

Methoden und Ansätze zur Entwicklung neuer Lebensdauermodelle und deren Integration in Digitale Zwillinge

Methods and Approaches for the Development of new Lifetime Models and their Integration in Digital Twins

Robin Bauer^{1,*}, Adrian Reuther², Christian Plesker², Benjamin Schleich², David Inkermann¹

¹ Institute of Mechanical Engineering, Technical University of Clausthal

² Product Life Cycle Management, Technical University of Darmstadt

* *Korrespondierender Autor:*

Robin Bauer

Institut für Maschinenwesen

Robert-Koch-Straße 32

38678 Clausthal-Zellerfeld

+49 5323 72-3550

✉ bauer@imw.tu-clausthal.de

Abstract

To implement a degradation model in a Digital Twin, the degradation of a filament nozzle for Fused Deposition Modeling (FDM) is analysed. The nozzle orifice diameter undergoes an expansion due to continuous extrusion of material, which leads to a deterioration in the quality of manufactured components. Due to a lack of data, the degradation model is developed by means of similarity considerations for waterjet cutting and calibration of the derived models using values from wear tests. It is determined which data from the printing tests must be used for modelling and how this data is to be processed in order to successfully integrate a degradation model into a Digital Twin. The aim is to adapt the printing process in real time in order to optimize print quality and operating times.

Keywords

Digital Twin, Degradation, Additive Manufacturing, Condition Monitoring, Process Optimization

1. Einleitung

Um die Planung von Lebenszyklusoptionen wie bspw. Wiederverwendung, Upgrade, oder Wartung zu verbessern, sind präzise Lebensdauermodelle für Systemkomponenten und kontinuierliche Zustandsüberwachungen von zentraler Bedeutung [1, 2]. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen können Produkte mittels Lebensdauerprognosen gezielt an die Anforderungen angepasst werden. In späteren Entwicklungsphasen, wenn bereits wichtige Entscheidungen in der Produktentwicklung umgesetzt wurden, sind häufig nur noch eingeschränkt Anpassungen und damit Optimierungen möglich [3]. Präzise Lebensdauerprognosen erfordern jedoch die Einhaltung der modellierten Betriebsgrößen. Abweichungen, z. B. durch veränderte oder variable Anwendungsfälle, können zu einer signifikant kürzeren Lebensdauer führen. Ein großes Problem in frühen Entwicklungsphasen von Produkten ist zudem der Informationsmangel zur präzisen Lebensdauermodellierung aufgrund fehlender Daten aus der Anwendung des Produktes. Um dennoch Lebensdauerprognosen in frühen Entwicklungsphasen vornehmen zu können, müssen Informationen von Vergleichssystemen genutzt werden, bei welchen bereits Informationen zur Lebensdauer und zugehörigen Einflussgrößen vorhanden sind [4]. Aus den Referenzinformationen können geeignete Lebensdauermodelle abgeleitet werden, welche auch bei veränderlichen Betriebsgrößen anwendbar sind. Dazu ist eine kontinuierliche Übertragung von Prozessparametern erforderlich, um die Lebensdauerprognose bei Bedarf anzupassen. Dies kann mithilfe Digitaler Zwillinge erfolgen. Digitale Zwillinge stellen eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts dar und bilden somit den aktuellen Zustand digital ab. Bei der Anwendung eines Digitalen Zwillings ist es erforderlich, den Lebenszyklus von Komponenten oder Systemen zwischen den Phasen „Begin of Life“ (BoL), „Mid of Life“ (MoL) und „End of Life“ (EoL) zu differenzieren. In der ersten Phase BoL befindet sich die Produktentwicklung, welche die Erstellung der Produktgeometrie sowie verhaltensbeschreibender Modelle dieses Produkts bzw. Systems beinhaltet. Diese Modelle und Daten werden im sogenannten Digitalen Master zusammengefasst [5]. Ein Digitaler Zwilling wird aus dem Digitalen Master abgeleitet und kann somit auf die entwickelten Modelle und Daten aus der BoL zugreifen. Durch den Einsatz Digitaler Zwillinge kann die benötigte Datenbasis zur Anpassung sowie zum Betrieb von Lebensdauermodellen bereitgestellt werden, wodurch präzisere Vorhersagen ermöglicht werden. Durch die bidirektionale Verbindung des Digitalen Zwillings mit dem physischen Objekt können dann diese Erkenntnisse direkt genutzt und Prozessparameter angepasst werden, um die Lebensdauer zu erhöhen. In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich erste Lebensdauermodelle basierend auf Ähnlichkeitsbetrachtungen entwickeln und mittels der Datenbasis des Digitalen Zwillings anpassen lassen, um Lebensdauerprognosen zu treffen (siehe Abbildung 1).

