

# Schlussbericht vom 02.05.24

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21778 N

## Thema

Erhöhung der Prozesskontrolle in der Pultrusion mit hochreaktiven Matrixmaterialien zur Reduktion von Ausschuss und Ausfallzeiten mithilfe eines datenbasierten Prozessüberwachungssystems

## Berichtszeitraum

01.09.2021 bis 30.11.2023

## Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen – IKV

Seffenter Weg 201, 52074 Aachen

Gefördert durch:

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN</b> .....	<b>5</b>
3.1	Pultrusionsprozess zur Herstellung Endlosfaser verstärkter Profile .....	5
3.2	Herausforderungen in der Prozessüberwachung bei der Pultrusion .....	6
3.3	Einsatz von Soft-Sensoren zur Prozessüberwachung.....	8
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSZIEL UND LÖSUNGSWEG</b> .....	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>DIGITALER RETROFIT EINER PULTRUSIONSANLAGE</b> .....	<b>12</b>
5.1	Erfassung eines priorisierten Fehlerkataloges .....	12
5.2	Erstellung eines Wirkungsplans für den Pultrusionsprozess.....	14
5.3	Datenerfassung und Struktur der Datenaufzeichnung .....	19
<b>6</b>	<b>SYSTEMATISCHE GENERIERUNG VON PROZESSDATEN</b> .....	<b>22</b>
6.1	Entwicklung des Versuchsplans .....	22
6.2	Erprobung der Sensorik und Identifikation Anlagen spezifischer Datenfragmente .....	23
6.3	Erfassung der Qualitätsdaten .....	25
<b>7</b>	<b>FUNKTIONSENTWICKLUNG UND KALIBRIERUNG VON SOFTSENSOREN</b> .....	<b>27</b>
7.1	Erläuterung der Prozessdatenaufbereitung und Verarbeitung .....	27
7.2	Erläuterung der Qualitätsdatenverarbeitung.....	28
7.3	Diskussion der erfassten Prozessdaten innerhalb des Versuchsraums .....	29
7.4	Bestimmung der Korrelationen zwischen Prozess- und Qualitätsgrößen.....	34
<b>8</b>	<b>GUIDELINE ZUR INSTALLATION VON SOFTSENSOREN FÜR SPEZIFISCHE FEHLERBILDER</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK</b> .....	<b>42</b>
<b>10</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN</b> .....	<b>43</b>
<b>11</b>	<b>VERWENDUNG DER ZUWENDUNG</b> .....	<b>44</b>
11.1	Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)...	44
11.2	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) .....	44
11.3	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) .....	44
<b>12</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR KMU</b> .....	<b>45</b>
12.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen .....	45
12.2	Wirtschaftlicher Nutzen .....	45
<b>13</b>	<b>ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT</b> .....	<b>47</b>
13.1	Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen .....	47
13.2	Nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen .....	49
<b>14</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN UND STUDENTISCH-WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN</b> .....	<b>51</b>

---

<b>15</b>	<b>ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES .....</b>	<b>52</b>
15.1	Abkürzungen .....	52
15.2	Formelzeichen .....	52
15.3	Indizes .....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<b>16</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>53</b>

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Ein wichtiges Verfahren zur Herstellung von Profilen aus faserverstärkten Kunststoffen ist das Pultrusionsverfahren, dessen Produkte in einer Vielzahl von Branchen Anwendung finden und bei dem die Fasern kontinuierlich mit reaktiven Harzen getränkt, in Form gebracht und ausgehärtet werden. Für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Pultrudeure in Deutschland sind kontinuierliche Innovationen notwendig, da immer strengere Emissions- und Arbeitsschutzrichtlinien eingehalten werden müssen. Ein Ansatz ist die Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit, die insbesondere durch den Einsatz innovativer und hochreaktiver Werkstoffe wie PUR oder in-situ polymerisierende Thermoplaste erreicht werden kann. Die Verarbeitung dieser Materialien führt aufgrund nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen reaktivem Material und Prozessparametern zu einer Verkleinerung des Prozessfensters und damit zu einer Verringerung der Prozessrobustheit.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden Fehlerbilder von Pultrusionsprofilen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) diskutiert und priorisiert. Die Fehlerbilder dienten als Ausgangspunkt für die informationstechnische Beschreibung des Pultrusionsprozesses. In dieser Beschreibung wurden die Fehlerbilder über physikalische Effekte während des Prozesses mit Messgrößen bzw. den zugehörigen Sensoren verknüpft. Auf Basis der Wirkungsbilder des Pultrusionsprozesses können Sensoren für unterschiedliche Überwachungsaufgaben ausgewählt werden. Außerdem dienen die so dargestellten Zusammenhänge als Anhaltspunkte für Soft-Sensoren. Die Verknüpften Messwerte können auf Korrelationen mit den entsprechenden Fehlerbildern hin untersucht werden.

Die Pultrusionsanlage des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) wurde mit einem Sensorkpaket ausgerüstet und mit einem Datenerfassungs- und Speichersystem ausgestattet. Die Prozessdaten werden in einer SQL-Datenbank gespeichert und durch umfangreiche Metadaten ergänzt, die für die Interpretation notwendige Informationen enthalten. Die Prozess- und Metadaten werden durch eine Versuchs-ID eindeutig zugeordnet. Nach der Installation des Datenerfassungssystems wurde ein 3<sup>2</sup>-Versuchsplan durchgeführt, der die Variation von Werkzeugtemperatur, Faservolumengehalt und Abzugsgeschwindigkeit in zwei Stufen umfasst. Als Grundlage für die Entwicklung von Softsensoren stehen die Prozessgrößen Abzugskraft, Druck und Temperatur in der Injektionsbox, sowie die Qualitätsgrößen für die Oberflächenbeschaffenheit des Profils Belag, Welligkeit und Trockenfaser zur

Verfügung. Die Oberfläche wurde im Anschluss an die Versuche manuell bewertet und den Prozessdaten zugeordnet.

Die Auswertung der durchgeführten Versuche zeigt, dass eine starke Abhängigkeit der Abzugskraft von Injektionsboxdruck und -Temperatur besteht. Die Abzugskraft kann in Kombination mit weiteren Prozessgrößen ein einen Soft-Sensor für den Prozesszustand darstellen. Darüber hinaus konnte ein stabiles Prozessfenster (minimale Fehlerraten der Qualitätsgrößen) identifiziert werden, welches durch eine Kombination aus Werkzeugtemperatur und Injektionsboxdruck beschrieben werden kann. Für Injektionsboxdrücke zwischen 0,09 bar und 0,17 bar wurde für Werkzeugtemperaturen von 180 °C ein nahezu fehlerfreies Profil hergestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass die vorgestellte Methodik für die Entwicklung von Soft-Sensoren zur Identifikation und Überwachung von stabilen Prozesspunkten geeignet ist. Dabei ist der Einsatz von Sensoren in der Injektionsbox zu empfehlen, da diese für den Zustand des Prozesses die kritische Position darstellt. Es können Rückschlüsse auf die Imprägnierqualität sowie den Reaktionsfortschritt des Harzsystems gezogen werden.

## 2 EINLEITUNG

Der Pultrusionsprozess zeichnet sich als etablierter kontinuierlicher FVK-Bauteilherstellungsprozess durch seine hohe Produktivität und den hohen Automatisierungsgrad aus. So weisen gut eingestellte Prozesse mit trägen Harzsystemen und Verarbeitung im offenen Bad Ausschussraten von unter 5 % auf, wobei für komplexere Profile und die Produktion von kleinen Losgrößen höhere Ausschussraten in Kauf genommen werden müssen [Sum12].

Die aktiv steuerbaren Prozessparameter in der Pultrusion sind auf die Abzugsgeschwindigkeit und die Temperaturführung im Werkzeug beschränkt, sodass bei einer Prozessoptimierung immer das gesamte Produktionssystem, also insbesondere auch Material- und Werkzeugeigenschaften, berücksichtigt werden müssen. Die notwendige Prozessoptimierung hinsichtlich Produktivität durch Produktionsgeschwindigkeitserhöhung kann durch unterschiedliche Maßnahmen realisiert werden. Zum einen kann das Werkzeug verlängert werden, was jedoch durch die Anlagentechnik hinsichtlich verfügbaren Platzes und überwindbaren Abzugskräften begrenzt wird. Zum anderen stellt der Einsatz schneller aushärtender Matrixmaterialien einen vielversprechenden Optimierungsansatz dar.

Die Verarbeitung hochreaktiver Harzsysteme erfordert jedoch aufgrund des kürzeren Verarbeitungszeitraums auch eine bessere Kontrolle der Verweilzeit des Harzes im Prozess, sodass der Einsatz von Injektionsboxen in den meisten Fällen unerlässlich ist. Darüber hinaus bedeutet eine Verdopplung der Abzugsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Werkzeuglänge eine Halbierung der Verweilzeit des Materials im Werkzeug. Es muss jedoch auch für hochreaktive Matrixsysteme genügend Energie zur Aktivierung und Aufrechterhaltung der chemischen Reaktion zugeführt werden sowie ausreichend Zeit für den Energieeintrag und chemische Reaktion bleiben.

Näherungsweise kann die Reaktionsgeschwindigkeit durch eine Erhöhung der Temperatur um 10 K verdoppelt werden, sodass auch schon kleine Temperaturabweichungen zu signifikanten Abweichungen im Prozess führen können. Darüber hinaus werden die im Werkzeug ablaufenden Temperatenausgleichsprozesse durch die Eigenschaft des Kunststoffes als schlechter Wärmeleiter und die Exothermie der Aushärtungsreaktion zusätzlich komplexer. Da die Zeit für Temperatenausgleichsprozesse den entscheidenden Faktor darstellt, sinkt die Prozessstabilität für kürzere Verweilzeiten, sodass Abweichungen im Prozess schneller zu verminderter Produktqualität durch unvollständige Aushärtung oder Prozessabbrüchen durch eine unkontrollierte Reaktion führen können.

Obwohl es in der Pultrusion mit Injektionsboxen nur zwei aktiv steuerbare Parameter gibt, identifiziert Krebs insgesamt 105 Einflussparameter, die die Bauteilqualität beeinflussen [Kre18]. Dementsprechend gibt es eine große Anzahl von Wechselwirkungen, die berücksichtigt werden müssen und mit steigender Prozessgeschwindigkeit potenziell kritisch werden können. Um dieser Komplexität gerecht zu werden, müssen eine zunehmende Anzahl der Prozessparameter überwacht werden. Zur Auswertung der komplexen Relationen zwischen den einzelnen Größen sind modellbasierte datengetriebene Assistenzsysteme zur Unterstützung des Werkers sinnvoll, da regulierende Eingriffe in einem zunehmend kleineren Zeitfenster erfolgen müssen. Denn eine unkoordinierte Unterbrechung des Pultrusionsprozesses mit hochreaktiven Materialien sind aufgrund des hohen Reinigungsaufwands und den damit verbundenen Stillstandszeiten bzw. Produktivitätsminderungen unbedingt zu vermeiden. Außerdem stellt die Quantifizierung des Prozesszustands die Grundlage zur Prozessoptimierung dar.

Da sich die Pultrusion durch eine Vielzahl von Anwendungen auszeichnet und dementsprechend diverse produktspezifische Prozessanpassungen und -variationen entwickelt wurden, findet sich in der industriellen Anwendung eine große Varianz der Anlagentechnik und insbesondere in der produktspezifischen Werkzeugtechnik. Der Bestand umfasst Jahrzehnte alte Anlagen, die auf die individuellen Anforderungen angepasst worden sind ebenso wie hochmoderne Anlagen, die bereits über Sensorik und Schnittstellen zur Übertragung der gemessenen Daten verfügen. Darüber hinaus sind die Produktlosgrößen selten so groß, dass die Investition in werkzeugintegrierte Sensorik gerechtfertigt wäre. Dementsprechend bestehen unterschiedliche Herausforderungen bei der Implementierung eines wirkungsvollen Produktionsanalysetools. Bestandsanlagen müssen zunächst mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet werden und die erfassten Daten, die in neueren Anlagen verfügbar sind, anschließend der datengetriebenen Prozessanalyse zugeführt werden.

### 3 GRUNDLAGEN

Zunächst wird eine kurze Einleitung in den Stand der Technik zu den Themen Pultrusion und Soft-Sensoren gegeben. Außerdem werden die Grundlagen für die im Bericht dargelegten Wirkzusammenhänge erläutert.

#### 3.1 Pultrusionsprozess zur Herstellung Endlosfaser verstärkter Profile

Die zur Herstellung des Pultrusionsprofils verwendeten Faserhalbzeuge wie Rovings oder Vliese werden in einem Faserregal vorgehalten. Über einer Faserführung, die die räumlich korrekte Ausrichtung der Halbzeuge zueinander sicherstellt, werden die Halbzeuge dem Imprägnierwerkzeug zugeführt. Die Faserführung stellt sicher, dass die Halbzeuge nicht überkreuzt einlaufen, Schlaufen bilden und Rovings möglichst ohne Verdrillung eingezogen werden. Zur Faserimprägnierung wird ein Harzbad oder eine Injektionsbox verwendet. Diese sind dem Pultrusionswerkzeug vorgeschaltet und im Falle der Injektionsbox direkt mit dem Pultrusionswerkzeug verbunden. Das Werkzeug hat die Aufgabe, die für die Vernetzungsreaktion benötigte thermische Energie zuzuführen. Das konsolidierte Profil wird bspw. mit alternierenden Greifern abgezogen. Die benötigte Abzugskraft lässt sich analytisch beschreiben setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen [Bar15, SCA18]:

- Reibung entlang der Faserführung
- Kompression der Faserhalbzeuge und Druckaufbau in der Injektionsbox
- Viskoser Widerstand des Matrixsystems vor Erreichen des Gelpunktes
- Festkörperreibung von Fasern und konsolidiertem Profil am Werkzeug

Abschließend wird das Profil durch eine mitlaufende Säge abgelängt. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Pultrusionsanlage. Weitere zentrale Prozessgrößen die i. d. R. anlagenseitig überwacht werden sind die Abzugsgeschwindigkeit und die Werkzeugtemperatur.

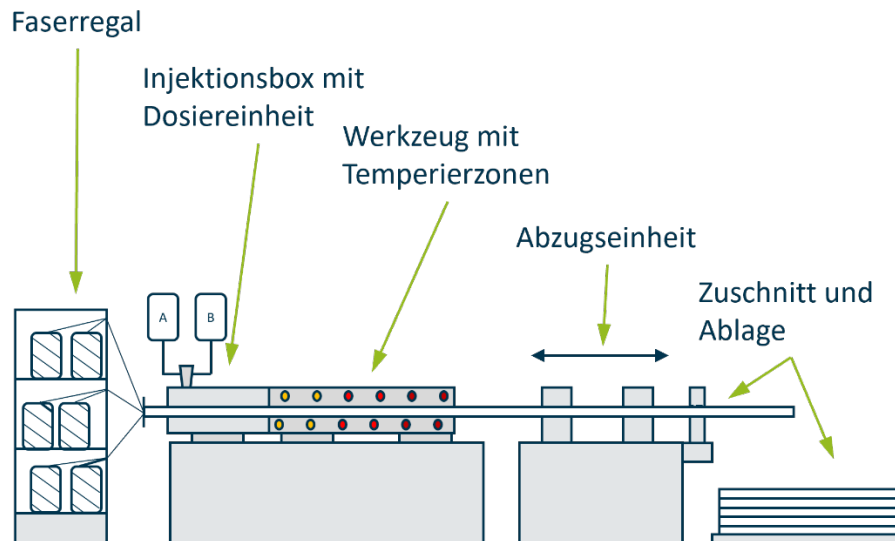


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Pultrusionslinie

### 3.2 Herausforderungen in der Prozessüberwachung bei der Pultrusion

Der Pultrusionsprozess wird bereits seit vielen Jahrzehnten erfolgreich in der Industrie angewendet, sodass ein umfangreiches Prozesswissen bei den Verarbeitern vorhanden ist. Darüber hinaus konnte durch wissenschaftliche Untersuchungen umfangreiches Hintergrundwissen zum Prozessverhalten entwickelt werden.

Dennoch ist aufgrund der zugrundeliegenden Komplexität, die durch die chemische Reaktion im Prozess hervorgerufen wird, wenig über die quantifizierbaren Zusammenhänge von Prozessparametern und relevanten Qualitätsmerkmalen (wie z. B. optische Erscheinung, Geometrie und mechanische Eigenschaften) bekannt. So beschreibt *Sumerak* eine Vielzahl von potenziellen Fehlern im Pultrusionsprozess, die die optischen oder funktionellen Eigenschaften des Pultrudats negativ beeinflussen [Sum12]. Dabei treten diese Fehler auf der Oberfläche, im Querschnitt oder in der dreidimensionalen Form auf. Allgemein sind diese Fehler auf die folgenden Aspekte oder einer Kombination aus diesen zurückzuführen: *Materialien*, *Methoden* oder *Prozessparameter* [Sum12]. In diesem Zusammenhang meint *Methoden* insbesondere die Anlagen- und Werkzeugtechnik. Die Europäische Norm EN 13706 definiert diverse Fehlerbilder und unterteilt diese in „Sichtbare Mängel“, „Zulässige Maßabweichungen“ und „Technische Ausführung“ [NN03].

