte	07/2025
Präsentation der Projektergebnisse	Informationen an Interessierte Firmen	Präsentation der Ergebnisse für Gäste des STFI und IWU	fortlaufend

8 Literaturverzeichnis

1: Smith, Grant Maloy, What is OPC UA?, 2024, <https://dewesoft.com/blog/what-is-opc-ua>

2: Paessler GmbH, IT Explained: OPC UA, 2025, <https://www.paessler.com/it-explained/opc-ua>