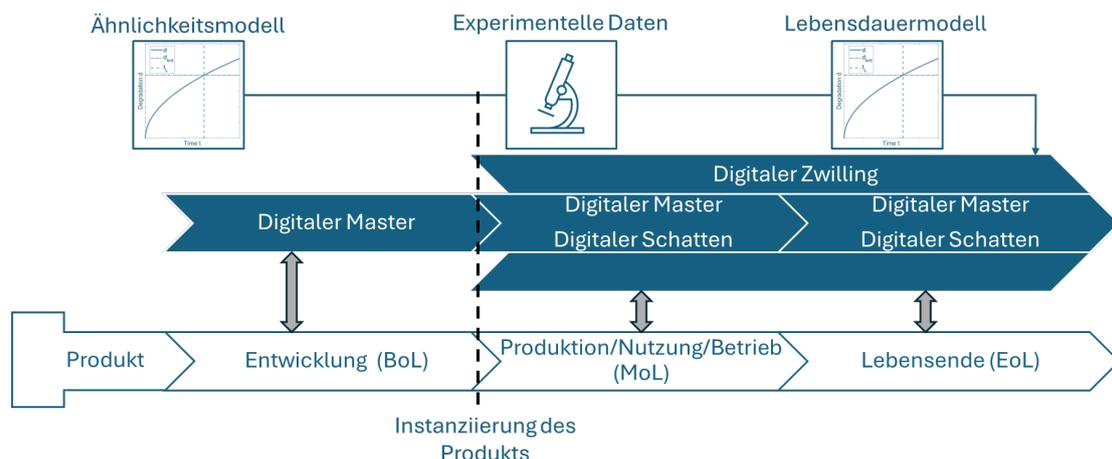


Abbildung 1: Integration von Lebensdauermodellen in den Digitalen Zwilling entlang der Lebenszyklusphasen

1.1. Methodik

Der Aufbau und die Integration von Lebensdauermodellen sollen in dieser Arbeit anhand eines Anwendungsbeispiels erfolgen. Hierzu dienen Filamentdüsen von 3D-Druckern, da hier ein Mangel an Lebensdauerinformationen festgestellt wurde. Der Düsenausgangsdurchmesser d_{da} wird als Degradationsgröße gewählt, da dieser eine hohe Relevanz für die Druckqualität hat [6]. Zur Generierung einer Datengrundlage für die Untersuchungen werden Verschleißversuche anhand eines vollfaktoriellen Versuchsplans und einer zu druckenden Beispielgeometrie durchgeführt. Variable Faktoren sind unterschiedlich harte metallischen Partikel in PLA-Filamenten und der Partikelmassenstrom \dot{m}_p . Die erzeugten Daten sind jedoch nicht ausreichend, um präzise Lebensdauermodelle für unterschiedliche Betriebsgrößen zu erstellen. Daher wird mithilfe von Ähnlichkeitsbetrachtungen ein Modellansatz abgeleitet und mittels der Messdaten angepasst. Hierbei werden Lebensdauermodelle physikalisch ähnlicher Systeme als Grundlage genutzt. Für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung der Filamentdüse wird ein Digitaler Zwilling eingesetzt, um eine Anpassung der Lebensdauerprognose an veränderte Betriebsgrößen zu ermöglichen. Digitale Zwillinge bieten durch ihre virtuelle Repräsentation sowie bidirektionale Verbindung zum physischen Objekt eine ideale Basis zur Überwachung, Prognose und Anpassung von Systemen. Auf den Anwendungsfall bezogen können mit Hilfe der im Druckprozess gewonnenen Daten dann bspw. Prozessparameter des physischen Systems während des Betriebs (MoL) angepasst werden, um lebensdauererweiternde Maßnahmen zu treffen oder Wartungsintervalle zu planen (EoL).

1.2. Handlungsbedarf und Forschungsfrage

Bei vielen Systemen existieren unzureichende Informationen bezüglich der Lebensdauer. Künftig werden vermehrt neuartige Produkte entwickelt, wie beispielsweise elektrifizierte Antriebe, welche diesen Informationsmangel aufgrund veränderter Betriebsbedingungen oder Systemarchitekturen teilen. Für klassische Modellierungsverfahren, werden viele Messdaten aus praktischen Versuchen benötigt [7]. Die Durchführung solcher Versuche ist aufwendig und kann erst erfolgen, wenn ein geeigneter Prototyp vorhanden ist. Um Lebensdauerprognosen für neuartige Systeme frühzeitig zu ermöglichen oder den Informationsbedarf und damit den Versuchsaufwand zu reduzieren, sind Verfahren nötig, welche auf vorhandene Lebensdauerdaten hinreichend ähnlicher Systeme zurückgreifen. Weiterhin sind in frühen Entwicklungsphasen von Systemen häufig noch nicht alle Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Systemen bekannt. Auch kann es zu Änderungen bestimmter Einflussgrößen kommen, z.B. wegen zusätzlicher ungeplanter Anwendungsfälle bzw. Betriebsbedingungen. Um diese Bedingungen präziser sowie anwendungsorientiert in die Modelle einzubeziehen, soll ein Digitaler Zwilling genutzt werden. Dabei muss erforscht werden wie ähnlichkeitsbasierte Modelle in den Digitalen Zwillingen integriert und dort an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden können. Um diese Probleme zu adressieren, werden folgende Forschungsfragen betrachtet und am Beispiel der Filamentdüse eines 3D-Druckers beantwortet:

1. Ist die ähnlichkeitsbasierte Modellbildung geeignet, um eine Lebensdauerprognose bei Systemen vorzunehmen, bei denen kaum Lebensdauerdaten vorliegen und was sind Einschränkungen dieses Verfahrens?
2. Was ist hinsichtlich der Integration und des Informationsaustausches von Lebensdauermodellen in Digitalen Zwillingen zu beachten und welchen Mehrwert bringt eine solche Integration bei Lebensdauerprognosen unter variablen Einflussgrößen?