Obwohl die Vielzahl der Fehlerbilder und deren mögliche Ursachen bekannt sind, erfolgt in der Regel eine Prozessüberwachung in der industriellen Anwendung aufgrund der großen Prozessrobustheit, wenn überhaupt, in Einzelfällen für Produkte mit besonderen Anforderungen, wie bspw. Kohlenstofffasern. Zusätzlich werden in

der Forschung weitere werkzeug-integrierte Sensoren eingebracht und vornehmlich für die Validierung von Simulationen genutzt [Bez17].

Ergänzend zu analytischen Ansätzen zur Bestimmung der Abzugskraft, gibt es eine Vielzahl von modellbildenden und simulativen Arbeiten, die umfassend durch *Safanov et al.* aufgearbeitet und zusammengefasst wurden [SCA18]. Die Entwicklung umfasst thermo-chemische, (z. B. [TMKN90]) und thermo-chemisch-mechanische Modelle (z. B. [Bar14]) sowie darüber hinaus auch Ansätze zur Berücksichtigung der Faserimprägnierung (z. B. [Bez17]).

Dennoch ermöglichen die Simulationen nur eine idealisierte Darstellung des Prozesszustands, da ein stationärer Zustand unter vereinfachenden Annahmen (wie bspw. homogenisierten und gemittelten Matrix- und Fasereigenschaften) beschrieben wird und die Materialcharakterisierung sehr aufwändig ist, sodass zusammenfassend die Prozesssimulation in der Pultrusion mit hochreaktiven Matrixmaterialien bisher eine wenig überzeugende Lösung für die Prozessanalyse darstellt. Dennoch sind die entwickelten Modelle eine gute Grundlage für die Modellierung des Systemverhaltens im Rahmen der Wirkungspläne, die für die datenbasierte Prozessanalyse herangezogen werden können [BCE+17].

Der Pultrusionsprozess verfügt über lediglich zwei Steuergrößen, die Abzugsgeschwindigkeit und die Heizleistung im Werkzeug. Für eine Prozessüberwachung oder -optimierung muss immer das gesamte System betrachtet werden. Das bedeutet das insbesondere Material und Werkzeugeigenschaften berücksichtigt werden müssen. Allgemein kann das Prozessfenster in der Pultrusion in Abhängigkeit der unabhängigen Parameter und den limitierenden Faktoren, wie in Abbildung 2 dargestellt, beschrieben werden. Diese Darstellung beinhaltet Material- und Werkzeugeigenschaften jedoch nur implizit, wie zum Beispiel die zur Aktivierung der Reaktion notwendige Energie sowie die für die Reaktion notwendige Zeit.

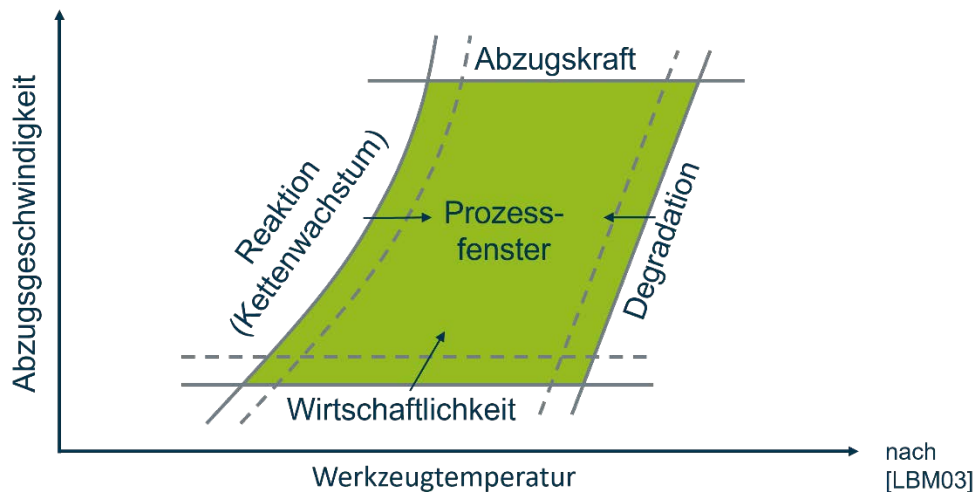


Abbildung 2: Prozefenster in der Pultrusion nach [LBM03]

### 3.3 Einsatz von Soft-Sensoren zur Prozessüberwachung

Für die Umsetzung einer umfassenden datenbasierten Prozessauswertung mit Soft-Sensoren ist es zunächst notwendig, die Daten zu kontextualisieren, was durch eine formalisierte Beschreibung des Pultrusionsprozesses erreicht werden kann. Denn bei einem Soft-Sensor, auch virtueller oder Software-Sensor genannt, handelt es sich um eine Abhängigkeitsbeschreibung von stellvertretenden Messwerten zu einer Zielgröße. Ein Soft-Sensor ist immer eine Akkumulation von physischen Sensoren und einer mathematischen Umwandlung. Dabei gibt es drei Methoden, um aus den Sensordaten zusätzliche Aussagen über den Prozesszustand zu treffen. Einerseits können zusätzliche Größen aus physikalischen Modellen berechnet werden. Andererseits können statistische Regressionen oder KI-Modelle Korrelationen zwischen einem oder mehreren Sensoren und relevanten Prozess- oder Qualitätsgrößen beschreiben [FGRX07, STHR20]. Ziel des Einsatzes von Soft-Sensoren ist die Reduktion kostenintensiver Hardware bzw. die Erfassung von komplexen Prozessgrößen durch günstigere Sensoren, die sonst nicht direkt messbar sind.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese allgemein eine geringe Robustheit gegenüber Veränderungen aufweisen [FGRX07]. Zur robusten Umsetzung der Soft-Sensoren muss aus diesem Grund eine Informations- und datentechnische Modellierung des Prozesses erfolgen. Das Informationsmodell umfasst semantische Zusammenhänge zwischen einzelnen modellierten Objekten einer Informationswelt, die bspw. mithilfe der Unified Modeling Language (UML) in Klassen- und Sequenzdiagrammen umgesetzt werden können. Darauf aufbauend erfolgt der Aufbau des Datenmodells, das der letztendlichen Datenstruktur (gemessene und

berechnete Werte, Einheiten, etc.) entspricht [Maj10]. In der Datenstruktur ist die ingenieurstechnische Prozessbeschreibung enthalten und umfasst insbesondere die Modellierung der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Messwerten, die als berechnete Werte der Soft-Sensoren letztendlich zur Bewertung des Prozesszustands herangezogen werden. Darauf aufbauend muss eine Analyse der Korrelationen und Sensitivität der Soft-Sensoren bezüglich der Erkennbarkeit von Prozessfehlerbildern erfolgen [HWT+18]. Darüber hinaus muss ein detailliertes Qualitätsmodell entwickelt werden, das zum einen spezifische Fehlerbilder erkennt und zum anderen eine ganzheitliche Prozessoptimierung ermöglicht. Zusätzlich muss die Granularität, die den notwendigen Detailgrad von Datensätzen beschreibt, des Datenmodells untersucht werden.

## 4 FORSCHUNGSZIEL UND LÖSUNGSWEG

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Verbesserung und Digitalisierung der Prozessüberwachung in der Pultrusion. Im kontinuierlichen und quasi-statischen Pultrusionsprozess ist viel Erfahrung und umfangreiches Prozessverständnis erforderlich, um Prozesse effektiv einzurichten und Abweichungen während der Produktion frühzeitig zu erkennen. Dies hat lange Entwicklungszeiten sowie hohe Ausschussraten zur Folge. Durch eine digitale Prozessüberwachung werden Veränderungen des Prozesszustandes mess- und sichtbar bevor sie am Profil zu erkennen sind. Dem Werker kann auf diese Weise nicht nur ein besserer Blick in den Prozess gewährt werden, sondern die Daten dienen auch zum kontinuierlichen Erkenntnisgewinn für künftige Entwicklungen. Abbildung 3 zeigt schematisch den Datenfluss und die Datenverarbeitung von der Prozessgröße hin zur Information an den Werker.

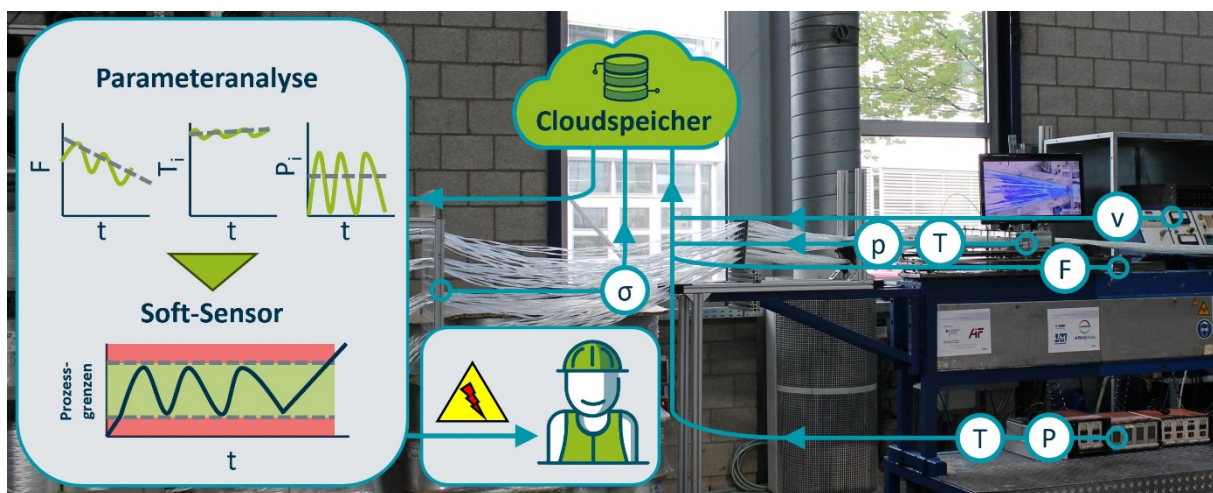


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Datenflusses und der Datenverarbeitung von der Prozessgröße zur Information an den Werker

Die kontinuierliche Prozessdatenerfassung wird durch eine kategorische Qualitätsdatenerfassung ergänzt, welche eine nachgelagerte Analyse der Prozesspunkte ermöglicht. Anhand dieser Daten können Soft-Sensoren kalibriert werden, die eine Vorhersage der Produktqualität ermöglichen. Auf diese Weise kann der Prozesszustand durch die zu erwartende Produktqualität bewertet werden.

Zur Umsetzung der Ziele wurden zunächst Wirkungspläne für den Pultrusionsprozess erstellt. Diese stellen eine Verknüpfung von Fehlerbildern und messbaren Prozessgrößen her. Anhand der Wirkungspläne wurden dann Sensoren ausgewählt, welche kostengünstig in die Pultrusionsanlage integriert werden können. Auf dieser Basis wurde der digitale Retrofit der Pultrusionsanlage inklusive des

Werkzeugs am IKV durchgeführt. Komplettiert wird die Datenerfassung durch die Datenspeicherung in einer SQL-Datenbank. Somit können die Prozessdaten live oder nachträglich verarbeitet und bewertet werden. Nachdem die Prozessdatenerfassung aufgebaut ist, wird eine repräsentative Datenbasis erzeugt. Dazu werden die zentralen Prozessparameter Werkzeugtemperatur, Abzugsgeschwindigkeit und FVG um einen stabilen Prozesspunkt variiert. Die erzeugte Datenbasis wird auf Korrelationen untersucht die als Soft-Sensoren eingesetzt werden können.

Aus den Herausforderungen bei der Prozessüberwachung in der Pultrusion leitet sich die Fragestellung ab, ob der Einsatz von Soft-Sensoren die Prozessüberwachung verbessern kann. Dies bedeutet konkret, dass aus dem begrenzten Sensorpaket im industriellen Einsatz kritische Prozessbereiche abgeleitet und aus erkannten Prozessabweichungen Handlungsempfehlungen an den Bediener abgeleitet werden müssen. Es muss herausgestellt werden, welche Prozessgrößen oder Qualitätsgrößen sich durch die beschriebenen Methoden überwachen lassen.

## 5 DIGITALER RETROFIT EINER PULTRUSIONSANLAGE

Zunächst wird ein systematischer Ansatz zur Auswahl benötigter Hardware-Sensoren diskutiert. Dabei steht der Zusammenhang zwischen Messgrößen und für das Produkt kritische Fehlerbilder im Vordergrund.

### 5.1 Erfassung eines priorisierten Fehlerkataloges

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden durch eine Literaturrecherche und eine Befragung des projektbegleitenden Ausschusses (PA) die wichtigsten Fehlerbilder im Pultrusionsprozess erarbeitet. So konnte eine sowohl wissenschaftlich fundierte als auch praxisrelevante Ausrichtung realisiert werden. Anschließend wurden die Fehlerbilder in Absprache mit dem PA priorisiert und geordnet. Auf Basis dieser Auswahl wurde ein allgemeiner Wirkungsplan des Pultrusionsprozesses erarbeitet. Anschließend wurden die Zusammenhänge mit Bezug zu den identifizierten Fehlerbildern einer genaueren Analyse unterzogen.

Neben der Norm für Pultrudierte Profile DIN EN 13706 [NN03] sind in den Arbeiten von *Sumarek* [Sum12] und *Krebs* [Kre18] Fehlerbilder im Pultrusionsprozess aufgelistet und kategorisiert. Tabelle 1 zeigt zusammengefasst mögliche Fehlerbilder auf. Die Fehlerbilder sind nach den Kategorien Oberflächendefekte, Querschnitt /Innere Fehler und Geometrieabweichung geordnet. Zwischen manchen der genannten Fehlerbildern ist keine klare Differenzierung möglich, bzw. kann es sich um eine Überlagerung von verschiedenen Fehlern handeln, die sich teils gegenseitig bedingen. So kann z. B. Verzug im Profil zu Rissen und Delamination führen. Aus diesem Grund wird im Anschluss ein priorisierter Fehlerkatalog diskutiert, welcher in Abstimmung mit dem PA erstellt wurde.

Oberfläche	Querschnitt	Geometrie
Einfallstellen	Rissbildung	Verzug
Fehlstellen, Nadellöcher	Hohlräume (Poren)	Biegung
Risse	Mattenfalte (Ecke)	Verdrehung
Abrieb	Mattenfalte (Kante)	Längenänderung
Schuppung	Lageneinzug ins Profil	Maßhaltigkeit
Schleierabdeckung	Rovingverschiebung	Profilgenauigkeit, Kontur
Niedriger Glanz	Delamination	Winkel
Blasen	Trockene Fasern	Riefen
Styrol Schlierenbildung	Rovingfalte (Lockenbildung)	
Verfärbung		
Trockenstelle		
Einschlüsse		
Welligkeit		

*Tabelle 1: Potenziell auftretende Fehlerbilder bei der Herstellung von Pultrudaten*

Nach Abstimmung mit dem PA wurde ein priorisierter Fehlerkatalog (Tabelle 2) festgelegt, der die sieben Fehlerbilder umfasst, die in den Unternehmen des PA am häufigsten auftreten bzw. die größten Herausforderungen darstellen. Tabelle 2 enthält eine kurze Beschreibung bzw. Definition der Fehlerbilder, wie sie im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht wurden.

<b>Fehlerbild</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Beeinflusst</b>
Porosität	Poren bzw. Lufteinschlüsse im Profil, meist bedingt durch Fehler in der Imprägnierung	Mech. Eigenschaften
Halbzeugverschiebung	Verschiebung von Rovings oder flächigen Halbzeugen an der Oberfläche	Mech. Eigenschaften Optische Erscheinung
Belag	Ablagerung von Abrieb oder degradiertem Matrixmaterial an der Oberfläche, häufig in Riefen oder Einfallstellen	Optische Erscheinung
Maßhaltigkeit	Abweichung von Nennmaßen oder abgerundete Kanten	Mech. Eigenschaften Optische Erscheinung
Blasen	Lufteinschlüsse an der Oberfläche	Optische Erscheinung
Schrumpfungsrisse	Risse in Längsrichtung, die i.d.R. als Folge der Matrixschwindung an Winkeln auftreten	Mech. Eigenschaften Optische Erscheinung
Schichttrennung	Trennung des Profils zwischen einzelnen Rovings oder Halbzeuglagen	Mech. Eigenschaften Optische Erscheinung

*Tabelle 2: Priorisierter Fehlerkatalog mit Fehlerbeschreibung, in absteigender Relevanz nach Absprache mit dem PA*

## 5.2 Erstellung eines Wirkungsplans für den Pultrusionsprozess

Anschließend wurde ein Wirkungsplan des Pultrusionsprozesses erstellt, der eine kausale Verknüpfung von Prozessgrößen und Fehlerbildern ermöglicht. Ziel war eine Identifikation von Wirkzusammenhängen, als Basis für die Integration von Softsensoren. Dazu mussten zunächst Prozessgrößen identifiziert werden, die mit den ausgewählten Fehlerbildern in Zusammenhang stehen. Auf Basis des Wirkungsplans können Sensoren ausgewählt werden, die eine möglichst umfassende Abbildung des Pultrusionsprozesses ermöglichen. Für Verarbeiter kann der Wirkungsplan eine Entscheidungsgrundlage darstellen, welche Sensoren zur Prozessüberwachung eingesetzt werden sollen.

