

FORSCHUNGSBERICHT

Qualitätssicherung sicherheitsrelevanter und additiv gefertigter Produkte durch Einsatz von künstlich intelligenter Inline-Thermografie mit Fokus auf Covid19-Medizinprodukte

Prozessüberwachung zum Druck von Medizinprodukten

Daniel Hoffmann, Sebastian Lulei, Daniel Seewald, Polina Lisinetskaya,
Luis Wachter, Giovanni Schober, Benjamin Baudrit, Martin Bastian

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Danksagung

Das Vorhaben 21677 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ-KFE gGmbH dankt dem BMWK und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens.

Darüber hinaus dankt die Forschungseinrichtung den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes und für die konstruktive Diskussion zu diversen Fragestellungen.

Kurzfassung

Durch den rasanten Anstieg in der Produktion und dem Einsatz additiv gefertigter Produkte, insbesondere auch in hochtechnisierten oder sicherheitsrelevanten Bereichen, nimmt die Qualitätssicherung während des Drucks und am fertigen Bauteil einen immer größeren Stellenwert ein. Die Thermografie ist in diesem Zusammenhang vielversprechend, da der Druckprozess großflächig, zerstörungsfrei und in Echtzeit verfolgt werden kann. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden daher neue Methoden der Qualitätssicherung auf Basis der Thermografie für das Fused Layer Modeling (FLM) entwickelt und evaluiert. Beim FLM-Prozess wird ein Kunststofffilament erwärmt und schichtweise abgelegt, um Bauteile herzustellen. Die häufigsten Fehlermerkmale, die dabei auftreten können, sind eine unzureichende Schichthaftung, überschüssiges Material oder geometrische Verformungen, die jeweils die Qualität des Produkts maßgeblich beeinträchtigen können. Das frühzeitige Erkennen dieser Fehlermerkmale steigert demnach sowohl die Qualität der Produkte als auch die Effizienz des Druckprozesses. Um Fehlstellen inline und automatisiert detektieren zu können, wurden drei verschiedene Messkonfigurationen untersucht, die jeweils anwendungsspezifische Vorzüge und Einschränkungen aufweisen. Zur Qualitätseinstufung wurden sowohl klassische Auswerteverfahren als auch Methoden auf Basis von künstlicher Intelligenz entwickelt. Durch eine Komprimierung der zeitlichen und räumlichen Abkühlkurven auf wenige Parameter konnte eine deutliche Reduzierung der Datenmenge und eine effiziente Qualitätsüberprüfung realisiert werden. Die entwickelte Messtechnik ermöglicht somit eine frühzeitige Fehleridentifikation beim 3D-Druck, wodurch die Ressourceneffizienz durch gesteigert, kostenintensive Prüfungen substituiert und neue Absatzmärkte für die Thermografie geschaffen werden.

Abstract

Due to the increasing production and application of additively manufactured products, especially in highly technical or safety-relevant areas, quality assurance during 3D printing and on the resulting product is becoming more and more important. Thermography is very promising in this context, as the printing process can be monitored over a large area, non-destructively and in real time. In this research project, thermography-based quality assurance techniques that can be applied for fused layer modeling (FLM) were developed and evaluated. In the FLM process, a plastic filament is heated and deposited layer by layer in order to build up a component. The most common defects that can occur during this process are insufficient layer adhesion, excess material, or geometric deformations, all of which can significantly impair the quality of the product. Early detection of these defects therefore increases the quality of the products and the efficiency of the printing process itself. For an automatic detection of defects during the process, three different measurement configurations were investigated, each of which has application-specific advantages and limitations. Both classic evaluation methods and methods based on artificial intelligence were developed for quality classification. By compressing the temporal and spatial cooling curves to a few parameters, a significant reduction in the amount of data and an efficient quality check could be realized. The measurement technology developed thus enables early defect identification in 3D printing, which increases resource efficiency, replaces cost-intensive testing procedures, and creates new sales markets for thermography.

1	Einleitung.....	5
2	Stand der Technik.....	6
2.1	Grundlagen des Fused Layer Modeling.....	6
2.2	Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren	8
2.3	Maschinelles Lernen	9
2.4	Eigener Kenntnisstand und Vorerfahrungen.....	10
3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	11
3.1	Identifizierung relevanter Fehlermerkmale	11
3.2	Entwicklung und Konfiguration des Prüfverfahrens	12
3.3	Entwicklung einer Auswertesoftware.....	12
4	Identifikation relevanter Fehlermerkmale.....	13
4.1	Auswahl von Druckvorlagen	13
4.2	Durchführung eines Ringversuchs.....	13
4.3	Referenzmessungen an den Druckobjekten.....	14
4.3.1	Computertomographie.....	14
4.3.2	Mechanische Prüfung.....	17
5	Entwicklung des Prüfaufbaus zur Inline-Thermografie beim FLM	19
5.1	Verwendete Hardwarekomponenten.....	19
5.2	Künstliche Erzeugung relevanter Fehlermerkmale.....	19
5.3	Konfiguration des Messaufbaus.....	21
5.3.1	Messkonfiguration 1: Überwachung der horizontalen Ebene	21
5.3.2	Messkonfiguration 2: Überwachung der Strangablage	23
5.3.3	Messkonfiguration 3: Frontale Überwachung des Druckobjekts	24
6	Entwicklung eines Prüfkonzepts	26
6.1	Bildaufnahme und Bildverarbeitung.....	26
6.2	Auswertung durch Bildsubtraktion.....	28
6.3	Auswertung des zeitlichen und räumlichen Abkühlverhaltens.....	29
6.3.1	Messkonfiguration 1	29
6.3.2	Messkonfiguration 2.....	31

6.3.3	Messkonfiguration 3	35
6.4	Auswertemethode des maschinellen Lernens	45
6.4.1	Autoencoder zur Rekonstruktion der Messdaten	45
6.4.2	Klassifikation mittels künstlicher neuronaler Netze	47
7	Zusammenfassung	50
8	Umsetzung der Forschungsergebnisse Fehler! Textmarke nicht definiert.	
8.1	Ergebnistransfer in die Wirtschaft..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
8.2	Verwendung der Zuwendung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für kmU und Angaben zur Finanzierbarkeit Fehler! Textmarke nicht definiert.	
10	Literaturverzeichnis	53

1 Einleitung

Durch den zunehmenden Einsatz additiv gefertigter Produkte in medizinischen, hochtechnisierten und sicherheitsrelevanten Branchen steigt der Bedarf an Prüftechnik, die zur Qualitätssicherung während des Druckprozesses und am fertigen Bauteil eingesetzt werden kann, immens. Dies betrifft insbesondere auch Strangablegeverfahren, die in den letzten Jahrzehnten sowohl im industriellen als auch im privaten Umfeld zunehmend an Relevanz gewonnen haben. Hier setzt das vorliegende Forschungsvorhaben an und soll unter Einsatz der Thermografie als Inline-Prüfverfahren einen Mindestqualitätsstandard sicherstellen. Die passive Thermografie, wie sie seit vielen Jahren immer mehr prozessbegleitend Einsatz in den unterschiedlichsten Kunststoff-Fertigungsverfahren wie der Extrusion, dem Spritzgießen und dem Fügen findet, soll dabei auf das Fused Layer Modeling (FLM) adaptiert und die Eignung der Messtechnik für die Detektion von qualitäts- und oftmals sicherheitsrelevanten Merkmalen evaluiert werden. Nach der Identifizierung industrierelevanter und häufig auftretender Fehlermerkmale soll die Messmethode durch Integration von Auswertemethoden der aktiven Thermografie und von Methoden auf Basis von künstlicher Intelligenz speziell für den Einsatz beim 3D-Druck entwickelt werden. Aus wissenschaftlich-technischer Sicht ist es herausfordernd, den unterschiedlichen Anforderungen der sehr verschiedenen Anwendergruppen wie Forschungsinstituten und Großunternehmen mit umfassendem Know-How, Kleinunternehmen mit viel praxisgerechter Erfahrung und peripher Privatanwendern gerecht zu werden, zumal die eingesetzte Systemtechnik vielfältig und hinsichtlich für die Prüfung wesentlicher Randbedingungen wie Zugänglichkeit, Bauraum und Umgebungsbedingung wie dem Vorhandensein einer Temperierung des Druckraums unterschiedlich ist. Hier soll explizit die Wettbewerbsfähigkeit gewahrt werden, sodass die Ergebnisse nicht für einen einzelnen Druckerhersteller, sondern möglichst universal anwendbar sein werden.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlagen des Fused Layer Modeling

Beim FLM handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren, das den extrudierenden Verfahren zugeordnet wird. Das Fused Deposition Modeling beschreibt technisch dasselbe Verfahren, ist jedoch eine von der Firma Stratasys geschützte Bezeichnung. Weiterhin ist auch die Bezeichnung Fused Filament Fabrication (FFF) geläufig [1].