2. Stand der Forschung

2.1. Ansätze und Verfahren zur Lebensdauermodellierung

Um präzise Lebensdauerprognosen für ein System vorzunehmen, müssen geeignete Ansätze und Verfahren zur Lebensdauermodellierung des betrachteten Systems und seiner Anwendungsfälle verfügbar sein oder entwickelt werden. Ein Vorgehen dazu ist in [8] beschrieben, wobei drei Ansätze zur Lebensdauermodellierung unterschieden werden. Als Ansatz können die Degradation, die Ausfallrate oder die Lastspielzahl bis zum Versagen verwendet werden. Der Verlauf der erstellten Modelle hängt dabei von internen Eigenschaften des Systems, Umgebungseinflüssen und Betriebsgrößen ab. Sollen einige dieser Einflussgrößen als Variablen in das Lebensdauermodell eingehen, steigt der Modellierungsaufwand.

Weiterhin existieren unterschiedliche Verfahren zur Umsetzung der Modellierungsansätze. Diese werden ebenfalls in [8] beschrieben, ebenso Kriterien zur Auswahl von Ansätzen und Verfahren zur Lebensdauermodellierung. Die Kriterien sollen in diesem Beitrag für Filamentdüsen von 3D-Druckern angewendet werden.

2.2. Ähnlichkeitsbasierte Modellierung

Eine Möglichkeit zur Übertragung vorhandener Informationen auf neue, aber vergleichbare Systeme und Anwendungsfälle ist die ähnlichkeitsbasierte Modellbildung. Dabei kann von Ähnlichkeit gesprochen werden, wenn es sowohl übereinstimmende, als auch sich unterscheidende Merkmale bei einer Problemstellung gibt [9]. Um Ähnlichkeit zu quantifizieren werden mehrere Ansätze verfolgt. Zum einen können dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen z. B. über algebraische oder Differentialgleichungen hergeleitet werden [10]. Dabei wird die Ähnlichkeit einzelner Merkmale bestimmt. Voraussetzung ist die physikalische Ähnlichkeit betrachteter Systeme, die physikalischen Vorgänge müssen also den gleichen mathematischen Funktionen unterliegen. Lediglich bei der Größe der Parameter darf es Unterschiede geben [11]. Alternativ können merkmalsbasierte Ähnlichkeitsmaßzahlen ermittelt werden, wobei durch Auswahl und Gewichtung relevanter Merkmale und durch Berechnung sogenannter Distanzmaße komplette Problemstellungen und Systeme auf Ähnlichkeit untersucht werden. Aufgrund der Gewichtung der Berechnung unterliegen die Ergebnisse aber häufig subjektiven Einschätzungen [10].

Bei den vorzunehmenden Untersuchungen ist insbesondere das Vorliegen von physikalischer Ähnlichkeit relevant, da für den Anwendungsfall, den Verschleiß von Filamentdüsen von 3D-Druckern, keine Lebensdauerdaten vorliegen. Demnach müssen Lebensdauerdaten physikalisch ähnlicher Systeme ermittelt und die vorhandenen Lebensdauermodelle untersucht werden. Um zu prüfen, ob bei Vorliegen gleichartiger physikalischer Vorgänge tatsächlich eine hinreichende Ähnlichkeit zur Nutzung der Daten vorliegt, kann die sogenannte Grundähnlichkeit der Systeme überprüft werden [10]. Dabei werden relevante Parameter zur Beschreibung des Lebensdauermodells herausgefiltert und ihr Verhältnis für die Vergleichssysteme berechnet. Sind alle Verhältnisse zwischen den Systemen nahe eins, so sollten Schädigungsmechanismen ähnlich ablaufen.

2.3. Digitale Zwillinge

Gemäß der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) wird ein digitaler Zwilling als eine digitale Repräsentation einer realen Produktinstanz wie einem Gerät, einer Maschine oder einem System definiert und umfasst ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhaltensweisen dieser Instanz [12]. In der Ära von Industrie 4.0 spielen Digitale Zwillinge eine zentrale Rolle, da sie die Integration und Vernetzung von physischen und digitalen Systemen ermöglichen und somit die Effizienz und Flexibilität in der Produktion erheblich stei-

gern können [12]. Die Instanziierung eines Digitalen Zwillings erfolgt mit der Produktionsfreigabe der zugehörigen Produktinstanz am Ende des BoL. Damit startet auch der eigene Lebenszyklus des Digitalen Zwillings, welcher mit dem Lebenszyklus der Produktinstanz in Beziehung steht [5]. Die virtuelle Repräsentation des Digitalen Zwillings wird während des gesamten Lebenszyklus des Produkts mit verschiedenen Modellen, Informationen und Daten angereichert. Der Digitale Schatten bildet eine Teilmenge des Digitalen Zwillings und enthält Betriebs-, Zustands- oder Prozessdaten der realen Produktinstanz [5]. Dies bildet die Grundlage für alle weiteren, mittels eines Digitalen Zwillings durchgeführte Anwendungen. Digitale Zwillinge finden heute Anwendung in den unterschiedlichsten Branchen und Bereichen sowie für verschiedene Anwendungen entlang des Produktlebenszyklus [13].

3. Konzept zur Lebensdauermodellierung im Digitalen Zwilling

Im Folgenden wird zunächst der Anwendungsfall näher spezifiziert, um darauf aufbauend das Konzept zur Lösung der Forschungsfragen zu präsentieren. Dazu wird zunächst das Lebensdauermodell sowie der Digitale Zwilling vorgestellt und anschließend in der Integration beide Systeme vereint.