Dazu wurde zunächst die Pultrusionsanlage als informationstechnisches Modell abgebildet, siehe Abbildung 4. Das Modell teilt die Pultrusionsanlage in ihre

funktionellen Einheiten (dunkelgrau) vom Spulengatter bis hin zur Abzugseinheit. Jeder Einheit werden die jeweiligen Prozessgrößen zugeordnet die theoretisch gemessen werden können (grau) und die an der Anlage des IKV nach Abschluss des Forschungsvorhabens messbar sind (grün).

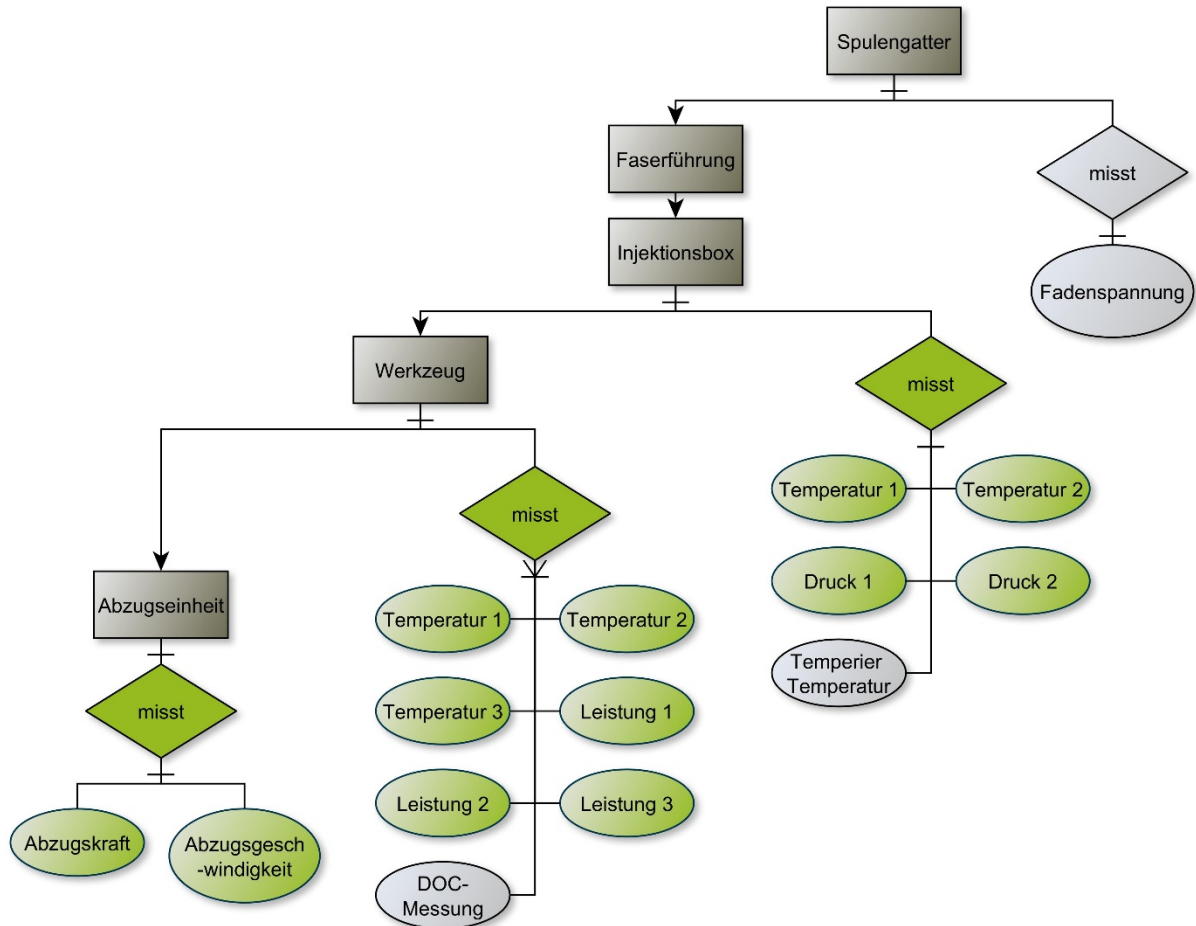


Abbildung 4: Informationstechnische Darstellung einer Pultrusionsanlage mit zugehörigen Messgrößen

Die genannten Prozessgrößen sind mit verschiedenen Messmitteln kontinuierlich und direkt messbar. Dies entspricht im weitesten Sinne dem Stand der Forschung. Mit diesem kontinuierlichen Messschrieb und dem resultierenden Profil ist es Anlagenbedienern oder Ingenieuren möglich, bestimmte Fehlerursachen basierend auf ihrer Erfahrung zu identifizieren. Ein direkter Blick auf die physikalischen Vorgänge im Pultrusionsprozess wie die Imprägnierung oder Aushärtung ist so jedoch nicht möglich. Diese Betrachtungsebene kann jedoch näherungsweise von Soft-Sensoren erreicht werden.

Der Überwachung von nicht direkt messbaren Vorgängen bzw. Effekten im Prozess kann sich auf analytische Weise genähert werden, indem für das pultrudierte Profil kritische Fehlerbilder über die Ursachen mit Messgrößen verknüpft werden.

Abbildung 5 zeigt den Wirkungsplan der Zusammenhänge zwischen Messgrößen und Fehlerbildern herstellt. Dabei ist die eingesetzte Sensorik in grün dargestellt, die physikalischen Vorgänge in orange, die resultierenden Effekte in hellblau und die Fehlerbilder in dunkelblau. Die Wirkungspläne in Abbildung 5 und 6 können vom Fehlerbild zum Sensor gelesen werden. Dazu werden Wirkmechanismen die zu den Fehlerbildern führen mit Messgrößen bzw. den entsprechenden Sensoren Verknüpft. So kann für ein spezifisches Fehlerbild ein relevantes Sensorpaket ausgewählt werden, oder anders herum nachvollzogen werden, auf welche Fehlerbilder mit vorhandenen Sensoren geschlossen werden kann. Wenn eine digitale Prozessüberwachung aufgebaut wird, geben die verknüpfenden Effekte mögliche Kombinationen von Messgrößen vor, welche als Soft-Sensor kombiniert und auf ein entsprechendes Fehlerbild eingestellt werden können.

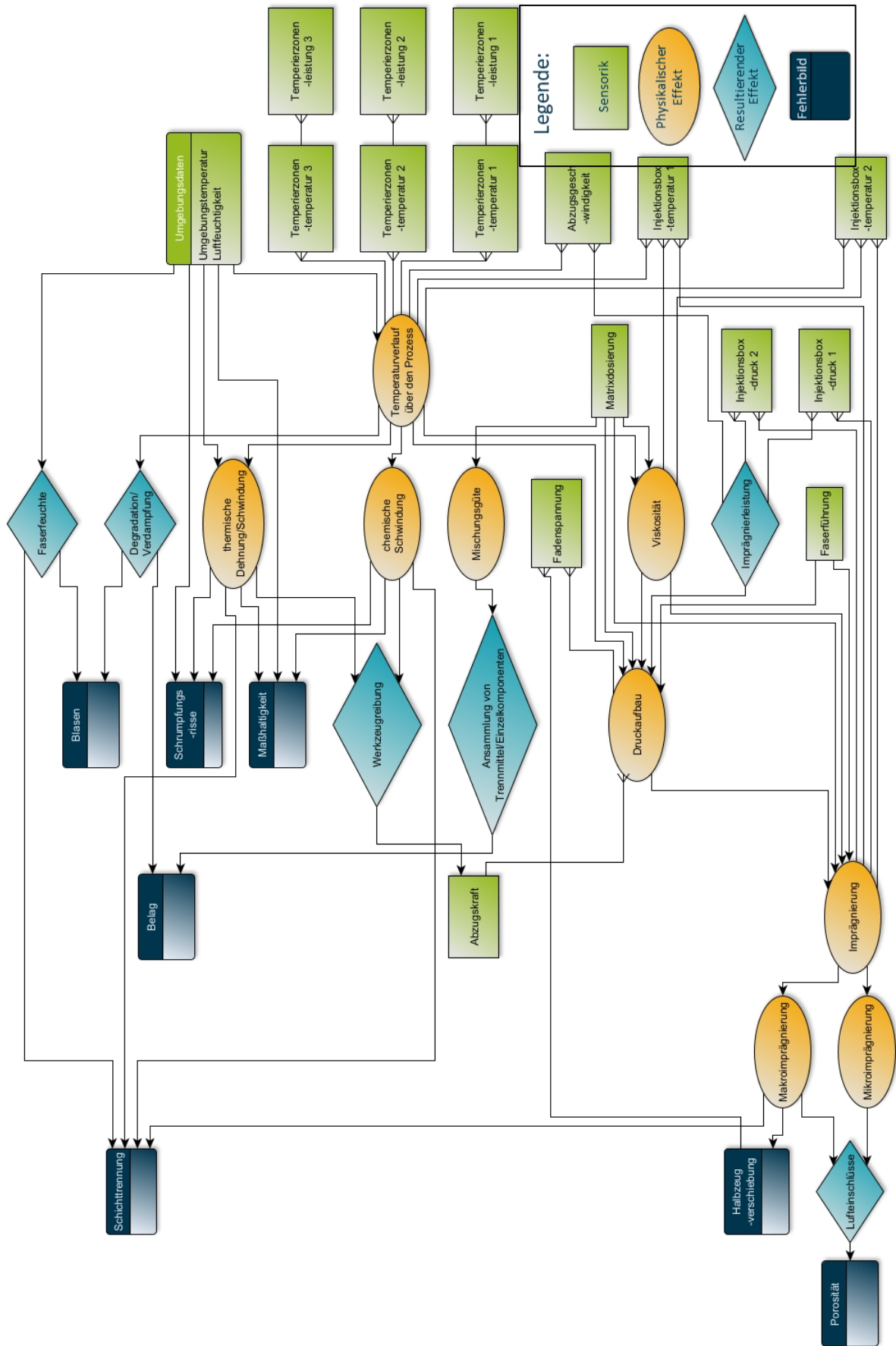


Abbildung 5: Wirkungsplan des Pultrusionsprozesses

Am Beispiel des Fehlerbilds „Porosität“ zeigt Abbildung 6 wie die Messgrößen aus Abbildung 4 mit dem Fehlerbild in Zusammenhang stehen. Die Imprägnierung ist der Ursprung von Lufteinschlüssen und somit eine Ursache für Porosität. Für die Imprägnierung des Pultrusionsprofils ist in der Injektionsbox die Matrixviskosität und der Druckaufbau verantwortlich. Diesen Größen bzw. Vorgängen sind die entsprechenden Messgrößen zugeordnet. Sind in der Prozessumgebung weitere Messgrößen verfügbar, z. B. Temperatur und Durchflussmenge von der verwendeten Dosieranlage können diese individuell den entsprechenden Effekten zugeordnet werden. Auf diese Weise stehen mehr Informationen über den gesamten Prozess zur Verfügung und das Zusammenwirken verschiedener Komponenten und Anlagen kann überwacht und analysiert werden.

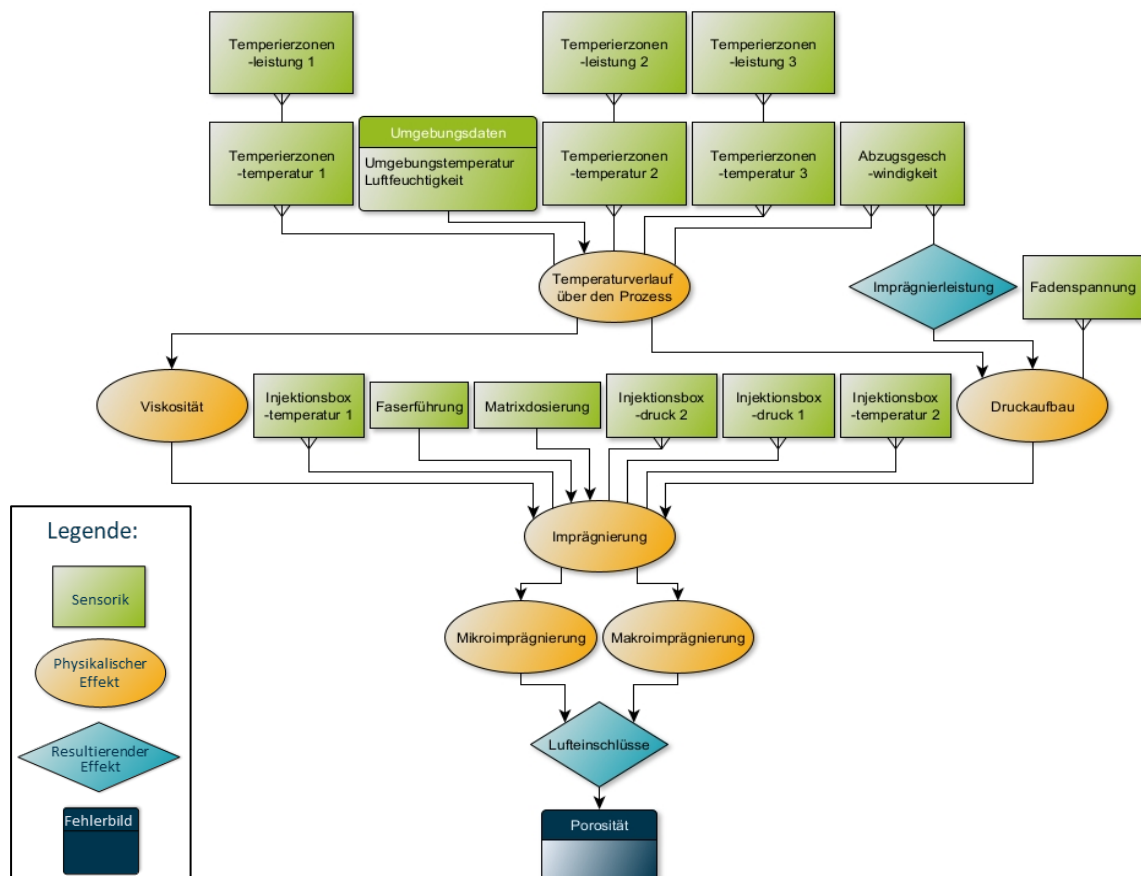


Abbildung 6: Rückverfolgung von Einflüssen auf die Ausbildung von Poren

Soft-Sensoren können auf Basis dieser Zusammenhänge oder allgemeiner Korrelationen erstellt werden. Somit kann aus den Messgrößen ein Indikator für den Prozesszustand hinsichtlich eines bestimmten Fehlerbildes oder Effektes abgeleitet werden.

Aus dem dargestellten Wirkungsplan und den möglichen Messgrößen ist ersichtlich, dass die allgemeine Überwachung des Pultrusionsprozesses eine umfangreiche

Aufgabe ist. Auch wenn die Systematik zur Erstellung von Soft-Sensoren übertragbar ist, so erfordert ein Vergleich auf unterschiedlichen Anlagen die gleichen Verbauten Sensoren. Diese sind jedoch bis auf einige Maschinengrößen wie Abzugskraft und -geschwindigkeit sowie der Werkzeugtemperatur bei industriellen Prozessen nicht gegeben. Auf Grund der am IKV zur Verfügung stehenden Anlage und dem daraus resultierenden individuellen Datenerfassungspaket ist ein Rüsten der mit Sensoren bestückten Werkzeuge auf anderen Pultrusionsanlagen nicht möglich. Ein Vergleich der erstellten Soft-Sensoren mit anderen Anlagen ist im Rahmen des Forschungsvorhabens somit nicht unmittelbar möglich gewesen. Das Ziel eines Anlagenunabhängigen Analysetools konnte somit nicht validiert werden. Dennoch wurde das Analysetool so entworfen, dass es auch auf Basis anderer Datenquellen funktioniert, die das Format einer SQL-Datenbank haben. Die Entwicklung des Analysetools ist durch die nicht erfolgten Ringversuche zwar nicht beeinträchtigt worden, die Bereitstellung für KMU ist jedoch eingeschränkt. Die Verknüpfung von Datenerfassung und Analysetool ist nur bedingt verallgemeinerbar, sodass diese Aufgabe stets eine manuelle Anpassung an die Zielanlage erfordert.

Zusammenfassend steht mit den Wirkungsplänen nicht nur die eine grundlegende Orientierung zur Fehlersuche zur Verfügung, sondern es kann für neue Überwachungssysteme eine Vorauswahl an benötigter Sensorik getroffen werden.

### **5.3 Datenerfassung und Struktur der Datenaufzeichnung**

Die identifizierten Wirkungspläne sind die Grundlage für den Aufbau der Datenbank und Datenerfassung. Aufbauend auf der bereits bestehenden Struktur am IKV wurde ein Konzept erstellt, welches die Aufteilung der Daten in kontinuierliche Prozessdaten und kategoriale Metadaten vornimmt. Die am IKV vorhandene Pultrusionsanlage Pultrex P500, der Firma Pultrex Ltd., Lawford, England, wurde für die Datenerfassung und Cloud basierte Speicherung nachgerüstet. Dazu wurden Sensoren verbaut, die Prozessdaten wie Abzugskraft, Abzugsgeschwindigkeit und die Temperatur der Werkzeugheizzonen erfassen. Außerdem erfolgt die Überwachung von Injektionsboxdruck und -temperatur mit zwei Sensoren der Firma Kistler Gruppe, Winterthur, Schweiz, Typ 4001A505. Mit Hilfe der Software LabView der Fa. National Instruments Corp., Austin, TX, USA, werden die Prozessdaten aufgezeichnet. Die Software verarbeitet die Eingangssignale und ermöglicht die direkte Weiterverarbeitung der Sensordaten. Des Weiteren werden prozessrelevante Umgebungsdaten wie Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte, mit einem Sensor vom Typ Bosch XDK110 Cross Domain Development Kit, der Robert Bosch GmbH,

Stuttgart, Deutschland, erfasst. Der Output eines Softensors kann aber ebenfalls eine kontinuierliche Größe sein, die den Prozesszustand beschreibt (vgl. Kapitel 7).

