



Antrag im Rahmen des zentralen Innovationsprogrammes für den Mittelstand „ZIM“

Anlage 4

„DrySense“



BvL Oberflächentechnik GmbH
Grenzstr. 16, 48488 Emsbüren



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt (TUDa)
Institut für Produktionsmanagement
Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Ansprechperson:
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Tel: +49 6151 16-20080
m.weigold@ptw.tu-darmstadt.de

4. Zu Anlage 4: Erläuterung der technisch/technologischen Zielstellung des FuE Projekts

Das folgende Kapitel erläutert die technische Zielstellung des FuE-Projekts.

4.1. Projektbeschreibung

Im Folgenden wird das geplante Gesamtvorhaben sowie die Arbeiten am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technische Universität Darmstadt (TUDa) beschrieben¹.

4.1.1. Ausgangssituation und Marktbedarf

Marktbedarf

In der metallverarbeitenden Industrie ist die Reinigung von Bauteilen ein wichtiger Prozessschritt und rückt aufgrund steigender Qualitätsanforderungen an die Bauteiloberfläche zunehmend in den Fokus [1]. Dabei werden mit einem Anteil von über 80% wässrige Reinigungsverfahren eingesetzt, welche eine nachfolgende Trocknung erfordern [2]. Zeitgleich führen steigende Energiepreise und klimapolitische Ziele zu wachsenden Anreizen, den Energieaufwand zu reduzieren [3]. In Untersuchungen an einer industriellen Durchlaufreinigungsanlage (DLRA) im Dauerbetrieb entfielen 37% des Energiebedarfs auf die Trocknung der Bauteile [4]. Entsprechend stellt die Bauteiltrocknung einen guten Ansatzpunkt zur Reduktion des Energiebedarfs – und damit einhergehend die Reduktion der CO₂-Emissionen und Kosten – dar.

Zur energetischen Optimierung der Bauteiltrocknung wurde in vorherigen Arbeiten gezeigt, dass die Wahl bauteilspezifischer und energetisch idealer Prozessparameter ein erhebliches Einsparpotential aufweist [5]. Diese Prozessparameter der Trocknungsaggregate werden derzeit erfahrungsbasiert ausgelegt und im laufenden Betrieb selten angepasst [6]. Dies resultiert nicht selten in einer Über Trocknung, welche idealerweise zu vermeiden ist [7]. Für eine energieeffiziente, bedarfsgerechte Prozessregelung von Trocknungsprozessen in der Bauteilreinigung ist eine Überwachung der aktuellen Bauteiltrockenheit erforderlich.

Ausgangssituation Inline-Monitoring der Bauteiltrockenheit

Flüssiges Wasser wird an metallischen Oberflächen adsorbiert, wobei unterschiedliche physikalische Effekte auftreten, die unter anderem vom Material abhängig sind [8]. Des Weiteren führen Geometrien wie Kanten oder Bohrungen zu Unterschieden in Tropfen- und Filmbildung [9]. Für die Praxis der Bauteiltrocknung ist daher von einer inhomogenen Verteilung der Flüssigkeit, trocknungskritischen Stellen und der Bildung von Tropfen und Filmen an der Oberfläche der Bauteile auszugehen. Daneben sind die Anforderungen bzgl. der Trockenheit von der individuellen Prozesskette und den nachfolgenden Fertigungsprozessen abhängig [1,10]. Dies führt zur grundlegenden Herausforderung, dass es keinen allgemein gültigen Zustand „trocken“ in Form eines quantitativen Wertes gibt und die Bewertung individuell zu vereinbaren ist [11].

¹ Die Forschungseinrichtung TUDa/PTW wird im Folgenden zumeist mit dem Institutsnamen „PTW“ abgekürzt.

Zur objektiven Analyse der Trockenheit führt der Fachverband industrielle Teilereinigung (FiT) eine Liste an Verfahren [12]. Diese sind im derzeitigen Stand der Technik nicht für die Inline-Detektion der aktuellen Trockenheit einsetzbar. Auch im Stand der Wissenschaft sind kaum Publikationen zu einem Inline-Monitoring der Bauteiltrockenheit für Bauteilreinigungsanlagen verfügbar. Der Stand in Wissenschaft und Technik ist detailliert in Kapitel 4.1.6 aufbereitet.

In vorherigen Arbeiten von PTW und der BvL Oberflächentechnik GmbH konnte das Potential von Infrarot-(IR)-Kameras sowie einer Prädiktion auf Basis von Low-Cost-Sensorik² für die Detektion von Restfeuchte gezeigt werden. Dabei ist die Anwendung allerdings auf Energiekennzahlen beschränkt bzw. mit deutlichen Limitationen versehen. Beides wird in Absatz 4.1.6 detailliert beschrieben. [13,14,5] Aufgrund der Limitation der bisherigen Verfahren erfolgt derzeit keine bedarfsgerechte Regelung der Trocknung in der industriellen Praxis. Anforderungen an eine Messstelle sind insbesondere:

- Erfassung der Trockenheit für unterschiedliche Geometrien
- Erfassung der Trockenheit in unterschiedlichen Behandlungskammern
- Präzise Erfassung im Live-Betrieb als Voraussetzung für die Regelung
- Robustheit des Verfahrens gegenüber Umwelteinflüssen in der industriellen Praxis

Für die bauteilspezifische, energieeffiziente Trocknung unterschiedlicher Bauteile mit unterschiedlichen Trocknungsverfahren ist die Erforschung einer innovativen, robusten Inline-Erfassung der aktuellen Trockenheit notwendig.

4.1.2. Beabsichtigte technologische Entwicklung von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen

Die übergeordnete Zielsetzung des Gesamtvorhabens ist der Aufbau eines Monitoring- und Regelungssystems für die Bauteiltrocknung zur Steigerung der Energieeffizienz. Monitoring im Allgemeinen dient dazu, auf Basis von Kennwerten, die im laufenden Betrieb einer Anlage ermittelt werden, den Zustand eines Untersuchungsgegenstands sichtbar, verarbeitbar, analysierbar und beschreibbar zu machen. Übergeordnetes Ziel einer Prozessregelung in der Fertigung ist es, präzise Prozesse mit geringer Fehlerabweichung zu erzielen. Für beides werden Echtzeitdaten von Sensoren verwendet. [15] Die Kernelemente eines Monitoringsystems sind in Abbildung 1 veranschaulicht.



Abbildung 1: Kernelemente eines Monitoringsystems (Quelle: Eigene Abbildung nach[15])

Kernelement des Gesamtsystems ist ein Sensor zur Überwachung der aktuellen Bauteiltrockenheit. Unter einem Sensor wird allgemeinesprochen ein Messfühler verstanden, mit welchem nichtelektrische Messgrößen in Form eines elektrischen Signals erfasst werden [16].

² Temperatur-, Druck-, Luftfeuchtigkeitssensoren. Diese sind weit verbreitet und günstig verfügbar.

Dabei ist bei Messfühlern zwischen einer direkten Messung der physikalischen Größe gegenüber einer indirekten Messung und Herleitung über andere physikalische Größen zu unterscheiden [17]. In Abgrenzung zu physikalischen Sensoren, sind virtuelle Sensoren Software-Layer, die Signale erzeugen, indem sie Eingaben von physikalischen Sensoren oder anderen virtuellen Sensoren kombinieren und aggregieren [18,19]. Das Konzept eines virtuellen Sensors ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Dabei können auch mehrere physikalische oder virtuelle Sensoren zu einem neuen virtuellen Sensor kombiniert werden. [19]

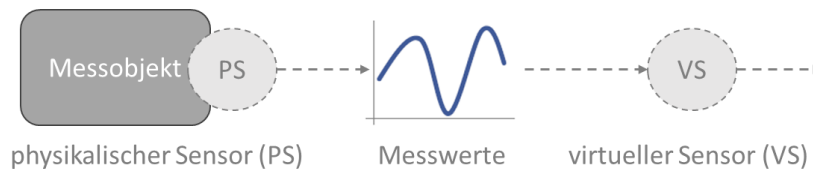


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines virtuellen Sensors (Quelle: Eigene Abbildung nach [19])

Für die Inline-Überwachung der aktuellen Bauteiltrockenheit sind derzeit keine geeigneten Produkte und Verfahren vorhanden. Die im Projekt angestrebte Lösung für die Messstelle ist ein virtueller Sensor. Dieser soll das bildgebende Verfahren einer IR-Kamera mit Grey-Box Modellen auf Basis von Low-Cost-Sensorik (Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit) kombinieren, sodass ein Einsatz für unterschiedliche Bauteile und Trocknungskammern möglich ist (siehe Abbildung 3). In Abgrenzung zu Black-Box Modellen und rein physikalischen Modellierungsansätzen (White-Box Modelle) stellen Grey-Box Modelle einen Mittelweg zwischen Abstraktionsgrad und Komplexität in der Modellierung dar (siehe Abbildung 6). Insgesamt soll der virtuelle Sensor die Stärken der jeweiligen Verfahren (IR-Kamera; Modell) hervorheben und Limitationen kompensieren.

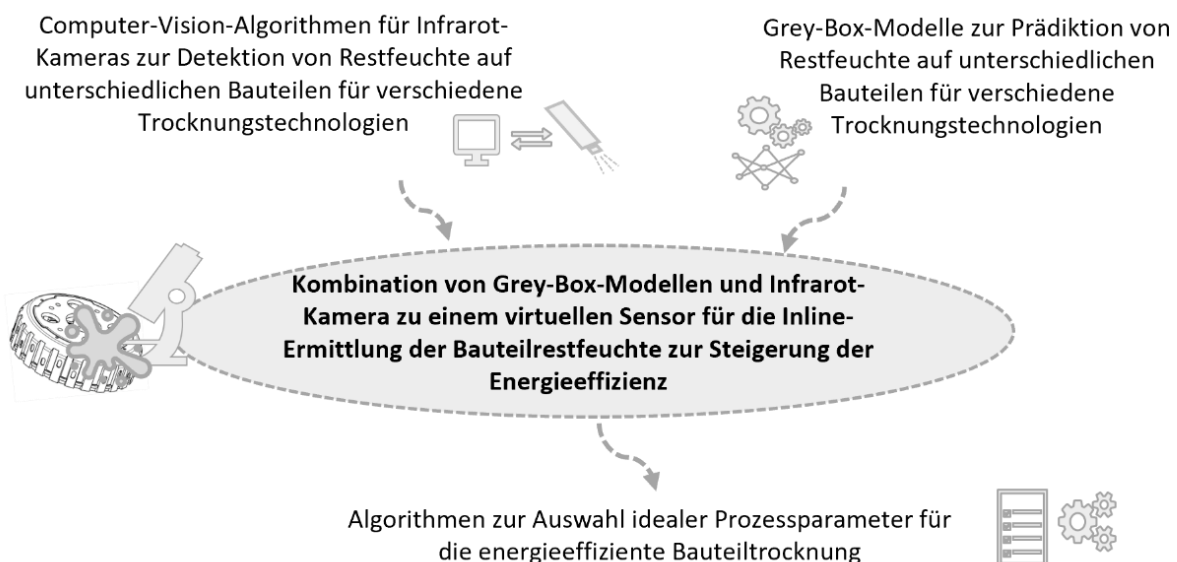


Abbildung 3: Geplantes Vorhaben zur Detektion der Restfeuchte auf Bauteilen für ein Monitorings- und Regelungssystem (Quelle: PTW)

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die geplanten Entwicklungen am PTW. Die detaillierten Teilschritte in Form von Arbeitspaketen sind im darauffolgenden Kapitel 4.1.3 beschrieben.

