

Fortschritte der interdisziplinären Forschung zur Digitalisierung in der Leichtbauproduktion: Anwendungen und Optimierungen in der LaiLa Modellfabrik

Vincent Adomat*, Maryam Ahanpanjeh, Christian Kober, Marc Fette, Jens P. Wulfsberg

Institute of Production Engineering

Helmut Schmidt University/University of the Federal Armed Forces Hamburg

Hamburg, Germany

*vincent.adomat@hsu-hh.de

Zusammenfassung — Die Modellfabrik des dtec Labors für intelligente Leichtbauproduktion (LaiLa) hat sich in den letzten drei Jahren als Digitalisierungslabor für intelligente Leichtbauproduktion etabliert und den Wissenstransfer zwischen Grundlagenforschung, anwendungsnaher Forschung und industrieller Anwendung in der Luftfahrt vorangetrieben. Durch die Implementierung und Optimierung von Technologien wie energieoptimierter Produktionsplanung und -steuerung, robotergestütztem kontinuierlichem Ultraschallschweißen und digitalen Zwillingen konnten signifikante Fortschritte in Bezug auf Qualitätssteigerung, individualisierte Fertigung, Ressourceneffizienz und Transparenz erzielt werden. Der vorliegende Beitrag präsentiert die gewonnenen Erkenntnisse und zeigt auf, wie die dargestellte Digitalisierung der Modellfabrik dazu beiträgt, Nachhaltigkeit und Effizienz in der Leichtbauproduktion durch intelligente Vernetzung, automatisierte Produktionssysteme, Echtzeit-Abbildung, Überwachung und Steuerung sowie flexibles Produktionsdesign zu erreichen. Darüber hinaus werden die Potenziale für die Weiterentwicklung und Skalierung der erprobten Lösungen in der industriellen Anwendung diskutiert, um den Weg für eine zukunftsorientierte und wettbewerbsfähige Leichtbauproduktion in der Luftfahrtindustrie und darüber hinaus zu ebnen. Im Einklang mit den übergeordneten Zielen von LaiLa und dtec trägt die Modellfabrik dazu bei, die Digitalisierung in der Leichtbauproduktion voranzutreiben und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie zu stärken. Durch die enge Zusammenarbeit von Partnern aus Industrie und Wissenschaft fördert LaiLa den Technologietransfer und die Entwicklung innovativer Lösungen.

Keywords — Digitalisierung, Leichtbauproduktion, Produktionsplanung, Ultraschallschweißen, Digitale Zwillinge, Nachhaltigkeit

I. EINLEITUNG

Unternehmen müssen eine Vielzahl von Strategien verfolgen, die sowohl technologische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigen, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Angesichts der zunehmenden Herausforderungen des Klimawandels und der Notwendigkeit einer nachhaltigen klimaneutralen Produktion gewinnen energieoptimierte Prozesse zunehmend an Bedeutung. Die Implementierung solcher Prozesse und die Nutzung umweltfreundlicher Materialien

helfen, ökologische Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig Kosten zu senken. Die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist ein zentraler Aspekt für eine nachhaltigere Produktion und Produktentwicklung, da sie zur Erreichung von Umweltzielen wie der Reduzierung von Treibhausgasemissionen und der Ressourceneffizienz beitragen können. Trotz deren geringen Gewichts bieten CFK-Bauteile eine hervorragende Festigkeit und Steifigkeit. Diese Materialien leisten einen wesentlichen Beitrag zur Modernisierung und Nachhaltigkeit der Luftfahrtindustrie, indem sie die Effizienz, Leistung und Umweltfreundlichkeit von Flugzeugen verbessern.

Unternehmen müssen nicht nur effizienter werden, sondern auch flexibler, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen. Ein zentraler Schritt ist die Förderung von Innovationen. Durch Investitionen in Forschung und Entwicklung können Unternehmen kontinuierlich neue Produkte und Technologien entwickeln. Der Einsatz fortschrittlicher Technologien zur Optimierung von Produktionsprozessen und die Umsetzung von Industrie 4.0-Prinzipien unterstützen die Digitalisierung und Vernetzung der Produktionsabläufe, was zu höherer Effizienz und besserer Anpassungsfähigkeit führt.

Dabei sind umfassende Qualitätskontrollen und kontinuierliche Verbesserungsprozesse von großer Bedeutung. Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), das Internet der Dinge (IoT) und Digitale Zwillinge (DTs) spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Der Einsatz digitaler Werkzeuge zur Überwachung und Verbesserung der Qualität bietet vielversprechende Ansätze zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Am Composite Technology Center (CTC) GmbH, dem Leichtbau-Technologie- und Innovationszentrum von Airbus in Deutschland, wird eine zentrale Laborplattform eingerichtet. Diese Plattform dient als praxisnahe Entwicklungs- und Validierungsumgebung für alle Arbeitspakete und die im Projekt definierten Anwendungsbereiche. Drei dieser Anwendungsbereiche werden im Folgenden bezüglich der wissenschaftlichen sowie industriellen Relevanz vorgestellt

und das damit einhergehende systematische Vorgehen im Projekt erläutert.

II. WEITERENTWICKLUNG ENERGIEOPTIMIRTER PPS IN DER KOMPOSITAVERARBEITUNG: ERKENNTNISSE UND FORTSCHRITTE DER LAiLa MODELLFABRIK

Die Herausforderungen des Klimawandels und die daraus resultierenden Anforderungen an eine nachhaltige und klimaneutrale Produktion haben in den letzten Jahren auch in Unternehmen aus dem Bereich der Kompositverarbeitung nochmals an Bedeutung zugelegt. Kompositwerkstoffe, insbesondere kohlenstoffbasierte faserverstärkte Kunststoffe (CFK, FVKs), bieten aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften und ihres Potenzials zur Gewichtsreduktion bereits heute zahlreiche Vorteile für eine ressourcenschonende und energieeffiziente Fertigung [1]. Um jedoch auch in Zukunft wettbewerbsfähig zu bleiben und den steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit gerecht zu werden, ist eine kontinuierliche Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in der Kompositverarbeitung unerlässlich. In diesem Kapitel werden die Fortschritte und Erkenntnisse der letzten zwei Jahre in der LaiLa Modellfabrik im Bereich der energieoptimierten PPS vorgestellt und diskutiert, um aufzuzeigen, wie Digitalisierung dazu beitragen kann, die Kompositverarbeitung langfristig international wettbewerbsfähig und klimaneutral zu gestalten.