Wie bei allen extrudierenden Verfahren wird auch beim FLM das Ausgangsmaterial durch eine Düse gepresst und durch Bewegung der Düse entlang einer Zielkontur in eine neue Form gebracht. Durch einen Höhenversatz zwischen der Düse und der Ebene der vorhergehenden Kontur ergibt sich ein dreidimensionaler Schichtaufbau des gewünschten Bauteils. Als thermisches Extrusionsverfahren grenzt sich das FLM von anderen Extrusionsverfahren dadurch ab, dass das Ausgangsmaterial zunächst erwärmt wird, bis es einen formbaren, pastösen Zustand erreicht. Bei der Extrusion durch die Düse wird der Materialstrang an die vorherige Schicht angedrückt und mit ihr verbunden. Beim Abkühlen erstarren die Schichten in der neuen Form. [2]

Die Bewegung des Druckkopfes sowie der Bauplattform wird in der Regel über Achssysteme realisiert. Dabei ergeben sich hinsichtlich der Achskinematik Unterschiede zwischen verschiedenen FLM-Maschinen, die jeweils ihre eigenen Vor- und Nachteile bezüglich Fertigungsqualität und Bauzeit mit sich bringen. Während Maschinen mit Portal-Architekturen sich durch eine vergleichsweise einfache und robuste Bauweise auszeichnen, werden Roboterarme für Anwendungen eingesetzt, die höhere Anforderungen an die Flexibilität stellen. Weiterhin werden auch Förderbanddrucker oder Architekturen mit polaren Koordinatensystemen verwendet. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Architekturen ergeben sich hauptsächlich durch die bewegte Masse, den Bauraum und die Umsetzbarkeit von geschlossenen Gehäusen, die für die Verwendung einiger Materialien erforderlich sind.

Das FLM-Verfahren stellt keine besonderen Anforderungen an die zu verarbeitenden Materialien, sodass eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffe eingesetzt werden kann. Grenzen ergeben sich hier vor allem durch den Energieeinsatz, der benötigt wird, um das Material für die Verarbeitung aufzuweichen. Hierbei muss etwa die Verarbeitungstemperatur stets unter der Schmelztemperatur des Heizblocks und der der Extruderdüse liegen, um die Funktion zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden überwiegend Kunststoffe

eingesetzt, die in der Regel eine vergleichsweise geringe Schmelztemperatur aufweisen. Weiterhin ist auch die Verwendung von glas- bzw. kohlefasergefüllten Kunststoffen oder Mischungen mit Metallpulver zur Fertigung von Grünkörpern möglich. [3] Die gängigsten Materialien für den FLM-Druck sind jedoch Polylactide (PLA), Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS), Polycarbonate (PC) und Polyethylenterephthalat (PETG).

Die Qualität additiv gefertigter Bauteile hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die beeinflussen, wie akkurat das ursprüngliche 3D-Modell umgesetzt wird. Dabei sind insbesondere die Maßhaltigkeit sowie die geforderten mechanischen Eigenschaften entscheidend. Beide Qualitätsmerkmale unterliegen bei der Fertigung einer Kombination von verschiedenen Einflüssen: Beim Slicing eines Modells kommt es zu sogenannten Modell- bzw. Slicingfehlern, da das Bauteils entgegen der Vorlage als Schichtmodell aufgebaut wird und die verwendete Maschinenarchitektur Grenzen bezüglich fertigbarer Geometrien vorgibt. Weitere Einflüsse auf die Bauteilqualität ergeben sich durch die gewählten Prozessparameter. Insbesondere die Düsenaustrittstemperatur und der gewählte Materialvorschub entscheiden über die Maßhaltigkeit und mechanische Eigenschaften. Diese Parameter beeinflussen die Dosierbarkeit des Materials am stärksten und entscheiden maßgeblich darüber, wie gut die einzelnen Schichten aneinanderhaften. Weiterhin ist auch die Umgebungstemperatur entscheidend, da sie beeinflusst, wie schnell das Material in der neuen Form erstarrt. Zudem neigen einige Materialien und Bauteilformen zu Spannungsrissen, wenn Temperaturunterschiede innerhalb des Bauteils zu groß werden. Neben diesen Hauptfaktoren wird die Ergebnisqualität noch von einer Vielzahl anderer Parameter wie Geschwindigkeit, Druckbetthaftung oder Materialkühlung beeinflusst.

Da fehlerhafte Einstellungen oder Prozessgrößen in der Regel zu fehlerhaften Bauteilen führen, ist es sinnvoll, den Fertigungsprozess zu überwachen. Hierdurch wird sowohl der Ausschuss als auch die Gefahr reduziert, dass fehlerhafte Bauteile verkauft und verwendet werden. Beim FLM kommen unterschiedliche Methoden zur Qualitätskontrolle zum Einsatz. Die Bestimmung geometrischer Abmessungen wird in der Regel berührend oder mittels Computertomografie durchgeführt, während mechanische Eigenschaften unter Anwendung zerstörender Prüfverfahren bestimmt werden. Da diese Methoden nicht inlinefähig sind, können sie jedoch nur für eine nachträgliche Optimierung der Prozessparameter genutzt werden. Als inlinefähige Prozessüberwachung hat sich bisher die Verwendung von Kameras in Kombination mit Bildverarbeitungsalgorithmen bewährt. Diese Methodik erlaubt eine Überwachung jeder einzelnen Schicht und eignet sich somit, um

frühzeitig auf geometrische Abweichungen reagieren zu können. [4] Eine weitere Methode ist die Verwendung eines Rheometers innerhalb der Düse, um wichtige Materialeigenschaften während der Extrusion zu überwachen. Diese inlinefähige Methode bietet direkte Einblicke, ob Parameter wie Drucktemperatur oder Materialvorschub korrekt gewählt wurden und ermöglicht entsprechende Korrekturen. [5] Bei anderen additiven Fertigungsverfahren ist des Weiteren die Thermografie eine vielversprechende Methode. So wurde ein Verfahren entwickelt, das eine Prozessüberwachung mittels aktiver Laserthermografie beim Prozess des pulverbasierten Laserstrahlschmelzens (L-PBF) ermöglicht, in dem der integrierte Laser als Anregungsmittel verwendet wird. Bei FLM-Maschinen sind thermografische Methoden bisher nicht etabliert, könnten jedoch insbesondere bei der Überwachung der Düsenaustrittstemperatur und der Schichthaftung von großem Nutzen sein.

2.2 Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren

Jeder Körper emittiert entsprechend seiner Temperatur elektromagnetische Wellen, wobei ein Teil der emittierten Strahlung im infraroten Spektralbereich liegt [6]. Durch Einsatz von Infrarotkameras (IR-Kameras) lässt sich die Temperatur eines Bauteils oberflächenabhängig und berührungslos messen [7]. Grundsätzlich wird zwischen der aktiven und der passiven Thermografie unterschieden [8]. Bei der aktiven Thermografie werden Wärmeströme innerhalb des Bauteils z. B. durch Einsatz externer Gerätetechnik wie Halogen- oder Blitzlampen erzeugt. Zur Gewinnung von Tiefeninformationen wird anschließend ein definierter Zeitbereich pixelweise durch eine Fourier-Transformation in ein Amplituden- und Phasenbild umgewandelt. Während das Amplitudenbild die mittlere Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche beschreibt, gibt das Phasenbild Aufschluss über die Laufzeit der erzeugten thermischen Wellen und ist weitestgehend unabhängig von Absoluttemperaturen und Umgebungseinflüssen wie Wärmestrahlung reflektierenden und ggf. bewegten Oberflächen. Bei der passiven Thermografie wird hingegen die prozessbedingt vorhandene Wärme etwa aus einem Verarbeitungsprozess genutzt, um beispielsweise Informationen über den Prozess oder den Zustand des Bauteils zu erhalten. Die Datenauswertung erfolgt durch Betrachtung der Ist-Temperaturen zu einem definierten Zeitpunkt und ggf. einem anschließenden Vergleich mit Soll-Temperaturen. Dabei wird das zeitliche Abkühlverhalten meist vernachlässigt, sodass keine Tiefeninformationen gewonnen werden können und die Messung an sich von der Umgebung abhängig ist.

Die passive Thermografie ist als Prozessüberwachungsmethode etabliert und findet immer mehr Anwendung im Spritzguss [9, 10, 11], beim Schweißen [12, 13, 14] und der Extrusion [15, 16, 17]. Die Thermografie allgemein ist derzeit in einer Vielzahl von Einsatzbereichen vertreten und findet Anwendung bei der Detektion diverser Schäden. So können beispielsweise Risse und Lunker [18, 19], Impactschäden [20, 21, 22], Ablösungen [18] und Delaminationen [23] erkannt werden. In diesem Forschungsvorhaben wurden sowohl Methoden der passiven Thermografie als auch Methoden aktiven Thermografie für die Entwicklung geeigneter Qualitätssicherungstechniken genutzt. Dabei wurde einerseits die prozessbedingte Eigenwärme des Filaments ohne Verwendung einer externen Anregungsquelle genutzt und andererseits das zeitliche Abkühlverhalten mittels Auswertetechniken der aktiven Thermografie ausgewertet, wodurch Vorteile beider Verfahrensvarianten nutzbar sind. Auch in der additiven Fertigung kommt die passive Thermografie zum Einsatz. Beim Lasersintern dient sie etwa im akademischen Umfeld und bei einzelnen Maschinenherstellern der Überwachung der Temperaturverteilung der Pulverbettoberfläche, die mit mechanischen Eigenschaften korreliert [24, 25, 26, 27]. Der Einsatz der Thermografie bei FLM-Verfahren befindet sich aktuell allerdings noch im Forschungsstadium. Verschiedene Vorhaben beschäftigen sich hier mit der thermischen Analyse des Druckprozesses. Dies beinhaltet v. a. die Temperaturverteilung in der Düse, im abgelegten Strang und im gedruckten Bauteil, die Wärmeleitung und Abkühlung in Abhängigkeit benachbarter Schichten [28, 29] sowie die Detektion von Defekten im gedruckten Bauteil in Folge von Unter- bzw. Überextrusion bzw. Strangabrissen während des Druckvorgangs [30].