3.1. Lebensdauermodellierung einer 3D-Druck-Düse

Filamentdüsen unterliegen Einflüssen, welche zum frühzeitigen Versagen führen können. Dazu gehören insbesondere korrosive Prozesse, wie die Wasserstoff-Sauerstoff-Versprödung [14]. Da derartige Einflüsse aber aufgrund ihrer Abhängigkeit von Werkstoff und Fertigungsverfahren der Düse schwer modellierbar sind, werden sie hier nicht betrachtet. Der Fokus liegt auf mechanischen Schädigungsmechanismen, die sich aus der Reibung des Filaments und dem daraus resultierenden Verschleiß an den Wänden der Düsenausgangsbohrung ergeben. Dies führt zur kontinuierlichen Vergrößerung des Düsenausgangsdurchmessers d_{da} gegenüber dem initialen Durchmesser d_{da0} , wodurch Oberflächengüte und Maßhaltigkeit angefertigter Bauteile sinkt [6]. In Abbildung 2 ist das Innere einer Filamentdüse während des Druckprozesses mittels partikelhaltigen, abrasiven Filaments dargestellt. Für eigene Versuche zur Generierung von Messdaten als auch zur Validierungsgrundlage nachfolgender Betrachtungen wurde ein 3D-Drucker der Marke Prusa vom Typ MK4 verwendet. Um dabei den Wechsel und die Vermessung der Düsen zu erleichtern, wurde der 3D-Drucker mit einem PRUSA-MK4-ADAPTOR-AS und passenden Filamentdüsen vom Typ V6-NOZZLE-175-400 des Herstellers E3D ausgestattet. Der verwendete 3D-Drucker nutzt zur Herstellung von Bauteilen als Fertigungsmethode das Fused Deposition Modeling (FDM). Details zum FDM-Verfahren sind in [15] dargestellt.

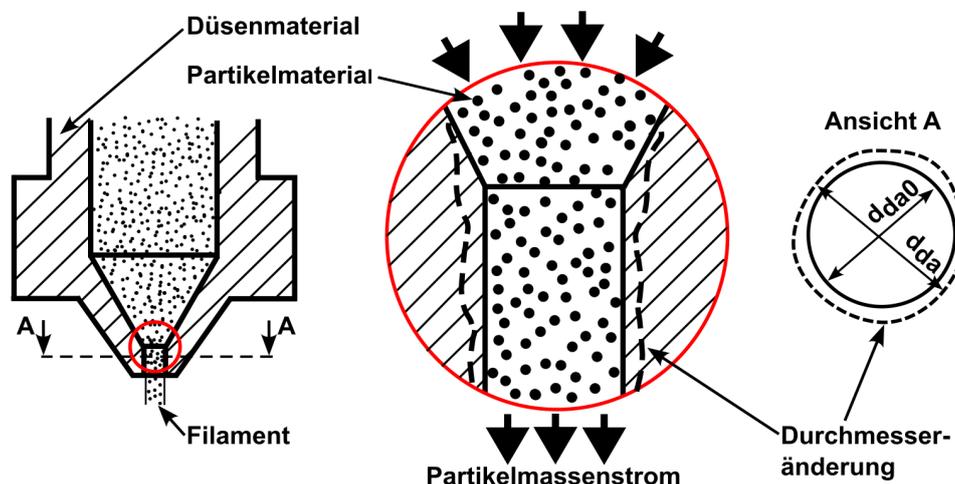


Abbildung 2: Verschleiß einer Filamentdüse durch Drucken von mit harten Partikeln gefüllten Material

Zur Modellierung der Lebensdauer von Filamentdüsen ist zunächst zu klären, welcher Modellierungsansatz zweckmäßig ist. Dazu werden die in [8] definierten Kriterien verwendet. Da der Düsenausgangsdurchmesser eine messbare, monoton steigende Schädigungsgröße ist, welche keiner großen Streuung unterliegt und wichtige Einflussfaktoren bekannt sind, ist das Aufstellen eines Degradationsmodells sinnvoll. Dazu soll ein empirisches Modell erstellt werden, welches normalerweise auf Messdaten basiert, für die ein Kurvenfit vorgenommen wird. Die Fitfunktion der Messdaten stellt dabei das Degradationsmodell dar und ist von den Einflussgrößen der Schädigung abhängig, vgl. [8]. Da nur wenige Messwerte zur Validierung eines solchen empirischen Modells zur Verfügung stehen, ist das Aufstellen einer geeigneten Ansatzfunktion deutlich erschwert. Mittels einer Ähnlichkeitsbetrachtung gemäß Kapitel 2.2 sollen physikalisch ähnliche Systeme ermittelt und die Übertragbarkeit vorhandener Lebensdauermodelle auf Grundlage der eigenen Messwerte geprüft werden.