Beabsichtigte technologische Entwicklungen der Forschungseinrichtung TUDa/PTW

Abbildung 3 zeigt schematisch die kombinierte Messstelle. Zunächst gilt es, die beiden Verfahren zur Erfassung der Restfeuchte für unterschiedliche Kammern und Bauteile zu befähigen. Während die Arbeiten der BvL Oberflächentechnik GmbH die Tätigkeiten zur Erfassung mit IR-Kameras umfassen, sollen am PTW zunächst Grey-Box Modelle zur Prädiktion auf Basis günstiger Sensorik erarbeitet werden. Hierfür sollen die in Arbeitspaket 3.2. geplanten, experimentellen Untersuchungen und Entwicklungstätigkeiten durchgeführt werden. Ziel sind robuste Prädiktionen für unterschiedliche Trocknungskammern und Bauteilgeometrien. Des Weiteren sollen Maßnahmen zur Steigerung der Präzision der Modelle erforscht sowie das Potential von verallgemeinerten Ansätzen identifiziert werden. Das Vorhaben am PTW bezüglich Grey-Box Modellen ergibt das TEZ 1.

Kern des virtuellen Sensors ist die Kombination aus IR-Kamera und Low-Cost-Sensorik mit Modellen. Wie im Kapitel zum Stand der Wissenschaft herausgearbeitet wird, ergänzen sich die Verfahren in wesentlichen Punkten (siehe Kapitel 4.1.6). Daher birgt die Kombination das Potential, die jeweiligen Stärken der einzelnen Verfahren zu nutzen und so die Limitationen zu kompensieren. Dafür sollen am PTW Ansätze zur Sensordatenfusion erforscht und entwickelt werden, die dies für den Anwendungsfall möglich machen. Darüber hinaus gilt das besondere Augenmerk der Robustheit im Betrieb, sodass die Tauglichkeit für die industrielle Praxis demonstriert werden kann. Die Forschungstätigkeiten zur Sensordatenfusion und dem virtuellen Sensor ergeben das TEZ 2.

Der entwickelte Sensor ermöglicht die automatisierte Erfassung der Trockenheit im Live-Betrieb. Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist dann die Steigerung der Energieeffizienz der Bauteiltrocknung durch eine Regelung der Stellgrößen des Systems. Hierfür sollen am PTW Algorithmen zur Auswahl idealer Prozessparameter für die Steigerung der Energieeffizienz erarbeitet werden. Diese bilden die Grundlage für die Adaption auf der Steuerung, die durch die BvL Oberflächentechnik GmbH umgesetzt werden soll. Das Vorgehen zur Auswahl der idealen Betriebsparameter entspricht dem TEZ 3.

Zuletzt sind die durchgeführten Tätigkeiten für die Erreichung der wirtschaftlichen Einzelziele (WEZ) angemessen aufzubereiten. Daher soll eine Demonstration und Validierung im Live-Betrieb erfolgen. Hierfür steht am Forschungsinstitut eine Durchlaufreinigungsanlage im industriellen Maßstab zur Verfügung, sodass die Einsatzfähigkeit für die Praxis gezeigt werden kann. Die zugehörigen Arbeiten münden im TEZ 4.

Somit ergeben sich für das PTW folgende technische Einzelziele (TEZ):

- **TEZ 1:** Entwicklung von Grey-Box-Modellen zur Prädiktion von Restfeuchte auf unterschiedlichen Bauteilen für verschiedene Trocknungstechnologien.
- **TEZ 2:** Kombination von Grey-Box-Modellen und Infrarot-Kamera zu einem virtuellen Sensor für die Inline-Ermittlung der Bauteilrestfeuchte.
- **TEZ 3:** Entwicklung von Algorithmen für die Maximierung der Energieeffizienz bei der Bauteiltrocknung durch Auswahl idealer Prozessparameter.
- **TEZ 4:** Demonstration und Validierung der Entwicklungen im Live-Betrieb an einer Forschungsanlage im industriellen Maßstab.

Neben den technischen Einzelzielen werden für das Vorhaben der Forschungseinrichtung folgende wirtschaftliche Einzelziele definiert:

- **WEZ 1:** Nutzung der Ergebnisse für den Transfer in die Wissenschaft durch Publikationen und Beiträge auf Konferenzen
- **WEZ 2:** Transfer in die Industrie in Führungen und Workshops
- **WEZ 3:** Transfer in der Lehre in Vorlesungen, Tutorien und im Rahmen von Abschlussarbeiten

Die im Projekt geplanten Tätigkeiten sind in Arbeitspaketen (AP) und Teilpaketen (TP) strukturiert. Die an der Forschungseinrichtung geplanten APs und TPs werden im Folgenden näher beschrieben. Hierbei werden auch die angestrebte, technische Funktionalität sowie der vorgesehene Lösungsweg beschrieben.

4.1.3. Angestrebte technische Funktionalitäten und relevante Parameter mit zugehörigem Lösungsweg

Im Folgenden werden die Arbeitspakete und Teilpakete, die vom PTW bearbeitet werden, beschrieben und die erwartete technische Funktionalität sowie der angestrebte Lösungsweg dargestellt.

Arbeitspaket 3: Grey-Box Modellen zur Prädiktion der Restfeuchte

In diesem Arbeitspaket sollen am PTW Grey-Box Modellen zur Prädiktion der Restfeuchte entwickelt werden. Im Folgenden werden die Lösungsschritte in Form von Teilpaketen detailliert beschrieben.

Teilpaket 3.1: Prüfstand und visuelles Bewertungsschema für die Trockenheit von Bauteilen

Empirische Modelle (z.B. Machine-Learning-(ML)-Modelle) sind in hohem Ausmaß von den Trainingsdaten abhängig, mit denen sie entwickelt werden. Im Kontext dessen, dass der Zustand „trocken“ in der Praxis der Bauteiltrocknung anwendungsfallspezifisch ist, stellt dies das Projekt vor die besondere Herausforderung, einen objektiven Zielzustand zu verwenden. Labor-Methoden wie die Restgasanalyse bieten einen objektiven und quantitativen Wert, sind aber zeit- und kostenaufwändig in der Anwendung. Dementsprechend ist der Aufbau umfangreicher Trainingsdatensätze aufwändig. Hingegen sind visuelle Begutachtungen mit Bewertungsschema subjektiver und weniger genau, bieten aber das Potential, niederschwellig größere Datensätze aufzubauen. Für das Projekt ist der Einsatz beider Verfahren zielführend. So soll einerseits für alle untersuchten Bauteile jeweils ein einheitliches Vorgehen festgelegt werden, nach denen die Trockenheit visuell durch Menschen bewertet wird. Ein beispielhafter Ansatz hierfür findet sich im vorherigen Projekt [5]. Dieser ist auch auf bislang nicht berücksichtigte Geometrien zu übertragen. Die visuelle Methode soll dann für den Aufbau größerer Trainingsdatensätze sowie die Validierung des Live-Betriebs verwendet werden, da hier ein schnelles Feedback und entsprechend ein schnelles Verfahren notwendig ist. Um die Nachteile in Puncto Genauigkeit auszugleichen, soll parallel dazu ein Prüfstand auf Basis der

Restgasanalyse (RGA) angeschafft und in Betrieb genommen werden. Das Grundprinzip des Verfahrens ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierfür sind kommerzielle Lösungen verfügbar [20,21].

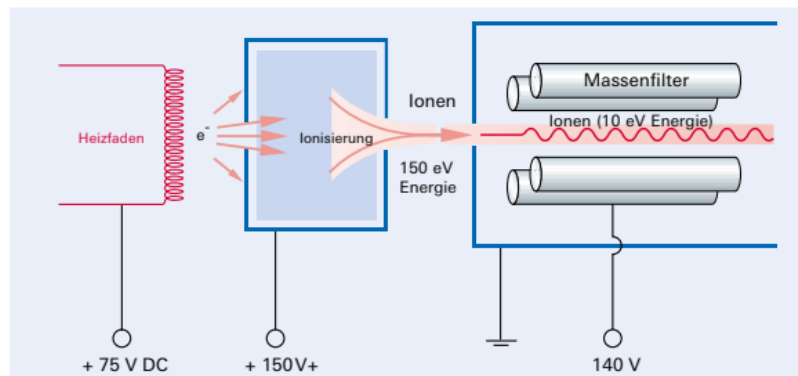


Abbildung 4: Grundprinzip der Massenspektrometrie (Quelle: Pfeiffer Vacuum [22])

Mit Hilfe der RGA werden die Ansätze zur visuellen Bewertung hinsichtlich ihrer Genauigkeit verbessert und validiert. Des Weiteren dient der Prüfstand der präziseren Bewertung der experimentellen Untersuchungen durch stichprobenartige Analysen. Durch die Verwendung der beiden Verfahren können offline sowohl kritische Stellen als auch die Gesamttrockenheit objektiv beschrieben werden und so ein Trainingsdatensatz für Modelle generiert werden. Die Funktionalität ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 :Technische Funktionalität von TP 3.1.

Parameter	Wert
Prüfstand	Ein Prüfstand zur manuellen, detaillierten und quantitativen Ermittlung des Trocknungsgrads wurde in der Forschungs- und Lernfabrik ETA in Betrieb genommen
Visuelle Bewertungsschemata	Für alle verwendeten Bauteile wurden visuelle Bewertungsschemata festgelegt, die charakteristische Geometrien von Bauteilen berücksichtigen Die Schemata wurden hinsichtlich Objektivität und Quantifizierbarkeit kritisch geprüft

Teilpaket 3.2: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der vorgelagerten Prozesse

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl die Bauteilgeometrie als auch der vorgelagerte Prozess Einfluss auf den Trocknungsprozess haben [12,23,9,5]. Beide Aspekte sollten daher vor der Modellbildung in TP 3.3. durch experimentelle Versuchsreihen systematisch adressiert werden. Hierfür steht am PTW eine Durchlaufreinigungsanlage (DLRA) der BvL Oberflächentechnik GmbH mit verschiebbarer Trocknungszone (Umluft- oder Vakuumtrocknung) zur Verfügung.



Abbildung 5: Durchlaufreinigungsanlage mit verfahrbarer Trocknungszone am PTW (Quelle: PTW)

Die Anlage ist mit einem komponentenbasierten Leistungsmonitoring sowie weiterer Sensorik (Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit) in den Reinigungs- und Trocknungskammern ausgestattet. Zusätzlich gibt es eine Kammeranlage des Typs Ocean mit (Umlufttrocknung). Zur Datenspeicherung sind Datenbanken vorhanden. Des Weiteren steht mobile Messtechnik zur Erfassung der Oberflächentemperaturen (IR-Messtechnik, Kontakttemperatursensoren) zur Verfügung. Alle Versuchsreihen werden dokumentiert und analysiert. Ziel ist es, aus den Versuchsreihen allgemeine Erkenntnisse abzuleiten, die in die Modelle der virtuellen Messstelle einfließen und die Genauigkeit und Generalisierbarkeit der Prädiktion erhöhen. Die Funktionalität ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Technische Funktionalität von TP 3.2.