In den letzten zwei Jahren hat die Forschung im Rahmen des dtec Labors für intelligente Leichtbauproduktion (LaiLa) deutliche Fortschritte bei der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Erweiterung der PPS in der Kompositverarbeitung um die Perspektive „Energiebedarf und Energiekosten“ erzielt. Durch die Arbeit an angepassten Algorithmen und Optimierungsmodellen [2] zur dynamischen Anpassung der Produktionsplanung konnten erste Erkenntnisse in realen Produktionsumgebungen gewonnen werden, die Unternehmen in die Lage versetzen, energieintensive Prozesse kostenoptimal zu planen und durchzuführen. Die entwickelten Ansätze zielen darauf ab, Kosten und CO₂-Emissionen zu reduzieren, indem energie- und arbeitsintensive Prozesse identifiziert, entkoppelt und zeitlich verlagert werden. Diese ersten Tests und Validierungen der Methoden und Werkzeuge deuten einen potenziellen Nutzen für Unternehmen, nicht nur in der Kompositverarbeitung, an. Durch die Integration der Perspektive „Energiebedarf und Energiekosten“ in das eigene PPS-System könnte das dtec Projekt LaiLa zukünftig auch einen dauerhaften Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit der Branche in Zeiten zunehmend volatiler Energiemärkte und wachsender Anforderungen an den Klimaschutz leisten. Im Folgenden werden die bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse näher beleuchtet und diskutiert, um das Potenzial der entwickelten Lösungen aufzuzeigen und weitere Schritte für deren Umsetzung in der Praxis abzuleiten.

Der Digitalisierung kommt eine zentrale Rolle bei der Optimierung des Energieverbrauchs in der Verarbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) zu. Durch den Einsatz von Sensoren und dezentralen Messköpfen konnten

in LaiLa detaillierte Daten über den Energieverbrauch von Prozessen und einzelnen Komponenten gesammelt werden. Diese Daten ermöglichen eine tiefgehende Analyse und Optimierung der Produktionsprozesse. Temporäre Messungen helfen dabei, die Energieverbräuche einzelner, wiederkehrender Prozessschritte zu identifizieren. So wird eine Optimierung von Heiz- und Kühlsystemen sowie die Nutzung von Abwärme für Parallelprozesse ermöglicht [3].

Eckhoff et al. [3] zeigen zudem, dass durch die gezielte Messung und Analyse der Energieverbräuche konkrete Energietreiber identifiziert und gezielte Verbesserungen vorgenommen werden können. Ein Beispiel für die Anwendung temporärer Messungen ist der Fertigungsprozess im Resin-Transfer-Moulding Verfahren (RTM) für strukturelle Großbauteile aus CFK. So wurden Leistungsmessungen der Harz-Injektionsanlage vorgenommen. Die einzelnen Prozessschritte sind in den gemessenen Kurven anhand ihrer unterschiedlichen Energieverbräuche zu erkennen. Durch die Vermessung aller einzelnen Systeme wie Heizungssysteme, Kühlsysteme sowie der Injektionsanlage konnten Wechselwirkungen und Zusammenhänge analysiert werden. Dies ermöglichte es, bei der Messung der Verbraucher konkrete Energietreiber zu identifizieren. Eckhoff et al. [3] haben gezeigt, dass bei bestehenden Anlagen durch eine solche Analyse gezielte Verbesserungen erreicht werden können, beispielsweise durch optimierte Regler, effizientere Aktuatoren oder eine verbesserte Steuerung der Anlage. Die Energiedatenerfassung über modernes Messequipment ist für alle Prozessschritte essenziell, um eine energieoptimierte Produktionsplanung und Steuerung zu gewährleisten.

In [4] stellen die Autoren ein Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) Modell vor, das darauf abzielt, die Produktionsplanung in der diskreten Fertigung unter Berücksichtigung variabler Energiepreise zu optimieren. Dieses Modell ist ein zentraler Baustein der energiebewussten PPS-Forschung in LaiLa. Es unterscheidet zwischen energieintensiven und arbeitsintensiven Prozessen und ermöglicht es, energieintensive Prozesse in Zeiten niedrigerer Energiepreise zu verlagern, um Kosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Das Modell berücksichtigt wesentliche Parameter wie den Energiebedarf und die Energiekosten, die Verfügbarkeit und Kosten von Maschinen sowie die Verfügbarkeit und Kosten von qualifizierten Arbeitskräften. Die Zielfunktion maximiert die Gesamteinnahmen aus den Produktionsaktivitäten, indem alle relevanten Kostenfaktoren von den jeweiligen Einnahmen abgezogen werden. Nebenbedingungen stellen sicher, dass jede Operation höchstens einmal geplant wird, keine Maschine in einer Periode mehrfach belegt wird, die Maschinenbelegung die verfügbare Kapazität nicht überschreitet, die Mitarbeiterkapazität pro Periode und Kompetenz nicht überschritten wird und die Energiekapazität pro Periode nicht überschritten wird. Als Ergebnis gibt das Modell eine optimale zeitliche Verteilung der einzelnen zur Bearbeitung vorgesehenen Aufträge auf die verfügbaren Maschinen gemäß Abbildung 1 aus

Zur Validierung des Modells wurden numerische Experimente mit verschiedenen Datensätzen durchgeführt, die auf der

period	57	58	59	60	61	62	63	64	65
date	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022	03.01.2022
time	09:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
energy cost	122.93	110.17	93.38	96.73	82.37	80.9	80.99	98.05	123.51
machine 1			operation 21		operation 41	operation 26			
machine 2							operation 32	operation 7	
machine 3					operation 4	operation 13			
machine 4	operation 36	operation 40	operation 12						
machine 5	operation 42	operation 29	operation 44						
machine 6			operation 25		operation 22	operation 27			
machine 7			operation 1						
machine 8									
machine 9									
machine 10		operation 40	operation 35			operation 24	operation 47		
machine 11		operation 29		operation 50	operation 18	operation 46		operation 45	
machine 12									
machine 13					operation 43	operation 28	operation 6		
machine 14		operation 5	operation 9	operation 37	operation 25	operation 33		operation 10	
machine 15									
machine 16								operation 3	
machine 17									
machine 18					operation 11	operation 34		operation 2	
machine 19	operation 30	operation 20				operation 14	operation 17	operation 15	
machine 20				operation 19			operation 16	operation 49	

ABILDUNG 1: EXEMPLARISCHE PLANUNGSTABELLE, WIE SIE DAS OPTIMIERUNGSMODELL AUS [4] AUSGIBT.

Modellfabrik des Projektes basieren. Diese Experimente zeigen, dass das Modell in der Lage ist, realistische Produktionszenarien zu optimieren und die Gesamteinnahmen zu steigern. Beispielsweise wurde für einen mittelgroßen Datensatz eine Einnahmesteigerung von 4,66 % durch die Berücksichtigung variabler Energiepreise erzielt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine flexible Planung energieintensiver Prozesse in Zeiten niedrigerer Energiepreise zu einer Erhöhung der Gesamteinnahmen führen kann. Dies unterstreicht die Bedeutung der Integration variabler Energiepreise in die Produktionsplanung, um sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Ziele zu erreichen.