2.3 Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen (*engl. Machine Learning*, ML) ist ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz (KI) und beschreibt das Anlernen und Trainieren von Computern, um bei der Analyse von z. B. Messdaten Entscheidungen oder Prognosen treffen zu können. Dafür werden die beim Computer hinterlegten Algorithmen über große Datensätze trainiert, um Muster oder Korrelationen in den Daten zu finden und eine Klassifizierung vornehmen zu können. Durch Einsatz des ML werden die Algorithmen selbstständig und ohne zusätzlichem Programmieraufwand stetig verbessert. Mit zunehmender Anzahl an Daten kann i. d. R. ebenso eine zuverlässigere Entscheidung bzw. Prognose getroffen werden, weswegen der Prozess auch als intelligent bezeichnet wird.

Auch bei industriellen Anwendungen findet ML immer stärkeren Einsatz. Bei der Industrie 4.0 spielt die Qualitätssicherung und die Prozessautomatisierung eine wichtige Rolle, für die das ML wiederum einen relevanten Beitrag leistet. Mess- und Prüftechnik wird immer stärker in allen Bereichen der industriellen Wertschöpfung zur Qualitätssicherung eingesetzt, während die Prüfaufgaben stetig vielfältiger und komplexer werden. Ebenso fallen dadurch immer größere Datenmengen an, die meist nicht leicht interpretierbar sind. Hierbei können künstliche Systeme helfen, um ohne umfangreiches Anwenderwissen den Messergebnissen eine Bedeutung zuzuordnen, Gesamtsituationen richtig einzuschätzen und die Daten auf eine relevante Menge zu reduzieren. Bei einer Primäranalyse werden dabei Verfahren der Signalverarbeitung eingesetzt, um die Messdaten aufzubereiten. Anschließend können die für die Mustererkennung relevanten Informationen über eine Sekundäranalyse extrahiert werden. Zur Klassifizierung von Thermografie-Daten können verschiedenste Modelle für ML verwendet werden. Einfache Modelle sind das Random Forest und das Gradient Boosted Model, wobei auch deutlich verfeinerte Algorithmen zur Klassifikation wie Convolutional Neural Networks (CNN) und Support Vector Machines (SVM) immer mehr Anwendung finden [31, 32]. CNN haben sich insbesondere in der Analyse von Bilddaten etabliert. Dabei handelt es sich um eine Art eines Neuronales Netzes, bei dem jedem Neuron einer Schicht im Netz nur ein abgegrenzter Output-Bereich einer vorherigen Schicht als Dateneingang zugeordnet wird [33]. Am Ausgang jedes Neurons werden die einzelnen Faltungen der erlernten Filterfunktionen mit den Eingangsdaten (die sogenannten Filterantworten) ausgegeben. Der Dateneingang jedes Neurons der letzten Schicht besteht aus den Outputs aller Neuronen der vorletzten Schicht. Anhand dieser Informationen kann dann die Klassifizierung vorgenommen werden [34, 35]. Weiterhin wurden in diesem Forschungsprojekt ein sog. Autoencoder eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein künstliches neuronales Netz, das konventionell zum effizienten Lernen von Codierungen genutzt wird [36]. Anhand den Thermografie-Daten, insbesondere anhand der Abkühlkurven, konnten damit Rückschlüsse über die Qualität während des Druckprozesses erlangt werden und eine Klassifizierung in als gut und als schlecht eingestufte Prozessparameter vorgenommen werden.

2.4 Eigener Kenntnisstand und Vorerfahrungen

In den letzten zehn Jahren konnte am SKZ ein Kompetenz-Zentrum für additive Fertigungsverfahren aufgebaut werden, wodurch umfangreiche wissenschaftliche und anwendungsnahe Aktivitäten im Bereich des 3D-Drucks vorhanden sind. Speziell für das

hier relevante FLM-Verfahren stehen sieben verschiedene, teils selbst entwickelte Drucker mit denen u. a. auch faserverstärkte und Hochtemperatur-Kunststoffe verarbeitet werden können, zur Verfügung. Insbesondere wurden bisher typische Fehlstellen, wie sie auch beim Druck der im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts zu betrachtenden Medizinprodukte zu erwarten sind, untersucht. Dies betrifft etwa Haftungsfragen zwischen Druckobjekt und der Druckplatte (IGF 19608 N) sowie Inhomogenitäten bei Hart-Weich-Verbindungen (IGF 19607 N) und an geklebten Bauteilen (IGF 19629 N). Zusätzlich zeigten sich auch Zusammenhänge zwischen zerstörungsfrei ermittelten Fehlstellen und des mechanischen Langzeitverhaltens (IGF 19020 N / 1), der Witterungsbeständigkeit (IGF 19151 N) und den Eigenschaften von geschäumten Bauteilen (ZIM ZF4026626KO8). Gleichmaßen besitzt das SKZ jahrzehntelange Expertise auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung von Kunststoff-Prozessen und -Produkten, besonders mit der Thermografie. So wurden in der Vergangenheit beispielsweise Projekte zur Thermografie als Prozessüberwachung beim Spritzguss (IGF 16950 N), beim Schweißen (IGF 18912 N, ZIM ZF4492501DF7 und IGF 19563 N) sowie beim Extrudieren (IGF 19982 N) erfolgreich bearbeitet. Weiterhin gibt es Forschungsarbeiten zur Qualitätskontrolle beim Behandeln von Oberflächen (IGF 20320 N) und zur Überwachung von manuellen Schweißprozessen (IGF 20774 N). Bezüglich der Weiterentwicklung der thermografischen Messtechnik an sich wurden Forschungsprojekte zur multifrequenten Lock-in-Thermografie (IGF 18166 N) und zur Mehr-Puls-Thermografie erfolgreich abgeschlossen (ZIM KF2012558DF4). Außerdem konnten auch bereits die Potenziale der Thermografie für die Anwendung an additiv gefertigten Bauteilen in einem abgeschlossenen IGF-Projekt demonstriert werden (IGF 19151 N).

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der Lösungsweg lässt sich in drei wesentliche Abschnitte gliedern.

3.1 Identifizierung relevanter Fehlermerkmale

Zur späteren gezielten Erzeugung relevanter Fehlermerkmale, die in der industriellen Produktion auftreten, wurde zunächst ein Ringversuch durchgeführt, bei dem die Teilnehmer verschiedene Druckvorlagen mehrfach zur Verfügung stellten. Mittels zerstörungsfreier und zerstörender Prüfverfahren konnten daraus häufig auftretende Fehlermerkmale erkannt werden.

3.2 Entwicklung und Konfiguration des Prüfverfahrens

Zunächst wurde an einem Drucker mit offenem Bauraum aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten der Integration, verschiedene Kamerapositionierungen und Kameras erprobt. Abhängig von der Zugänglichkeit des Bauteils im Bauraum und der Auswertemethode wurde die geeignetste Konfiguration gewählt und auf einem Drucker mit geschlossenem Bauraum übertragen, um das Verfahren an komplex zu prozessierenden Materialien zu erproben. Parallel dazu wurden Methoden recherchiert, wie sich die im ersten Abschnitt identifizierten Fehlermerkmale künstlich im Druck erzeugt werden können. Anschließend wurde die Umsetzbarkeit erprobt und die Erkennbarkeit in den Thermogrammen abhängig von der Prüfkonfiguration evaluiert. Weiterhin wurde die Ausprägung der Fehlermerkmale variiert.

3.3 Entwicklung einer Auswertesoftware

Im letzten Teil werden auf die zuvor erzeugten Daten Signalverarbeitungsmethoden der aktiven und passiven Thermografie angewendet und diese auch kombiniert. Mittels dieser klassischen Auswertemethoden wurden Schwellwerte definiert, welche eine Unterscheidung in fehlerfrei und fehlerbehaftete Drucke zulassen. Um die Genauigkeit der Klassifizierung zu verbessern, wurden zusätzlich Methoden des maschinellen Lernens anstatt der klassischen Schwellwertbetrachtung verwendet. Mithilfe künstlicher neuronaler Netze wurde so die Klassifizierungsgüte der Bauteile verbessert. Im Anschluss wurden die einzelnen Softwareteile zusammengefügt, sodass direkt während der Aufnahme die Druckqualität überwacht wird. Abschließend wurde das System gemeinsam mit den Teilnehmern des Ringversuchs und Projektausschussmitgliedern evaluiert und auf die Bedürfnisse der Branche angepasst.

4 Identifikation relevanter Fehlermerkmale

Als Vorbereitung auf die Entwicklung eines Messsystems zur Inline-Detektion relevanter Fehlermerkmale mussten zunächst in der industriellen Produktion auftretende Fehlermerkmale analysiert werden. Dafür wurde ein Ringversuch durchgeführt und die erhaltenen Druckobjekte durch Referenzverfahren geprüft.

4.1 Auswahl von Druckvorlagen

In Rücksprache mit den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses (pbA) wurden drei Druckvorlagen für projektrelevante Produkte identifiziert. Die ausgewählten Bauteile sind in Abbildung 1 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein klassisches Referenzobjekt in Form einer Pyramide. An dieser kann die Qualität des Drucks in Bezug auf das Vorhandensein von Geometrieabweichungen leicht quantitativ beurteilt werden. Weiterhin wurden zwei medizinische Objekte mit Bezug zur Bekämpfung der Corona-Pandemie gewählt. Ein Druckventil für Beatmungsgeräte und eine Halterung für Filterstoffe von Kunststoffmasken.