Parameter	Wert
Einfluss der vorgelagerten Prozessschritte	<p>Der Einfluss vorgelagerter Prozess für verschiedene Trocknungskammern und Bauteile wurde experimentell untersucht.</p> <p>Alle Versuchsdaten wurden analysiert.</p> <p>Es wurde eine Handlungsempfehlung abgeleitet, wie der Vorprozess in die Detektion der Trockenheit berücksichtigt werden kann.</p>

Teilpaket 3.3.: Entwicklung von Grey-Box Modellen zur Prädiktion der Restfeuchte

In vorangegangenen Arbeiten am PTW wurde gezeigt, dass mit Hilfe von Low-Cost-Sensorik und aktuellen Betriebsdaten der Maschine die Trockenheit von Bauteilen abgeschätzt werden kann. Hierfür wurde ein ML-Algorithmus auf Basis eines Black-Box Modells mit Versuchsdaten angelernet und implementiert [14]. Um den Trainingsaufwand für unterschiedliche Bauteile zu reduzieren und die Robustheit der Prädiktion zu erhöhen, sollen für die angestrebte Messstelle Grey-Box Modelle entwickelt werden, in denen die Trocknungsvorgänge auf physikalische Zusammenhänge in Kombination mit empirisch bestimmten Parametern zurückgeführt werden [24]. Wie genannt stellen Grey-Box Modelle hierbei einen Mittelweg zwischen

Abstraktionsgrad und Komplexität in der Modellierung dar (siehe Abbildung 6) [25]. Eine vollständige physikalische Modellierung in White-Box-Modellen ist aufgrund der komplexen Vorgänge der Wärme- und -Stoffübertragung in der Bauteiltrocknung für eine Inline-Prädiktion in unterschiedlichen Anlagen mit unterschiedlichen Bauteilen nicht erstrebenswert [26].

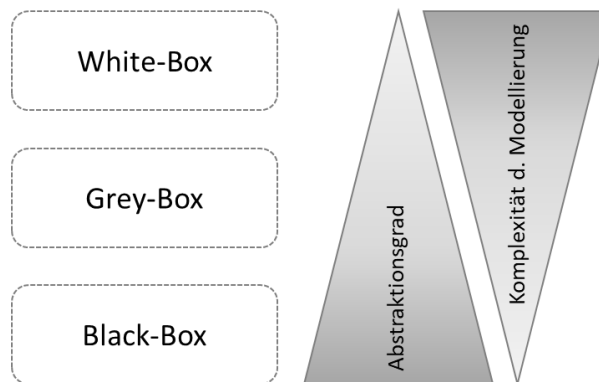


Abbildung 6: Vergleich unterschiedlicher Modellierungskonzepte [25] (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [25].)

Als Vorgehen sind zunächst Algorithmen zur Datenverarbeitung und -filterung notwendig, welche die Robustheit der einzelnen Sensoren erhöhen (siehe allgemeiner Aufbau eines Monitoringsystems in Abbildung 1). Parallel dazu werden allgemeine Ansätze für die Beschreibung der Vorgänge der Bauteiltrocknung identifiziert und hinsichtlich Abstraktionsgrad und Komplexität der Modellierung für den Anwendungsfall verglichen. Dabei sollen einerseits die unterschiedlichen Funktionsprinzipien der Trocknung einbezogen werden. Andererseits sollen die Erkenntnisse aus TP 3.2. bezüglich der Bauteilgeometrien und Vorprozesse berücksichtigt werden. Untersuchungsobjekt ist die zuvor genannten DLRA am PTW, die bereits mit Sensorik ausgestattet ist. Mit Hilfe der allgemeinen Ansätze werden dann individuelle Grey-Box Modelle entwickelt und parametrisiert, die die Trockenheit nach den Bewertungsschemata aus TP 3.1. abschätzen. Zur Parametrierung der Modelle können zunächst historische Daten verwendet werden, die im Laufe des Arbeitspaketes schrittweise durch gezielte Versuchsreihen validiert und ggf. ersetzt werden. Da viele Bauteile über mehrere geometrische Features verfügen, ist es möglich, anstelle eines Gesamtmodells kleinere Teilmodelle zu entwickeln. Diese können dann aggregiert werden, um eine Gesamtlösung zu bieten. Die Modellierung in kleineren, spezifizierten Bereichen erlaubt die Verwendung unterschiedlicher physikalischer Modelle und kann daher Details besser abbilden. Im Rahmen des Projekts gilt es zu prüfen, ob die Modellierung in Teilaspekten in Puncto Performance, Modellierungsaufwand und Übertragbarkeit einen Vorteil bietet. Ziel von TP 3.3. sind individuelle, robuste Grey-Box Modelle für die Umlufttrocknung und Vakuumtrocknung und dementsprechend die Erreichung von TEZ 2. Die technische Funktionalität ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Technische Funktionalität von TP 3.3.

Parameter	Wert
-----------	------

Vorgehen zur Datenverarbeitung und -filterung	<p>Es wurden Algorithmen implementiert, die die erfassten Rohdaten der Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeitssensoren in aussagekräftige Informationen überführen.</p> <p>Das Ergebnis liegt unterhalb der Produkttaktzeit vor, sodass der Live-Betrieb möglich ist.</p>
Grey-Box Modelle	<p>Es wurden allgemeine Ansätze für Trocknungsvorgänge in der Umluft- und Vakuumtrocknung ausgewählt.</p> <p>Die Modelle wurden mit Daten aus der Anlage parametrisiert.</p> <p>Es wurden Grey-Box Modelle zur Prädiktion der Trockenheit für unterschiedliche Bauteile entwickelt.</p>

Teilpaket 3.4.: Vereinfachte Parametrierung und Implementierung

Alle Entwicklungen im Projekt finden im Hinblick auf den Einsatz in unterschiedlichen Trocknungsverfahren und für unterschiedliche Bauteile statt. Entscheidend für den breiten Einsatz in der industriellen Praxis ist, dass der Sensor mit vertretbarem Aufwand implementiert und parametrisiert werden kann. Dementsprechend gilt es Ansätze zu erforschen, mit denen die notwendigen Parameter möglichst niederschwellig identifiziert werden können. Als Lösungsweg gilt es für die entwickelten Modelle aus TP. 3.3. zu analysieren, wie leicht die notwendigen Informationen erfasst werden können. Bspw. sind konstruktive Parameter leichter zugänglich als empirische Untersuchungen. Des Weiteren gilt es zu untersuchen, wie automatisierte Parameter-Identifikationen ausgeführt werden können und ob dies einen Vorteil gegenüber einer Parametrierung durch menschliche Anwender*innen birgt. Zweckmäßig sind zudem eine Abstraktion und Verallgemeinerung der Ansätze, sodass der Sensor möglichst nach einem Baukastensystem aufgebaut werden kann. Dies soll ebenfalls auf Basis der entwickelten Modelle anwendungsnah erforscht werden. Die Entwicklungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Technische Funktionalität von TP 3.4.

Parameter	Wert
Grey-Box-Modelle	<p>Das Potential von Ansätzen zur vereinfachten Parametrierung wurde untersucht.</p> <p>Das Potential zur Verallgemeinerung der Ansätze wurde geprüft.</p>

Arbeitspaket 4: Entwurf des virtuellen Sensors + Entscheidungsfindung

In diesem Arbeitspaket wird am PTW der kombinierte, virtuelle Sensor entwickelt sowie die Entscheidungsfindung bezüglich bedarfsgerechter Prozessparameter erforscht. Im Folgenden werden die Lösungsschritte in Form von Teilpaketen detailliert beschrieben.

Teilpaket 4.1.: Sensordatenfusion

Abbildung 7 zeigt schematisch den angestrebten Gesamtaufbau an Sensorik in der Messkammer. Mit Hilfe der Arbeiten aus den vorherigen Teilpaketen werden Informationen über das Bauteil und die Umgebung erfasst und auf Basis dessen die Trockenheit einzelner Stellen bestimmt. So ist in der Abbildung schematisch angedeutet, dass die Kamera die trocknungskritischen Geometrien (1.) sowie die weitere sichtbare Oberfläche (2.) erfasst. Die Trockenheit der nicht sichtbaren Bereiche des Bauteils wird mit Hilfe der weiteren Sensoren vorhergesagt (3.).

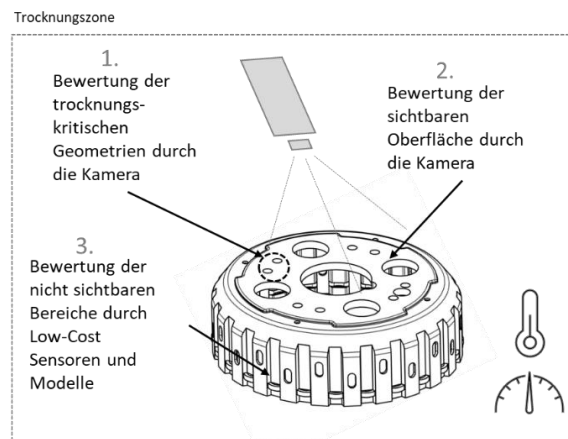


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Aufbaus der virtuellen Messstelle (Quelle: PTW)

Als zentraler Schritt für TP 4.2. müssen die Daten aus den unterschiedlichen Sensoren für den virtuellen Sensor fusioniert werden. Dabei ist die Herausforderung, die zeitkontinuierlichen Daten der Kammerumgebung mit den zeitdiskreten Bilddaten der einzelnen Bauteile zu kombinieren. Zudem soll die Fusion so gestaltet werden, dass die jeweiligen Stärken der Technologien zum Tragen kommen und die Trockenheit bestmöglich geschätzt wird. Dementsprechend sollen gängige Ansätze zur Datenfusion hinsichtlich ihrer Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall untersucht werden. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Trocknungskammern werden dabei individuelle Lösungen erwartet. Die Implementierung der Algorithmen erfolgt dabei in Python oder vergleichbarer Programmiersprache mit einer großen Auswahl an Bibliotheken für etablierte Datenverarbeitungsoperationen.

Tabelle 5: Technische Funktionalität von TP 4.1.