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden Verschleißbeobachtungen an Düsen beim Wasserstrahlschneiden identifiziert. Der Schädigungsmechanismus ist dabei nahezu identisch, wenn auch mit höheren Partikelgeschwindigkeiten und anderen Materialien gearbeitet wird als beim FDM [16,17]. Es gibt mehrere empirische und rechnergestützte Untersuchungen zu Einflussgrößen auf die Degradation sowie daraus abgeleitete Degradationsmodelle [16-19]. Da physikalische Ähnlichkeit zwischen der Degradation von Düsen im 3D-Druck und beim Wasserstrahlschneiden vorliegt, soll die Grundähnlichkeit überprüft werden, vgl. Kapitel 2.2. Dazu wird ein Lebensdauermodell als Referenz genutzt, welches möglichst Einflussgrößen enthält, die auch in eigenen Versuchen variiert werden können. Geeignete Parameter waren dabei der Partikelmassenstrom \dot{m}_p und Eigenschaften des Partikelmaterials, weshalb ein aus [16] ermitteltes Lebensdauermodell gewählt wurde. Werden nicht variable Größen zu einem konstanten Faktor zusammengefasst, ergibt sich

$$\dot{m}_{\text{loss}} = c \cdot H_p^{7,12} \cdot \dot{m}_p^{2,9} \quad (1)$$

mit der Konstante c und der Härte des Partikelmaterials H_p . Dabei wird jedoch die Massenverlustrate \dot{m}_{loss} anstatt der aktuelle Düsenausgangsdurchmesser d_{da} betrachtet. Daher muss Gleichung (1) nach der Zeit t integriert und nach d_{da} umgeformt werden. Somit ist die Ansatzfunktion für die Degradation

$$d_{\text{da}} = \sqrt{c \cdot H_p^{7,12} \cdot \dot{m}_p^{2,9} \cdot t + d_{\text{da}0}^2} \quad (2)$$

mit $d_{\text{da}0} = d_{\text{da}}(m_p = 0)$. Wird nun die Grundähnlichkeit nach Kapitel 2.2 überprüft, so ist festzustellen, dass \dot{m}_p beim Wasserstrahlschneiden deutlich größer ist. Hier ist daher noch eine Überprüfung mittels eigener Messdaten notwendig. Außerdem sind Düsen beim Wasserstrahlschneiden meist aus Wolframcarbid, welches deutlich härter ist als die in den Versuchen verwendeten Messingdüsen. Insgesamt ist also nicht von einer Grundähnlichkeit, sondern nur von physikalischer Ähnlichkeit zwischen Wasserstrahlschneiden und FDM auszugehen. Daher ist anzunehmen, dass Anpassungen an dem aus den Ähnlichkeitsbetrachtungen hervorgegangenen Degradationsmodell notwendig werden.

3.2. Digitaler Zwilling einer 3D-Druck Düse

Um nun eine präzise Lebensdauermodellierung zu erreichen, muss das erstellte ähnlichkeitsbasierte Lebensdauermodell an das physische System und den Anwendungsfall angepasst werden. Dazu kommt ein Digitaler Zwilling (DZ) zum Einsatz. Im vorliegenden Anwendungsfall der Filamentdüse eines 3D-Druckers liegt der Schwerpunkt auf den Degradationerscheinungen während des Druckprozesses. Im Digitalen Zwilling werden eine Vielzahl von Daten und Parametern erfasst und verarbeitet. Dies umfasst Sensordaten aus dem Druckprozess, spezifische Düsenparameter sowie Informationen über das verwendete Filament. Ein detailliertes 3D-Modell der Filamentdüse bildet die geometrische Grundlage und ermöglicht die Darstellung der Degradationerscheinungen. Eine präzise Lebensdauermodellierung erfordert die kontinuierliche Eingabe von Parametern wie den Eigenschaften des verwendeten

Filaments und den Umgebungsbedingungen in das Lebensdauermodell im Digitalen Zwilling. Dies dient sowohl der Anpassung der Parameter des Modells als auch der Generierung neuer Lebensdauerprognosen. Das System nutzt die gewonnenen Daten aus dem Digitalen Zwilling, um den Druckprozess kontinuierlich anzupassen und zu optimieren. Prozessparameter können aktiv verändert werden, um die Lebensdauer der Düse zu verlängern. Erreicht die Düse einen kritischen Abnutzungsgrad, kann der Austausch der Düse angeordnet werden. Die Abnutzung kann zudem visuell über die Geometriemodelle des Digitalen Zwillings dargestellt werden, was eine bessere Einschätzung durch den Anwender ermöglicht.

3.3. Integration des Lebensdauermodells in den Digitalen Zwilling

Für die konzeptionelle Integration von Lebensdauermodellen in den Digitalen Zwilling (DZ) erfolgt zunächst die Auswahl geeigneter Lebensdauermodelle. Dazu wird wie beschrieben eine Ähnlichkeitsbetrachtung herangezogen, die auf den spezifischen Betriebsbedingungen der selektierten Düse angepasst wird. Die relevanten Daten, einschließlich Sensordaten und Betriebsparameter, werden kontinuierlich im DZ erfasst und vorverarbeitet, um aussagekräftige Merkmale für die Modelle zu extrahieren [2]. Bei der Integration wird eine modulare Architektur verwendet, die flexible Anpassungen ermöglicht. Eine Datenbank mit Schnittstellen zur Datenaufnahme und -verarbeitung speichert und verwaltet die Modelle. Während des Betriebs der Filamentdüse speisen Livedaten die Modelle kontinuierlich. Eine Datenverarbeitungsmethode analysiert diese Daten und aktualisiert die Lebensdauerprognosen. Im Falle von Abweichungen oder neuen Belastungsmustern erfolgt eine dynamische Anpassung der Modelle, wodurch die Prognosegenauigkeit erhöht wird. Von besonderer Relevanz sind dabei die Größen m_p sowie die Konstante c . Diese werden im DZ bestimmt und im Lebensdauermodell angepasst. Darüber hinaus erlaubt die Berücksichtigung der Informationen des zugeführten Filaments eine Anpassung der Härte des Partikelmaterials H_p . Die gewonnenen Daten und Prognosen finden schließlich Verwendung bei der Prozessoptimierung [20]. Eine Anpassung der Prozessparameter, wie beispielsweise der Druckgeschwindigkeit oder der Temperatur, kann sowohl automatisiert als auch über die Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgen, um die Lebensdauer der Düse zu verlängern. Die Outputs der Lebensdauermodelle werden in einer benutzerfreundlichen Oberfläche visualisiert, welche die aktuelle Düsenabnutzung und die verbleibende Lebensdauer anzeigt (vgl. Abbildung 3).