[2] erweitert das bestehende Mixed-Integer-Linear-Programm (MILP) Modell zur energiepreisoptimierten Produktionsplanung um spezifische Aspekte der Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFRP). Diese Erweiterung berücksichtigt die besonderen Anforderungen und Einschränkungen der CFRP-Fertigung, wie die begrenzte Haltbarkeit von Materialien, die Notwendigkeit der Materialvorbereitung, das Öffnen von Formen während des RTM-Zyklus, wiederholte Autoklav-Aushärtungszyklen, das hohe individuelle Investitionsrisiko und die hohen Kosten für Verzögerungen. Das Modell integriert diese spezifischen Produktionsbedingungen und optimiert die Planung, indem es energieintensive Prozesse in Zeiten niedrigerer Energiepreise verlagert. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das Modell nicht nur für kleinere, sondern auch für größere industrielle Szenarien geeignet ist und eine signifikante Reduzierung der Energiekosten bei gleichzeitiger Maximierung der Einnahmen ermöglicht. Die Erweiterung hebt hervor, dass die Flexibilisierung der Produktionsplanung durch die Berücksichtigung variabler Energiepreise nicht nur zur Kostensenkung beiträgt, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit in einem globalisierten Markt sichert und die Umstellung auf erneuerbare Energien fördert. Zukünftige Arbeiten sollen das Modell um Techniken zur Vorhersage von Energiepreisen erweitern und betriebliche Abhängigkeiten detaillierter berücksichtigen.

Die Erprobung der belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BoA) als Methode der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) unter Berücksichtigung variabler Energiepreise stellt einen weiteren, jedoch heuristischen Ansatz der PPS-Optimierung dar. Die BoA, die ursprünglich darauf abzielt, die Produktionskapazitäten durch gezielte Freigabe von Aufträgen zu optimieren und Engpässe zu vermeiden, muss hierfür um zusätzliche Parameter und Entscheidungsvariablen erweitert werden. Insbesondere müssen die Energiepreise als

dynamische Größe in die Freigabeentscheidungen integriert werden. Dies bedeutet, dass neben der Berücksichtigung der Maschinen- und Personalkapazitäten auch die aktuellen und prognostizierten Energiepreise in die Entscheidungsfindung einfließen [5]. Die Anpassung der BoA erfordert die Entwicklung eines erweiterten Modells, das die zeitliche Verschiebung energieintensiver Prozesse in Perioden niedrigerer Energiepreise ermöglicht. Hierzu müssen die Energiebedarfe der einzelnen Aufträge ebenfalls bekannt sein und in Relation zu den variablen Energiepreisen gesetzt werden. Die Erweiterung der BoA um diese energiepreisabhängigen Entscheidungsvariablen ermöglicht es, die Produktionsplanung selber flexibler und kosteneffizienter zu gestalten, da auch Optimierungen mehrdimensionaler Systeme mit verhältnismäßigem Rechenaufwand näherungsweise gelöst werden können. Experimentellen Ergebnisse zeigen, dass durch die Integration variabler Energiepreise in die BoA eine relevante Reduzierung der Energiekosten bei gleichzeitiger Maximierung der Produktionsleistung erreicht werden kann. Dieses Thema ist ein aktueller Arbeitsschwerpunkt und wird in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter vertieft, um die praktische Anwendbarkeit und die wirtschaftlichen Vorteile dieser Methode zu maximieren. Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BoA) bleibt auch heute noch in der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) relevant. Ihre weitläufige industrielle Verwendung beruht auf ihrer Fähigkeit, Produktionskapazitäten durch gezielte Freigabe von Aufträgen zu optimieren und Engpässe zu vermeiden. In den letzten zwei Jahren wurden an der LaiLa Modellfabrik umfangreiche Energiemessungen durchgeführt, um den Energieverbrauch in verschiedenen Produktionsprozessen detailliert zu erfassen. Basierend auf diesen Daten wurde ein Mixed-Integer-Linear-Programm (MILP) Optimierungsmodell entwickelt, das eine energiebewusste Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ermöglicht. Dieses Modell optimiert die zeitliche Verlagerung energieintensiver Prozesse unter Berücksichtigung variabler Energiepreise, um Kosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Parallel dazu wurde die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BoA) untersucht und um energiepreisabhängige Entscheidungsvariablen erweitert. Dies ermöglicht eine flexible und kosteneffiziente Produktionsplanung, die auf aktuelle und prognostizierte Energiepreise reagiert. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt lag auf der Analyse der Prozessketten für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), wobei energieintensive Prozessbestandteile identifiziert und das Potenzial für eine energieoptimierte PPS-Planung untersucht wurden. [6] Zusätzlich führten die Analysen der Messdaten zu direkten Verbesserungen der Energieeffizienz, was weitere positive Ergebnisse über die Optimierung der PPS hinaus ermöglichte. Insgesamt zeigen die Forschungsergebnisse, dass eine integrierte Betrachtung von Energieverbrauch und Produktionsplanung erhebliche wirtschaftliche und ökologische Vorteile bietet.

III. ROBOTERGEFÜHRTES KONTINUIERLICHES ULTRASCHALLSCHWEISSEN

Der Einsatz von carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) in der Luftfahrt steigt seit den 1960er-Jahren aus ökonomischen und ökologischen Gründen. Faserverstärkte Thermoplaste bieten im Vergleich zu duroplastischen Verbundwerkstoffen mehrere Vorteile, die sie für verschiedene Anwendungen in der Luftfahrtindustrie attraktiv machen, wie z. B. hohe Schlagzähigkeit, Bruchzähigkeit, Recyclingfähigkeit sowie kurze Verarbeitungszeit [7], [8]. Ihre Schweißbarkeit ist einer ihrer größten Vorteile. Das Ultraschallschweißen (USW), eine der in den letzten Jahren am weitesten verbreiteten Füge-technologien für thermoplastische Verbundwerkstoffe, zeichnet sich durch seine hervorragende Festigkeit, Energieeffizienz, kurze Verarbeitungszeit und seine Fähigkeit zur vollständigen Automatisierung aus [9], [10], [11]. Beim kontinuierlichen Ultraschallschweißen gibt es zwei wichtige Phasen: Vibration und Konsolidierung. Während jeder Phase bestimmen einige Schlüsselparameter und Kriterien die Qualität der endgültigen Schweißnaht. In der Vibrationsphase erfolgt die Erwärmung durch mechanische Schwingungen mit hoher Frequenz (20–40 kHz) und niedriger Amplitude (50–100 μm). Ein Wandler wandelt elektrische Schwingungen in mechanische Schwingungen um, die dann über eine Sonotrode auf die Schweißteile übertragen werden. Diese Schwingungen versetzen Molekülketten in Schwingung, wenn sie auf ein Material treffen. Wenn sich die Moleküle bewegen, reiben sie aneinander und erzeugen Reibungswärme. Dadurch steigt die Temperatur an der Kontaktfläche an, und das thermoplastische Harz erreicht seine Glasübergangstemperatur (T_g). Bei fortgesetzter Erwärmung findet die viskoelastische Wärme statt und die Fügezone beginnt zu schmelzen [11], [12]. In der nächsten Phase wird die Schweißnaht unter einer Konsolidierungseinheit unter die T_g abgekühlt.