Parameter	Wert
Sensordatenfusion	<p>Es wurden unterschiedliche Möglichkeiten identifiziert, wie sich die Daten aus IR-Kamera und Grey-Box-Modellen fusionieren lassen.</p> <p>Es wurden Algorithmen implementiert, die die aufbereiteten Daten aus IR-Kamera und den Grey-Box-Modellen zusammenführen.</p> <p>Das Ergebnis liegt unterhalb der Produkttaktzeit vor, sodass der Live-Betrieb möglich ist.</p>

Teilpaket 4.2.: Virtueller Sensor für die Erfassung der Bauteiltrockenheit

Eine der zentralen Innovationen im Gesamtprojekt ist die Entwicklung eines virtuellen Sensors zur Live-Erfassung der aktuellen Trockenheit der Bauteile im Betrieb der Anlage. Basis bilden die physikalischen Sensoren in der Trocknungskammer sowie die Sensordatenfusion aus TP 4.1. (Vgl. Abbildung 3 und Abbildung 7). Dieser virtuelle Sensor ist dann Kernelement des geplanten Monitoring-Systems. Es wird offensichtlich, dass für den Live-Betrieb sowohl eine Anbindung an die Sensorik in der jeweiligen Trocknungskammer und an die IR-Kamera, als auch eine Rückführung in die Prozesssteuerung notwendig sind (siehe Abbildung 1). Des Weiteren wird eine Schnittstelle zur einer Nutzeroberfläche mitgedacht. Diese ist bei der Implementierung zu berücksichtigen. Die Arbeiten am PTW konzentrieren sich auf die Implementierung des virtuellen Sensors, der ein Software-Layer darstellt. Die Schnittstellen und Einbettung in die Hardware sind mitzudenken, werden aber in AP 5 durch den Hauptantragssteller umgesetzt. Als Rahmen für die Implementierung steht an der Versuchsanlage am PTW ein MiniPC an der Anlage zur Verfügung, auf dem eine beispielhafte Umsetzung erfolgen soll. Dabei sind Kommunikationsschnittstellen (OPC UA) zum Netzwerk des Forschungslabors vorhanden, über die sich ein Zugriff auf die Sensorik realisieren lässt. Dies gilt zu Demonstrationszwecken aufzubauen. Bei der Implementierung der Algorithmen soll ein besonderer Fokus auf die Robustheit im Feedback eines aktuellen Trocknungswertes gelegt werden, da dieses für den stabilen Betrieb der Anlage stets gewährleistet werden muss. In diesem Zusammenhang gilt es zu prüfen, wie der Sensor auf Signalabbrüche oder falsche Feedbacks reagiert. Das Arbeitspaket soll zur Erreichung von TEZ 2 führen

Tabelle 6: Technische Funktionalität von TP 4.2.

Parameter	Wert
Virtueller Sensor	Der virtuelle Sensor wurde auf einer geeigneten, anlagennahen Recheneinheit implementiert. Die Performance wurde evaluiert. Mögliche Implikationen im Bezug auf den sicheren Betrieb der Anlage wurden identifiziert.

Teilpaket 4.3.: Algorithmen zur Ermittlung idealer Betriebsparameter.

Als letzter Schritt nach Ermittlung der aktuellen Trockenheit sollen ideale Betriebsparameter auf Basis einer Heuristik ausgegeben werden. Hierbei hat sich im Zusammenhang mit Trocknungsprozessen der Lebensmittelindustrie der Einsatz von Fuzzy-Logic als ein geeigneter Ansatz herausgestellt [25]. Fuzzy-Logic orientiert sich am menschlichen Sprachgebrauch mit nicht eindeutigen Aussagen. Mit Hilfe der entsprechenden Verfahren können unscharfe Informationen wie „Trocknen bei hoher Temperatur“ in Computern verarbeitet werden. Der Vergleich mit klassischen Systemen, die eine klare Grenztemperatur benötigen, ist in Abbildung 8 dargestellt [27].

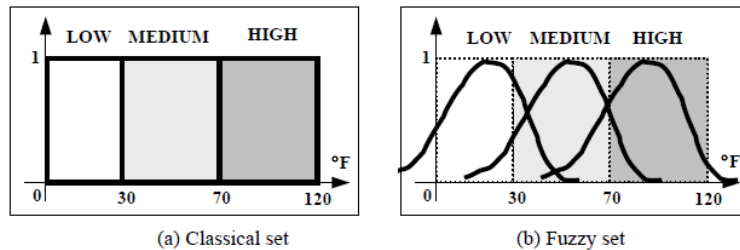


Abbildung 8: Fuzzy Set für Temperaturen (Quelle: [27])

Als Lösungsweg soll eine Parameterauswahl sowohl auf Basis einer festen Heuristik als auch mit Fuzzy-Logic an der Anlage umgesetzt werden. Hierfür gilt es ein Schreiben der Betriebsparameter über die vorhandenen Kommunikationsschnittstellen (OPC UA) zu realisieren. Die testweise Umsetzung erlaubt den Vergleich der Ansätze. Da als Zielvorstellung optimale Trockenheit bei minimalem Energieeinsatz pro Bauteil erzielt werden soll, stellt das Grundproblem ein multi-objective Optimierungsproblem dar. Daher soll zusätzlich erforscht werden, wie Pareto-optimale Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Bauteiltrocknung beitragen. [28] Zusammengefasst entspricht TP 3.4. der Erfüllung des TEZ 4. Die technische Funktionalität ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Technische Funktionalität von TP 4.1.

Parameter	Wert
Heuristische Ausgabe idealer Betriebsparameter	<p>Es wurde eine Heuristik entwickelt, die auf Basis der detektierten Trockenheit im Vergleich zur Solltrockenheit Trocknungsparameter für einen energieeffizienten Betrieb bestimmt.</p> <p>Die Heuristik wurde im Monitoring auf einer anlagennahen Recheneinheit implementiert.</p> <p>Der Einsatz von Fuzzy-Logic für die Ausgabe idealer Parameter zur bedarfsgerechten Trocknung wurde gezeigt.</p>
Pareto-optimale Lösungen	Das Potential von Pareto-Optimierung im Anwendungsfall wurde untersucht.

Arbeitspaket 7: Validierung des Gesamtsystems

Alle genannten Entwicklungen sollen im Live-Betrieb der DLRA am PTW getestet, validiert und demonstriert werden. Das Arbeitspaket entspricht der Erfüllung von TEZ 4. Zudem stellt es die Grundlage für die wirtschaftlichen Zielstellungen des Forschungsinstituts dar (Transfer in Lehre, Wissenschaft und industrielle Praxis)

4.1.4. Technische Risiken des FuE-Projekts entlang des Lösungswegs

Die Vorarbeiten für die modellbasierte Vorhersage in der Bauteiltrocknung basieren auf einem Trainingsdatensatz mit visueller Bewertung der Trockenheit. Sollte sich das visuelle Verfahren

bei der Validierung durch das manuelle Verfahren als zu ungenau bzw. subjektiv herausstellen, wird der Aufbau der Trainingsdatensätze mit angemessener Qualität gefährdet. Dies könnte dazu führen, dass die Entwicklung und Parametrierung der Grey-Box Modelle unmöglich wird und TEZ 1 verfehlt wird. Dies wirkt sich auch auf die weiteren technischen Einzelziele aus.

Je nach notwendiger Modellierungstiefe könnten sich die Modelle als zu rechenaufwändig erweisen. In diesem Fall könnte die Berechnung innerhalb der typischen Taktzeit gefährdet sein. Dies könnte TEZ 2 unmöglich machen, sodass auch TEZ 3-4 nur eingeschränkt umgesetzt werden können.

Bei der Validierung könnten sich die Grey-Box-Modelle als zu ungenau für komplexere Geometrien erweisen. In diesem Fall könnten alle TEZ zwar zu großen Teilen abgeschlossen werden. Allerdings wäre die Anwendung in der Praxis auf Einzelfälle limitiert. Ein ähnlicher Fall tritt ein, wenn Parametrierung und Implementierung einen hohen personellen und finanziellen Aufwand pro Kammer und Bauteil erfordern. In diesem Fall sind die Ansätze für die Wissenschaft weiterhin von Interesse, aber für die industrielle Praxis auf wirtschaftliche Anwendungsfälle begrenzt.

Die Sensordatenfusion könnte hinsichtlich der Robustheit limitiert sein. Daraus resultierende Daten-Crashes würden den Live-Betrieb unsicher machen, sodass TEZ 3-4 nicht zuverlässig gewährleistet werden können. Gleiches gilt, wenn zu hoher Rechenaufwand notwendig ist, sodass die Taktzeiten nicht eingehalten werden können.

Die Umsetzung des virtuellen Sensors ist abhängig von der erfolgreichen Umsetzung der Computer-Vision-Algorithmen, den Grey-Box Modellen und der Sensordatenfusion. Aufgrund der Abhängigkeit von den verschiedenen Teilsystemen, die jeweils mit technischen Herausforderungen und hoher Komplexität in der Entwicklung verbunden sind, kann eine erfolgreiche Umsetzung von TEZ 2 nicht im Vorfeld gewährleistet werden. Probleme in den Teilentwicklungen wirken sich direkt auf den geplanten virtuellen Sensor aus.

Die Auswahl idealer Betriebsparameter setze ein Feedback der Messstellen voraus. Während die Machbarkeit der Algorithmen auch bei geringerer Robustheit und Datenqualität möglich sein sollte, hängt die vollständige Erreichung von TEZ 3-4 und direkt von der erfolgreichen Implementierung des virtuellen Sensors ab, die - wie zuvor genannt - ebenfalls risikobehaftet ist.

4.1.5. Wirtschaftliche Risiken des FuE-Projekts

Aufgrund der technischen Herausforderungen und der hohen Komplexität des Projektes könnten Probleme bei einzelnen Partnern den gesamten Entwicklungsablauf stark verzögern. Zudem könnte sich dabei auch herausstellen, dass der gesamte personelle Aufwand des Projektes höher ausfällt als erwartet. Die zusätzliche Dauer inkl. anfallender Kosten des Projektes würden eine verspätete oder unvollständige Fertigstellung bedeuten.

Trotz intensiver Recherche des gegenwärtigen Stands der Technik kann das Szenario eintreten, dass durch nationale oder internationale Mitbewerber eine ähnliche Technologie (im

Geheimen) entwickelt wird. Dabei besteht das Risiko, dass von diesen Mitbewerbern früher oder gleichzeitig ein vergleichbares Produkt publiziert wird. In diesem Fall wäre WEZ 1 erschwert.

4.1.6. Führende Konkurrenzprodukte/-verfahren, internationaler Stand der Technik und Wissenschaft unter Angabe der technischen Daten im Vergleich mit den eigenen Entwicklungszielen

Im Folgenden wird zunächst auf den Stand der Technik für Sensoren zur Bewertung der Trockenheit in der Bauteiltrocknung eingegangen. Als Erweiterung wird zudem ein knapper Überblick über Trockenheits-Sensoren in industriellen Trocknungsanlagen anderer Güter gegeben. Danach erfolgt ein Überblick über die Vorarbeiten der Forschungseinrichtung. Zuletzt werden führende Konkurrenzprodukte und Verfahren aufgezeigt und verglichen.

Stand der Technik und Wissenschaft für Sensoren zur Bewertung der Bauteiltrockenheit in der industriellen Teilereinigung

Wenn vorhanden, dienen Monitoringsystem in der Bauteilreinigung und -trocknung primär der Qualitätssicherung und werden offline mittels manueller Methoden durchgeführt. Dabei konzentrieren sich die Bewertungen hauptsächlich auf die Sauberkeit der Teile in Bezug auf filmartige und partikuläre Verunreinigungen, nicht auf deren Trockenheit. Es kann eine Präferenz für visuelle Verfahren festgestellt werden. [2]

Zur expliziten Bewertung der Trockenheit in der Bauteilreinigung führt der „Fachverband industrielle Teilereinigung“ (FiT) die in Abbildung 9 gezeigten Analyseverfahren als Stand der Technik [12,11].