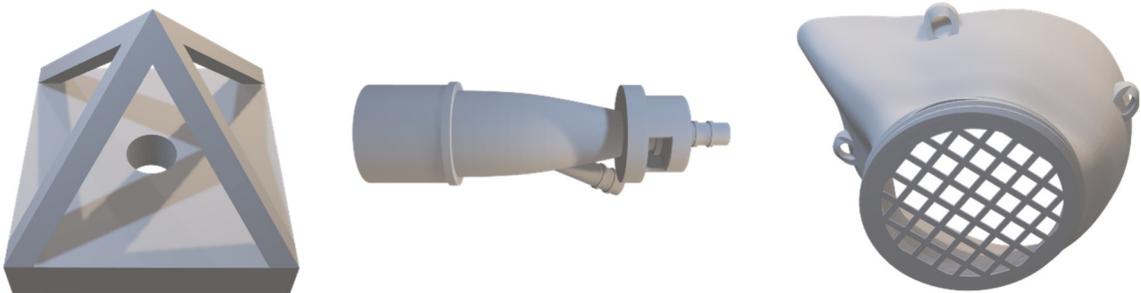


Abbildung 1: Ausgewählte Druckvorlagen. Von links nach rechts: Pyramide als Referenzobjekt, Druckventil für Beatmungsgeräte, Halterung für Filterstoff von Kunststoffmasken.

4.2 Durchführung eines Ringversuchs

Die in Abschnitt 4.1 ausgewählten Druckvorlagen wurden den Teilnehmern des Ringversuchs zur Verfügung gestellt. Aus statistischen Gründen wurden alle Druckobjekte von jedem Teilnehmer des Ringversuchs jeweils mehrfach zur Verfügung gestellt. Zum Druck wurde ABS verwendet. Bei den Teilnehmern wurde darauf geachtet, ein möglichst breites Spektrum an Wissensständen abzubilden, weshalb sowohl auf additive Fertigung spezialisierte Unternehmen als auch Privatpersonen mit einbezogen wurden. Dadurch wird eine Bewertung der Druckergebnisse in Bezug zum Kenntnisstand der Teilnehmer ermöglicht. Die an dem Ringversuch beteiligten Unternehmen werden nachfolgend anonymisiert mit Hersteller 1 bis 7 bezeichnet.

4.3 Referenzmessungen an den Druckobjekten

Zur qualitativen Beurteilung der von den Teilnehmern des Ringversuchs zur Verfügung gestellten Druckobjekte wurden diese mittels zerstörungsfreier und zerstörender Prüfmethoden hinsichtlich häufig vorkommender Fehlermerkmale untersucht.

4.3.1 Computertomographie

Als zerstörungsfreies Prüfverfahren eignet sich in diesem Fall die Computertomographie (CT). Diese ermöglicht eine 3D-Rekonstruktion des kompletten Bauteils bei gleichzeitig hoher Auflösung über den gesamten Scanbereich. Dadurch lassen sich gleichzeitig Fehlermerkmale an der Oberfläche und dem Bauteilinneren auch mit Abmessungen im Sub-Millimeterbereich erkennen. In Abbildung 2 sind die entsprechenden 3D-Rekonstruktionen aus den CT-Messungen der drei definierten Bauteile exemplarisch dargestellt. Diese wurden für die Evaluierung der Druckqualität und Ermittlung von relevanten Fehlermerkmalen verwendet. Insbesondere die Betrachtung von Schnittbildern hat hier die Identifizierung von Fehlern ermöglicht, wie exemplarisch anhand der Pyramide in Abbildung 3 dargestellt ist. Durch die Untersuchungen der industriellen Bauteile konnte eine Unterteilung der auftretenden Fehler in fünf Fehlermerkmalsklassen vorgenommen werden, zu denen jeweils ein exemplarisches Schnittbild in Abbildung 3 aufgeführt ist:

1. Fehlerhafte Verbindungen und Delaminationen
2. Verzug und Deformationen
3. Tropfenbildung
4. Überschüssiges Material

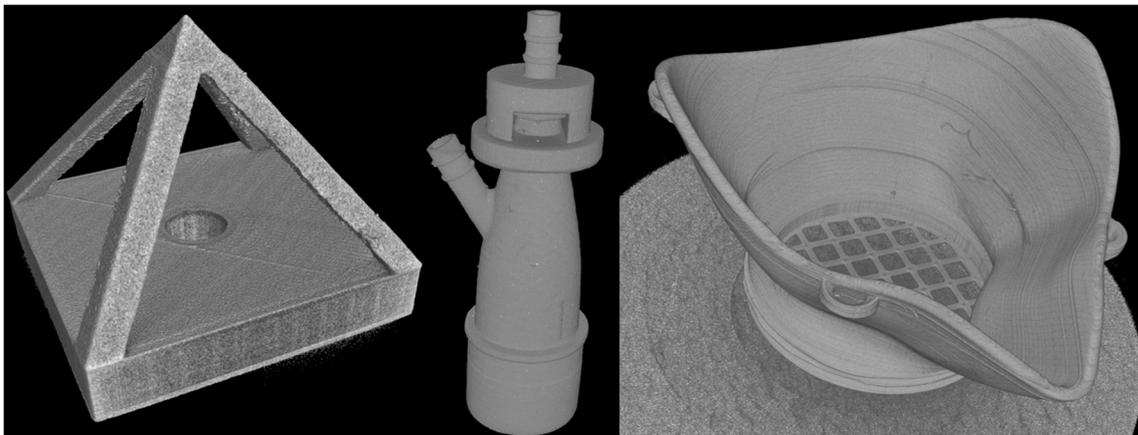


Abbildung 2: 3D-Rekonstruktion der CT-Messdaten beispielhafter aus dem Ringversuch erhaltener Druckobjekte

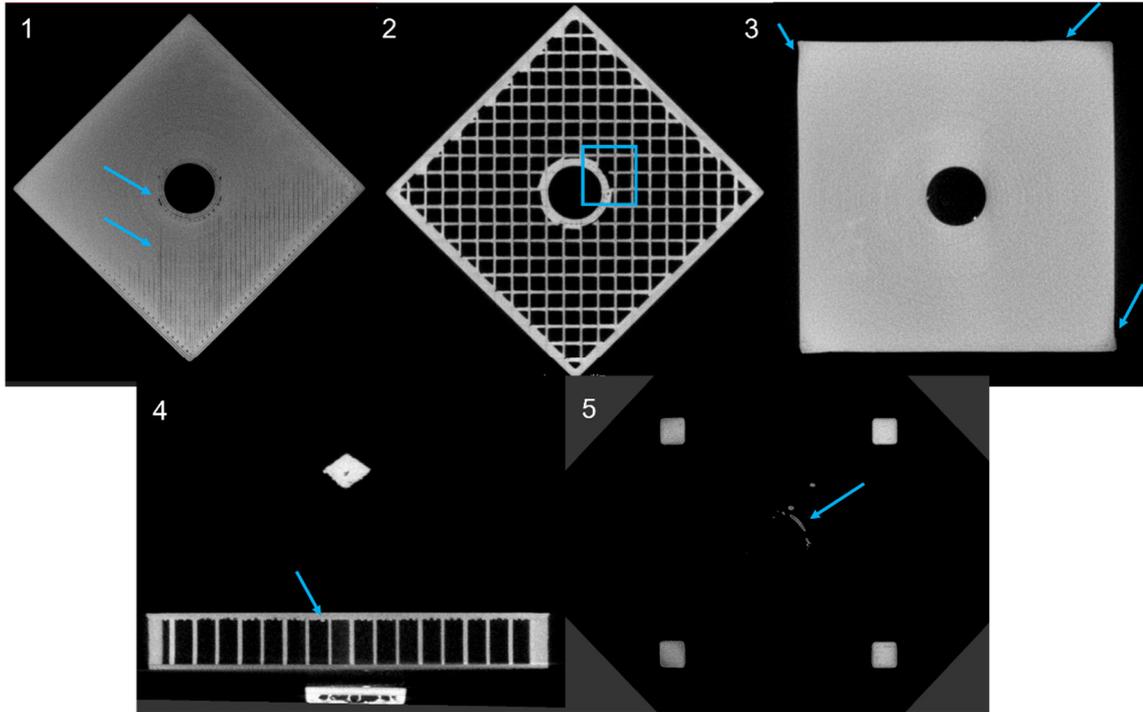


Abbildung 3: Schnittbilder aus den 3D-Rekonstruktionen der CT-Messdaten, beispielhaft gezeigt für die Pyramide. Vier mehrfach auftretende Fehlermerkmalsklassen wurden identifiziert: Fehlerhafte Verbindungen, Deformationen, Tropfenbildung und überschüssiges Material.

Aufbauend auf den CT-Untersuchungen fand eine Zählung der Fehlstellen und eine Unterteilung der ermittelten Fehler in die jeweilige Klasse statt. Die resultierenden Häufigkeiten für die jeweiligen Fehlerklassen sind herstellerabhängig in Abbildung 4 dargestellt. Die Angaben stellen dabei durchschnittliche Werte für ein gedrucktes Bauteil dar. Der Ringversuch hat gezeigt, dass Tropfenbildung und eine fehlerhafte Verbindung lediglich bei 2 bzw. bei 3 Herstellern festgestellt werden, wohingegen jedes Bauteil überschüssiges Material und Deformationen verzeichnete. Insgesamt nahm die Tropfenbildung dennoch die häufigste Fehlerklasse ein und eine fehlerhafte Verbindung war am geringsten vertreten.