In den Metadaten werden alle Informationen zu den verwendeten Faser- und Matrixmaterialien, den verwendeten Werkzeugen und den durchgeführten Versuchen gespeichert, die für die Interpretation der Prozessdaten benötigt werden. Es wird für jede der genannten Informationen ein Datentyp mit eigener Datenbank (DB) angelegt. Dies ermöglicht einen schnellen Zugriff auf einzelne Datentypen, die einfache Ergänzung neuer Daten sowie eine leichte Vergleichbarkeit zwischen verfügbaren Komponenten. Die Informationen ermöglichen in Verbindung mit den Prozessdaten eine datenbasierte Prozessüberwachung in Echtzeit und liefern die Datengrundlage für eine systematische Auswertung des Prozesses. Abbildung 7 zeigt den Datenfluss im Umfeld der Pultrusionsanlage. Innerhalb der Datenbankstruktur sind die Daten über die Versuchs-ID verknüpft, sodass jederzeit eine eindeutige Zuordnung gewährleistet ist. Für die Auswertung bzw. Weiterverarbeitung der Prozessdaten müssen aber nicht immer die Metadaten mit geladen werden.

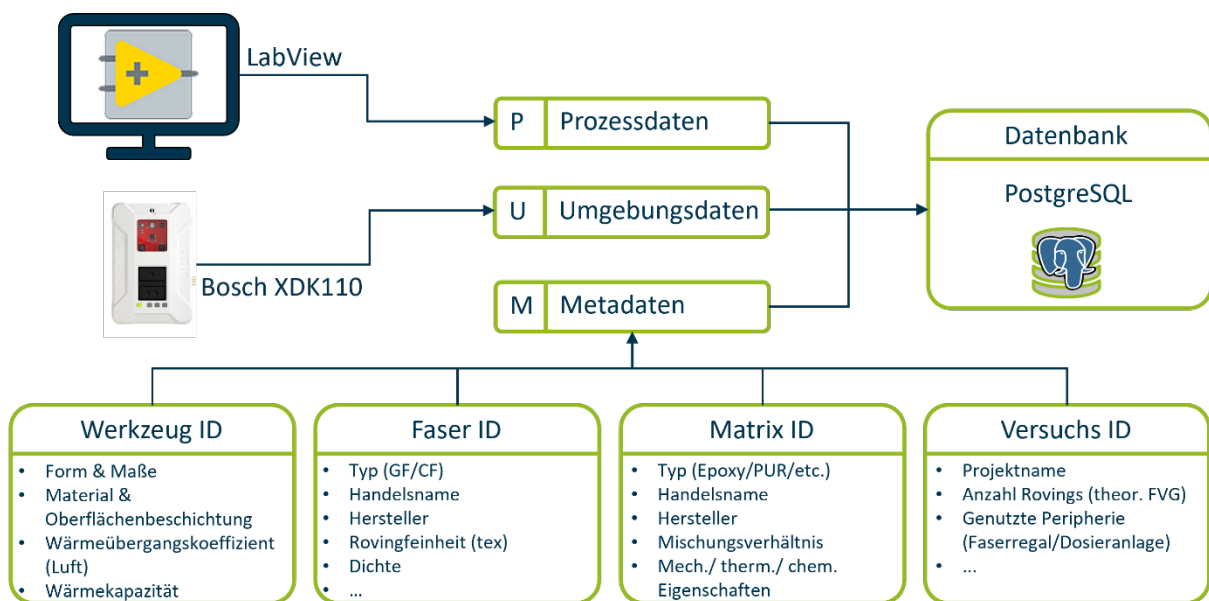


Abbildung 7: Datenfluss im Retrofit der Pultrusionsanlage am IKV

Alle der bis hier hin beschriebenen Daten sind ausschließlich anlagenseitig. Um eine Bewertung des Prozesses vornehmen zu können, sind ebenfalls Daten zum hergestellten Profil notwendig. Dabei steht die Bewertung hinsichtlich des priorisierten Fehlerkataloges im Vordergrund. Ziel war es eine kontinuierliche Vermessung des Pultrusionsprofils während der Versuche zu etablieren. Das erprobte Ringkamarasystem [FFFH23, HWSF22] lieferte jedoch keine ausreichend

präzise Vermessung des Profils. Die Auflösung des Systems war ausreichend, jedoch führte die eingesetzte Kombination aus Matrix und Glasfasersystem zu einer diffusen Rückstreuung des Profils, welche die Erkennung der Profilkanten verhinderte. Daher wurde im Laufe des Forschungsvorhabens eine nachgelagerte manuelle Beurteilung der Profilqualität angestrebt. Auf diese Weise entstehen kategorische Merkmale, die vor dem Vergleich mit den kontinuierlichen Prozessdaten zunächst transformiert werden müssen.

## 6 SYSTEMATISCHE GENERIERUNG VON PROZESSDATEN

In diesem Kapitel wird die Generierung einer Datenbasis für die Entwicklung von Soft-Sensoren beschrieben. Dazu wird zunächst ein Versuchsplan durchgeführt, um gezielt verschiedene Prozesszustände anzufahren, anhand derer das Ansprechverhalten auf Prozesszustandsänderungen der Sensoren analysiert werden kann.

### 6.1 Entwicklung des Versuchsplans

Für die Bewertung der Prozessüberwachung wurde ein  $3^2$ -Versuchsplan durchgeführt [SBH17]. Dabei wurden die für die Pultrusion zentralen Größen Temperatur (T), Abzugsgeschwindigkeit (v) und Faservolumengehalt (FVG) variiert, ausgehend von einem etablierten stabilen Prozesspunkt (0). Tabelle 3 fasst die Parametereinstellungen zusammen. Das verwendete Werkzeug ist in drei Heizzonen eingeteilt, deren Temperaturen hier getrennt dargestellt sind.

	Temperatur [°C]	Abzugsgeschwindigkeit [m/min]	FVG [%]
+	180/200/200	0,40	65
0	170/190/190	0,25	60
-	160/180/180	0,10	55

*Tabelle 3: Parametervariationen im durchgeführten Versuchsplan*

Für die Versuche wurden die Glasfaserrovings StarRov 090 4.800 tex, der Johns Manville Europe GmbH, Wertheim, Deutschland, sowie das Polyurethan (PUR) System Baydur PUL 20PL20, mit Desmodur 10PL02 der Covestro AG, Leverkusen, Deutschland verwendet ( $\eta \approx 310$  mPas, bei 20 °C). Die Injektion des PUR Systems erfolgte mit einer Niederdruckdosieranlage des Typs Eldomix 101, der Firma Hilger und Kern GmbH, Mannheim, Deutschland. Es wurden Rechteckprofile (35 x 4 mm<sup>2</sup>) hergestellt. Für die Faserführung wurde eine gleichmäßige Verteilung der Rovings über den gesamten Querschnitt mit lokal konstanten Faservolumengehalt berücksichtigt. Für die kontinuierliche Imprägnierung wurde eine am IKV entwickelte Injektionsbox verwendet [FFFH23, HWSF22]. Die Datenerfassung nach dem in Bild 6 beschriebenen Schema erfolgte mit einer Frequenz von 0,5 Hz für 30 Minuten je Versuchspunkt. Um einen stabilen, quasi-stationären Prozesspunkt zu erreichen, wurde jeder Prozesspunkt für mindestens 30 Minuten angefahren bevor die Daten für die Auswertung aufgezeichnet wurden.

Um eine ausreichende Robustheit der Prozessüberwachung zu gewährleisten, müssen die zu Grunde liegenden Daten eine ausreichende Streuung aufweisen. Die Streuung der Versuchsdaten ist aber nur soweit möglich, wie eine stabile Durchführung des Pultrusionsprozesses noch möglich ist. Daher wurde vor der Versuchsplanung der Bereich um den zentralen Versuchspunkt bestimmt, der einen stabilen Pultrusionsprozess ermöglicht. Der zentrale Prozesspunkt wurde in Zusammenarbeit mit dem Harzhersteller ausgewählt und orientiert sich an den Verarbeitungsvorgaben für das PUR-System. Die finale Konfiguration des Versuchsplans folgt aus den weiteren Restriktionen durch die vorhandene Anlagen- sowie Werkzeugtechnik, siehe Kap. 3.2. Zunächst wurde der Versuchsplan auf eine Kombination von Material und Werkzeug beschränkt.

Darüber hinaus wurden alle während der Prozesslaufzeit durchgeführten Versuche mit der Pultrusionsanlage aufgezeichnet. Somit steht ein breiter Datensatz zur Verfügung, der unter anderem Versuche mit anderen Profilgeometrien, anderen Fasertypen (Carbonfasern verschiedener Hersteller und Tex-Zahlen) und Matrixmaterialien umfasst. Perspektivisch können die in dem Forschungsvorhaben entwickelten Prozessüberwachungstools auf die Versuchsdaten angewandt werden, um stabile Prozesspunkte für ähnliche Versuche zu identifizieren.

## **6.2 Erprobung der Sensorik und Identifikation anlagenspezifischer Datenfragmente**

Die erste digitale Prozesszustandsanalyse für die Pultrusionsanlage mit dem nachgerüsteten Sensorpaket erfordert zunächst die Einrichtung der Sensorik. Dazu müssen sowohl die Einzelsensoren im Betrieb auf Funktion überprüft werden, als auch kombinierte Funktionen validiert werden. Außerdem ist für den Prozess in dieser Konfiguration unbekannt welche Effekte bzw. Ausschläge in den Daten auf die Anlage zurückzuführen sind. Dazu müssen die Messschriebe der einzelnen Sensoren analysiert werden. Diese Fragestellungen wurden während der Vorversuche zur Bestimmung des Versuchsraums adressiert.

Während der Betrachtung der einzelnen Messschriebe wird sowohl auf die Streuung der Werte als auch spezifische Peaks geachtet. Weisen Peaks eine Regelmäßigkeit bzw. ein Muster auf, so ist davon auszugehen, dass dies auf periodische Bewegungen der Anlage zurückzuführen sein könnte. Abbildung 8 zeigt einen Messschrieb aus Vorversuchen zur Bestimmung von Prozessgrenzen. Es sind die zentralen Größen Abzugskraft und Abzugsgeschwindigkeit über der Zeit dargestellt. Der Versuch wurde bei einer Nenngeschwindigkeit von 0,12 m/min durchgeführt und

weist ein quasi-statisches Verhalten auf. Im Messschrieb der Abzugskraft sind drei Plateaus zu erkennen, gekennzeichnet durch gestrichelte rote Linien. Über einen Zeitraum von 30 Minuten ist eine Verringerung der Abzugskraft um etwa 15 % zu erkennen. Aus der Analyse der Meta- und weiteren Prozessdaten ist keine direkte Erklärung für dieses Verhalten zu erkennen. Eine mögliche Erklärung ist eine Umlagerung der Rovings in der Injektionsbox. Der Prozess strebt das energetische Optimum an und somit ordnen sich die Rovings im Rahmen ihrer Beweglichkeit innerhalb der Injektionsbox neu an, sodass weniger Reibung innerhalb der Injektionsbox entsteht.

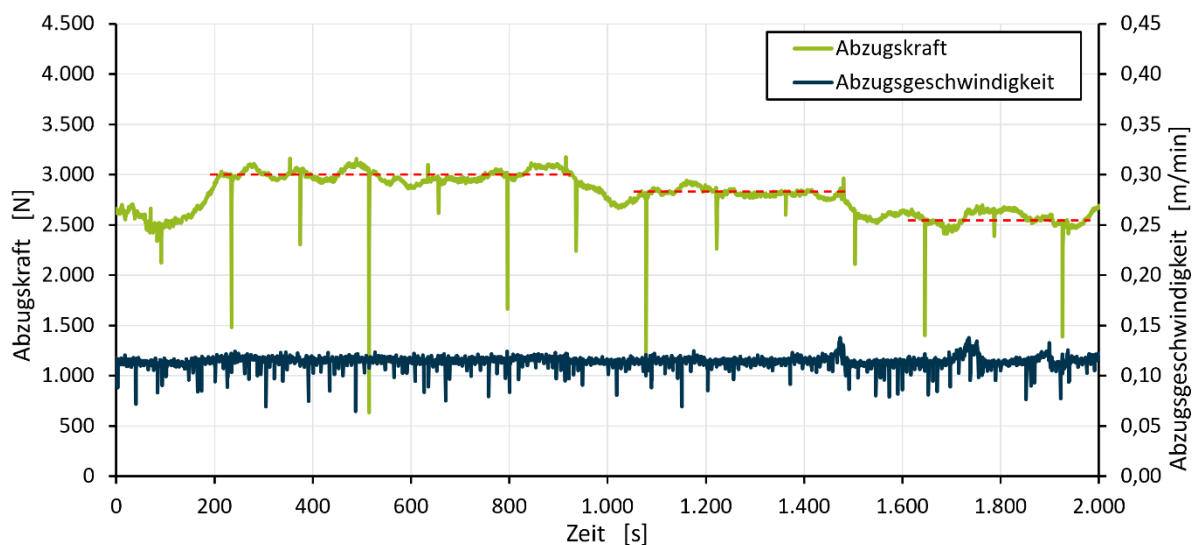


Abbildung 8: Abzugskraft und -geschwindigkeit über der Versuchsdauer während der Vorversuche

Der Kurvenverlauf für die Abzugskraft weist periodisch starke Ausschläge auf. Dieser kurzzeitige Verlust der Abzugskraft ist auf das Greifersystem der Pultrusionsanlage zurückzuführen. Durch die alternierende Übergabe des Profils zwischen den Greifern kommt es in manchen Fällen dazu, dass das Profil kurz entlastet wird, was zu einem Abfall der am Werkzeugschlitten gemessenen Abzugskraft führt. Diese Messpunkte sind in der späteren Datenverarbeitung als Ausreißer zu deklarieren, siehe Kap. 7.

Dieses Beispiel zeigt einerseits die Möglichkeiten zur Effektanalyse durch eine digitale Prozessüberwachung andererseits die Herausforderungen eines individuellen Retrofits. Eine kritische Betrachtung der Messwerte für nachgerüstete Sensoren ist für jede Anlage individuell vorzunehmen und erfordert entsprechendes Fachwissen zur Analyse.

### 6.3 Erfassung der Qualitätsdaten

Als Zielgröße für die Bewertung des Prozesszustandes können verschiedene Qualitätsgrößen des Profils herangezogen werden. Für eine generelle Beurteilung des Prozesszustandes eignen sich vor allem optische Kriterien an der Oberfläche wie sie in Tabelle 1 & 2 aufgelistet sind. Für eine Beurteilung der Imprägnierqualität können Mikroskopieaufnahmen von Schnittbildern oder mechanische Kennwerte herangezogen werden. Die mechanischen Kennwerte berücksichtigen allerdings zusätzlich Einflüsse der einzelnen Komponenten wie z. B. den Aushärtegrad des Matrixsystems. Das Ziel des Forschungsvorhabens war es die Prozessstabilität durch eine digitale Prozessüberwachung zu verbessern. Da für dieses Ziel eine große Menge an Profil produziert und bewertet werden musste, wurde eine Bewertung des Profils durch eine nachgelagerte manuelle Oberflächenanalyse durchgeführt.

Der Fehlerkatalog aus Tabelle 2 umfasst die optischen Merkmale Belag, Blasen, Risse und Schichttrennung. Risse und Schichttrennung konnten während der durchgeführten Versuche mit dem Rechteckprofil nicht festgestellt werden. Diese wären typischer Weise für Profile mit Radien und flächigen Faser-Halbzeugen zu erwarten. Der Fokus der optischen Profilanalyse wurde daher auf das Merkmal Belag gelegt, da an den Profilen auch keine Blasen beobachtet werden konnten. Im Gegenzug wurden die die Faktoren Trockenfaser und Welligkeit aus Tabelle 1 ergänzt. Bei den durchgeführten Versuchen traten diese Fehler häufig auf und sind ebenfalls durch die Norm klassifizierte Fehlerbilder. Daher wurden diese mit in die Beurteilung mit aufgenommen. Abbildung 9 zeigt Beispiele für die verschiedenen Fehlerbilder, die während der Versuche auftraten. Als Welligkeit wurden alle Formen von oberflächlichen Geometrieabweichungen an den breiten Profilseiten definiert, die zu einer Verschiebung der Oberfläche von der Soll-Geometrie führen. Belag bildet sich z.B. durch abgelagerte Reinharzmengen, die durch das Werkzeug gezogen werden und sich in der Oberfläche des Profils ablagern. Trockenfasern sind nicht imprägnierte Faserstränge an der Oberfläche, die sich weiß von der umgebenden Matrix abheben.