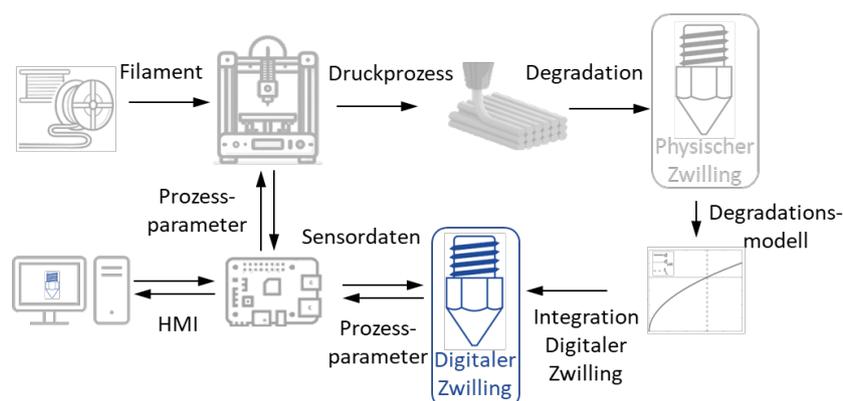


Abbildung 3: Konzept der Integration eines Lebensdauermodells in den Digitalen Zwilling einer Filamentdüse

Benachrichtigungssysteme warnen automatisch bei kritischen Abnutzungsgraden oder anstehenden Wartungen. Die Integration von Lebensdauermodellen in den Digitalen Zwilling ermöglicht eine umfassende Überwachung und Optimierung des Druckprozesses. Dies führt zu einer Verlängerung der Düsenlebensdauer, einer Reduzierung der Betriebskosten und einem möglichst langanhaltenden Maß an Druckqualität.

4. Experimente und Versuchsergebnisse

Zur Umsetzung des in Kapitel 3 beschriebenen Konzepts wurden erste Experimente zur Bedatung des Lebensdauermodells durchgeführt, die nachfolgend beschrieben sind.

4.1. Durchführung von Verschleißversuchen

Im Rahmen der Versuche ist eine Variation von Faktoren erforderlich, welche sich auf die Lebensdauer auswirken und auch bei Referenzmodellen des Wasserstrahlschneidens variiert werden. Dadurch wird eine Datengrundlage für die Lebensdauermodellierung mittels Ähnlichkeitsbetrachtungen geschaffen. Zudem wurde die Variation von zwei Faktoren als Datengrundlage als hinreichend betrachtet, da lediglich die Anwendbarkeit der Methode demonstriert und kein detailliertes Lebensdauermodell von Filamentdüsen erstellt werden soll. Variiert wurde zum einen das Filamentmaterial. Genutzt wurden die drei Filamente copperFill, bronzeFill und steelFill von colorFabb, was eine Variation der Partikelhärte H_p ermöglicht. Die Härte der Partikel wurde auf Grundlage von Anfragen beim Hersteller geschätzt. Außerdem wurde der Filamentmassenstrom variiert und daraus mit Hilfe von bei colorFabb angefragten Datenblättern der Partikelmassenstrom berechnet und auf bestimmte Werte festgelegt. Die so definierten Faktor-Werte sind in Tabelle 1 zusammengetragen.

Tabelle 1: Faktor-Werte des Versuchsplans

Index	\dot{m}_{p1}	\dot{m}_{p2}	\dot{m}_{p3}	\dot{m}_{p4}	H_{p1}	H_{p2}	H_{p3}
Wert	40 $\frac{g}{h}$	60 $\frac{g}{h}$	80 $\frac{g}{h}$	100 $\frac{g}{h}$	215 HB	75 HB	40 HB

Als Versuchsplan wurde ein dreiwertiger vollfaktorieller Plan ohne Wiederholung verwendet. Abweichend davon wurde allerdings steelFill bzw. H_{p1} mit den Partikelmassenströmen \dot{m}_{p1} , \dot{m}_{p2} , und \dot{m}_{p3} kombiniert, die übrigen Filamente mit \dot{m}_{p2} , \dot{m}_{p3} , und \dot{m}_{p4} . Als Beispielgeometrie zur Durchführung der Versuche wurden Würfel mit einer Masse von etwa 85 bis 100 Gramm gedruckt. Die Düsenausgangsdurchmesser der verwendeten Filamentdüsen wurden vor Benutzung initial vermessen. Die Düsen wurden markiert und jeder eine Kombination aus \dot{m}_p und H_p zugewiesen. Anschließend wurden die Beispielgeometrien gedruckt und nach jeder Fertigstellung eines Würfels die jeweilige Düse erneut vermessen, bis entweder eine Filamentmasse $m_F = 400g$ gedruckt wurde oder d_{da} sich nur noch wenig gegenüber der letzten Messung verändert. Zum Vermessen wurde ein Mikroskop vom Typ DSX1000 vom Hersteller Olympus sowie die zugehörige Software benutzt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 4 dargestellt.