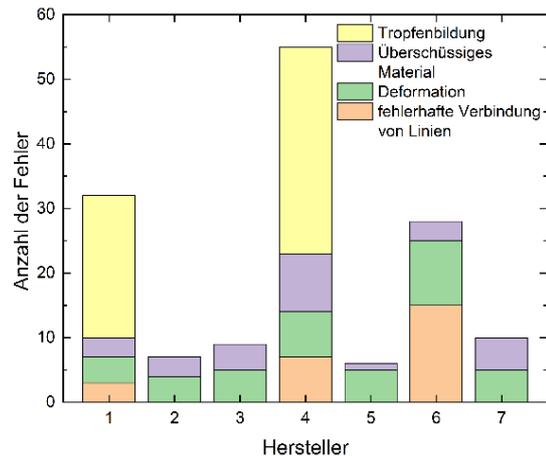


Abbildung 4: Anzahl der aus den CT-Untersuchungen ermittelten Fehler eingeteilt nach den definierten Fehlerklassen für den jeweiligen Hersteller. Angezeigt ist ein durchschnittlicher Wert für jeweils ein Bauteil.

Zuletzt wurde mittels CT die geometrische Abweichung vom Sollmaß untersucht. Für diese Untersuchungen hat sich insbesondere die Pyramide als geeignet erwiesen, da sich die Abweichung in der Länge, Breite und Höhe anhand des Sockels bestimmen lässt. Die resultierenden Mittelwerte sind exemplarisch in Abbildung 5 aufgeführt. Anhand der Werte ist erkennbar, dass Abweichungen von 0,4 bis 2 % zum Sollwert vorliegen. Bei Hersteller 1 und 4 ist die Maßabweichung im Mittel mit knapp 0,5 % am geringsten, während bei den Herstellern 2, 3 und 7 die größte mittlere Abweichung mit ca. 1 % vorliegt.

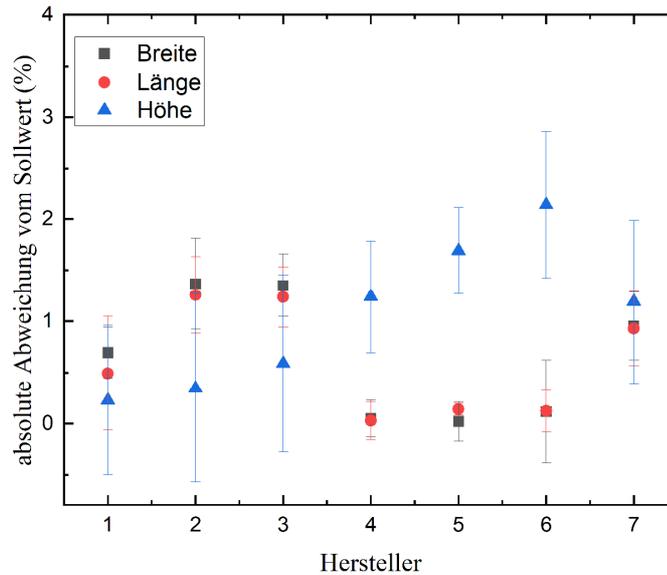


Abbildung 5: Absolute prozentuale Abweichungen der Maße von den Sollwerten des Pyramidensockels

4.3.2 Mechanische Prüfung

Um Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften der gedruckten Bauteile festzustellen, wurden weiterhin Druckprüfungen mit der Prüfmaschine Z010 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG an den Pyramiden-Bauteilen durchgeführt. In Abbildung 6 sind exemplarisch Fotos während der Messung bei unterschiedlichen Belastungszuständen aufgeführt. Das resultierende Kraftmaximum vor dem Versagen sowie die prozentuale Stauchung bei dem entsprechenden Kraftmaximum ist für die jeweiligen Hersteller in Abbildung 7 dargestellt. Bei der Pyramide des Herstellers 3 war die Belastungsgrenze bis zum Versagen am geringsten, während die maximale Belastung bei der Pyramide des Herstellers 7 am größten war. Die Bewertung einer Korrelation zwischen der Art und Häufigkeit der vorliegenden Fehlstellen und der gemessenen mechanischen Kennwerte ist nicht zielführend, da die ableitbaren Aussagen nicht allgemeingültig, sondern stark produkt-, material- und einsatzbedingungspezifisch sind. Zusätzlich müsste etwa auch die örtliche

Verteilung der Fehlstellen innerhalb der Bauteile berücksichtigt werden, da z. B. bei der Pyramide fast ausschließlich die Stegqualität Einfluss auf das Ergebnis nimmt.

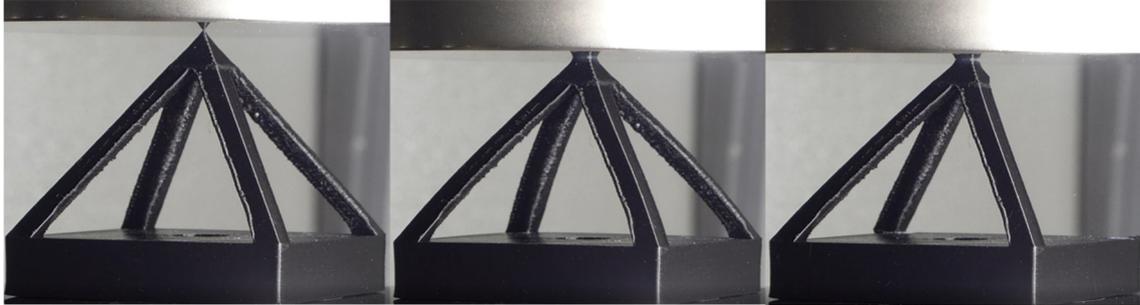


Abbildung 6: Druckprüfung eines Pyramiden-Bauteils: Vor der Belastung (links), während der Belastung (Mitte) und maximale Belastung (rechts).

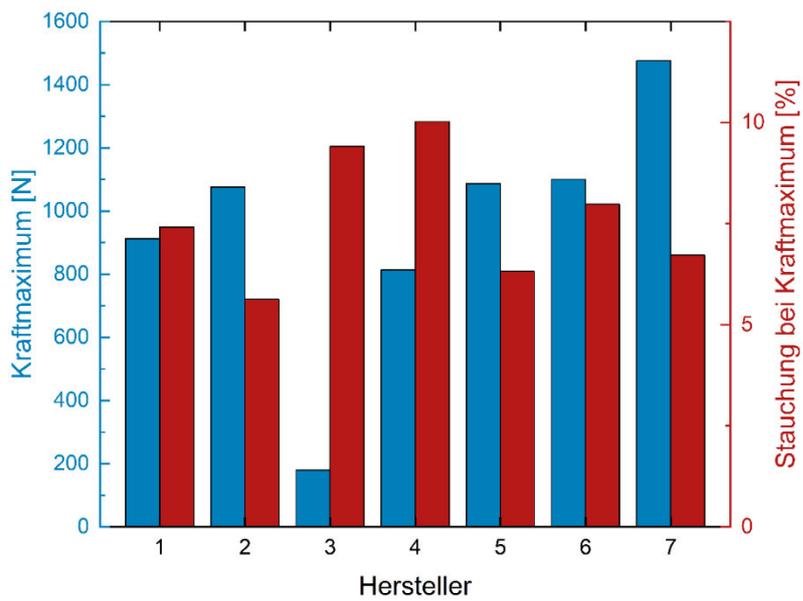


Abbildung 7: Kenngrößen der Druckprüfung: Kraftmaximum und Stauchung beim Kraftmaximum ausgelesen aus der aufgenommenen Stauchung-Kraft-Kurve.

5 Entwicklung des Prüfaufbaus zur Inline-Thermografie beim FLM

5.1 Verwendete Hardwarekomponenten

Es wurden zwei Drucker für das Projekt verwendet, der CR10-mini der Firma Creality 3D Technology Co. Ltd. und der Guider IIs der Firma Flashforge Technology Co. Ltd. Bei beiden Modellen handelt es sich um kartesische Drucker, wobei der Guider IIs in der CoreXY mit top-down Druckbett und der CR10-mini mit in y-Richtung beweglichem Druckbett und einem x-Schlitten, an dem der Druckkopf befestigt ist, der ebenfalls in z-Richtung bewegt wird, arbeitet.

Bei den verwendeten Kameras handelt es sich um die zwei Infrarotkameras (IR-Kameras) Pi 640 und Pi 450i der Firma Optris GmbH sowie die SC5500 der Firma Flir Systems Inc., die von edevis GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Die gewählten IR-Kameras eignen sich durch deren Spektralbereich für die beim Verdrucken und Abkühlen der Filamente vorwiegend vorkommenden Temperaturen und konnten auch bereits bei Forschungsaktivitäten in Bezug auf die additive Fertigung erfolgreich eingesetzt werden, wie in der Literatur beschrieben ist [37, 38]. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Spezifikationen zu den verwendeten IR-Kameras aufgeführt.

Tabelle 1: Technische Spezifikationen der verwendeten Wärmebildkameras

Produktname	Optris Pi 640	Optris Pi 450i	Flir SC5500
Detektortyp	Ungekühltes Mikrobolometer	Ungekühltes Mikrobolometer	Halbleiterdetektor
Spektralbereich	8 – 14 μm	8 – 14 μm	2,5 – 5,1 μm
Geometrische Auflösung	640 x 480 Pixel	382 x 288 Pixel	320 x 256 Pixel
Thermische Auflösung NETD	75 mK	40 mK	< 30 mK
Aufnahmefrequenz	32 Hz (125 Hz bei 640 x 120 Pixel)	27 Hz (auf 80 Hz umschaltbar)	Bis 380 Hz (bei 320 x 256 Pixel)

5.2 Künstliche Erzeugung relevanter Fehlermerkmale

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zu untersuchende Fehlermerkmale künstlich erzeugt, um Auffälligkeiten bei den Thermografie-Aufnahmen spezifischen Ursachen zuordnen zu können. Zu diesem Zweck wurden die Druckparameter Vorschub und Drucktemperatur variiert und jeweils die Auswirkungen der Manipulationen untersucht. Diese Parameter wurden ausgewählt, da fehlerhafte Einstellungen hier in der Regel schnell zu kritischen Auswirkungen wie mangelhafter Schichthftung, geometrischen Abweichungen oder Fadenbildung führen. Weiterhin wurden auch Manipulationen am CAD-Modell vorgenommen, um Strangabrisse, Delaminationen oder fehlendes Material zu simulieren. Hierbei wurden etwa horizontale Spalten der Höhe einer Schicht erzeugt, um ein kurzzeitiges Ausbleiben der Extrusion zu erzwingen. Für jede Messung wurde jeweils nur ein bestimmter Parameter manipuliert, sodass sich Fehlermerkmale eindeutig auf spezifische Ursachen zurückführen lassen. In Abbildung 8 sind zwei fehlerbehaftete Bauteile exemplarisch dargestellt, bei denen Druckparameter variiert wurden, während Abbildung 9 entsprechende Bauteile unter Verwendung eines manipulierten CAD-Modells exemplarisch zeigt.