Abbildung 9: Verfahren zur Analyse der Bauteiltrockenheit (Quelle: Eigene Darstellung nach [11])

Wischtest, Klopftest und Abblastest sind manuelle Verfahren, bei denen vorhandene Restfeuchte mechanisch entfernt von einem saugfähigen Material (bspw. einem Tuch) aufgenommen und sichtbar gemacht wird [12]. Entsprechend der definierten Anforderungen aus vorherigen Arbeiten sind diese drei Verfahren insbesondere im Hinblick auf die Echtzeitfähigkeit zur Ermittlung der Restfeuchte während des Trocknungsprozesses ungeeignet [5]. Beim Wiegen bzw. der Differenzwägung wird die Wassermenge mit Hilfe einer gravimetrischen Messung und dem Vergleich zwischen Ist- und Sollzustand ermittelt [12]. Das Messverfahren ist grundsätzlich geeignet für ein digitales Messsignal. Allerdings ist die Integration in Durchlaufanlagen mit bewegten Bauteilen mit hohem konstruktivem Aufwand verbunden. Des Weiteren ist das

Verfahren in der Genauigkeit limitiert, sodass insbesondere dünne Filme in an Trocknungskritischen Stellen, die geringes Gewicht aufweisen, nicht erfasst werden [5]. Restgasanalyse und Vakuumtest sind sich im Prinzip ähnlich: Die Bauteile werden im Vakuum vollständig getrocknet und die dabei entstehenden Gase analysiert [12]. Da die Verfahren jeweils ein Vakuum voraussetzen, ist der Aufwand in Bezug auf kontinuierliche Trocknungsprozesse hoch. Die letzte Klasse sind visuelle Verfahren, bei denen die Trockenheit per augenscheinlicher Betrachtung – teilweise unter Einsatz von technischen Hilfsmitteln wie Mikroskopen – erfasst wird [12]. Die Automatisierung über entsprechende Kamera-Systeme wurde als vielversprechender Ansatz zur Detektion der kritischen Stellen identifiziert. Herausforderung ist die optische Zugänglichkeit. [5]

Zusätzlich zu den Limitierungen der genannten Verfahren besteht die Herausforderung, dass es keinen allgemein gültigen Zustand „trocken“ in Form eines quantitativen Wertes gibt [11]. In der Praxis werden daher technisch begründete Abnahmekriterien zwischen Kunde und Lieferant vereinbart [12]. Die Definition von individuellen Trocknungsklassen ist dabei zweckmäßig als klares Kriterium [5].

Um den Stand der Wissenschaft einzuordnen, wurde in Titeln, Abstract und Keywords der Datenbank ScienceDirect gesucht [29]. Die Eingrenzung durch die Schlagwörter Monitoring, Trocknung und Bauteilreinigung³ ergibt 15 Treffer, wobei sich nur Elserafi et al. speziell mit der Bauteiltrocknung auseinandersetzt [13]. Eine vergleichbare Durchsuchung der Datenbank Taylor and Francis ergibt 54⁴ Treffer [30]. Keines der Ergebnisse dort betrifft die industrielle Bauteilreinigung und -trocknung. Es wird deutlich, dass es wenige, bis keine wissenschaftlichen Publikationen zum Monitoring der Trockenheit in Bauteilreinigungsanlagen gibt. Daher wird die Literaturübersicht auf verwandte Arbeiten aus anderen industriellen Trocknungsanwendungen ausgeweitet. Hierzu wird zunächst wieder die Datenbank ScienceDirect verwendet, wobei der Ergebnisraum durch Reduktion der Schlagworte systematisch erweitert wird. Dies führt zu wahlweise 173⁵, 292⁶ oder 13.636⁷ Ergebnissen wobei keine klare Eingrenzung auf das Thema erkennbar ist. Daher wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft auf Basis des Schneeballverfahrens gepaart mit vorhandenem Wissen aufbereitet, was sich als praktisches Vorgehen erwiesen hat [31].

Stand der Wissenschaft für Sensoren zur Bewertung der Bauteiltrockenheit in anderen industriellen Trocknern

Für Trockner im Allgemeinen haben sich indirekte Verfahren mit kostengünstigen Sensoren, die den Umgebungszustand analysieren, als brauchbar erwiesen [32,33]. In Grundlagenliteratur werden Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Absolutdruck, aber auch die Erfassung der Luftgeschwindigkeit vorgeschlagen [7,34,33,35,25,23]. Die zuvor genannten sind

³ (monitoring OR monitor) AND (drying OR dryness) AND (workpiece OR part) AND (cleaning)

⁴ monitor* AND dry* AND part* AND clean*

⁵ (monitoring OR monitor) AND (drying OR dryness) AND (workpiece OR part)

⁶ (monitoring OR monitor) AND (drying OR dryness) AND (cleaning)

⁷ (monitoring OR monitor) AND (drying OR dryness)

auch für die Bauteiltrocknung von Interesse, während bspw. Messungen über elektrische Kenngrößen (Dielektrizitätszahl, elektrische Leitfähigkeit) auf kontinuierliche Gutsströme und homogene Feuchtigkeitsverteilung ausgelegt und sich nicht für die Bauteiltrocknung eignen [33]. Zur automatisierten, optischen Begutachtung wird die Absorption und Reflexion elektromagnetischer Wellen am Trocknungsgut erfasst [33]. Häufiger genannt werden unter anderem Mikrowellen, Infrarotstrahlung und Nahinfrarot-(NIR)-Spektroskopie [32,34,33,35,23]. Im Folgenden werden einige konkrete Beispiele herausgegriffen. Hierbei liegt der Fokus auf der Trocknung von Lebensmitteln und Agrarprodukten, da diese Verfahren im industriellen Maßstab weit verbreitet sind und dementsprechend auch Berücksichtigung in wissenschaftlichen Publikationen finden.

Einen guten Überblick über die Trends in der Überwachung von Trocknern bietet Freire et al. [32]. Santini und Tomaselli detektieren den Feuchtigkeitsgehalt in der Holztrocknung basierend auf dem Verhältnis der Holztemperatur zur Feuchtkugeltemperatur, da dies in experimentellen Daten eine gute Korrelation aufweist [36]. Dai et al. präsentieren ein mathematisches Modell basierend auf der Heißlufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durch die Anpassung des empirischen Henderson-und-Pabis-Modell an experimentelle Daten [37]. Eine Grey-Box Modellierung findet sich bspw. bei Vieira et al. [24]. Dort wird Wassergehalt von Milchpulver während der Trocknung mit Hilfe von Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren, Energie- und Massenbilanzen sowie einem neuronalen Netz, welches auf Basis von experimentellen Daten antrainiert wurde, geschätzt [24]. Jensen et al. verfolgen einen ähnlichen Ansatz für die Trocknung von Teeblättern, wobei hier Umgebungstemperaturen sowie die Oberflächentemperatur des Trocknungsgutes als Eingangsparameter verwendet werden [38]. Ein umfangreicheres, mathematisches Modell, in welchem die Dynamik des Prozesses bei unterschiedlichen Eingangsparameter empirisch modelliert wird, präsentieren Schuster et al. [39]. Insgesamt ist in der Lebensmittelindustrie ein deutlicher Trend in Richtung der visuellen Verfahren zu erkennen [32]. Beispielsweise stellen Romano et al. einen Ansatz zur Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts basierend auf der Rückstreuung von Laserlicht im sichtbaren bis nahinfraroten Bereich vor. Dabei wird die Korrelation zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Rückstreuungsbereich genutzt [40]. Später wurde die Methode auf Mango- und Litschifrüchte ausgeweitet, indem eine Zweiparameter-Lorentz-Verteilung berechnet wurde, die die Eignung von Licht bei verschiedenen Wellenlängen unterscheidet [41]. Ähnlich wandten Udomkun et al. die VIS-Laserlicht-Rückstreuung zur Inline-Messung des Feuchtigkeitsgehalts beim Trocknen von Papaya an, wobei die Lichtintensität als zusätzliches bestimmendes Merkmal des Feuchtigkeitsgehalts verwendet wurde [42]. Die Methode wurde darauffolgend auf VIS/NIR-Wellenlängen zur Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts für Äpfel, Mangos, Papayas, Litschis und Paprikas erweitert [43]. Eine gut Übersicht für CV in der Trocknung mit Fokus auf Lebensmittel bietet Martynenko [44]. Neben dem allgemeinen Vorgehen zum Aufbau der Algorithmen wird aufgezeigt, dass zur Bewertung der Trockenheit zumeist Faktoren wie die geometrische Schrumpfung, Farbänderungen oder Oberflächenbeschaffenheit detektiert werden, welche bei Bauteilen jedoch konstant sind [44].

Es wird deutlich, dass sowohl Low-Cost-Sensoren in Kombination mit mathematischen und empirischen Modellen als auch visuelle Verfahren erfolgreich für andere Trocknungsgüter getestet wurden. Allerdings ergibt sich keine direkte Übertragbarkeit. Insbesondere die inhomogene Verteilung der Feuchtigkeit sowie komplexe Geometrien mit trocknungskritischen Stellen stellen in der Bauteiltrocknung Herausforderungen dar, die in anderen Trocknungsgütern nicht vorhanden sind.

Vorarbeiten der Forschungseinrichtung PTW

Im Zuge des Forschungsprojekts LoTuS wurde am PTW das Potential von digitalen Messkonzepten zur Erfassung der Bauteiltrockenheit im laufenden Betrieb einer Durchlaufreinigungsanlage geprüft und vielversprechende Ansätze herausgearbeitet. Dabei wurden die zuvor genannten Erkenntnisse aus anderen Trocknern berücksichtigt. [5] Im Zuge der Arbeiten konnte für ein Referenzbauteil in einer Umlufttrocknungszone gezeigt werden, dass sich entweder mit IR-Kameras oder mit einem Black-Box-Modell als virtuelle Messstelle der Trockenheitsgrad von einem Bauteil quantifizieren und für Energiekennzahlen verwenden lässt [13,14]. Allerdings weisen beide Verfahren Limitationen auf, die der Verwendung in einem geschlossenen Regelkreis entgegenstehen. Die Verfahren werden im Folgenden beschrieben und ihre Vor- und Nachteile genannt.

Temperatur-, Druck-, und Feuchtigkeitssensoren sind kostengünstige Bauteile, mit denen kontinuierlich der Zustand einer Trocknungszone überwacht werden kann. Mit Hilfe eines antrainierten ML Modells als virtueller Sensor kann dann auf Basis der Messwerte in Echtzeit der Trocknungsgrad vorhergesagt werden. [14] Derzeitige Limitationen sind:

- Die Machbarkeit wurde bislang nur für ein einzelnes Bauteil mit geringer geometrischer Komplexität demonstriert.
- Die Umsetzung wurde bislang nur in einer Umlufttrocknung gezeigt. Dabei hat sich der Luftgeschwindigkeit in Form der Ventilator Drehzahl als dominierendes Feature herauskristallisiert. Da nicht jede Anlage mit variabler Drehzahl betrieben werden kann, ist eine direkte Übertragbarkeit selbst auf konvektive Verfahren nicht immer gegeben.
- Da der virtuelle Sensor auf einem ML Modell basiert, sind viele Trainingsdaten zum Anlernen notwendig. Dies macht die Implementierung aufwändig und unattraktiver für die industrielle Praxis.
- Der Trainingsdatensatz ist derzeit beschränkt, sodass bislang keine prozesssichere Vorhersage für alle anfahrbaren Zustände der Maschine möglich ist. Bspw. umfasst der Datensatz nicht die gesamte Spanne an Prozesstemperaturen und Luftfeuchtigkeiten in hinreichender Datenqualität. Außerdem umfasst auch das Feedback des Sensors nur bekannte Trockenheitsklassen.
- Der Algorithmus führt derzeit zu konservativen Entscheidungen bezüglich der aktuellen Trockenheit, sodass beim Einsatz in der Prozessregelung eine Tendenz zum Übertrocknen erwartet wird.
- Da die Trockenheit nur indirekt erfasst und vorhergesagt wird, ist das System anfällig gegenüber nicht berücksichtigten Störgrößen, wie beispielsweise einer variablen

anfänglichen Wasserbeladung der Bauteile. Dies stellt eine große Herausforderung in Bezug auf Robustheit in der praktischen Anwendung dar.