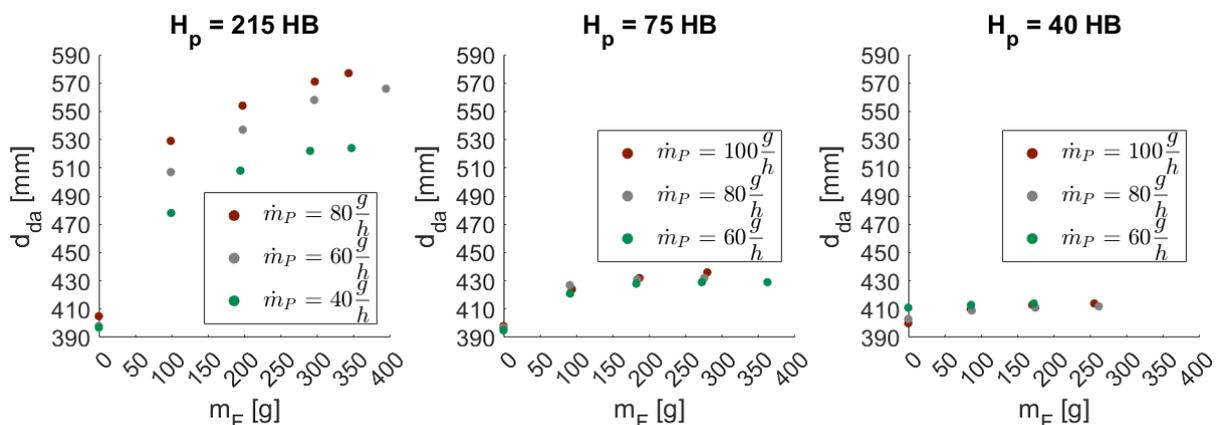


Abbildung 4: Ergebnisse der Verschleißversuche für unterschiedliche Partikelmassenströme und Partikelhärten

4.2. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Im nächsten Schritt wurde c aus Gleichung (2) berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass ein guter Datenfit anhand dieser Gleichung nicht ohne weiteres möglich ist. Auch Modifikationen der Gleichung, z. B. durch Potenzieren einzelner Faktoren, führten zu keinem guten Ergebnis. Insgesamt muss daher geschlussfolgert werden, dass die nicht vorhandene Grundähnlichkeit zwischen FDM und Wasserstrahlschneiden keine Übernahme von empirischen Lebensdauermodellen erlaubt. Empirische Lebensdauermodelle sind offenbar derart auf ihre Datengrundlage optimiert, dass Sie nur auf Anwendungsfälle übertragbar sind, bei denen mindestens Grundähnlichkeit vorliegt. Damit ist die ähnlichkeitsbasierte Modellbildung nicht immer für eine Lebensdauerprognose geeignet. Eine wichtige Einschränkung ist, dass die Vergleichsmodelle sich nicht allein auf Messdaten gründen sollten, sondern z.B. mittels physikalischer Überlegungen Ansatzfunktionen ermittelt wurden, welche die zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen näherungsweise beschreiben. Nur so wird die vorausgesetzte physikalische Ähnlichkeit bei der Modellierung adressiert. Damit ist die Untersuchung physikalisch ähnlicher Systeme dennoch sinnvoll, da Einflussfaktoren auf die Lebensdauer des Systems besser erfasst werden können. Im Anwendungsbeispiel hatten sowohl Partikelhärte als auch Partikelmassenstrom einen signifikanten Einfluss auf die Degradation der Filamentdüsen. Somit wird auch die Erstellung eines eigenen (semi-)physikalischen Modells erleichtert und die Überprüfung aufgestellter Annahmen mittels Vergleichsdaten ermöglicht.

4.3. Diskussion des Konzeptes des Digitalen Zwillings

Im vorliegenden Konzept wurde der Digitale Zwilling nur konzeptionell und nur für eine Filamentdüse betrachtet sowie prototypisch umgesetzt. Die Architektur und Umsetzung des Digitalen Zwillings muss in weiteren Forschungsprojekten standardisiert und ausgestaltet werden. Darüber hinaus bestehen in der Praxis viele Produkte aus komplexen Systemen, die sich aus Teilsystemen und Einzelkomponenten zusammensetzen. Diese Heterogenität der Systemteilnehmer erfordert eine differenzierte Betrachtung des Lebenszyklus der einzelnen Komponenten. Um eine präzise Gesamtlebensdauer des gesamten Produkts zu bestimmen, ist es notwendig, Digitale Zwillinge detailliert für Einzelkomponenten zu entwickeln sowie die Lebensdauermodelle dieser in die korrespondierenden Digitalen Zwillinge zu integrieren und zu synchronisieren. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Prognose, die die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten berücksichtigt. Die Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung geeigneter Methoden zur Integration und Koordination der verschiedenen Digitalen Zwillinge, um eine konsistente und genaue Lebensdauerprognose zu gewährleisten. Außerdem ist in Zukunft die Identifikation der Prozessparameter notwendig, deren Anpassung lebensverlängernde Auswirkung haben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Konzept zur Integration von Lebensdauermodellen in Digitale Zwillinge untersucht, um die Lebenszyklusplanung von Produkten, insbesondere von Filamentdüsen für 3D-Drucker, zu verbessern. Durch kontinuierliche Zustandsüberwachung und die Nutzung von Vergleichsdaten sollen auch in frühen Entwicklungsphasen mit wenigen Daten genaue Lebensdauerprognosen erstellt werden. Dazu ist die Übernahme und Anpassung von Lebensdauermodellen physikalisch ähnlicher Systeme zwar grundsätzlich naheliegend, aber häufig nicht ohne weiteres geeignet. Deshalb sind weitere Untersuchungen zu ähnlichkeitsbasierten und intelligenten Verfahren vorzunehmen, welche die Mess- bzw. Rohdaten von Vergleichssystemen nutzen und daraus neue Modelle erstellen, anstatt Modellgleichungen zu übernehmen. Ein Beispiel für ein solches Verfahren wäre z.B. das Transfer Learning oder die physikalische Modellbildung. Ziel ist die Absicherung eigener Lebensdauerdaten und die Erstellung