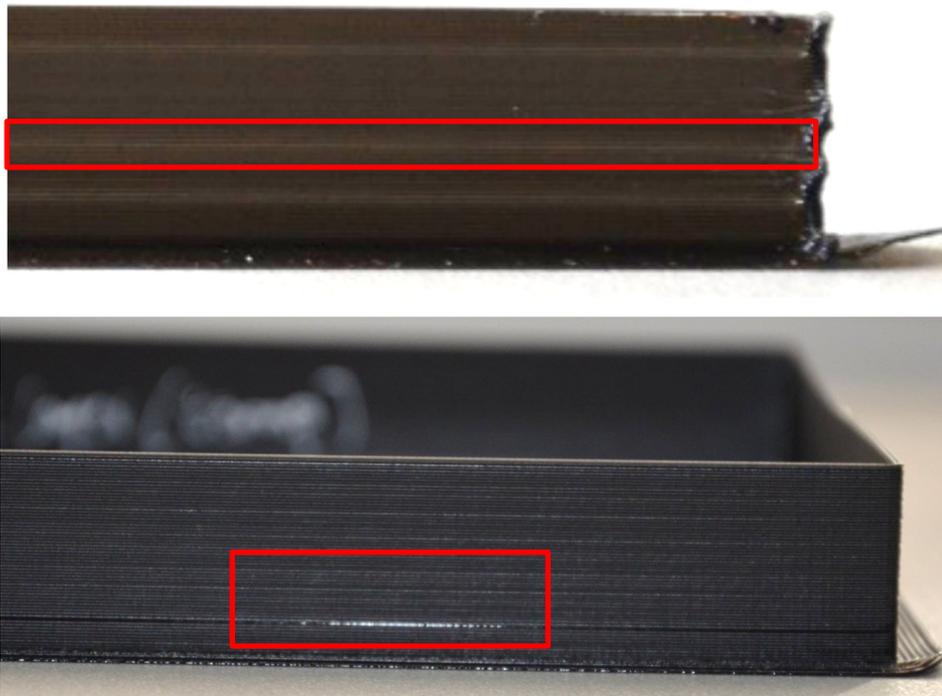


Abbildung 8: Künstlich erzeugte Fehlermerkmale durch Verringerung der Drucktemperatur (oben) und der Extrusionsmenge (unten). Die roten Markierungen zeigen fehlerbehaftete Bereiche.

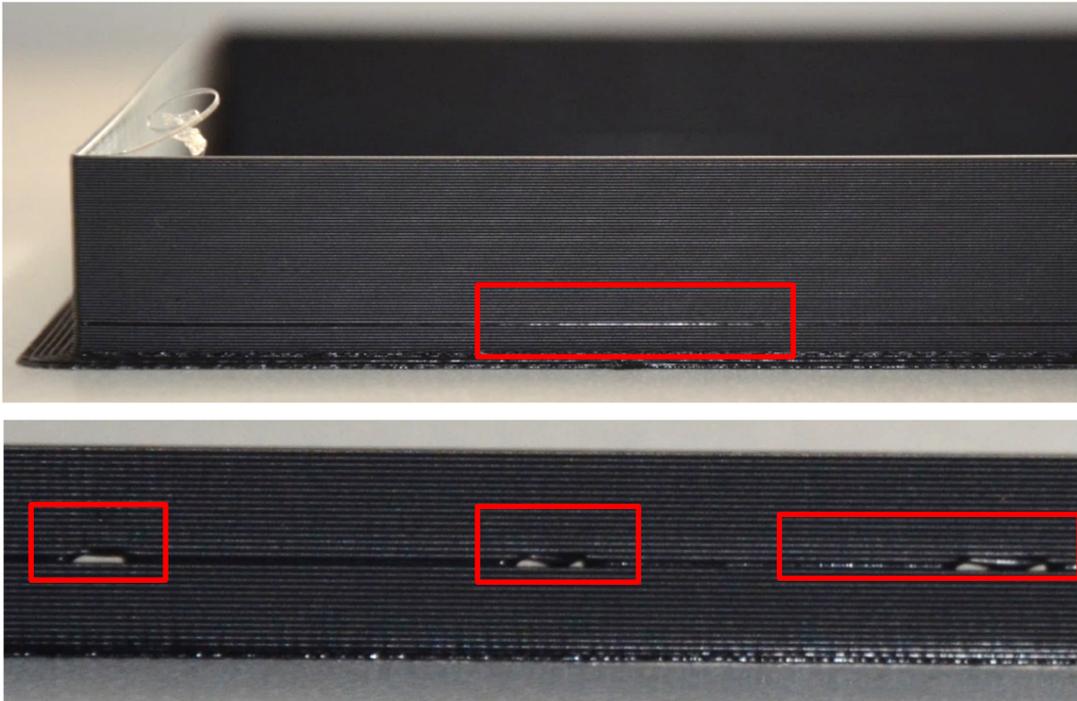


Abbildung 9: Künstlich eingebrachten Fehler durch Manipulation des CAD-Modells: Schlechte Schichthaftung (oben) und simulierter Strangabriss (unten). Die roten Markierungen zeigen fehlerbehaftete Bereiche.

5.3 Konfiguration des Messaufbaus

Für die Überwachung des Druckprozesses wurden drei Messkonfigurationen im Rahmen des Projektes untersucht, auf die im Nachfolgenden detaillierter eingegangen wird.

5.3.1 Messkonfiguration 1: Überwachung der horizontalen Ebene

Bei dieser Messkonfiguration wurde die IR-Kamera oberhalb des 3D-Druckers positioniert und die horizontale Ebene während des Druckprozesses betrachtet. In Abbildung 10 ist der Aufbau anhand des 3D-Druckers CR10-mini gezeigt, während Abbildung 11 die Konfiguration beim Flashforge Guider IIs veranschaulicht, der einen geschlossenen Bau-raum aufweist. Bei Letzterem wurde hierfür ein Fenster in die nicht für die Infrarotstrahlung transparente Haube eingebracht. Die Messkonfiguration ermöglicht eine schichtweise Überwachung des gesamten Bauteils, ohne dass der Fokus erneut eingestellt werden muss und der Druckprozess beeinflusst wird. Auch das Abkühlverhalten einer Strangposition kann dabei über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Da sich bei dem Aufbau der Druckkopf zwischen IR-Kamera und Bauteil befindet, kann allerdings nicht die Düse selbst und der Strang auch nicht direkt bei Düsenaustritt überwacht werden und ein Teil des Bauteils ist meist vom Druckkopf und den Verfahrsachsen verdeckt. Je nach

Druckertyp kann außerdem eine Anpassung des Kamerafokus notwendig sein, wenn sich das Bauteil mit zunehmender Schichtanzahl aus dem Fokus herauswächst.

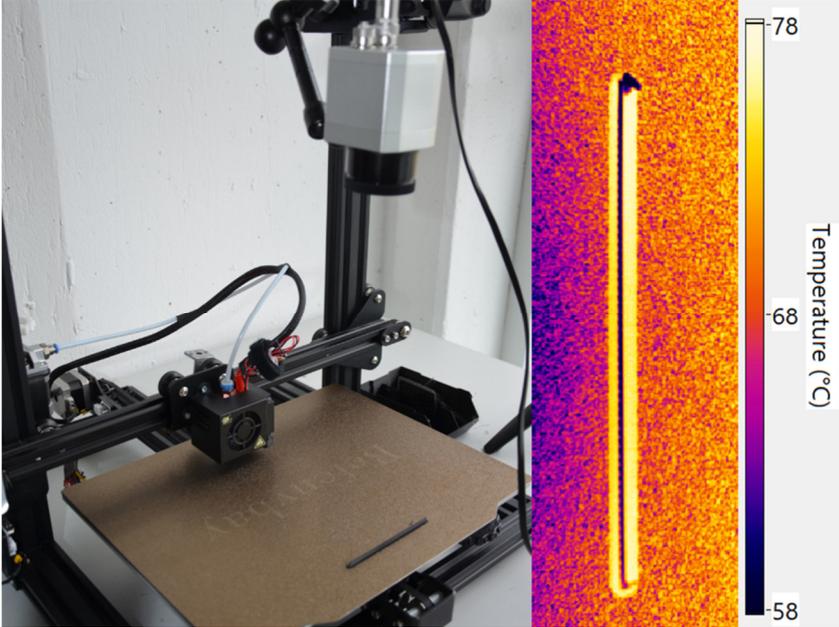


Abbildung 10: Messkonfiguration 1 zur Betrachtung der horizontalen Ebene beim 3D-Drucker CR10-mini (links) sowie ein resultierendes Thermogramm (rechts)