- Das Verfahren bewertet das Bauteil als Ganzes, sodass keine Aussagen über trocknungskritische Stellen möglich sind. Dies kann zu suboptimalen Trocknungsergebnissen führen [23].

Vorteil des Modells liegen in der kostengünstigen Umsetzung. Des Weiteren ist keine Sichtbarkeit des Bauteils notwendig, sodass auch für Bauteile mit komplexen Geometrien und mehreren trocknungskritischen Stellen Aussagen möglich sind. Limitierungen sind die Abhängigkeit von den Trainingsdaten, die mangelnde Robustheit gegenüber externen Faktoren sowie die fehlende, explizite Bewertung der Trocknungskritischen Stellen. Demgegenüber liegt die Stärke der IR-Kamera im visuellen Feedback, sodass Tropfen und Filme detektiert und klassifiziert sowie die Trockenheit kritischer Stellen bewertet werden kann. Dies wurde für die konvektive Trocknung in einer Durchlaufanlage für eine Führungsscheibe gezeigt, die als kritisches Merkmal Sacklöcher an der Oberfläche aufweist. [13] Generell ist bei visuellen Verfahren die automatisierte Extraktion von prozessfähigen, quantitativen Informationen eine Herausforderung [45]. Derzeit liegen folgende Limitierungen vor [13]:

- Das Verfahren wurde bislang nur für ein Bauteil gezeigt, welches eine überschaubare Komplexität aufweist. Die Sacklöcher als trocknungskritische Stellen sind eher flach und liegen alle in einer Ebene, sodass die visuelle Zugänglichkeit leicht realisierbar ist. Komplexere Geometrien sind derzeit nicht erfassbar.
- Das Sichtfeld der Kamera ist u.a. durch den Bauraum auf bestimmte Bereiche beschränkt, sodass bislang nur kleine Bauteile überwacht werden können.
- Der Einsatz des Systems wurde bislang ausschließlich in einer Umluftzone mit moderaten Bedingungen demonstriert. Durch die bauliche Trennung von Reinigung und Trocknung findet der derzeitige Einsatz unter Bedingungen statt, die günstig sind. Bei Einsatz in anderen Kammern können niedrige Drücke (Vakuum) oder hohe Temperaturen das System schädigen oder Wasserdampf zu einem Beschlagen der Optik führen.
- In der derzeitigen Anordnung ist die Kamera hinter dem eigentlichen Prozess positioniert, sodass unzureichende Trockenheit identifiziert werden kann. Die Anpassungen im Prozess haben aber frühestens auf nachfolgende Bauteile Einfluss, sodass stets Ausschuss entsteht.
- Mit Hilfe von CV-Algorithmen konnte wahlweise die benetzte Oberfläche oder die Trocknungsklasse bestimmt werden, sodass grundsätzlich ein quantitativer Wert vorliegt. Allerdings ergeben sich Schwankungen in der Detektion, sodass die Genauigkeit für eine Regelung nicht ausreicht. Daher ist das Verfahren bislang auf die Anwendung in Energiekennzahlen beschränkt.
- Die Ermittlung des Trocknungsgrades unter Einsatz von Computer-Vision- und KI-Algorithmen ist zweckmäßig, aber rechenintensiv, sodass der Wert erst nach einer gewissen Verarbeitungsdauer vorliegt.

- Es existiert kein verallgemeinertes Vorgehen zum Entwurf der Algorithmen, sodass mit einem hohem Implementierungsaufwand für jedes neue Bauteil zu rechnen ist.

Neben den genannten anwendungsspezifischen Limitierungen bestehen das generelle Problem, dass der Einsatz von Kamerasystemen auf visuell zugängliche Bereiche beschränkt ist, was bspw. bei tiefen Bohrungen, Hinterschneidungen etc. nicht gewährleistet werden kann. Zudem ist in Anlagen häufig der Bauraum begrenzt. Es wird deutlich, dass sich die beiden Verfahren in wesentlichen Punkten ergänzen, sodass die Kombination das Potential birgt, die Limitationen der einzelnen Ansätze zu beheben.

Insgesamt zeigt der Stand von Technik und Wissenschaft, dass es zum Zeitpunkt des Antrags keine Studien oder kommerziell verfügbaren Produkte gibt, die speziell auf Monitoring- und Regelungsstrategien für Trocknungsprozesse von Bauteilen in wässrigen Bauteilreinigungsanlagen ausgerichtet sind. Ausnahme sind die zuvor genannten Vorarbeiten am PTW, die jedoch limitiert sind [13,14,5].

Führende Konkurrenzprodukte/-verfahren

Konkurrenzverfahren sind die zuvor genannten, in Abbildung 9 dargestellten, Analyseverfahren [12,11]. Tabelle 8 vergleicht vor und Nachteile der einzelnen Verfahren mit dem angestrebten Vorhaben. Dabei werden die Verfahren bezüglich dem im Projekt geplanten Anwendungsfall wahlweise als positiv (+), neutral (0) oder negativ (-) einsortiert.

Tabelle 8: Qualitativer Vergleich des Vorhabens mit führenden Konkurrenzverfahren. Einstufung als positiv (+), neutral (0) oder negativ (-).

	Wisch- test, Klopf- test, Abblas- test	Diffe- renz-wä- gung	Restgas- analyse, Vakuum- test	Visuelle Begut- achtung	Angestre- btes Pro- jekt- vorhaben
	-	0	+	0	+
Kontinuierliche, digitale Messwerterfassung	i.d.R. ma- nuelles Verfah- ren	Dif- ferenz- messun- gen not- wendig		.d.R. ma- nuelles Verfah- ren	
	0	+	+	-	0
Quantitativer Trocken- heitswert	Hoher Messfeh- ler mög- lich				
	-	-	0	0	+

Automatisierbarkeit für Durchlaufanlagen und Anlagen mit hoher Bauteiltaktung	.d.R. manuelles Verfahren	Genauigkeit schwer erreichbar	Vakuumkammer vorausgesetzt	i.d.R. manuelles Verfahren ⁸	
Erfassung bauteilspezifischer, trocknungskritischer Stellen	-	-	-	+	+
Hardwarekosten	+	+	-	+	0
Personalaufwand	-	-	0	0	+

4.1.7. Patentsituation

Für die Aufarbeitung der Patentsituation wurde eine Recherche in der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamts durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche deutsche und englische Begriffe im Titel unter Einsatz der vorhandenen Suchoperatoren gesucht. Da keine relevanten Patente im Bereich der kontinuierlichen Überwachung von Bauteiltrocknungsprozessen identifiziert werden konnten, wurde der Suchbegriff auf industrielle Trocknungsverfahren ausgeweitet. Hierbei wurden die Ergebnisse auf die IPC-Klasse F26B - „Trocknen von festen Gütern oder Erzeugnissen durch Entfernen von Flüssigkeit“ – begrenzt. [46] Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 im Anhang zusammengefasst.

Generell zeigt sich eine geringe Anzahl an Patenten im Bereich des Trocknungs-Monitorings. Dabei betrifft keines der identifizierten Dokumente die Inline-Detektion des Trocknungsgrades in Bauteilreinigungsanlagen. Wird der Suchbegriff aufgeweitet, zeigen sich allgemeinere Ansätze bei Trocknern für andere Produkte (Pharmazie, Lebensmittel, Agrarprodukte). Hauptsächlich werden dort Ansätze auf Basis von Temperaturmessungen in Kombination mit physikalischen Gleichungen gewählt. Eine explizite Begriffssuche findet auch zwei Ansätze mit visueller Überwachung durch Kameras. Alle gefundenen Dokumente in der erweiterten Suche beziehen sich auf Produkte, bei denen von einer annähernd homogenen Verteilung der Feuchtigkeit auszugehen ist. Besonders Trocknungskritische Stellen werden nicht detektiert oder berücksichtigt.

Zusammenfassend ließen sich keine Patente identifizieren, die speziell auf die Herausforderungen in der Bauteiltrocknung abgestimmt sind.

⁸ Machbarkeit für Bauteiltrocknung am PTW demonstriert. In der Lebensmitteltrocknung im Stand der Wissenschaft etabliert.

4.1.8. Anteil des Antragsstellers am gesamten Vorhaben, Charakterisierung des innovativen Kerns des Teilprojekts und Abgrenzung zu anderen Teilprojekten

Die Abgrenzung zum Antragssteller lässt sich anhand des Schemas des geplanten Monitoringsystems zeigen (siehe Abbildung 10). Der Antragssteller BvL Oberflächentechnik GmbH entwickelt das visuelle Verfahren und sorgt für Integration der Entwicklungen an der Anlage und in den Prozess (blau markierter Bereich in Abbildung 10). Die Tätigkeiten am PTW umfassen die Grey-Box Modelle für die Low-Cost-Sensorik sowie die Entwicklung der Sensordatenfusion und des virtuellen Sensors (rot markierter Bereich in Abbildung 10).