möglichst allgemeingültiger Modelle. Ein weiterer wichtiger Aspekt für zukünftige Forschungsprojekte ist die Rückführung der gewonnenen Daten in den Digitalen Master zur Verbesserung der nächsten Produktgeneration. Der aktuelle Ansatz fokussiert auf einen einseitigen Informationsfluss und berücksichtigt den Beginn des Lebenszyklus nicht vollständig. Um den Produktentwicklungsprozess der Generation n+1 mit den Erkenntnissen aus der Generation n zu bereichern, sollte die Integration des Lebensdauermodells bereits im Digitalen Master erfolgen. Zukünftige Forschung wird diesen Ansatz weiter untersuchen, um die Effizienz und Qualität der nächsten Produktgenerationen zu steigern.

Literaturverzeichnis

- [1] Umeda, Y.; Daimon, T.; Kondoh, S.: Life Cycle Option Selection Based on the Difference of Value and Physical Lifetimes for Life Cycle Design. In: 16th International Conference on Engineering Design (2007), Paper-Nr. DS42_P_47.
- [2] D'Amico, D. et al.: Conceptual Framework of a Digital Twin to Evaluate the Degradation Status of Complex Engineering Systems. In: Procedia CIRP 86 (2019), S. 61-67.
- [3] van den Bogaard, J. A.: Product Lifecycle Optimization Using Dynamic Degradation Models. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006, S. 59-71.
- [4] Bauer, R. and Inkermann, D.: Analyse von Degradationsmodellen zur Modellierung der Lebensdauer-heterogenität komplexer Systeme. In: 33th Symposium Design for X (2022), Paper-Nr. 16.
- [5] Javid, M.; Haleem, A.; Suman, R.: Digital Twin Applications Toward Industry 4.0: A Review. In Cognitive Robotics 3 (2023), S. 71-92.
- [6] Carstensen, J.V.: Topology Optimization with Nozzle Size Restrictions for Material Extrusion-Type Additive Manufacturing. Structural and Multidisciplinary Optimization 62 (2020), S. 2481-2497.
- [7] Li, Y. et al.: Data-Driven Health Estimation and Lifetime Prediction of Lithium-Ion Batteries: A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 113 (2019), Paper-Nr. 109254.
- [8] Bauer, R. S., Inkermann, D.: Selection of Model Approaches and Modelling Methods for Lifetime Prognosis. In: Proceedings of the Design Society Vol. 3 (2023), S. 3125-3134.
- [9] Mach, E.: Die Ähnlichkeit und die Analogie als Leitmotiv der Forschung. In: Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie und Forschung (1917), S. 220-232.
- [10] Deimel, M.: Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen. Düsseldorf: VDI Verlag, 2007, S. 5-13.
- [11] Weber, M.: Das allgemeine Ähnlichkeitsprinzip der Physik und sein Zusammenhang mit der Dimensionslehre und der Modellwissenschaft. In: Jahrbuch der Schiffsfahrttechnischen Gesellschaft 31 (1930), S. 274-354.
- [12] Stark, R. et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (s1) (2020), S. 47-50.
- [13] B. Schleich et al.: Shifting Value Stream Patterns Along the Product Lifecycle with Digital Twins. In: Procedia CIRP 86 (2019), S. 3-11.
- [14] Aleph Objects: 3-D Printer Nozzle Failure Analysis. Aleph Objects Inc., 2015.
- [15] Masood, S. H.: Advances in Fused Deposition Modeling. In: Hashmi, S. (Hrsg.): Comprehensive Materials Processing Volume 10: Advances in Additive Manufacturing and Tooling. Elsevier, 2014, S. 69-91.
- [16] Nanduri, M., Taggart, D., Kim, T.: The Effects of System and Geometric Parameters on Abrasive Water Jet Nozzle Wear. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002), S. 615-623.
- [17] Hashish, M.: Observations of Wear of Abrasive-Waterjet Nozzle Materials. In: Journal of Tribology 116 (1994), Nr. 3, S. 439-444.
- [18] Qiang, Z. et al.: CFD Research on Particle Movement and Nozzle Wear in the Abrasive Water Jet Cutting Head. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 95 (2018), S. 4091-4100.
- [19] Chen, X., Deng, S., Guan, J. et al.: Experiment and Simulation Research on Abrasive Water Jet Nozzle Wear Behavior and Anti-Wear Structural Improvement. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 39 (2017), S. 2023-2033.
- [20] Spaney, P. et al.: A Model-Driven Digital Twin for Manufacturing Process Adaptation. In: ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (2023), S. 465-469.