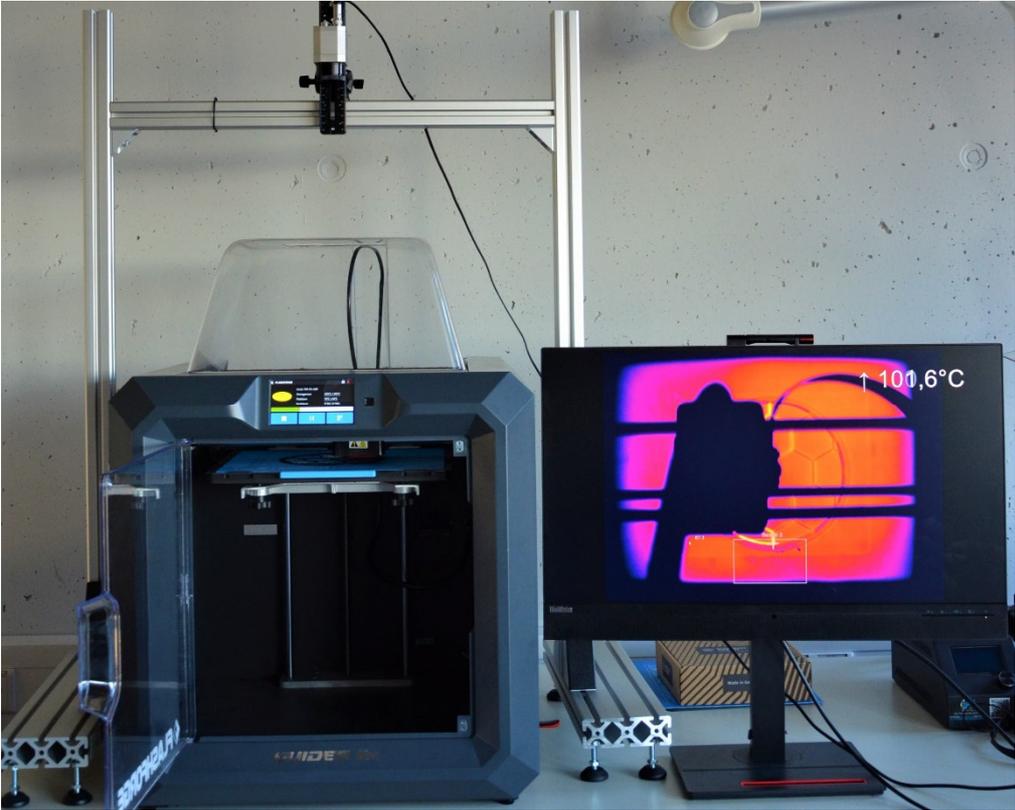


Abbildung 11: Messkonfiguration 1 zur Betrachtung der horizontalen Ebene beim 3D-Drucker Flashforge Guider II mit Live-Bild-Anzeige. Für die Anbringung der Kamera wurde eine Halterung aus Aluminiumprofilen konstruiert und als Sichtfenster dient ein Loch in der Haube des Druckers.

5.3.2 Messkonfiguration 2: Überwachung der Strangablage

Weiterhin wurde eine Messkonfiguration untersucht, bei der die IR-Kamera an der Verfahreinheit des Druckkopfes angebracht wurde und mithilfe eines Goldspiegels der Bereich der Düse überwacht wurde. Da der Goldspiegel einen hohen Reflexionskoeffizienten im infraroten Spektralbereich aufweist, kann damit die Infrarotstrahlung in Richtung der IR-Kamera geleitet werden (vgl. Abbildung 12). Diese Konfiguration bietet den Vorteil, dass an jeder Bauteilposition die Düse und der Strang direkt ab Düsenaustritt überwacht werden können. Allerdings variiert die Richtung der Strangablage und führt insbesondere bei der Bewegung in die Richtung des Spiegels oder weg davon zu einer erschwerten bis nicht-realisierten Überwachung des Abkühlverhaltens, da sich der Strang im Thermogramm in die Ebene hinein oder aus der Ebene heraus bewegt. Ebenso stellt die Anbringung der IR-Kamera eine größere Herausforderung dar, da die zusätzliche Messtechnik in den Druckraum integriert werden, wodurch möglicherweise auch der Druckbereich eingeschränkt wird. Darüber hinaus kann der Druckprozess selbst durch das zusätzliche Gewicht an der Verfahreinheit negativ beeinflusst werden. Außerdem variiert durch die Bewegung der Messtechnik der aufgenommene Bereich und das Ergebnisbild vibriert während der Messung.



Abbildung 12: Messkonfiguration 2 zur Betrachtung der Strangablage über einen Goldspiegel (links) und ein beispielhaftes Thermogramm, in dem die Druckrichtung weg vom Spiegel verläuft (rechts)

5.3.3 Messkonfiguration 3: Frontale Überwachung des Druckobjekts

Bei der Konfiguration zur frontalen Überwachung wurde die IR-Kamera über eine Halterung horizontal vor dem Druckbett positioniert, wie Abbildung 13 (links) veranschaulicht. Diese Messkonfiguration bietet den Vorteil, dass das Temperaturverhalten der Düse selbst und des Strangs direkt ab Düsenaustritt überwacht werden kann. Die Qualitätsüberwachung kann dabei über ein Fenster erfolgen und die Messtechnik kann außerhalb des 3D-Druckers positioniert werden, wodurch der Druckprozess selbst nicht beeinflusst wird. Außerdem kann der Wärmetransport auf die darunterliegenden Schichten beobachtet werden, wodurch Rückschlüsse auf Fehlstellen anhand von Wärmestaus möglich sind. Nachteilig an dem Messaufbau ist, dass lediglich die äußerste Wand einer Bauteilseite untersucht werden kann und eine Öffnung oder ein Fenster vorhanden sein muss.

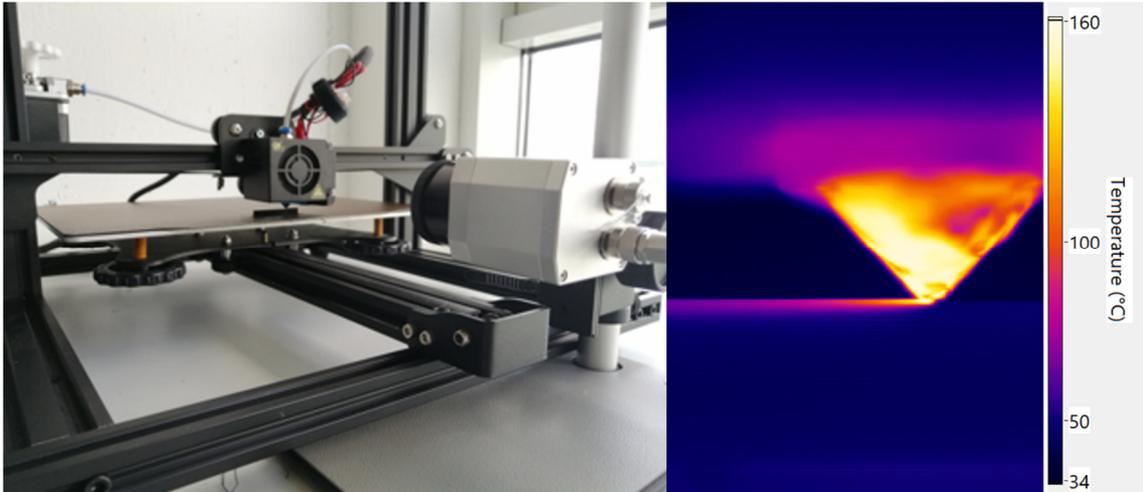


Abbildung 13: Messkonfiguration 3 zur frontalen Überwachung des Druckprozesses (links) und ein beispielhaftes resultierendes Thermogramm (rechts)

6 Entwicklung eines Prüfkonzpts

6.1 Bildaufnahme und Bildverarbeitung

Die Aufnahme der Temperaturdaten konnte über eine eigens entwickelte Software auf LabVIEW-Basis realisiert werden, deren Oberfläche exemplarisch in Abbildung 14 dargestellt ist. Die Messdaten konnten schließlich in einer ebenfalls am SKZ entwickelten Auswertesoftware auf Python-Basis weiterverarbeitet werden, die exemplarisch in Abbildung 15 gezeigt ist. Der entwickelte Algorithmus detektiert automatisch irrelevante Bereiche wie den Druckkopf über einen individuell einstellbaren Grenzwert. Dieser ermöglicht die Erkennung von Bereichen mit Umgebungstemperatur und filtert daraus größere und annähernd rechteckige Formen wie den Druckkopf (rote Markierung in Abbildung 15, links). Weiterhin kann über die Software eine *Region of Interest* (ROI) um den Druckkopf als relevanter Bereich definiert werden (blaue Markierung in Abbildung 15, links), in dem mittels eines anpassbaren Grenzwertes Temperaturpeaks detektiert werden, die sich auf den Druck des aktuellen Strangs zurückführen lassen. Daraus lässt sich automatisiert eine Maske für jedes Thermogramm berechnen, die das Thermogramm auf den relevanten Bereich, respektive den Strang bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur, einschränkt. Für jeden durch die Maske definierten Strang-Pixel kann folglich der zeitliche Temperaturverlauf gespeichert werden und für jeden Zeitpunkt kann wiederum die räumliche Temperaturentwicklung entlang des Strangs gespeichert werden. Dies ist für die in Abbildung 15 (rechts) dargestellte Maske exemplarisch in Abbildung 16 gezeigt. Abbildung 16 (links) zeigt die räumliche Temperaturentwicklung entlang des Strangs, der über die Maske definiert wurde, zu unterschiedlichen Zeitpunkten, während Abbildung 16 (rechts) den zeitlichen Temperaturverlauf für unterschiedliche Messpunkte aufzeigt. Durch Anpassung der Messdaten über die Maske können irrelevante Bereiche gelöscht und die Datenmenge deutlich reduziert werden.