Der Einsatz von Industrierobotern wird zur Notwendigkeit, wenn das Ultraschallschweißen zum Fügen komplexer und großer Bauteile eingesetzt wird. Industrieroboter sind flexibler als Schweißmaschinen und besitzen einen großen Arbeitsbereich, allerdings bringen sie trotz ihrer Vorteile auch Herausforderungen mit sich. Industrieroboter verfügen über geringe absolute Genauigkeit aufgrund der mangelnden Steifigkeit und deren seriellen Kinematik [13]. Zudem sind sie durch eine enge Wechselwirkung zwischen dem Prozess und der mechanischen Roboterstruktur gekennzeichnet. Die am Prozess beteiligten Kräfte führen zu Auslenkungen des Roboters und des Endeffektors, welche Abweichungen von der gewünschten Bahn verursacht und den Ablauf vom Prozess beeinträchtigt [14]. Daher ist es eine große Herausforderung die Roboter in manchen Applikationen einzusetzen, insbesondere bei Prozessen mit hohen statischen und dynamischen Kräften. Die Fähigkeit, jederzeit gleichbleibend gute Schweißnähte zu liefern und gleichzeitig robust genug zu sein, um mit Fertigungstoleranzen umzugehen, ist von einer großen Bedeutung, um den Prozess auf ein höheres Technologieniveau zu bringen.

Dieses erfordert jedoch ein gutes Verständnis des Prozesses und des Verhaltens des Roboters sowie der Wechselwirkungen zwischen beiden.

In der Vibrationsphase ist es von entscheidender Bedeutung, die Prozessparameter richtig zu wählen, um die notwendige Energie für die Herstellung einer Schweißverbindung zu erzeugen. Diese Prozessparameter sind Schwingungsfrequenz, Amplitude und statische Kraft der Sonotrode. Außerdem muss sichergestellt werden, dass die erzeugte Energie in angemessener Weise in die Fügezone übertragen wird. Die Energie der Schwingungsamplitude, die sich in der Schweißzone verteilt, hängt von der richtigen Ausrichtung der Sonotrode in Bezug auf das obere Bauteil ab [15], [16]. Die maximale Wärmeabgabe in einer Schweißzone kann nur bei vertikaler Positionierung der Sonotrode erreicht werden. Während der Konsolidierungsphase muss genügend Wärme von der Fügezone abgeführt werden, um sie unter die Kristallinitätstemperatur zu bringen. Dies hängt von der Konsolidierungskraft und der Konsolidierungszeit ab. Die richtige Auswahl der Prozessparameter und die richtige Einstellung der wichtigen Kriterien reichen nicht aus, um Schweißnähte von wiederholbarer Qualität zu erzielen, da es während des Schweißprozesses zu Abweichungen kommen kann. Um wiederholbar hochwertige Schweißnähte zu erzielen, müssen diese Parameter und Kriterien überwacht und schließlich kontrolliert werden.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit im Rahmen des LaiLa-Projektes ist die Erzeugung reproduzierbarer Schweißqualität durch Erstellung einer automatisierten Schweißbahn beim robotergeführten kontinuierlichen Ultraschallschweißen mittels sensorgestützter Bewegungsausführung und Bewegungsbeobachtung, wo auch die wichtigsten Prozessparameter überwacht und eventuell geregelt werden. Abbildung 2 zeigt die zu entwickelnde automatisierte Bahnplanung, bei der die wichtigen Prozessparameter überwacht und gegebenenfalls geregelt werden.

Wie bereits erwähnt sind die Schweißkraft und die Konsolidierungskraft zwei Schlüsselparameter, die die Qualität von der Schweißnaht beeinflussen. Diese Kräfte werden unabhängig voneinander durch pneumatische Zylinder aufgebracht. Allerdings bleiben die eingestellten Kräfte durch die Interaktionen zwischen den Komponenten am Endeffektor während des Prozesses nicht konstant. Um diese Kräfte zu überwachen und bei Bedarf zu regeln, wurden unter der Kolbenstange der Pneumatikzylinder 1-D-Kraftsensoren integriert und die Kräfte (Z-Bewegungen von Komponenten am Endeffektor) geregelt. Ein zusätzlicher Kraftsensor wurde an der Rolle eingebaut, um die Vorspannkraft zu überwachen und zu regeln. Abbildung 3 zeigt die integrierten Kraftsensoren an der Sonotrode, Konsolidierungseinheit und der Rolle.

Die Ausrichtung der Sonotrode ist eines der wichtigsten zu überwachenden Kriterien, die die Schwingungsübertragung und die Gleichmäßigkeit der Druckverteilung während der Vibrationsphase beeinflusst. Zu diesem Zweck wurde eine Inertialmesseinheit (IMU) in der Nähe der Sonotrode am Endeffektor angebracht und ein auf Quaternionen basierender Kalman-