Abbildung 9: Beispielbilder für die untersuchten Fehlerklassen, Aufnahmen von Profilen die während des Forschungsvorhabens analysiert wurden

## 7 FUNKTIONSENTWICKLUNG UND KALIBRIERUNG VON SOFTSENSOREN

In diesem Kapitel wird zunächst die Aufbereitung der Prozessdaten und Qualitätsdaten erläutert. Dabei stehen die Auswahl, Filterung und Verarbeitung der Daten im Vordergrund, sodass eine Grundlage für die anschließend diskutierten Ergebnisse vorliegt. Die Prozessdaten werden hinsichtlich des zu erwartenden Prozesszustandes diskutiert. Darauf aufbauend wird die Entwicklung von Soft-Sensoren auf Basis der etablierten Datenerfassung beschrieben und die resultierenden Kenngrößen für den Prozesszustand diskutiert. Alle in diesem Bericht beschriebenen Maßnahmen der Datenverarbeitung und Auswertung sind am IKV in einem Programm zusammengefasst, welches in Kooperation mit dem IKV Verarbeitern zur Verfügung gestellt werden kann.

### 7.1 Erläuterung der Prozessdatenaufbereitung und Verarbeitung

Während der Durchführung der Versuche (Kap. 6.1) wurden die Daten mit der beschriebenen Struktur (Kap. 5.3) aufgezeichnet. Für die Auswertung wurde ein Skript in der Programmiersprache Python 3 entwickelt. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Funktionen erläutert.

Das Skript greift bei jeder Ausführung direkt auf die in der SQL-Datenbank gespeicherten Daten zu und speichert diese temporär als Dataframe (Tabellenfunktion des Python-Package „Pandas“). So ist sichergestellt, dass die Rohdaten nicht verändert oder beschädigt werden. Außerdem es mit diesem Aufbau möglich eine beliebige Kombination von Versuchspunkten in die Auswertung aufzunehmen. In Zukunft können weitere Versuche in die Datengrundlage für die Analyse von Zusammenhängen oder die Generierung von Soft-Sensoren aufgenommen werden. Es ist z. B. möglich für die Erprobung eines neuen Profils alle Versuchspunkte für die Soft-Sensoren zu berücksichtigen, die eine vergleichbare Konfiguration an Matrix- und Fasermaterial sowie FVG hatten.

Um die Daten des quasi-stationären Prozesszustandes auszuwerten, müssen sie zunächst aufbereitet werden. Abbildung 10 zeigt die Abzugskraft über der Zeit für einen Versuchspunkt (T+, v-, FVG+). Zunächst wurden in den Rohdaten (Grün) Ausreißer nach der  $3\sigma$ -Methode identifiziert und entfernt. Dazu wurden der Mittelwert und die Standardabweichung ( $\sigma$ ) bestimmt. Alle Werte, die weiter als  $3\sigma$  vom Mittelwert entfernt liegen, wurden als Ausreißer deklariert. Dieses Vorgehen wird auf jede Datenreihe für jeden Prozesspunkt angewendet. Dabei werden die Punkte die in

einer Datenreihe als Ausreißer deklariert wurden aus allen Datenreihen entfernt, um einen konsistenten Datensatz zu erhalten (Blau).

Die um Ausreißer bereinigten Datensätze werden im Anschluss geglättet bzw. verkleinert. Über je fünf Messwerte wird der Mittelwert gebildet und für die weitere Verarbeitung verwendet (Grau). Dies führt zu einer berücksichtigten Messfrequenz von 0,1 Hz. Die Messfrequenz der Datenerfassung liegt bei 0,5 Hz. Im Vergleich zur maximalen Produktionsgeschwindigkeit und dem eher trägen Prozessverhalten, kann aber auch die effektive Frequenz von 0,1 Hz als ausreichend sensitiv betrachtet werden. Dies erhöht einerseits die Rechengeschwindigkeit der Auswertung und verbessert andererseits die Korrelationsanalyse, da die Messwerte weniger hochfrequente Schwankungen aufweisen. Die Schwankungen können aus der natürlichen Schwankungen der Messkette resultieren.

Die Verknüpfung der hergestellten Profile mit den Prozessdaten erfolgt über die Länge der Profile. Aus der Versuchszeit und der Geschwindigkeit wird die aktuelle Profillänge bzw. -position berechnet. Der Kraftanstieg durch den Beginn der Matrixdosierung in die Injektionsbox ist der Synchronisationspunkt.

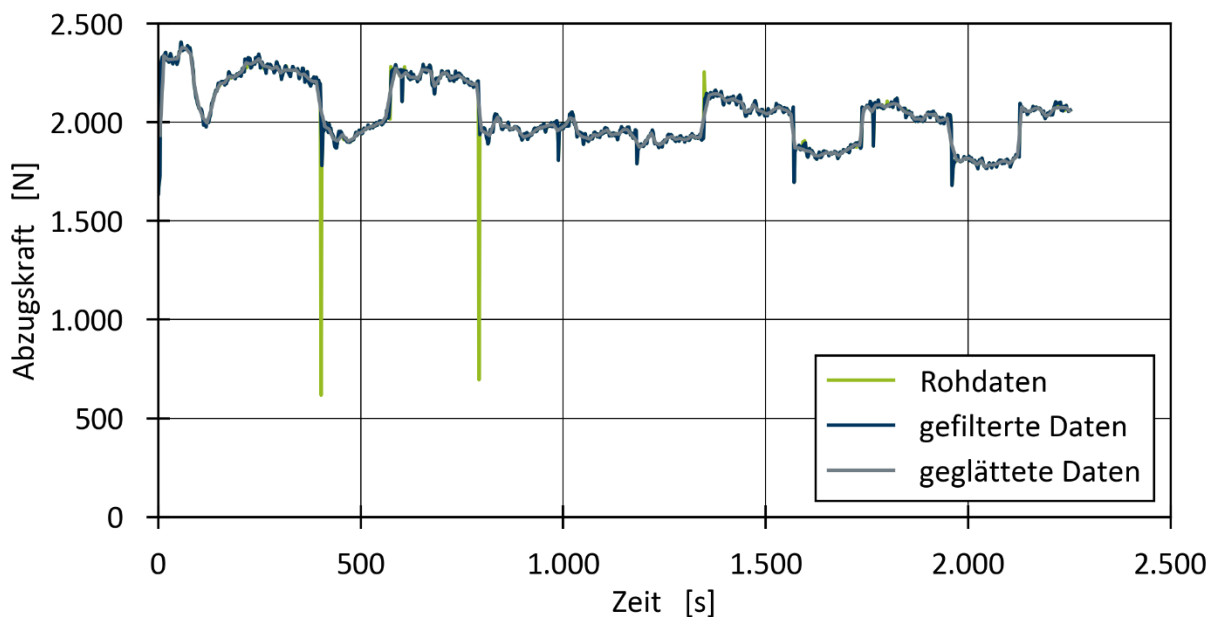


Abbildung 10: Schritte der Datenaufbereitung am Beispiel der Abzugskraft für den Versuchspunkt ( $T_+$ ,  $v_-$ ,  $FVG_+$ )

## 7.2 Erläuterung der Qualitätsdatenverarbeitung

Die optische Analyse der Profile erfolgte hinsichtlich der in Kapitel 6.3 diskutierten Fehlerbilder. Für jeden Punkt des Profils wird somit kategorisch festgehalten, ob an dieser Stelle das entsprechende Fehlerbild vorliegt (1) oder der Fehler nicht vorliegt (0). Diese Dokumentation erlaubt es die anhand der Profilposition die

kontinuierlichen Prozessdaten mit den kategorischen Qualitätsdaten zu korrelieren. Auf diese Weise lassen sich automatisiert Korrelationen aufdecken, bzw. die Informationen für die Erstellung von Soft-Sensoren nutzen.

Der am umfangreichsten untersuchte Parameter ist die Abzugskraft, die als Addition verschiedener Bestandteile aufgefasst werden kann. Diese Bestandteile sind die Kompressionskraft, Viskositätskraft und Reibkraft. Dabei handelt es sich insbesondere bei der Viskositätskraft um eine integrale Größe über die Werkzeuglänge in der sich die Viskosität der Matrix in einem großen Bereich verändert. Darüber hinaus ist es nicht möglich die Bestandteile im laufenden Prozess zu separieren, sodass in diversen Veröffentlichungen unterschiedliche analytische Modellierungsansätze für die Kraftkomponenten beschrieben werden. [BCH+14, Bla99, LXD+03a, LXD+03b, MKK99, MRV98, SKJ06]

Diverse Arbeiten haben den Einfluss der Prozessparameter sowie der FVK-Zusammensetzung (Matrix, Fasern und Faservolumengehalt) für unterschiedliche Profilgeometrien auf die Entwicklung der Abzugskräfte untersucht und berichten von teilweise widersprüchlichen Ergebnissen mit unterschiedlichen Matrixmaterialien, die auf Grund unterschiedlichster Materialeigenschaften nicht vergleichbar, bzw. übertragbar, sind [Bla99, LBM03, LXD+03a, LXD+03b, MRV98, SRJ14]. Dementsprechend bietet die singuläre Betrachtung der Abzugskräfte ohne die Berücksichtigung weiterer relevanter Kennwerte keinen ausreichenden Informationsgehalt für die spezifische Identifikation von Prozessabweichungen. Die umfassende Datenerfassung in diesem Projekt bietet die Chance die Abzugskraft im Kontext zu bewerten. Darüber hinaus kann die Abzugskraft mit weiteren Daten zu Soft-Sensoren für Qualitätsgrößen korreliert werden, um eine verbesserte Aussagekraft zu ermöglichen.

### **7.3 Diskussion der erfassten Prozessdaten innerhalb des Versuchsraums**

Zunächst werden exemplarisch die aussagekräftigsten Prozessgrößen diskutiert. Die Betrachtung Abzugskraft, sowie des Zustandes in der Injektionsbox (Druck und Temperatur) ermöglichen eine erste Einordnung der Versuchsergebnisse. Tabelle 3 beschreibt den Versuchsraum, aus dem sich die Parameterkombinationen für einen  $3^2$ -Versuchsplan mit Sternpunkt ergeben. Um die neun Versuchspunkte zu vergleichen werden die Prozessdaten in Boxplots dargestellt. Dabei umfasst die zentrale Box den Median als Teilung sowie das obere und untere Quartil als Grenzen. In der hier gewählten Darstellungsform werden die „Whisker“ durch das

1,5-fache des Interquartilabstandes (IQR) bestimmt. Alle Werte die außerhalb dieser Grenzen liegen werden gesondert als Ausreißer in Form kleiner Rauten dargestellt.

Die Abzugskraft ist nach dem Stand der Technik die zentrale Größe zur Beurteilung des Prozesszustandes. Im Betrieb stellt sich für einen spezifischen Prozesspunkt eine quasi-statische Abzugskraft ein. Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 11 zeigt die Abzugskräfte für jeden einzelnen Versuch. Dabei werden für den FVG von 55 % durchschnittlich Abzugskräfte von 228 N bis 1489 N erreicht und für den FVG von 65 % werden 1570 N bis 2259 N erreicht. Es ist zu erkennen, dass sich die Abzugskraft proportional zu  $T$ ,  $v$  und FVG verhält. Die höchsten Abzugskräfte sind für den ersten abgebildeten Versuchspunkt zu erwarten. Da die Abzugskraft durch die Reibung von Fasern und Profil am Werkzeug beeinflusst wird, steigt die Abzugskraft mit dem FVG und der Abzugsgeschwindigkeit. Hier ist jedoch eine geringere Abzugskraft zu verzeichnen. Möglicherweise liegt für diesen Prozesspunkt eine besonders gute Konfiguration vor, hinsichtlich des Reaktionszustandes (Abhängig von  $T$  und  $v$ ) und dem Imprägniervorgang (Abhängig von  $T$ , FVG und  $v$ ), was die benötigte Abzugskraft reduziert. Auffällig ist die erhöhte Anzahl der als Ausreißer markierten Datenpunkte und die generell breitere Verteilung, bei allen Versuchen mit hohem FVG. Dies lässt sich durch Prozessschwankungen bei hohen Abzugskräften erklären, die durch den Abzug und die Krafterfassung entstehen. Bei hohen Abzugskräften führt der Greiferwechsel zu einer kurzen Entlastung und erneuten Belastung des Kraftsensors, was Ausschläge in der Datenerfassung erzeugt (vgl. Abb. 8). Diese Beobachtung besteht auch nach der Filterung der Daten, dies ist durch die grundlegend hohe Schwankung der gemessenen Abzugskräfte begründet. Wird nur die Abzugskraft betrachtet, ist keine direkte Aussage über den Prozesszustand möglich. Bei einem bestehenden Prozess können lediglich qualitative Abweichungen vom Mittelwert erkannt und bewertet werden. Zusätzlich kann die Änderung der Standardabweichung ein Hinweis auf eine Änderung des Prozesszustandes sein. Die Abzugskraft kann also nur Abweichungen vom Sollzustand erkennen, gibt aber allein keine Hinweise auf die Ursache.

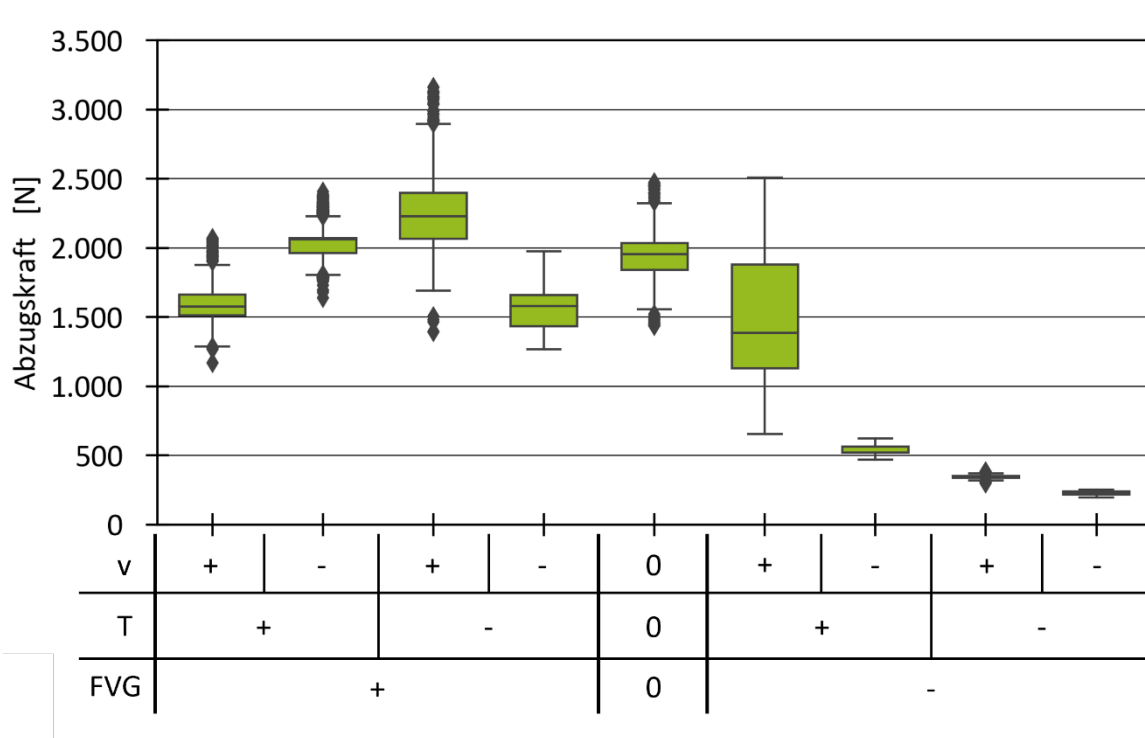


Abbildung 11: Boxplot der Abzugskräfte für die untersuchten Parameterkombinationen

Wie im Stand der Technik beschrieben, handelt es sich bei der Pultrusion um einen quasi-statischen Prozess. Bei der Verwendung von Injektionsboxen ist davon auszugehen, dass einige Änderungen im Prozesszustand dort zuerst zu erkennen sind. In der Injektionsbox findet die Imprägnierung der Faserhalbzeuge in Abhängigkeit des Matrixzustandes, der Abzugsgeschwindigkeit und Profileigenschaften wie dem FVG statt. Die Untersuchungen von *Hopmann et al.* [HWSF21, HWSF22] sowie die Untersuchungen zum Strömungszustand in Injektionsboxen von *Wruck* [Wru22] zeigen, dass sich in der Injektionsbox Prozesspunkt abhängig ein charakteristischer Strömungszustand einstellt. Die Rückflusslänge und Druckaufbau in der Injektionsbox sind von der Geometrie der I-Box abhängig, diese ist jedoch über die Versuche konstant. Als variable Faktoren bleiben die Viskosität der Matrix sowie die Rovingkonfiguration und der FVG. Die Viskosität der Matrix in der Injektionsbox kann nicht direkt gemessen werden, ist aber von der Temperatur und der Verweilzeit in der Injektionsbox abhängig. Außerdem beeinflusst die Viskosität direkt den Druckaufbau. Durch die Werte für Druck und Temperatur in der Injektionsbox sowie der Abzugsgeschwindigkeit können somit Rückschlüsse auf den Strömungszustand in der Injektionsbox gezogen werden und somit auch auf den allgemeinen Prozesszustand.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen den Boxplot des Drucks und der Temperatur in der Injektionsbox. Der entsprechende Sensor ist in der Mitte der Bodenplatte der

Injektionsbox 50 mm vor dem finalen Werkzeugquerschnitt verbaut. Somit werden die Werte möglichst nahe am Punkt der stärksten Kompression in der Injektionsbox entnommen.