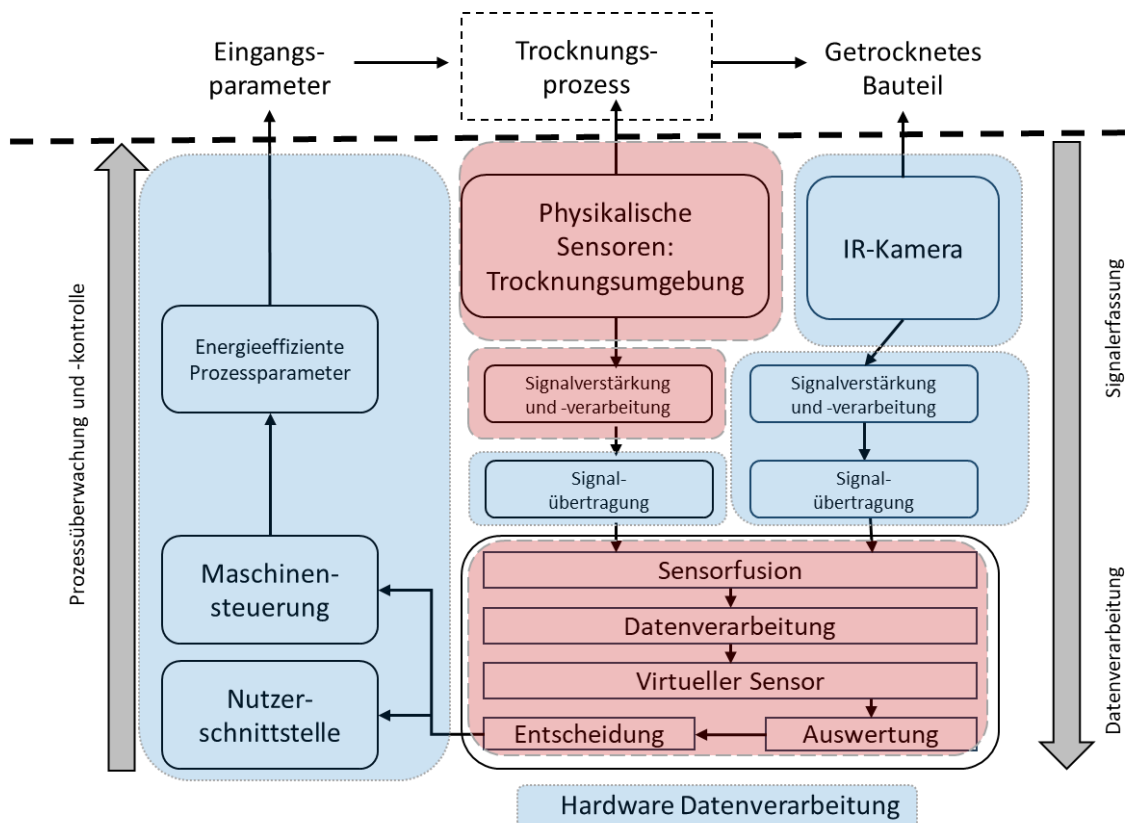


Abbildung 10: Geplantes Monitoring- und Regelungssystem für die Bauteiltrocknung zur Steigerung der Energieeffizienz. Darstellung: BvL in blau, PTW in rot (Quelle: PTW in Anlehnung an [15]).

Aufgrund des Mangels an Lösungen zur Live-Überwachung der Bauteiltrockenheit liegt die Notwendigkeit der Forschungsentwicklung im Gesamtvorhaben. Die innovativen Kerne des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt (PTW) können wie folgt aufgezählt werden:

- Entwicklung von Grey-Box Modellen zur Prädiktion der Bauteiltrockenheit
- Erforschung von Algorithmen zur Sensordatenfusion für den vorliegenden Anwendungsfall
- Implementierung eines virtuellen Sensors zur Ermittlung der Bauteiltrockenheit
- Forschung zur Auswahl zur Entscheidungsfindung, energieeffizienter Prozessparameter für die Bauteiltrocknung

4.1.9. Meilensteine zur Erreichung der festgelegten Zielkriterien

Die vorgesehenen Meilensteine für das PTW (MS PTW) sind nachstehend aufgelistet (geplanter Projektstart 01.01.2025).

- MS-1 (PTW): Ein Prüfstand zur offline-Ermittlung der Trockenheit wurde in Betrieb genommen (Quartal 2 nach Projektstart)
- MS-2: Die Versuchsreihen zum Einfluss der Tanktemperatur wurden abgeschlossen (Quartal 3)
- MS-3: Es wurden geeignete Grey-Box Modelle für unterschiedliche Trocknungskammern identifiziert (Quartal 5)
- MS-4: Für unterschiedliche Trocknungskammern wurde ein virtueller Sensor implementiert (Quartal 6)
- MS-5: Ein geeigneter Algorithmus zur Auswahl energie-idealer Betriebsparameter wurde entwickelt (Quartal 7)
- MS-6: Alle Entwicklungen wurden im Live-Betrieb an einer industriellen Bauteiltrocknung getestet (Quartal 8)

4.1.10. Projektplan

BvL	2025												2026												TUDa/PTW
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
AP1 Entwicklung eines Prüfstandes zur Validierung der Sensoriken und Lösungsansätze																									AP1 Entwicklung eines Prüfstandes zur Validierung der Sensoriken und Lösungsansätze
AP2 KI und CV-Algorithmen für IR-Kameras zur Detektion von Restfeuchte																									AP2 KI und CV-Algorithmen für IR-Kameras zur Detektion von Restfeuchte
AP3 Grey-Box Modelle zur Prädiktion der Restfeuchte																									AP3 Grey-Box Modelle zur Prädiktion der Restfeuchte
AP4 Entwurf des virtuellen Sensors + Entscheidungsfindung																									AP4 Entwurf des virtuellen Sensors + Entscheidungsfindung
AP5 Einbindung in die Anlagentechnik																									AP5 Einbindung in die Anlagentechnik
AP6 Durchführen von Versuchsreihen unter praxisgerechten Bedingungen; Auswerten der Ergebnisse sowie Festlegen und Umsetzen von Anpassungsentwicklungen																									AP6 Durchführen von Versuchsreihen unter praxisgerechten Bedingungen; Auswerten der Ergebnisse sowie Festlegen und Umsetzen von Anpassungsentwicklungen
AP7 Validierung des Gesamtsystems																									AP7 Validierung des Gesamtsystems

Abbildung 11: Projektplan

4.1.11. Notwendigkeit sowie technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit des FuE-Projektes für den Antragsteller

In der Forschungsgruppe ETA | Energietechnologien und -anwendung in der Produktion wird seit 2010 Hand in Hand mit Industrie- und Forschungspartnern gearbeitet, um Lösungen zu entwickeln und zu erproben, die eine klimaneutrale Produktion ermöglichen. Dabei ist die ETA-Fabrik nicht nur Testfeld, sondern auch Lernfabrik sowie Großdemonstrator im industriellen Maßstab [47]. Die Erforschung von Effizienzmaßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs von Produktionsstätten ist dabei wesentliche Säule der Vision. Industrielle Bauteilreinigung und -trocknung als typischer Bestandteil spanender Fertigungslinien ist dabei als Forschungsthema fest verankert.

Neben der Arbeitsgruppe ETA besteht das PTW aus einer Vielzahl an Mitarbeiter*innen in drei weiteren Arbeitsgruppen: Center für industrielle Produktivität (CiP), Management industrieller Produktion (MiP) und Fertigungstechnologie (TEC). Dementsprechend gehören zum Institut Prüflabore und Werkstätten sowie geschultes technisches Personal (bspw. Versuchsfeld-Techniker*innen, IT). Darüber hinaus sind umfangreiche IT-Systeme zur Simulation (bspw. Software: Matlab/Simulink, Dymola/Modelica; Hardware: diverse Workstations mit bis zu 32 GB RAM und 8 Kernprozessoren, NVIDIA DGX-Station, Zugriffsmöglichkeit zum Lichtenberg Hochleistungsrechner HRZ) sowie Erfahrung in Aufbau und Umgang mit digitaler, industrieller Infrastruktur vorhanden [48]. Durch die hervorragende technische und personelle Infrastruktur am Institut sowie dem jahrelangen Know-How in anwendungsorientierten Verbundprojekten ist das geplante Forschungsvorhaben für die Forschungseinrichtung realisierbar.

4.1.12. Fachliche Eignung des eingeplanten Personals

Das Projekt wird durch wissenschaftliche Mitarbeiter*innen des PTWs aus der Forschungsgruppe ETA durchgeführt. Bereits seit Gründung der Forschungsgruppe wird an energieeffizienten Prozessen für die industrielle Bauteilreinigung als fester Bestandteil zerspanender Fertigungslinien geforscht [49]. Im Zuge des Forschungsprojekts LoTuS wurde in Kooperation mit dem Antragssteller eine industrielle Durchlaufreinigungsmaschine mit verschiebbarer Trocknungszone entwickelt und in der ETA-Fabrik in Betrieb genommen, in welcher seitdem die Praxistauglichkeit von Effizienzmaßnahmen für die Bauteiltrocknung demonstriert wird [50,51,4,5,52]. Die jüngste Forschung konzentriert sich dabei insbesondere auf das Monitoring und die Regelung der Trocknungsprozesse, sodass auf vorhandenes Know-how aufgebaut werden kann [13,14]. Die Themen sind dementsprechend fest etablierter Bestandteil der Forschung am Institut. Dank Vorlesungen, studentischer Arbeiten sowie hilfswissenschaftlicher Tätigkeiten ist dabei auch gut geschulter Nachwuchs gewährleistet.

4.2. Zu Anlage 4: Technische und wirtschaftliche Wirkung und Verwertung des FuE-Projekts in der Forschungseinrichtung

Die technische und wirtschaftliche Wirkung und Verwertung am PTW ist unterteilt in die Themenfeldern Transfer in die Wissenschaft, Transfer in die industrielle Praxis und Lehre.

Transfer in die Wissenschaft

Das Institut PTW der TU Darmstadt wird die Projektergebnisse in Form von Dissertationen, studentischen Abschlussarbeiten und Publikationen sowie zur Teilnahme an Konferenzen nutzen, um den die Ergebnisse in die Wissenschaft zu tragen. Hierbei gilt es insbesondere, den Technologie- und Methodentransfer zwischen Wissenschaft und Industrie weiter zu intensivieren. Dies wird durch praxisnahe Forschung sowie Live-Demonstration der Ergebnisse in der industriellen Anlagentechnik der ETA-Fabrik möglich.

Transfer in die industrielle Praxis

Die Projektergebnisse werden über das Institut PTW und die Öffentlichkeitsarbeit der ETA-Fabrik nachhaltig in die Industrie getragen. Insbesondere werden in der ETA-Fabrik regelmäßig praxisnahe Workshops und Führungen für die Industrie angeboten, in die die Ergebnisse zeitnah einfließen können. Dabei wird auf das Konzept der Lernfabrik zurückgegriffen, in der die Projektergebnisse in einem industrieähnlichen Umfeld umgesetzt werden und so für Teilnehmende der Workshops und Führungen greifbar gemacht sind. Die Öffentlichkeitsarbeit des PTWs ermöglicht es, Projektergebnisse über die Online-Präsenz des Instituts niederschwellig und öffentlichkeitswirksam verfügbar zu machen. Des Weiteren wird die Teilnahme an Fachmessen (bspw. parts2clean oder vergleichbar) angestrebt.

Lehre

Das Institut PTW der TU Darmstadt wird die Projektergebnisse in eigenen Vorlesungen, studentischen Abschlussarbeiten und studentischen Tätigkeiten innerhalb der Lehr- und Forschungsfabrik nutzen. Ziel ist, das Thema energie- und ressourceneffiziente Produktion nachhaltig in der ingenieurstechnischen Praxis zu verankern. Hierzu sollen Nachwuchs-Ingenieur*innen für die Themen sensibilisiert und mit den nötigen Kompetenzen zur Umsetzung ausgestattet sein.