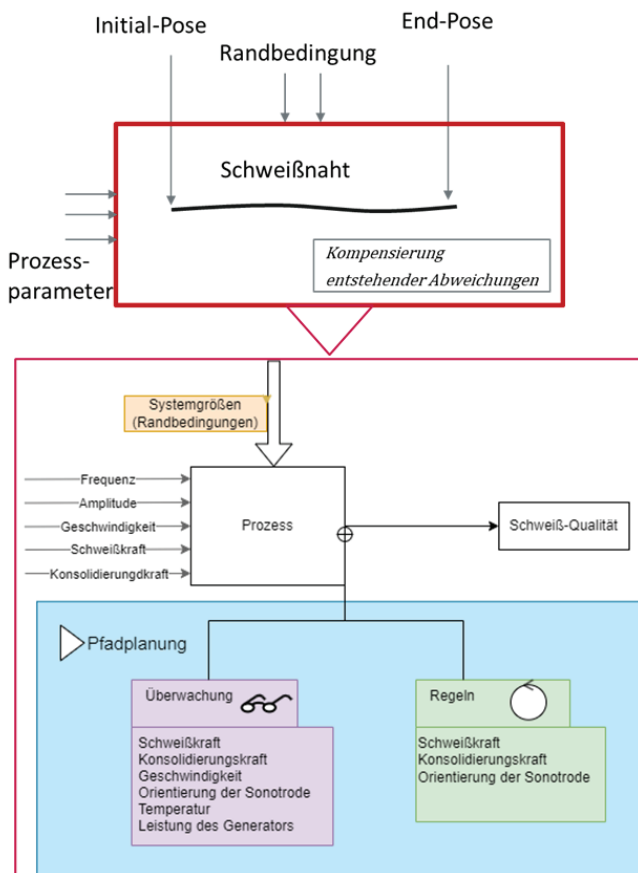


ABBILDUNG 2: ENTWICKELTE SENSORBASIERTE STRATEGIE FÜR AUTOMATISIERTE PFADPLANUNG

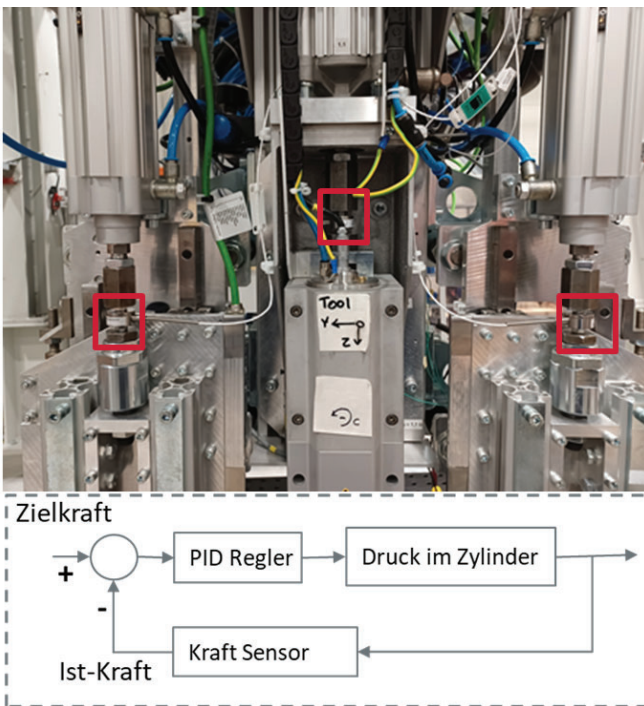


ABBILDUNG 3: INTEGRIERTE KRAFTSENSOREN UND DER REGELKREIS

Filter (EKF) integriert, um die Ausrichtung der Sonotrode in Echtzeit zu messen. Eine IMU, die in dieser Arbeit verwendet wird, besteht aus einem Drei-Achsen-Gyroskop und einem Drei-Achsen-Beschleunigungsmesser. Das Gyroskop misst die Winkelgeschwindigkeit des Objekts und der Beschleunigungssensor misst die externen Kräfte in Bezug auf den IMU-Rahmen (Körperrahmen). Durch die Integration der Winkelgeschwindigkeitsdaten von Gyroskop über die Zeit kann die IMU Änderungen in der Ausrichtung abschätzen, allerdings neigen Gyroskope dazu, mit der Zeit abzudriften, welches mit Hilfe von Beschleunigungsmesserdaten korrigiert werden kann. Da der Beschleunigungssensor bestimmte Kräfte, einschließlich der Schwerkraft, misst, kann er die Ausrichtung des Geräts in Bezug auf die vertikale Drehachse bestimmen. EKF wurde verwendet, um Daten von Beschleunigungsmessern und Gyroskopen zusammenzuführen und die Ausrichtung der Sonotrode um die X- (Schweißrichtung) und Y-Achse zu bestimmen. Mithilfe von diesem Sensor kann die vertikale Ausrichtung der Sonotrode auf den oberen Fügepartner sichergestellt werden.

Zusammenfassend gibt es bei einem Roboter-Ultraschallschweißprozess eine signifikante Wechselwirkung zwischen Prozess und Roboterdynamik. Das Schweißen komplexer Teile mit Doppelkrümmungen und Rampen erfordert eine aktive Bahnüberwachung und -steuerung, um jederzeit die richtige Positionierung und Ausrichtung der Komponenten zu erreichen. Ziel dieser Forschung ist es, die abgebildete Kompensationsstrategie mit Hilfe geeigneter Sensoren weiterzuentwickeln, um das wiederholbare Schweißen komplexer und gekrümmter Strukturen zu ermöglichen.

IV. DIE BEDEUTUNG VON FIDELITY IM KONTEXT DES NUTZENS VON DIGITALEN ZWILLINGEN

Eine Modellfabrik dient in erster Linie der Demonstration der Umsetzbarkeit und Machbarkeit neuer Technologien. In LaiLa wird jedoch auch der Transfer und die Implementierung dieser Technologien in die Industrie erforscht und durch die Entwicklung entsprechender Frameworks und Methoden unterstützt. Es wurde in der Praxis häufig beobachtet, dass im Rahmen der Digitalisierung der Fertigung, beispielsweise durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen (DT), eine Diskrepanz zwischen dem erzielten Mehrwert und den entstehenden Mehrkosten besteht. Dieser Abschnitt fasst daher die Ergebnisse einer früheren Veröffentlichung zusammen, die diesen Aspekt vertieft analysiert [17].

Im Zuge der Umstellung auf Industrie 4.0 steigt die Nachfrage nach digitalen Werkzeugen und fortschrittlichen Technologien kontinuierlich. Gleichzeitig nimmt die Komplexität in der Fertigungsindustrie zu, da die Anforderungen an Individualisierung und Produktionsflexibilität zunehmen [18]. Um diesen Anforderungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg gerecht zu werden, müssen Unternehmen ihre Effizienz kontinuierlich steigern und agiler werden, ohne dabei die Produktqualität zu beeinträchtigen [19]. Die Digitalisierung und ihre zugrundeliegenden Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT) und DTs

bieten hierbei einen vielversprechenden Ansatz zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit [20]. DTs sind ein technologisches Konzept, das zunehmend Beachtung in der Industrie findet [21]. Allerdings gibt es immer noch Uneinigkeit darüber, was einen DT genau ausmacht. Seit der ersten Definition im Jahr 2002 sind zahlreiche weitere entstanden [22], [23], [24]. Ein DT umfasst in der Regel eine physische Realität, ihre virtuelle Repräsentation und den Datenaustausch zwischen beiden. Trotz dieser grundlegenden Elemente besteht weiterhin kein allgemeiner Konsens über die Definition eines DTs. Zudem ist das Bewusstsein für die Beziehungen zwischen den variablen Elementen eines DTs gering, was zu einem unzureichenden Verständnis des Konzepts und seiner Vorteile führt [25]. Unternehmen investieren oft in DTs, ohne konkrete Ziele zu definieren, was dazu führt, dass praktische Implementierungen in der Fertigungsindustrie selten sind [26], [27], [28]. Zudem fehlt es an einer Bewertung der Kosten für die Erstellung und Nutzung von DTs, was zu Akzeptanzproblemen führt [17].