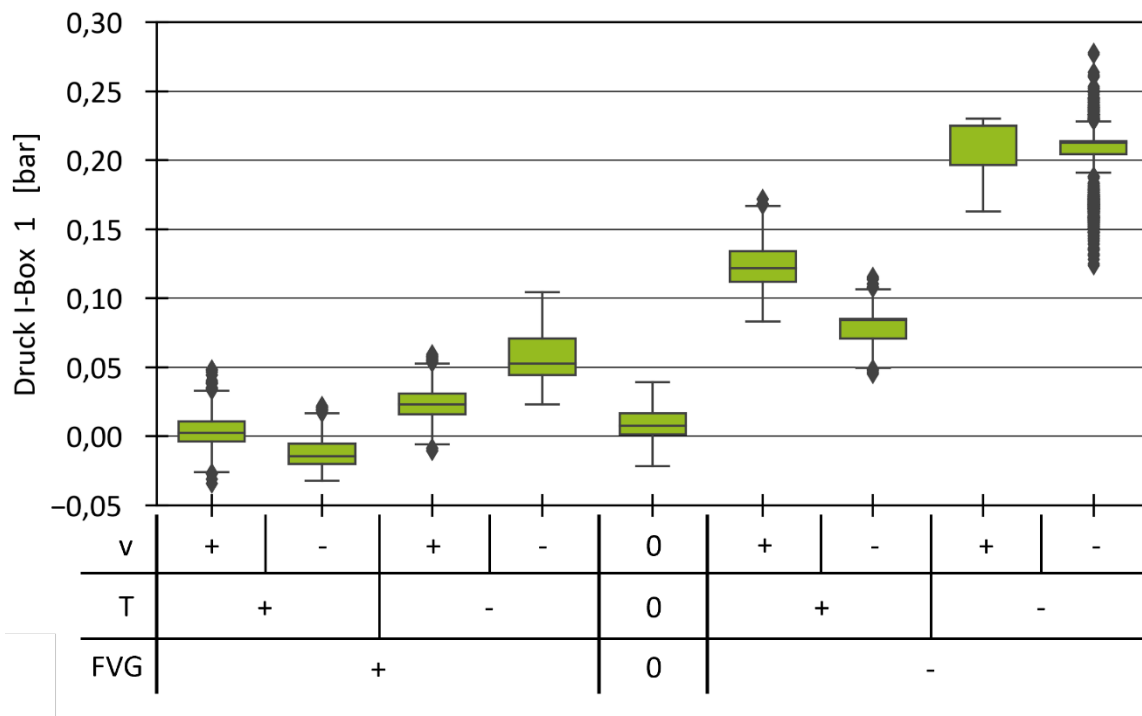


Abbildung 12: Boxplot des Injektionsbox Innendrucks 50mm vor dem finalen Querschnitt

Für die Versuchspunkte mit dem hohen FVG von 65 % sind deutlich niedrigere Drücke gemessen worden. Der Mittelwert des Druckes schwankt zwischen 0,012 bar und 0,058 bar. Dem stehen mittlere Drücke von 0,078 - 0,211 bar für den FVG von 55 % gegenüber. An der Stelle des Drucksensors kommt es nicht zu einem ausreichenden Aufstauen der Matrix in der Injektionsbox. Es ist daher auch davon auszugehen, dass eine vollständige Imprägnierung an dieser Position in der Injektionsbox nicht gegeben ist. Dies kann auf die höhere Komprimierung der Fasern in der Injektionsbox zurückzuführen sein, was zu einer geringeren Permeabilität und damit zu einer langsameren Imprägnierung führt. Für diese Theorie spricht ein indifferenten Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit, da eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit nicht zu einer Abnahme des Druckes führt, ist die Druckabnahme wahrscheinlich nicht auf die gesteigerte Menge transportierten Harzes an der Messstelle zurückzuführen. Bei sonst gleichem Strömungszustand an der Messstelle würde eine erhöhte Menge an mitgezogenem Harz zu einem

geringerem Druckaufbau führen, da das transportierte Harz weniger stark durch das Aufstauen komprimiert wird.

Die Interpretation der Druckdaten deutet darauf hin, dass keine vollständig imprägnierten Fasern mit Harzüberschuss am Sensor vorliegen. Es kann auf diese Weise zwar ein Rückschluss auf die Imprägnierung getroffen werden, aber eine Differenzierung hinsichtlich des Imprägnierzustands bei verschiedenen Prozesszuständen ist fraglich. Die Beurteilung und Vorhersage von Qualitätsdaten ist mit den gemessenen Druckwerten nicht zielführend.

Die gemessene Injektionsboxtemperatur weist wie in Abbildung 13 zu erkennen nur geringe Schwankungen innerhalb der Prozesspunkte auf. Die maximale Standartabweichung von 0,33 °C wird für den Versuchspunkt (FVG+, T-, v+) erreicht. Dennoch sind im Boxplot einige Ausreißer zu erkennen, für die zunächst keine konsistente Erklärung gefunden werden kann. Bedingt durch die enge Verteilung der Messwerte werden bereits kleine Abweichungen der absoluten Werte als Ausreißer deklariert. Daher ist nicht davon auszugehen, dass es sich dabei um einen systematischen Effekt handelt.

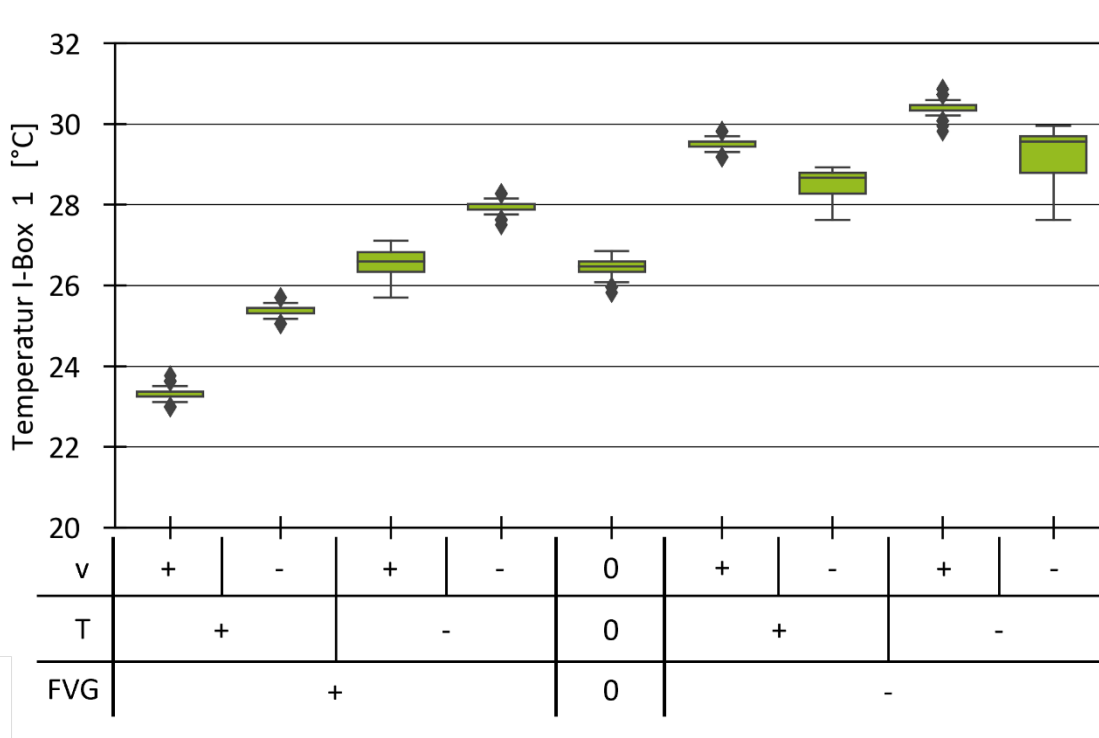


Abbildung 13: Boxplot der Injektionsbox Temperatur 50mm vor dem finalen Querschnitt

Für die Interpretation der Injektionsboxtemperatur ist zu beachten, dass zwischen dem trichterförmigen Teil der Injektionsbox und dem Pultrusionswerkzeug eine Walkstrecke für eine bessere Imprägnierung verbaut ist. Die Walkstrecke verfügt

über einen Kühlkanal nahe der Kontaktfläche zur Injektionsbox, um ein Aufheizen der Injektionsbox zu verhindern. Dazu ist zusätzlich eine Isolierung zwischen Injektionsbox und Werkzeug verbaut. Während der Versuche wurde die Wasserkühlung immer mit der gleichen Leistung betrieben, um die Vergleichbarkeit zu wahren. Die in der Injektionsbox resultierende Temperatur ist somit als unabhängig von der festgelegten Werkzeugtemperatur zu sehen. In Abbildung 13 ist kein systematischer Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Injektionsboxtemperatur zu erkennen. Es ist daher davon aus zu gehen, dass die Unterschiede in der Injektionsboxtemperatur auf den Reaktionsfortschritt des Harzsystems zurückzuführen sind. Das verwendete PUR reagiert exotherm und selbstkatalytisch. Eine erhöhte Injektionsboxtemperatur deutet also auf den Beginn bzw. das Fortschreiten der Vernetzungsreaktion bereits in der Injektionsbox hin. Eine erhöhte Injektionsboxtemperatur korreliert also mit der Verweilzeit des Harzsystems in der Injektionsbox. Wie die Menge des transportierten Harzes mit dem FVG korreliert wurde bereits diskutiert und resultiert in durchschnittlich niedrigeren Temperaturen (25,65 °C) für den höheren FVG sowie höheren Temperaturen (29,23 °C) für den niedrigen FVG. Dies passiert auf Grund der geringeren Verweilzeit des Harzes in der Injektionsbox. Auch hier ist analog zum Injektionsboxdruck kein signifikanter Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit zu erkennen.

Die individuelle Interpretation der Prozessdaten ist erwartungsgemäß nicht für eine umfassende Prozessüberwachung nutzbar. Die Daten zeigen dennoch Korrelationen wie sie im Stand der Technik bereits diskutiert wurden. Daher ist davon auszugehen, dass die Daten den Prozess qualitativ abbilden. Für eine umfassende Prozessüberwachung werden die Daten im Anschluss unter einander auf Korrelationen untersucht und in Kontext gesetzt, um Rückschlüsse auf den Prozesszustand zu ziehen.

#### **7.4 Bestimmung der Korrelationen zwischen Prozess- und Qualitätsgrößen**

Zur Auswertung des Versuchsplans werden einerseits die Parameterstufen direkt miteinander verglichen, um so Trends und Abhängigkeiten aufzudecken. Andererseits werden die aufgezeichneten Daten in einer Korrelationsmatrix verglichen und bewertet.

Die Prozessdatenerfassung ermöglicht die Analyse von Zusammenhängen und Korrelationen zwischen den Prozessgrößen. Hierbei wird automatisch die Korrelation zwischen den einzelnen Datenreihen ermittelt. Dabei werden die Datenreihen untereinander mithilfe des Pearson-Kriteriums für lineare Korrelationen verglichen.

Ein Wert von 1 oder -1 bedeutet, dass die Abhängigkeit durch eine lineare Gleichung beschrieben werden kann, während ein Wert von 0 darauf hinweist, dass keine Korrelation zwischen den Datenreihen besteht [HID17]. Die Anwendung des Pearson-Kriteriums auf alle Kombinationen der erfassten Datenreihen ergibt eine Korrelationsmatrix, aus der hervorgeht, welche Messgrößen möglicherweise Abhängigkeiten aufweisen. Tabellen 4 bis 6 zeigen einen Ausschnitt aus der Korrelationsmatrix des Versuchsplans, aufgeteilt nach den drei Prozessgrößen Abzugskraft, I-Box Druck, I-Box Temperatur in Tabelle 4, den drei variierten Parametern  $v$ ,  $T$ , FVG in Tabelle 5 und den drei Qualitätsgrößen der Oberflächenbetrachtung Belag, Trockenfaser und Welligkeit in Tabelle 6.

Es lassen sich starke Abhängigkeiten zwischen Abzugskraft, Injektionsboxtemperatur und Injektionsboxdruck feststellen, die durch einen Korrelationskoeffizienten von größer oder gleich 0,8 bewertet werden. Außerdem ist eine starke Korrelation der Prozessgrößen mit dem FVG zu erkennen (vgl. Tab. 4 & 5). Der FVG ist für ein Profil festgelegt und wird nicht variiert, daher wird der Zusammenhang für die weitere Bewertung hinsichtlich der Prozessüberwachung nicht weiter Berücksichtigt.

	<b>Abzugskraft</b>	<b>Injektionsbox-Temperatur</b>	<b>Injektionsbox-Druck</b>
<b>Abzugskraft</b>	1	-0,668	<b>-0,797</b>
<b>Injektionsbox-Temperatur</b>	-0,668	1	<b>-0,848</b>
<b>Injektionsbox-Druck</b>	<b>-0,797</b>	<b>-0,848</b>	1
<b>v</b>	0,355	0,100	-0,056
<b>FVG</b>	<b>0,839</b>	<b>-0,857</b>	<b>-0,825</b>
<b>T</b>	0,200	-0,361	-0,500
<b>Welligkeit</b>	0,222	-0,093	-0,220
<b>Trockenfaser</b>	-0,123	0,101	0,035
<b>Belag</b>	0,100	-0,107	-0,188

*Tabelle 4: Auszug aus der Korrelationsmatrix der Prozessgrößen über ausgewählten Prozessgrößen (Werte: Korrelationskoeffizienten, berechnet nach dem Pearson-Kriterium)*

	<b>v</b>	<b>FVG</b>	<b>T</b>
<b>Abzugskraft</b>	0,355	<b>0,839</b>	0,200
<b>Injektionsbox-Temperatur</b>	-0,100	<b>-0,857</b>	-0,361
<b>Injektionsbox-Druck</b>	-0,056	<b>-0,825</b>	-0,500
<b>v</b>	1	0,163	-0,120
<b>FVG</b>	0,163	1	0,046
<b>T</b>	-0,120	0,046	1
<b>Welligkeit</b>	0,197	0,080	0,178
<b>Trockenfaser</b>	-0,101	-0,164	0,123
<b>Belag</b>	0,042	0,046	0,227

*Tabelle 5: Auszug aus der Korrelationsmatrix der Prozessgrößen über den variierten Parametern (Werte: Korrelationskoeffizienten, berechnet nach dem Pearson-Kriterium)*

Die Qualitätsgrößen weisen keine ausgeprägte Korrelation mit den Prozessdaten auf. Tabelle 6 zeigt für die Qualitätsdaten einen maximalen Wert des Pearsonkriteriums von 0,271, was per Definition bedeutet dass keine lineare Korrelation der Daten vorliegt. Auch für eine breit angelegte Korrelationsanalyse ergeben sich somit keine ausgeprägten Zusammenhänge zwischen den gemessenen Qualitätsdaten und Prozessgrößen. Daher sind im nächsten Schritt Kombinationen von Größen zu untersuchen. Da dies eine Vielzahl von Möglichkeiten beinhaltet wurde die Korrelationsmatrix auf weitere auffällige Kombinationen untersucht, die zumindest einen schwachen Zusammenhang zwischen den Variablen vermuten lassen.

Bei kontinuierlichen Prozessen ist die Produktionsgeschwindigkeit ein entscheidender Faktor. Tabelle 5 und Abbildung 11 zeigen keinen signifikanten Einfluss der untersuchten Geschwindigkeitsvariation auf die Qualitätsparameter und die Abzugskraft. Es ist daher davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit im untersuchten Bereich keinen Einfluss auf die Prozessfassung und die untersuchten Zielgrößen hat. Bei höheren Abzugsgeschwindigkeiten ist zu prüfen, ob eine Erhöhung der Messfrequenz erforderlich ist, dies ist jedoch durch das System abbildbar und stellt kein Hindernis für den Einsatz der Datenerfassung dar.

	<b>Welligkeit</b>	<b>Trockenfaser</b>	<b>Belag</b>
<b>Abzugskraft</b>	0,222	-0,123	0,100
<b>Injektionsbox-Temperatur</b>	-0,093	0,101	-0,107
<b>Injektionsbox-Druck</b>	-0,220	0,035	-0,188
<b>v</b>	0,197	-0,101	0,042
<b>FVG</b>	0,080	-0,164	0,046
<b>T</b>	0,178	0,123	0,227
<b>Welligkeit</b>	1	0,079	0,271
<b>Trockenfaser</b>	0,079	1	0,063
<b>Belag</b>	0,271	0,063	1

*Tabelle 6: Auszug aus der Korrelationsmatrix der Prozessgrößen über den Oberflächenqualitätsgrößen (Werte: Korrelationskoeffizienten, berechnet nach dem Pearson-Kriterium)*

Die Korrelation zwischen dem Injektionsbox Druck und dem Parameter Temperatur aus dem Versuchsplan wird mit 0,5 angegeben, siehe Tabelle 4. Dies deutet nach dem Pearson-Kriterium auf eine mögliche oder schwache Korrelation hin. Im Folgenden wird daher beispielhaft anhand dieser Größen die Fehlerhäufigkeit über den verschiedenen Größen betrachtet.