4.3. Literaturverzeichnis

- [1] Koblenzer, G., 2016. Trends in der Automobil-Teilereinigung: Die aktuellen „Großtrends“ in der Automobilindustrie – dazu gehören Industrie 4.0, Elektromobilität und autonomes Fahren – haben auch Auswirkungen auf die Teilereinigung. Bisher mussten vor allem Anforderungen an die partikuläre Reinheit berücksichtigt werden. Nun rücken verstärkt filmische Verunreinigungen in den Blick. *J Oberfl Techn* 56 (9), 74–76.
- [2] Frank-Holm Rögner, 2020. Markt- und Trendanalyse in der industriellen Teilereinigung 2020. Geschäftsbereich Reinigung bei Fraunhofer, Dresden.
- [3] Blesl, M., Kessler, A., 2017. Energieeffizienz in der Industrie, 2. Auflage ed. Springer Vieweg, [Berlin, Germany], 1 online resource.
- [4] Magin, J., Elserafi, G., Hayn, A. von, Stellmacher, K., Weigold, M., 2024. Einsparpotenzial alternativer Trocknungstechnologien. *ZWF* 119 (3), 162–165.
- [5] Weigold, M., 2023. LoTuS - Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit : gemeinsamer Schlussbericht : Fachbereich: Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe (ESN 2) : Projektlaufzeit: 01.12.2019-31.05.2023 (42 Monate).
- [6] McLaughlin, M.C., Zisman, A.S., 2007. The aqueous cleaning handbook: A guide to critical-cleaning procedures, techniques, and validation, Fourth edition ed. AI Technical Communications, White Plains, NY, 182 pp.
- [7] Durkee, J.B., 2006. Management of industrial cleaning technology and processes, 1. ed. ed. Elsevier, Amsterdam, 472 pp.
- [8] Carrasco, J., Hodgson, A., Michaelides, A., 2012. A molecular perspective of water at metal interfaces. *Nature materials* 11 (8), 667–674.
- [9] Schweigler, K.M., Ben Said, M., Seifritz, S., Selzer, M., Nestler, B., 2017. Experimental and numerical investigation of drop evaporation depending on the shape of the liquid/gas interface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 105, 655–663.
- [10] 2021. Reinigung und Reiniger in der Metallindustrie.
- [11] FiT e.V., 2023. Wann ist ein Bauteil trocken? *J Oberfl Techn* 63 (S4), 58–59.
- [12] FiT e.V., 2023. FiT Leitlinie Trocknung in der Bauteilreinigung. https://www.fit-online.org/fileadmin/05_publicationen/leitlinien/Leitlinie_Trocknung_in_der_Bauteilreinigung_2024.pdf. Accessed 20 April 2024.
- [13] Elserafi, G., Ioshchikhes, B., Magin, J., Weigold, M., 2023. Process monitoring for energy assessment of parts drying processes. *Procedia CIRP* 120, 392–397.
- [14] Elserafi, G., Magin, J., Fürst, Raoul, Kleemann, Jonathan, Weigold, M., 2024. Fuzzy Logic Process Control Approach for Intelligent Parts Drying Processes. (akzeptiertes und präsentiertes Konferenzpaper). 18th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering.
- [15] CIRP, 2019. CIRP Encyclopedia of production engineering, Second edition ed. Springer, Heidelberg, Berlin, 941 pp.
- [16] Helbig, W., 2021. Praxiswissen in der Messtechnik: Arbeitsbuch für Techniker, Ingenieure und Studenten. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 145 pp.
- [17] Puente León, F., 2015. Messtechnik, 10. Aufl. 2015 ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 440 pp.
- [18] Kabadayi, S., Pridgen, A., Julien, C., 2006. Virtual Sensors: Abstracting Data from Physical Sensors, in: Proceedings / WoWMoM 2006, 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Buffalo, New York, 26 - 29 June 2006. 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks(WoWMoM'06), Buffalo-Niagara Falls, NY, USA. 26-29 June 2006. IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., pp. 587–592.

- [19] Martin, D., Kühl, N., Satzger, G., 2021. Virtual Sensors. *Bus Inf Syst Eng* 63 (3), 315–323.
- [20] Pfeiffer Vacuum, 2024. Broschüre HiCube RGA. Pfeiffer Vacuum. <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/de/markets/scientific-instruments/mass-spectrometry/residual-gas-analysis-rga>. Accessed 15 August 2024.
- [21] TREAMS GmbH. Automatisches Restgasanalyse-Tool. TREAMS GmbH. <https://treams-gmbh.de/de/produkte-und-dienstleistungen/vakuumsysteme/argat.html>.
- [22] Pfeiffer Vacuum, 2024. Vakuumlösungen für die Massenspektrometrie. Pfeiffer Vacuum. https://esc-eu-central-1.empolisservices.com/service-express/portal/project1_p/document/iu-350-43206ae8-9a6b-4a0e-b49b-f18efb601b84?context=%7B%7D.
- [23] Mujumdar, A.S. (Ed.), 2015. *Handbook of industrial drying*, 4. ed. ed. CRC Press, Boca Raton, Fla., 1318 pp.
- [24] Vieira, G.N.A., Freire, F.B., Freire, J.T., 2015. Control of the Moisture Content of Milk Powder Produced in a Spouted Bed Dryer Using a Grey-Box Inferential Controller. *Drying Technology* 33 (15-16), 1920–1928.
- [25] Martynenko, A., Bück, A. (Eds.), 2018. *Intelligent control in drying*, 1st ed. Taylor & Francis a CRC title part of the Taylor & Francis imprint a member of the Taylor & Francis Group the academic division of T&F Informa plc, Boca Raton, 1 p.
- [26] Defraeye, T., 2014. Advanced computational modelling for drying processes – A review. *Applied Energy* 131, 323–344.
- [27] Bai, Y., Wang, D., 2006. *Fundamentals of Fuzzy Logic Control — Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications*. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, 17–36.
- [28] Ngatchou, P., Zarei, A., El-Sharkawi, A., 2005. Pareto Multi Objective Optimization. *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*.
- [29] Elsevier, 2024. ScienceDirect. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/>. Accessed 31 July 2024.
- [30] Taylor & Francis, 2024. Taylor & Francis Online. Informa PLC. <https://www.tandfonline.com/>. Accessed 31 July 2024.
- [31] Greenhalgh, T., Peacock, R., 2005. Effectiveness and efficiency of search methods in systematic reviews of complex evidence: audit of primary sources. *BMJ (Clinical research ed.)* 331 (7524), 1064–1065.
- [32] Freire, F.B., Vieira, G.N.A., Freire, J.T., Mujumdar, A.S., 2014. Trends in Modeling and Sensing Approaches for Drying Control. *Drying Technology* 32 (13), 1524–1532.
- [33] Kröll, K., 1978. *Trocknungstechnik: Zweiter Band Trockner und Trocknungsverfahren*, Zweite, neubearbeitete Auflage ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 654480 pp.
- [34] Heindl, A., 2016. *Praxisbuch Bandtrocknung: Grundlagen, Anwendung, Berechnung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 700 pp.
- [35] Land, C.M.v., 2012. *Drying in the process industry*. Wiley, Hoboken, N.J., 1 online resource.
- [36] Santini, E.J., Tomaselli, I., 2001. Control of the drying process through the relationship of wood and wet-bulb temperatures. *Drying Technology* 19 (1), 127–135.
- [37] Dai, A., Zhou, X., Liu, X., 2017. Design and Simulation of a Genetically Optimized Fuzzy Immune PID Controller for a Novel Grain Dryer. *IEEE Access* 5, 14981–14990.
- [38] Jensen, S., Da Cruz Meleiro, L.A., Zanoelo, É.F., 2011. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). *Biosystems Engineering* 108 (1), 75–85.

- [39] Schuster, A., Kozek, M., Voglauer, B., Voigt, A., 2012. Grey-box modelling of a viscose-fibre drying process. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 18 (3), 307–325.
- [40] Romano, G., Baranyai, L., Gottschalk, K., Zude, M., 2008. An Approach for Monitoring the Moisture Content Changes of Drying Banana Slices with Laser Light Backscattering Imaging. *Food Bioprocess Technol* 1 (4), 410–414.
- [41] Romano, G., Nagle, M., Müller, J., 2016. Two-parameter Lorentzian distribution for monitoring physical parameters of golden colored fruits during drying by application of laser light in the Vis/NIR spectrum. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 33, 498–505.
- [42] Udomkun, P., Nagle, M., Mahayothee, B., Müller, J., 2014. Laser-based imaging system for non-invasive monitoring of quality changes of papaya during drying. *Food Control* 42, 225–233.
- [43] Nagle, M., Romano, G., Udomkun, P., Argyropoulos, D., Müller, J., 2016. Potential for Automated Systems to Monitor Drying of Agricultural Products Using Optical Scattering, in: Kubota, N., Kiguchi, K., Honghai, L., Obo, T. (Eds.), *Intelligent robotics and applications*, vol. 9835. Springer, Cham, pp. 317–327.
- [44] Martynenko, A., 2017. Computer Vision for Real-Time Control in Drying. *Food Eng Rev* 9 (2), 91–111.
- [45] Szeliski, R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.
- [46] Deutsches Patent- und Markenamt, 2022. Recherche zum Stand der Technik: Im Internet, München. <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=index&action=index>. Accessed 18 July 2024.
- [47] Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) TU Darmstadt, 2024. Vorstellung ETA-Fabrik: Website. <https://www.ptw.tu-darmstadt.de/eta-fabrik/startseite/index.de.jsp>. Accessed 20 August 2024.
- [48] Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) TU Darmstadt, 2024. Vorstellung des Instituts: Website. <https://www.ptw.tu-darmstadt.de/index.de.jsp>. Accessed 20 August 2024.
- [49] Junge, F., 2019. Ein Beitrag zur Energieeffizienzbewertung von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen. Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, Darmstadt, Online-Resource.
- [50] Elserafi, G., Borst, F. Energieeffiziente Bauteil trocknung durch Abwärmenutzung.
- [51] Elserafi, G., von Hayn, A., Wolf, C., Weigold, M., 2022. Effiziente Trocknung mit Induktion und Infrarot: Einsparpotenzial alternativer Trocknungsarten für eine energieeffiziente Bauteiltrocknung. *Werkstattstechnik online : wt* 112 (01-02), 16–21.
- [52] Weigold, M., Elserafi, G., 2021. Bewertung industrieller Trocknungsprozesse: Forschungsbericht zum Projekt EE4InG. https://ee4ing.de/wp-content/uploads/2020/06/FT-PTW_Trocknung-Eduard.pdf.

4.4. Anhang

Tabelle 9: Suchergebnisse der Patentrecherche in DEPATISnet

Suchbegriffe	Treffer	Dokumentnummer mit Nähe zum angestrebten Forschungsvorhaben ⁹
TI=(Trock?) AND TI=(Bauteil?)	117	-
TI=(Dry?) AND TI=(Monitor?) AND TI=(part?)	32	-
TI=(Dry?) AND TI=(Monitor?) AND TI=(continuous)	22	US000004204337A JP000S63111514A
TI=(Dry?) AND TI=(Monitor?) AND TI=(camera)	6	NZ000000600018A DE000010134234A1
TI=(part# (L) cleaning) AND TI=(Monitor?)	8	CN000105363720A
TI=(Trock?) AND TI=(Überwachung) AND (ICB='F26B?' OR MCD='F26B?')	30	EP000000265215A2 DE000003835641A1 DE102017115081A1 WO002024051986A1 EP000002148158B1 DE000002721965A1

⁹ Bei der Bewertung der Relevanz wurden ausschließlich Dokumente auf Deutsch oder Englisch berücksichtigt