Eine wesentliche Variable, die den Nutzen von DTs beeinflusst, ist die DT-Fidelity. Fidelity beschreibt die "Anzahl der Parameter, ihre Genauigkeit und ihr Abstraktionsniveau" [29]. Um durch die Implementierung von DTs Vorteile zu erzielen, muss die Fidelity bereits in der Entwurfs- und Konzeptentwicklungsphase berücksichtigt werden [30]. Akademische Definitionen legen nahe, dass ein DT mit hoher Fidelity modelliert werden sollte [23], [31]. Jedoch ist eine hohe Fidelity für den praktischen Einsatz nicht immer erforderlich [30], da sie zu höheren Kosten führt [32], [33]. Daher ist es entscheidend, ein geeignetes Fidelityniveau festzulegen. Bestehende Verfahren zur Auswahl geeigneter Fidelityniveaus sind jedoch oft subjektiv und erfordern Erfahrung, die häufig nicht vorhanden ist. Trotz der Relevanz von DT-Fidelity mangelt es weiterhin an Methoden, die potenzielle Implementierungen anleiten [30]. Ein Ansatz zur Ermittlung geeigneter Fidelitystufen in Produktionsumgebungen ist das Digital Twin Fidelity Requirements Model (DT-FRM) [30]. Dieses Kapitel trägt zum Verständnis des DT-Konzepts und der Beziehungen zwischen den relevanten Variablen bei und untersucht die Auswirkungen der DT-Fidelity auf den Nutzen, definiert als Differenz zwischen Einsparpotenzial und Kosten. Die in diesem Kapitel vorgestellten Forschungsergebnisse schließen die Lücke im Verständnis des Einflusses von DT-Fidelity. Zudem wird untersucht, ob die analysierten Zusammenhänge grafisch dargestellt werden können, um als Referenz im DT-Konzeptualisierungs- und Designprozess zu dienen. Ziel ist es, realistischere Erwartungen bei potenziellen Nutzern zu erzeugen und die Akzeptanz in Organisationen zu erhöhen.

Design Science Research (DSR) wurde verwendet, um die DT Benefit Curves (DT-BC) zu entwickeln und zu validieren, die in mehreren Designzyklen und basierend auf einer umfangreichen Literaturanalyse erstellt wurden [34]. Die Entwicklung der DT-BCs begann mit einer Analyse relevanter Literatur zu ähnlichen Konzepten in der Fertigungsindustrie, gefolgt von einer schrittweisen Anpassung der Suchbegriffe und der Anwendung der Analogiemethode. Theoretisches und empirisches Wissen wurden in den Entwürfen verarbeitet. Vorläufige

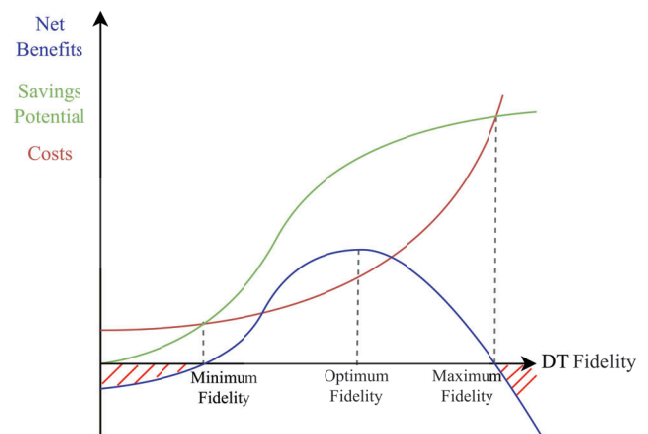


ABBILDUNG 4: DIGITAL TWIN BENEFIT-CURVES AUS [17]

Entwürfe wurden in Diskussionen mit Industrieexperten und Wissenschaftlern überprüft und angepasst. Schließlich wurden die Entwürfe in einer Online-Fokusgruppe bewertet und weiterentwickelt, bis die finalen DT-BCs festgelegt wurden [35]–[37], siehe Abbildung 4.

In diesem Kapitel wird der Verlauf der Kurven für das Einsparpotenzial und die Kosten unter Bezugnahme auf die einschlägige Literatur erläutert. Abbildung 4 veranschaulicht die typische Entwicklung der Kosten und des Einsparpotenzials in Abhängigkeit von der DT-Fidelity, wobei der Schwerpunkt auf relativen Relationen und nicht auf absoluten Werten liegt. Die Kostenkurve schneidet die Ordinate oberhalb des Ursprungs, da zur Realisierung des DT zunächst Investitionskosten anfallen, beispielsweise für Hardware, Software und Personal. Diese Kosten sind unabhängig von der tatsächlichen DT-Fidelity und hängen stark vom Digitalisierungsreifeegrad der Organisation ab. Der exponentielle Verlauf der Kostenkurve basiert auf der Analogie zu den Komplexitätskosten: Je höher die Komplexität, desto höher sind die Kosten für Modellierung, Berechnung, Modifikation und Interpretation der Ergebnisse. Tools und Knowhow sind meist schon auf einem niedrigen Fidelityniveau vorhanden, während mit zunehmender Fidelity die Lücke zwischen vorhandener und benötigter Erfahrung wächst. Infolgedessen steigt der Aufwand zur Erreichung eines höheren Fidelity-Levels exponentiell. Dieser Effekt ist das Gegenteil des Lernkurveneffekts, bei dem die Kosten mit zunehmender Erfahrung sinken. Zudem erfordert die Realisierung von DTs mit sehr hoher Fidelity oft individuelle Spezialsoftware oder kostspielige Kombinationen mehrerer Softwaretools, was weitere Forschung erforderlich machen könnte. Eine weitere Analogie ist die Progression der Zehnerregel: Je später im Entwicklungsprozess eine Änderung notwendig wird, desto teurer ist sie, da die Komplexität und Abhängigkeiten des Systems zunehmen. Dieser Zusammenhang lässt sich auch auf die DT-Fidelity übertragen.