In Abbildung 14 und 15 ist die Fehlerhäufigkeit für die untersuchten Fehlerbilder Welligkeit, Belag und Trockenfaser über dem Injektionsboxdruck abgebildet. In Abbildung 14 sind alle Datenpunkte berücksichtigt die für die hohe Einstellung des Parameters Temperatur (T+, 180/200/200 °C) aufgezeichnet wurden, in Abbildung 15 dementsprechend alle für die niedrige Einstellung (T-, 160/180/180 °C). Es ist zu erkennen, dass für den Bereich zwischen 0,09 bar und 0,17 bar die Häufigkeit der Fehler von 20 - 80 % (je nach Fehlertyp) bei T+, auf 0 % bei T- sinkt. Die Kombination aus Werkzeugtemperatur und Injektionsboxdruck weist also einen klaren Wertebereich aus, in dem ein Prozesszustand mit minimaler Fehlerquote liegt.

Daraus lässt sich ein kombinierter Soft-Sensor ableiten, der auf der Überwachung der Werkzeugtemperatur und des Injektionsboxinnendruck basiert. Bei Abweichungen vom Sollbereich der Temperatur und/ oder des Injektionsboxdruck gibt der Soft-Sensor eine Fehlermeldung aus. Diese enthält die Information welcher Wert abweicht und korrigiert werden muss. Da in den durchgeführten Versuchen nur zwei Werkzeugtemperaturen untersucht wurden, muss in weiteren Versuchen ein

Temperaturbereich identifiziert werden, in dem Profile mit minimalem Fehleranteil produziert werden.

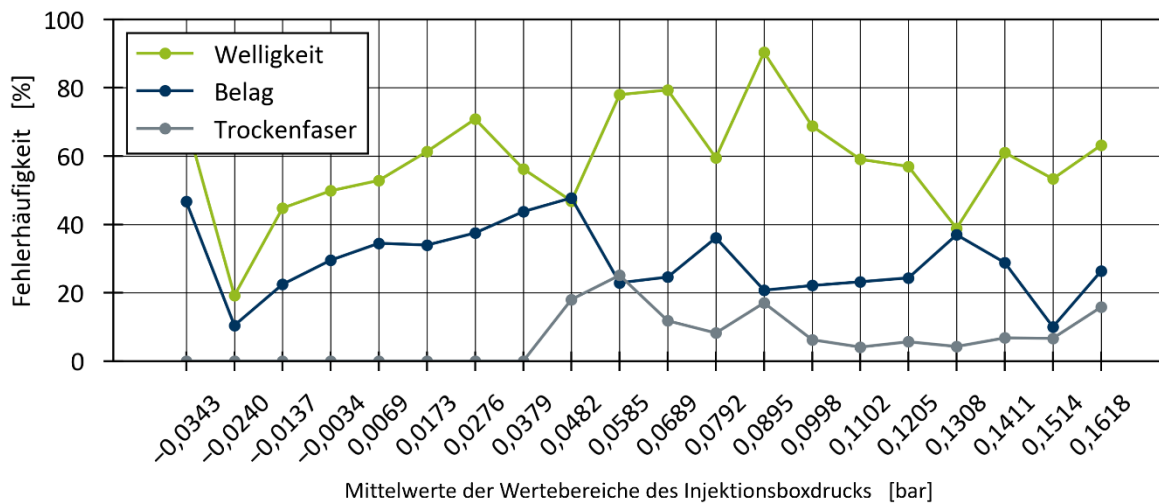


Abbildung 14: Fehlerhäufigkeiten über dem Injektionsboxdruck für den Versuchspunkt „T+“ (180/200/200 °C)

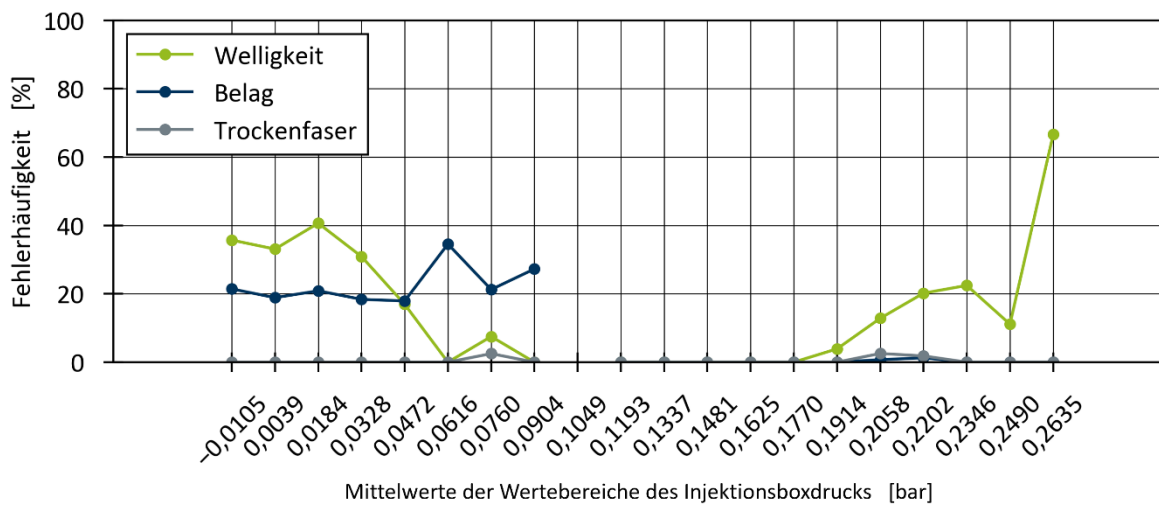


Abbildung 15: Fehlerhäufigkeiten über dem Injektionsboxdruck für den Versuchspunkt „T-“ (160/180/180 °C)

Das identifizierte Prozessfenster zeigt, dass eine Kombination von Messwerten das Potential hat, den Pultrusionsprozess zu überwachen. Die dargestellte Korrelation konnte aufgrund einer schwachen Abhängigkeit in der Korrelationsmatrix identifiziert werden. Die Nachrüstung der Pultrusionsanlage ermöglicht eine manuelle Analyse des Prozesses. Es ist möglich, auch komplexere Zusammenhänge im Prozess zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Qualitätsgrößen zu bestimmen. Die Korrelationsmatrix zeigt jedoch keine weiteren Zusammenhänge zwischen den Werten auf.

Für eine breit angelegte Untersuchung ohne Anhaltspunkte aus der Korrelationsmatrix ist die manuelle Kombination von Messwerten nicht zielführend. Die manuelle Erstellung einer ausreichenden Anzahl von Soft-Sensoren für eine ganzheitliche Überwachung des Pultrusionsprozesses ist aus wirtschaftlicher Sicht wahrscheinlich nicht sinnvoll. Da davon auszugehen ist, dass diese für andere Prozesskonfigurationen (Material, Geometrie) erneut angepasst werden müssen. Daraus leitet sich die Forschungsfrage ab, wie aggregierte Soft-Sensoren für einen kontinuierlichen Prozess auf Basis einer umfassenden Datenerfassung automatisiert identifiziert werden können.

## 8 RICHTLINIE ZUR INSTALLATION VON SOFTSENSOREN FÜR SPEZIFISCHE FEHLERBILDER

Im Folgenden wird eine Richtlinie vorgestellt, die Unternehmen insbesondere Verarbeiter dazu befähigt Soft-Sensoren für die Prozessüberwachung im Pultrusionsprozess zu installieren. Dazu wird das im Forschungsvorhaben erprobte Vorgehen zusammengefasst und systematisch dargestellt. Das Schaubild in Abbildung 16 zeigt ein Flussdiagramm für die Entscheidungen und Arbeitsschritte die für die Einrichtung eines Soft-Sensors nötig sind. Der Ablauf folgt dem Vorgehen im Forschungsvorhaben, wie er in diesem Bericht dargestellt ist. Für detaillierte Informationen und Entscheidungshilfen wird im Schaubild auf die entsprechenden Diagramme und Tabellen im Bericht verwiesen. Das Schaubild ist von Oben nach Unten zu lesen und steigert entlang der Integrationskette den Grad der Abstraktion, der für die Prozessüberwachung durchzuführen ist. So ist der Beginn die direkte Messung von Prozessdaten, während am Ende Soft-Sensoren für komplexe, nicht direkt messbare Prozess- oder Qualitätsgrößen stehen.

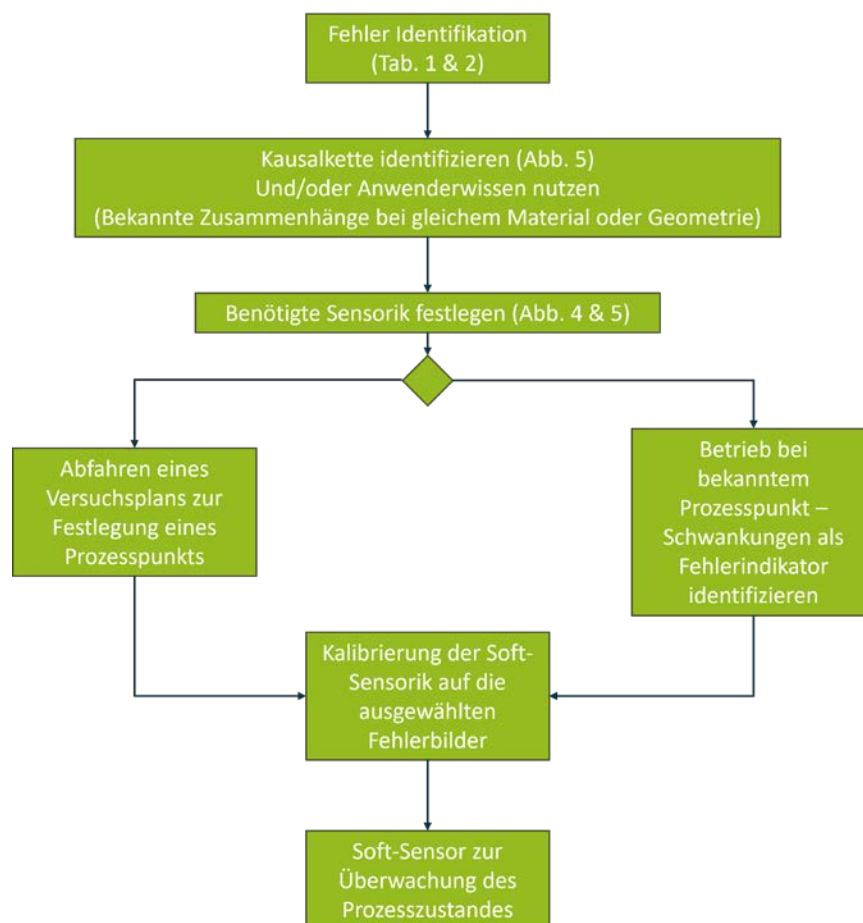


Abbildung 16: Flussdiagramm zur Richtlinie für Soft-Sensoren

Zunächst werden die zu überwachenden Fehler identifiziert. Davon ausgehend werden die in der Pultrusionsanlage zu verbauenden Sensoren ausgewählt. Um diese auszuwählen kann sich an dem in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehen orientiert werden, oder es werden bekannte Zusammenhänge bspw. von Prozessen mit gleicher Geometrie oder gleichem Matrixmaterial herangezogen. Bevor die Soft-Sensorik abschließend kalibriert bzw. in der Maschinenumgebung implementiert werden kann muss ein Testdatensatz zur Verfügung stehen. Dazu wird in einem der beiden beschriebenen Szenarien ein Datensatz mit der verbauten Sensorik erfasst, der daraufhin auf Korrelationen untersucht wird. Dabei können die Daten mit dem durch das IKV entwickelte Analysetool untersucht werden oder manuell analysiert werden.

Mit Hilfe dieses Vorgehens können Pultrusionsprozesse analysiert werden und auf Basis der Ergebnisse Soft-Sensoren etabliert werden, die eine Beurteilung des Prozesszustandes ermöglichen. Langfristig kann somit das Auftreten von Fehlern reduziert und der Ausschuss gesenkt werden. Abschließend müssen die vorhandenen Daten für die verschiedenen Nutzer, wie Werkern oder Prozessingenieure, über ein geeignetes Graphical User Interface (GUI) zugänglich gemacht werden. Insbesondere das GUI für Anlagenbediener muss mit zu entwickelnden Handlungsempfehlungen basierend auf der Interpretation der Daten, wie z. B. das Erkennen eines spezifischen Fehlers, angereichert werden, um die adressierten Ziele zu erreichen.

## 9 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Pultrusionsanlage des IKV in einem umfangreichen Retrofit digitalisiert. Die nachgerüsteten Sensoren sind über Labview mit der Datenspeicherung in einer SQL-Datenbank verbunden. Die Daten sind in Prozess- und Metadaten unterteilt. Weiterhin wurden Wirkungspläne der Pultrusionsanlage erstellt, die als Entscheidungsgrundlage für den Einsatz von Sensoren dienen können. Auf dieser Basis wurde ein Versuchsplan mit Variation von FVG, T und v durchgeführt, um den Prozesszustand zu analysieren. Damit konnte eine Datenbasis erfasst werden, die als Grundlage für die Entwicklung von Soft-Sensoren zur Verfügung steht.

Die Auswertung ergab keine direkte Korrelation zwischen den Prozessdaten und den Qualitätsgrößen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass durch die Kombination von Werkzeugtemperatur und Werkzeuginnendruck ein Prozessfenster identifiziert werden kann, in dem die untersuchten Qualitätsdaten nahezu 0 % Fehler aufweisen. Die Funktionalität des im Forschungsprojekt entwickelten Datenanalysetools konnte nachgewiesen werden.

Aus den Ergebnissen des Vorhabens lassen sich weitere Fragestellungen ableiten, die sich aus der Möglichkeit einer umfassenden Datenerfassung ergeben. Eine weiter abstrahierte Analyse der Messdaten kann ggf. Aussagen über Veränderungen im Prozess ermöglichen. Hierzu können z. B. zeitliche Ableitungen herangezogen werden. Dies bildet auch die Grundlage für eine differenzierte Betrachtung von kurz- und langfristigen Veränderungen des Prozesszustandes. Diese sollten eine Betrachtung unterschiedlicher Fehlerbilder ermöglichen. Eine Abrundung der Profilgeometrie durch Ablagerungen ist eher eine langfristige Veränderung, während eine Verschlechterung der Imprägnierung eher spontan auftreten kann. Darüber hinaus kann der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen oder die Korrelationsanalyse mittels KI sinnvoll sein. Sollen mehrere Messwerte zu einem Soft-Sensor kombiniert werden, übersteigt die Anzahl der möglichen Kombinationen den Rahmen einer manuellen Auswertung. Auf diese Weise könnte das Datenanalysewerkzeug zu einem Prozessüberwachungstool erweitert werden. Wird zusätzlich eine automatisierte Erkennung von Zusammenhängen im Tool angestrebt, könnte ggf. eine datenbasierte Regelung des Pultrusionsprozesses abgeleitet werden.

## 10 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN

Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Die Analyse von Fehlerbildern und Wirkungsplänen war notwendig, um den Fokus der Prozessüberwachung auf für KMU relevante Prozessbereiche zu legen. Außerdem wurden in durch die Wirkungspläne bereits vor der Analyse zu untersuchende Korrelationen festgelegt. Nicht alle der vermuteten Korrelationen weisen für die untersuchte Konfiguration eine Relevanz auf, bilden aber dennoch die Grundlage für die Untersuchung weiterer Konfigurationen.

Der Retrofit der Pultrusionsanlage am IKV wurde erfolgreich durchgeführt. Das aufgebaute Datenerfassungs- und Verarbeitungssystem steht für die Prozessanalyse von Materialien oder Geometrien zur Verfügung. KMU können in Kooperation mit dem IKV gezielt Soft-Sensoren zur Überwachung ausgewählter Prozesse entwickeln und für eine Implementierung in industriellen Anwendungen auslegen. Darüber hinaus wird durch die weitere Überwachung aller Pultrusionsversuche am IKV eine Datenbank für Prozesszusammenhänge in der Pultrusion aufgebaut. So ist es langfristig möglich Zusammenhänge für spezifische Materialklassen oder Profilgeometrien über eine breite Auswahl an Einflüssen zu analysieren.

Die Richtlinie zur Erstellung von Soft-Sensoren für den Pultrusion kann zusammen mit dem entwickelten Analysetool von Pultrudeuren eingesetzt werden, um die Prozessüberwachung im industriellen Umfeld zu digitalisieren und zu verbessern. Die Prozessüberwachung wird direkt aus dem Prozess entwickelt, sodass der Übergang zu einer digitalen Prozessüberwachung fließend geschieht und keine radikale Umstellung der Produktion verursacht.

Insgesamt konnten die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit bestätigt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## **11 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG**

### **11.1 Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)**

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurden durch die Forschungsstelle (IKV) 20,41 Personalmonate für wissenschaftliches Personal über die gesamte Laufzeit verwendet, zudem wurde ein technischer Angestellter sowie studentische Hilfskräfte über die gesamte Laufzeit des Projektes eingesetzt.

Mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren wissenschaftliche Mitarbeiter (HPA A, TVL-13) mit abgeschlossener, wissenschaftlicher Universitäts- oder Hochschulausbildung sowie studentische Hilfskräfte über der Projektlaufzeit beschäftigt und wurden dem Arbeitsaufwand entsprechend eingesetzt. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter waren erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts wissenschaftliche Arbeiten durchführten.