Hinsichtlich des Einsparpotenzials folgt der typische Trend einer S-Kurve. Zunächst ist der Wissenszuwachs durch ein Low-Fidelity-Modell relativ gering. In diesem Stadium können die meisten Erkenntnisse wahrscheinlich mit anderen Methoden als der Verwendung des DTs gewonnen werden. Ab einer

bestimmten Mindestfidelity übersteigt das Einsparpotenzial jedoch die Kosten, sodass der Nettonutzen positiv wird. Dieser Übergang erfolgt, da mit zunehmender Fidelity neues Wissen aufgedeckt und durch den DT adressiert wird. Die Steigung der Einsparpotenzialkurve erreicht an ihrem Drehpunkt ein Maximum, abhängig von der zielgerichteten Nutzung des DTs. Ab einem bestimmten Fidelityniveau steigt das Einsparpotenzial jedoch nicht mehr weiter an und erreicht einen asymptotischen Wert. An diesem Punkt dominieren die Kosten durch ihren exponentiellen Verlauf, sodass der Nettonutzen negativ wird. Das Optimum des Nettonutzens liegt somit zwischen der minimalen und der maximalen Fidelity, abhängig vom spezifischen Anwendungsfall. Abbildung 4 zeigt daher eine typische, beispielhafte Kurve, die für DTs charakteristisch ist.

Zusammenfassend schärfen die Diagramme das Bewusstsein und das Verständnis dafür, wie die Fidelity den Nettonutzen beeinflusst, der durch die Anwendung von DTs in Fertigungsunternehmen erzielt wird. Dieses gesteigerte Bewusstsein führt zu einer besseren Einschätzung, ob sich die hohen Anfangskosten für die Realisierung von DTs lohnen. Außerdem kann die Akzeptanz von DTs bei Stakeholdern durch die Visualisierung der Beziehungen anhand der vorgestellten Grafiken verbessert werden. Empirische Validierungen haben gezeigt, dass die Kennlinien als relevant wahrgenommen werden und ein besseres Verständnis ermöglichen.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorangegangene Text stellt die bisherige Optimierung moderner Produktionstechnologien im Rahmen des Forschungsprojektes „LaiLa“ dar. Ein zentraler Schwerpunkt des Projektes liegt auf der Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Unternehmen müssen technologische und organisatorische Strategien verfolgen, um wettbewerbsfähig und nachhaltig zu bleiben. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) spielen hierbei eine zentrale Rolle, insbesondere in der Luftfahrtindustrie. Technologien wie Industrie 4.0, Künstliche Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT) und Digitale Zwillinge (DTs) sind entscheidend für die Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit. Die LaiLa Modellfabrik hat durch die Implementierung und Optimierung dieser Technologien signifikante Fortschritte in Bezug auf Qualitätssteigerung, individualisierte Fertigung, Ressourceneffizienz und Transparenz erzielt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Ultraschallschweißen und der Einsatz von Industrierobotern. Der Einsatz von Industrierobotern ist aufgrund ihrer Flexibilität notwendig, jedoch herausfordernd, da sie eine geringe absolute Genauigkeit aufweisen und Wechselwirkungen zwischen dem Prozess und der Roboterstruktur bestehen. Im Rahmen des LaiLa-Projektes wird daran gearbeitet, diese Herausforderungen durch die Entwicklung einer automatisierten Schweißbahn mittels sensorgestützter Bewegungsausführung zu bewältigen, bei der die wichtigsten Prozessparameter und -faktoren überwacht und gegebenenfalls geregelt werden. Zur Optimierung der Produktionsplanung wurde ein Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) Modell entwickelt, das die Produktionsplanung unter Berücksichtigung variabler Energiepreise optimiert. Die Er-

gebnisse zeigen, dass eine flexible Planung energieintensiver Prozesse in Zeiten niedrigerer Energiepreise die Gesamteinnahmen steigern und die Energiekosten senken kann. Dieses Modell ist ein zentraler Baustein der energiebewussten Produktionsplanung und -steuerung (PPS) im LaiLa-Projekt und ermöglicht es, energieintensive Prozesse in Zeiten niedrigerer Energiepreise zu verlagern. Ein weiterer Aspekt der Forschung ist die Untersuchung von Digitalen Zwillingen. Ein Digitaler Zwilling umfasst eine physische Realität, ihre virtuelle Repräsentation und den Datenaustausch zwischen beiden. Die Genauigkeit und Detailliertheit eines Digitalen Zwillinges (Fidelity) beeinflusst den Nutzen und die Kosten. Es ist entscheidend, ein geeignetes Fidelityniveau festzulegen, um den maximalen Nettonutzen zu erzielen. Im Rahmen des LaiLa-Projektes wird daran gearbeitet, geeignete Fidelityniveaus zu bestimmen und die Akzeptanz von Digitalen Zwillingen in der Industrie zu erhöhen.

Im weiteren Verlauf des Projektes „LaiLa“ wird die Weiterentwicklung der sensorbasierten Technologie angestrebt, um die Überwachung und Regelung der Schweißparameter zu verbessern. Dies umfasst die Integration fortschrittlicher Sensoren, die eine präzisere Erfassung und Steuerung der Schweißprozesse ermöglichen. Zudem soll das bestehende Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) Modell erweitert werden, indem Techniken zur Vorhersage von Energiepreisen und eine detailliertere Berücksichtigung betrieblicher Abhängigkeiten integriert werden. Dies wird die Flexibilität und Effizienz der energieoptimierten Produktionsplanung weiter erhöhen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Optimierung der Digitalen Zwillinge, wobei Methoden zur Bestimmung des optimalen Fidelityniveaus für verschiedene Anwendungsfälle entwickelt werden sollen. Schließlich wird die Erforschung und Implementierung nachhaltiger Materialien und Prozesse in der Produktion fortgesetzt, um die ökologischen und ökonomischen Vorteile weiter zu maximieren.

Der Forschungsausblick des Projektes „LaiLa“ sieht eine Erweiterung der Anwendung von Digitalen Zwillingen vor, um deren praktische Implementierung und Akzeptanz in verschiedenen Industrien zu untersuchen. Zudem wird der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) zur weiteren Optimierung der Produktionsprozesse und zur Vorhersage von Prozessabweichungen erforscht. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung neuer Modelle und Algorithmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen, um energieeffiziente Produktionssysteme zu fördern. Schließlich wird die interdisziplinäre Forschung vorangetrieben, um die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen zu fördern und innovative Lösungen für komplexe Produktionsherausforderungen zu entwickeln.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dtec.bw – dem Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr und CTC GmbH – dem Composite Technology Center (An Airbus Company) für die Unterstützung dieser Arbeit im

Rahmen des Projekts "LaiLa – Labor für intelligente Leichtbauproduktion". Dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

LITERATUR

- [1] V. Adomat, M. Ahanpanjeh, C. Kober, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, "Interdisziplinäre forschungsperspektiven auf die digitalisierung in der leichtbauproduktion und anwendungsmöglichkeiten in der laila modellfabrik." [Online]. Available: <https://openhsu.ub.hsu-hh.de/handle/10.24405/14557>
- [2] V. Adomat, D. Trautwein, J. Eckhoff, and J. P. Wulfsberg, "Redesigning industrial composite production planning and control for energy awareness," *Procedia CIRP*, vol. 119, p. 582–588, 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.152>
- [3] J. Eckhoff, V. Adomat, and M. Fette, "Energieoptimierte produktionsplanung: Am beispiel der faserverbundkunststoffverarbeitenden luftfahrtindustrie," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 118, no. 3, p. 133–137, Mar. 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1515/zwf-2023-1032>
- [4] V. Adomat, C. Kober, M. Ahanpanjeh, and J. P. Wulfsberg, "A linear programming model for renewable energy aware discrete production planning and control," 2023. [Online]. Available: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/13602>
- [5] S. Willeke, S. Wesebaum, and G. Ullmann, "Integration zeitvariabler energiekosten in die belastungsorientierte auftragsfreigabe," p. Issue 07, 2015. [Online]. Available: <http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2015/07/4200>
- [6] J. Eckhoff, V. Adomat, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, "Energy optimized process design and scheduling in the field of large scale cfrp parts," in *SAMPE Europe Conference 2023*. Madrid, Spain: Helmut Schmidt University, 2023.
- [7] "Review of thermoplastic composites in AerospaceIndustry," vol. 3, no. 1. [Online]. Available: <https://skeenapublishers.com/journal/ijeti/IJETI-03-00031.pdf>
- [8] S. L. Omairey, S. Sampethai, L. Hans, C. Worrall, S. Lewis, D. Negro, T. Sattar, E. Ferrera, E. Blanco, J. Wighton, L. Muijs, S. L. Veldman, M. Doldersum, R. Tonnaer, N. Jayasree, and M. Kazilas, "Development of innovative automated solutions for the assembly of multifunctional thermoplastic composite fuselage," vol. 117, no. 5, pp. 1721–1738. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/s00170-021-07829-2>
- [9] B. Jongbloed, J. Teuwen, R. Benedictus, and I. F. Villegas, "On differences and similarities between static and continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites," vol. 203, p. 108466. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836820335149>
- [10] I. F. Villegas, "Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters," vol. 65, pp. 27–37. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X14001614>
- [11] Zongbo Zhang, Xiaodong Wang, Yi Luo, Zhenqiang Zhang, and Liding Wang, "Study on heating process of ultrasonic welding for thermoplastics," vol. 23, no. 5, pp. 647–664. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705709356493>
- [12] S. Tutunjian, O. Eroglu, M. Dannemann, N. Modler, and F. Fischer, "A numerical analysis of an energy directing method through friction heating during the ultrasonic welding of thermoplastic composites," vol. 33, no. 11, pp. 1569–1587. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705719833108>
- [13] K. Wu, J. Li, H. Zhao, and Y. Zhong, "Review of industrial robot stiffness identification and modelling," vol. 12, no. 17, p. 8719. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8719>
- [14] M. Ahanpanjeh, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, "Contribution of process parameters to geometric deviations of the robot for continuous ultrasonic welding process of thermoplastic composites," in *2023 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2023, pp. 1–7.
- [15] Q. Zhi, L. Lu, Z.-X. Liu, and P.-C. Wang, "Influence of horn misalignment on weld quality in ultrasonic welding of carbon fiber/polyamide 66 composite," vol. 97, no. 5, pp. 133–143.
- [16] C. B. G. Brito, J. J. Teuwen, C. A. Dransfeld, and I. F. Villegas, "The effects of misaligned adherends on static ultrasonic welding of thermoplastic composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246233489>
- [17] C. Kober, B. N. Algan, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, "Relations of Digital Twin Fidelity and Benefits: A Design-to-Value Approach," *Procedia CIRP*, vol. 119, pp. 809–815, 2023. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827123005759>
- [18] W. ElMaraghy, H. ElMaraghy, T. Tomiyama, and L. Monostori, "Complexity in engineering design and manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 61, no. 2, pp. 793–814, 2012. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002004>
- [19] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, "Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 811–833, 2016.
- [20] E. Oztemel and S. Gursev, "Literature review of Industry 4.0 and related technologies," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 31, no. 1, pp. 127–182, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- [21] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, conference Name: IEEE Access. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9103025>
- [22] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihm, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318316021>
- [23] E. H. Glaessgen and D. S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," Honolulu, HI, 2012, nTRS Author Affiliations: NASA Langley Research Center, Air Force Office of Scientific Research NTRS Report/Patent Number: NF1676L-13293 NTRS Document ID: 20120008178 NTRS Research Center: Langley Research Center (LaRC). [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>
- [24] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decision Support Systems*, vol. 145, p. 113524, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167923621000348>
- [25] C. Kober, F. Gomez Medina, M. Benfer, J. P. Wulfsberg, V. Martinez, and G. Lanza, "Digital Twin Stakeholder Communication: Characteristics, Challenges, and Best Practices," *Computers in Industry*, vol. in print, 2024. [Online]. Available: <https://www.ssrn.com/abstract=4692283>
- [26] R. Joppen, A. Lipsmeier, C. Tewes, A. Kühn, and R. Dumitrescu, "Evaluation of investments in the digitalization of a production," *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 411–416, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119303762>
- [27] C. Kober, M. Fette, and J. Wulfsberg, "Challenges of Digital Twin Application in Manufacturing," in *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Dec. 2022, pp. 0162–0168.
- [28] T. Riedelsheimer, P. Lünemann, S. Wehking, and L. Dorfhuber, "Digital Twin Readiness Assessment," 2020.
- [29] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581720300110>
- [30] C. Kober, V. Adomat, M. Ahanpanjeh, M. Fette, and J. Wulfsberg, "Digital Twin Fidelity Requirements Model For Manufacturing," in *Proceedings of the 3rd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL)*, Vancouver, 2022, pp. 595–611.
- [31] M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," 2014. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>
- [32] L. Zhang, L. Zhou, and B. K. Horn, "Building a right digital twin with model engineering," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 59, pp. 151–164, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612521000455>

- [33] C. Kober, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, "A Method for Calculating Optimum Digital Twin Fidelity," *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 1155–1160, 2023. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827123008739>
- [34] J. vom Brocke, A. Hevner, and A. Maedche, Eds., *Design Science Research. Cases*, ser. Progress in IS. Cham: Springer International Publishing, 2020. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-46781-4>
- [35] M. C. Tremblay, A. R. Hevner, and D. J. Berndt, "Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research," *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 26, pp. 599–618, Jan. 2010, publisher: Association for Information Systems. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=sso&db=plh&AN=52686571&site=ehost-live&custid=ns065117>
- [36] T. Dresing and T. Pehl, *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*, 8th ed. Marburg: dr. dresing & pehl GmbH, 2018.
- [37] P. Mayring, *Qualitative Content Analysis: A Step-by-Step Guide*, 1st ed. Thousand Oaks: SAGE Publications Ltd, Dec. 2021.