### **11.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Im Vorhaben wurden keine Werkzeuge beschafft.

### **11.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

## **12 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR KMU**

### **12.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen**

Hauptzielgruppe der Forschungsergebnisse sind KMU aus dem Bereich der FVK-Verarbeiter, die Strukturbauteile herstellen und entsprechend effiziente und robuste Fertigungsprozesse benötigen. Verarbeiter von Strukturbauteilen können die Ergebnisse des Forschungsprojektes nutzen, um ihre Prozessüberwachung zu digitalisieren und damit gegebenenfalls Ausschussquoten zu reduzieren. Darüber hinaus kann wertvolles Prozesswissen erfasst und auch unerfahrenen Werkern zur Verfügung gestellt werden, um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken und Prozesswissen im Unternehmen zu sichern. Darüber hinaus bietet eine digitale Prozessüberwachung das Potenzial, Fehler früher und schneller zu erkennen, so dass der Überwachungs- und Reinigungsaufwand durch Prozessunterbrechungen reduziert wird. Der Aufbau einer eigenen Prozessdatenbank ermöglicht schnellere und fundiertere Entscheidungen bei der Auslegung neuer Prozesse durch die Analyse bereits bestehender vergleichbarer Konfigurationen.

KMU sind somit in der Lage, ihre Wirtschaftlichkeit durch einen robusteren Prozess sowie eine kürzere Entwicklungszeit zu steigern und somit im kostengetriebenen Wettbewerb durch resultierende Kostenvorteile (Materialkosteneinsparung durch Ausschussreduzierung, Kostenreduzierung für Prozessüberwachung und weniger Stillstandszeiten für Reinigung, etc.) im kostengetriebenen Wettbewerb bestehen zu können. Darüber hinaus kann durch die Prozessüberwachung und die daraus resultierenden Einsparungen beim Energiebedarf und den Produktionsabfällen ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung wesentlicher gesellschaftspolitischer Ziele geleistet werden.

### **12.2 Wirtschaftlicher Nutzen**

Die im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse zum Einsatz von Soft-Sensoren können von KMU genutzt werden, um die Prozessüberwachung zu digitalisieren und damit einen robusteren Prozess zu etablieren. Der Ansatz kann über den hier beschriebenen Einsatz an einem Pultrusionsprozess hinaus auf andere kontinuierliche Prozesse erweitert werden.

Das Forschungsvorhaben bietet ein hohes Innovationspotenzial für alle beteiligten KMU der Branche, da für ein etabliertes kontinuierliches Verfahren (Pultrusion) eine Methode zur digitalen Prozessüberwachung vorgestellt wird. Damit können

Anforderungen an die Nachhaltigkeit der Unternehmen umgesetzt und eine Datenbasis für den entsprechenden Nachweis geschaffen werden. Zusätzlich wird eine Möglichkeit zur Wissensarchivierung geschaffen, die die Aus- und Weiterbildung von Werkern vereinfacht, da diese direkt aus bekannten Zusammenhängen lernen können.

Das generierte Wissen kann sowohl von Verarbeitern als auch von Unternehmen im Bereich Industrie 4.0, die sich auf die Digitalisierung von Prozessen spezialisiert haben, genutzt werden. Die Ergebnisse können die Grundlage für Softwarelösungen bilden, die ein digitales Abbild des Pultrusionsprozesses zur Verfügung stellen.

## 13 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

### 13.1 Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

<b>Maßnahme:</b>	<b>Zeitraumen:</b>
<b>Projektbegleitender Ausschuss</b>	Quartale 1, 5, 8 der Projektlaufzeit
<p>Es ist ein intensiver Dialog mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) vorgesehen, die den potenziellen Nutzerkreis widerspiegeln: Rohstoffhersteller, Ingenieurdienstleister, Werkzeugbauer, IoT-Dienstleister, Anlagenhersteller und Verarbeiter. Der erste PA findet als Workshop statt, bei dem alle PA-Mitglieder sowie weitere interessierte Partner Prozessfehler klassifizieren und priorisieren. Darüber hinaus werden Kausalketten für den Einfluss der Prozessfehler auf Qualitätsmerkmale diskutiert. Somit wird die Relevanz der untersuchten Prozessfehler sichergestellt und der Transfer durch die Einbindung der Akteure unterstützt.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1. PA am 30.06.2022</li> <li>- 2. PA am 21.03.2023</li> <li>- 3. PA am 27.11.2023</li> </ul>	
<b>Fachbeiratsgruppe</b>	Jährlich im November/Dezember
<p>In den jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen werden den Mitgliedern der Fördervereinigung des Instituts für Kunststoffverarbeitung die aktuellen Forschungsvorhaben vorgestellt und gemeinsam diskutiert. Der Teilnehmerkreis umfasst ca. 290 Mitgliedsfirmen, von denen der wesentliche Teil klein- und mittelständisch strukturiert ist. Somit wird der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen, und aktuelle Aspekte werden berücksichtigt.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Präsentation auf der Fachbeiratsgruppensitzung PUR-Technologie am 08.11.2022 (23 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung Composites am 09.11.2022 (24 Teilnehmer)</li> <li>- Präsentation auf der Fachbeiratsgruppensitzung PUR-Technologie am 07.11.2023 (26 Teilnehmer)</li> <li>- Vorstellung auf der Fachbeiratsgruppensitzung Composites am 08.11.2023 (26 Teilnehmer)</li> </ul>	

<b>Dialog mit der Wirtschaft</b>	Jährlich / zweijährig / dreijährig
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden über den PA hinaus mit weiteren potenziellen Nutzern diskutiert. Dies erfolgt durch Besuche vor Ort oder durch Posterpräsentation, Vorträge und Fachgespräche im Rahmen des zweijährig durchgeführten Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquiums des IKV, Messen (z. B. „K“ und „JEC“), Konferenzen (z. B. „World Pultrusion Conference“, SAMPE Deutschland/Europe, Internationale Konferenz der "Polymer Processing Society" PPS) und den vom bzw. mit dem IKV durchgeführten Fachtagungen („Reactive Pultrusion – Approaches for a cost-efficient FRP-profile production“) und Seminare („Faserwickel- &amp; Pultrusionsverfahren“).</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Projektvorstellung auf der JEC World 2022 in Paris, Frankreich (03.-05.05.2022)</i></li> <li>- <i>Projektvorstellung auf der JEC World 2023 in Paris, Frankreich (25.-27.05.2023)</i></li> <li>- <i>Projektvorstellung auf der JEC World 2024 in Paris, Frankreich (05.-07.05.2024)</i></li> <li>- <i>Projektvorstellung in der IKV-Insight 3/2022</i></li> </ul>	
<b>Wissenschaftliche Publikationen</b>	Zwischenergebnisse und Abschlussveröffentlichung
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in Form von Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften wie z. B. „Composites Part A“ (Elsevier Verlag), „Kunststoffe“ (Carl Hanser Verlag) oder „Plastverarbeiter“ (Hüthig Verlag GmbH) einem breiten Publikum vorgestellt. Es werden sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Leserkreise berücksichtigt und branchenspezifische sowie -übergreifende Medien ausgewählt. Neben der obligatorischen Abschlussveröffentlichung ist die Veröffentlichung von Zwischenergebnissen vorgesehen.</p> <p><i>Durchgeführt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- FLAMMER, F.; FOERGES, D.; FISCHER, K.; HOPMANN, CH.; Auf dem Weg zur digitalen Pultrusion, <i>Plastverarbeiter</i> (2024) 3, S.: 20-23</li> </ul>	

### 13.2 Nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

<b>Maßnahme:</b>	<b>Zeitraumen:</b>
<b>Forschungsbericht</b>	2. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in einem detaillierten Forschungsbericht dokumentiert, der interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt wird.	
<b>Unterstützung von Unternehmen bei der Umsetzung des Analysetools</b>	Während der Laufzeit / nach Abschluss
<p>Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Wissen fließt in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Das IKV berät interessierte Unternehmen bei der Umsetzung der Projektergebnisse, wie Ausrüstung einer Pultrusionsanlage mit geeigneter Sensorik, Aufbau einer geeigneten IT- und Dateninfrastruktur oder Kalibrierung der Algorithmen auf vorhandene Prozesse.</p> <p>Darüber hinaus greift das IKV bei der Umsetzung der komplexen Digitalisierungsprojekte auf sein Netzwerk zurück, um Kompetenzsynergien der Mitgliedsfirmen und den Mitgliedern des PA zu realisieren und sorgt so für die wichtige Vernetzung von domänenspezifischem Fachwissen.</p>	
<b>Integration der Projekteinhalte in ein geeignetes Veranstaltungskonzept</b>	zum Abschluss
Die entwickelte Technologie wird in den Umfang des jährlich angebotenen Seminars „Faserwickel- & Pultrusionsverfahren“ integriert und bei entsprechender Nachfrage gegebenenfalls ein eigenständiges, anwenderorientiertes Veranstaltungsformat entwickelt.	
<b>Bereitstellung des Analyseframeworks für industrielle Daten</b>	zum Abschluss
Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden interessierten Industrieunternehmen auf verschiedene Weisen bereitgestellt. Zum einen ermöglicht der entwickelte Leitfaden (Kap. 8) die direkte Umsetzung der Erkenntnisse im Unternehmen, z. B. durch die gezielte Auswahl von notwendiger Sensorik zur spezifischen Fehlererkennung und zum anderen können bereitgestellte Prozessdaten mit dem Analysetool ausgewertet und analysiert werden können.	

<b>Akademische Lehre/ Personaltransfer/ Dissertation</b>	Während der Laufzeit / nach Abschluss
<p>An der Bearbeitung der Aufgabenstellung sind Studierende als Hilfskräfte beteiligt. Zusätzlich werden Bachelor- und Masterarbeiten zu dem Themenkomplex angeboten. Das erarbeitete Wissen können die Studenten später in die betriebliche Praxis übernehmen. Zusätzlich fließen die Projektergebnisse in die Lehrtätigkeiten des IKV ein und sind so Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure. Darüber hinaus besteht für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter die Möglichkeit zur Promotion auf dem beantragten Forschungsthema.</p>	

## 14 VERÖFFENTLICHUNGEN UND STUDENTISCH-WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

### Veröffentlichungen:

- [FFFH24] - FLAMMER, F.; FOERGES, D.; FISCHER, K.; HOPMANN, CH.; Auf dem Weg zur digitalen Pultrusion, *Plastverarbeiter* (2024) 3, S.:20-23

### Studentisch-wissenschaftliche Arbeiten:

- [Hou23] HOURLE, M.: *Aufbau eines Datenmodells für die Pultrusion als Grundlage für die datenbasierte Prozessüberwachung*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2023 – Betreuer: E. Kremer

## 15 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

### 15.1 Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
DB	Datenbank
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoffe
GUI	Graphical User Interface
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PUR	Polyurethan
SQL	Structured Query Language
T	Temperatur
v	Geschwindigkeit

### 15.2 Formelzeichen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
F	[N]	Kraft
FVG	[-]	Faservolumengehalt
h	[mm]	Höhe
h	[mm]	Dicke
Hz	[1/s]	Frequenz
L	[mm]	Länge
P	[N/mm <sup>2</sup> ]	Druck
t	[s]	Zeit
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$\eta$	[mPas]	Viskosität
$\sigma$	[-]	Standartabweichung

## 16 LITERATUR

- [Bar14] BARAN I.: *Modelling the Pultrusion Process of Off Shore Wind Turbine Blades*. Technical University of Denmark, Dissertation, 2014
- [Bar15] BARAN, I.: Pultrusion processes for composite manufacture In: BOISSE, A. (Hrsg.): *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. Woodhead Publishing, 2015, S. 379-414
- [BCH+14] BARAN, I.; CARLONE, P.; HATTEL, J.H.; PALAZZO, G.S.; AKKERMAN, R.: The Effect of product size on the pulling force in pultrusion. *Key Engineering Materials* 611-612 (2014), S. 1763-1770
- [BCE+17] BARAN I, CINAR K, ERSOY N, AKKERMAN R, HATTEL JH.: A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. *Archives of Computational Methods in Engineering* 24(2) (2017), S.: 365-95
- [Bez17] BEZERRA RM.: *Modelling and Simulation of the Closed Injection Pultrusion Process*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Dissertation; 2017
- [Bla99] BLAUROCK J. *Zur Optimierung des Strangziehverfahrens für endlosfaserverstärkte, hochfeste Kunststoffprofile*. RWTH Aachen: Dissertation; 1999
- [FFFH23] FLAMMER, F.; FOERGES, D.; FISCHER, K.; HOPMANN, CH.; Gewusst wie: Injektionsboxdesign für die Pultrusion, *Kunststoffe* 113 (2023) 3, S.:86-89
- [FGRX07] FORTUNA, L.; GRAZIANI, S.; RIZZO, A.; XIBILIA, M.G.: *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*, Springer, London, 2007, ISBN: 978-1-84628-479-3
- [HID17] HOLMES, L.; ILLOWSKY, B.; DEAN, S.: *Introductory Buisness Statistics*. Houston, Texas, OpenStax, 2017
- [HWSF21] HOPMANN, C.; WRUCK, L.; SCHNEIDER, D.; FISCHER, K.: Flow field dynamics in pultrusion injection boxes, *JEC Composites Magazine*, 141 (2021), S. 22-25
- [HWSF22] HOPMANN, C.; WRUCK, L.; SCHNEIDER, D.; FISCHER, K.: Experimental study of roving configuration's influence on the flow field in a full-scale transparent pultrusion injection box. *Journal of Composite Materials* 56 (2022) 17, S. 2695-2712
- [HWT+18] HOPMANN, CH.; WAHLE, T.; THEUNISSEN, M.; HEINISCH, J.; BIBOW, P.; LAMMERT, N.;KESSLER, F.: Flexibilisierung der Spritzgussfertigung durch Digitalisierung. 29. *Internationales Kolloquium Kunststofftechnik 2018*. Aachen, Februar 2018
- [Kre18] KREBS, D.: *Fundamentals of the Pultrusion Process for Production of FRP Components for the Requirements of Automotive Large-scale Production*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2018
- [LBM03] LUISIER, A.; BOURBAN, P.-E; MÅNSON, J.-A.E.: Reaction injection pultrusion of PA12 composites: process and modelling. *Composites: Part A* 34 (2003), S. 583–595
- [LXD+03a] LI, S.; XU, L.; DING, Z.; LEE, L.J.: Experimental and Theoretical Analysis of Pulling Force in Pultrusion and Resin Injection Pultrusion (RIP) - Part I: Experimental. *Journal of Composite Materials* 37 (2003) 02, S. 163-189
- [LXD+03b] LI S, XU L, DING Z, LEE JL, ENGELEN H. *Experimental and Theoretical Analysis of Pulling Force in Pultrusion and Resin Injection Pultrusion (RIP) – Part II: Modeling and Simulation*. *Journal of Composite Materials*. 37 (2003), (3): S.: 195-216
- [Maj10] MAJER, F.: *Semantisches Informationsmodell für die Betriebsunterstützung dienstorientierte Systeme*. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2010
- [MKK99] MUSTAFA, I.; KHOMAMI, B.; KARDOS, J.L.: 3-D Nonisothermal Flow Simulation Model for Injected Pultrusion Processes. *AIChE Journal* 45 (1999) 01, S. 151-163
- [MRV98] MOSCHIAR, S.M.; REBORDO, M.M.; KENNY, J.M.; VÁZQUEZ, A.: *Pultrusion Processing*. Institute of Material Science and Technology (INTEMA), Mar del Plata, Argentinien, 1998
- [NN03] N.N.: *DIN EN 13706: Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe Spezifikationen für pultrudierte Profile*, 02.2003
- [SBH17] SIEBERTZ, K.; BEBBER, D.; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DOE)*, Springer Vieweg, Berlin, Deutschland, 2017
- [SCA18] SAFONOV A, CARLONE P, AKHATOV I.: Mathematical simulation of pultrusion processes: A review. *Composite Structures*, 184 (2018), S. 153-77
- [SKJ06] SRINIVASAGUPTA, D.; KARDOS, J.L.; JOSEPH, B.: Analysis of Pull-Force in Injected Pultrusion. *SAMPE Journal of Advanced Materials* (2006)
- [SRJ14] SHAKYA, N.S.; ROUX, J.A.; JESWANI, A.L.: Effect of Fiber Volume Fraction in Fiber Reinforcement Compaction in Resin Injection Pultrusion Process. *Polymer & Polymer Composites*, 24 (2016) 01, S. 7-20

- [STHR20] SAVYTSKYI, O.; TYMOSHENKO, M.; HRAMM, O.; ROMANOV, S.: Application of soft sensors in the automated process control of different industries. *The International Conference on Sustainable Futures ICSF. Web Conference, 2020*
- [Sum12] SUMERAK, J.E.: Pultrusion Process Troubleshooting. In: WAGNER, J.R. (Hrsg.): *Handbook of Troubleshooting Plastics Processes*. Beverly, USA: Scrivener Publishing, 2012, S. 407-439
- [TMKN90] TRIVISANO, A.; MAFFEZZOLI, A.; KENNY, J. M.; NICOLAIS, L.: Mathematical modeling of the pultrusion of epoxy based composites. *Advances in Polymer Technology* 10 (1990) 4: S. 251-264.
- [Wru22] WRUCK, L.: *Experimentelle Analyse des Strömungsfelds in offenen Injektionsboxen für die Pultrusion*. Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV): Dissertation; 2022