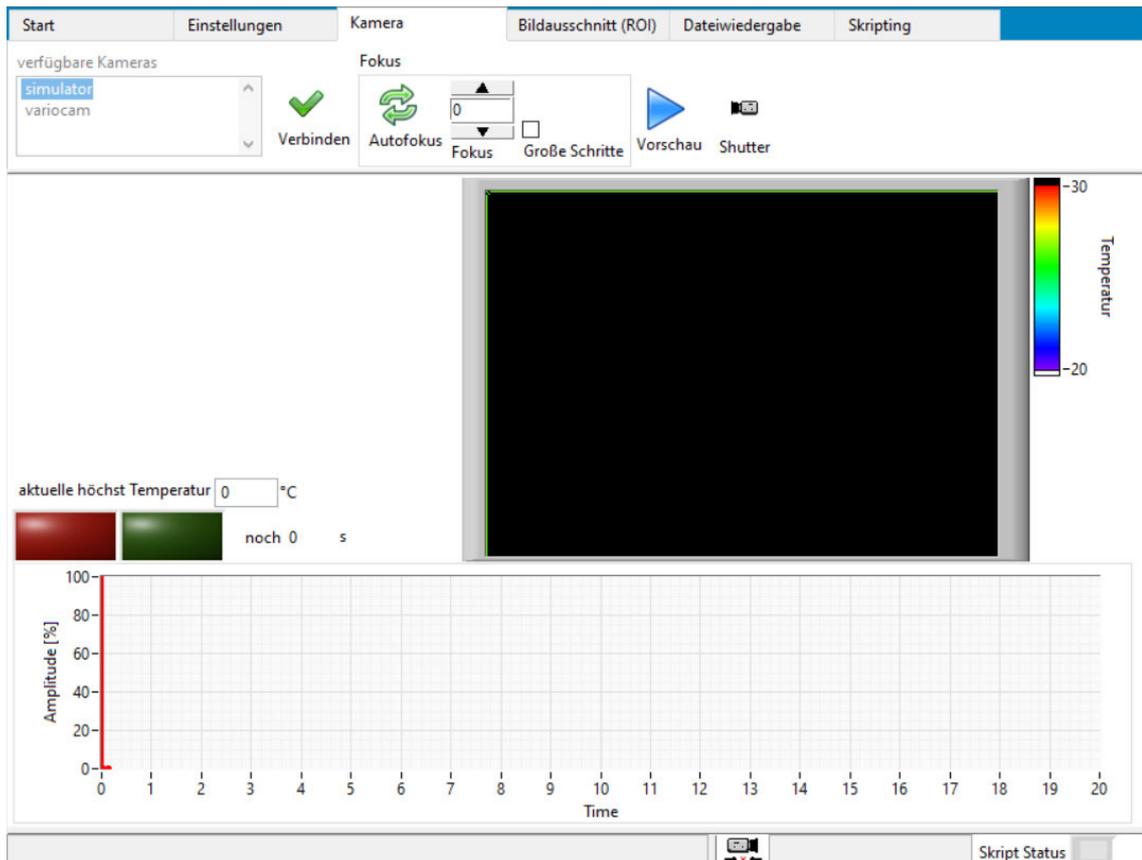


Abbildung 14: Oberfläche der Software zur Aufnahme der Thermogramm-Sequenz

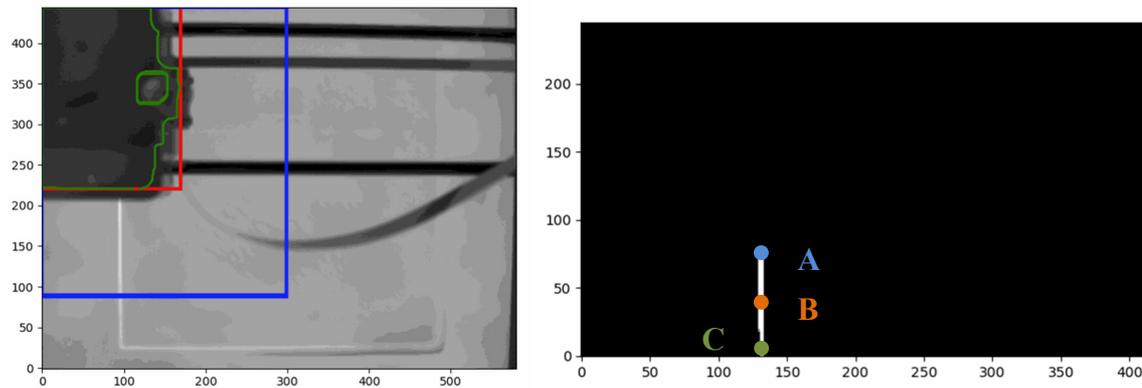


Abbildung 15: Software zur automatisierten Weiterverarbeitung der thermografischen Messdaten von der Überwachung des Druckprozesses. Links: Thermogramm mit Erkennung des Druckkopfes (rot) und der automatisch definierten ROI (blau). Rechts: Maske zur Beschränkung auf den relevanten Bereich, die aus dem Thermogramm ermittelt wurde. In der Maske sind drei Messpunkte eingezeichnet, für die nachfolgend exemplarisch der Temperatur-Zeit-Verlauf gezeigt.

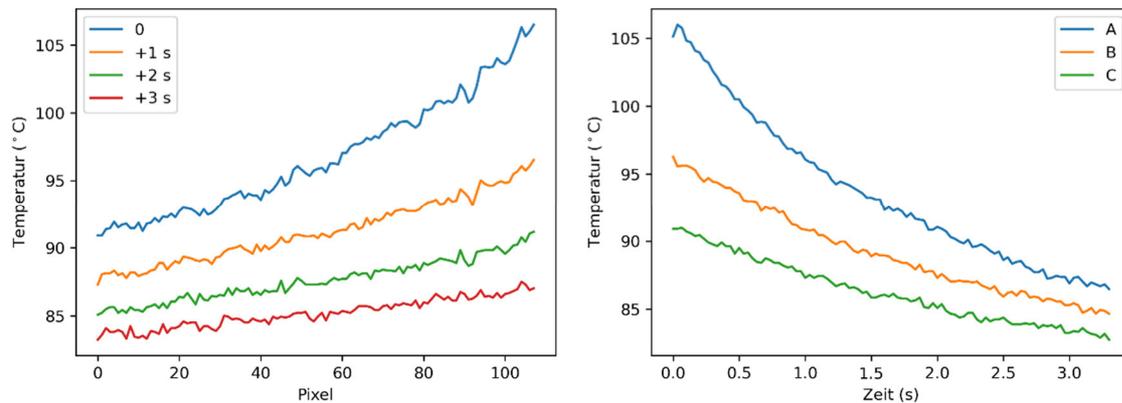


Abbildung 16: Exemplarische Temperaturverläufe, die automatisiert aus den Messdaten ermittelt werden können. Links: Räumlicher Temperaturverlauf entlang der weißen Linie in Abbildung 15 zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Rechts: Zeitlicher Temperaturverlauf an den Messpunkten A, B und C (vgl. Abbildung 15).

6.2 Auswertung durch Bildsubtraktion

Um Rückschlüsse über die Qualität von gedruckten Objekten zu erhalten, kann das Thermogramm eines als gut eingestuftem Prozesses als Referenzbild genutzt werden und mit den resultierenden Thermogrammen nachfolgender Druckprozesse verglichen werden. Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung dieser Methode ist, dass der Messaufbau dabei konstant bleibt und die Pixel beim Referenzdruckprozess und dem zu untersuchenden Druckprozess somit an derselben Position liegen. Aus diesem Grund wurde zur Erprobung der Auswertevariante Messkonfiguration 1 verwendet. In Abbildung 17 ist exemplarisch das Referenzbild beim Druck einer Wabenstruktur gezeigt (Abbildung 17, links). Zur Vergleichbarkeit wurde ein weiteres Bauteil mit als gut eingestuftem Einstellungen angefertigt (Abbildung 17, Mitte links). Weiterhin wurden Bauteile mit einer verringerten Drucktemperatur (Abbildung 17, Mitte rechts) und mit einer verringerten Flowrate (Abbildung 17, rechts) gedruckt, wodurch Fehler im Bauteil induziert werden können. Anhand der Thermogramme selbst (Abbildung 17, oben) konnten keine Unterschiede visualisiert werden, wohingegen die Differenzbilder, die durch Subtraktion des Referenzbildes von den Thermogrammen erstellt wurden, je nach gewählten Prozessparametern Abweichungen aufzeigen. Während das Differenzbild beim Druck des Gutteils keine Struktur aufzeigt und das Temperaturverhalten damit identisch zum Referenzdruck ist, sind beim Druck mit als schlecht eingestuften Parametern deutliche Unterschiede im

Differenzbild und damit Abweichungen im Temperaturverhalten zu erkennen. Gleichermaßen konnten auch komplette Thermogramm-Sequenzen des 3D-Drucks aufgenommen werden und mit entsprechenden zeitlich identisch ablaufenden Druckprozessen verglichen werden. Die Differenzbild-Methode ermöglicht somit die Überwachung des Druckprozesses. Nach Angabe von Toleranzwerten, die vom Anwendungsfall und von der entsprechenden Qualitätsanforderung abhängig sind, kann dabei eine Einstufung in „i. O.“ und „n. i. O.“ vorgenommen werden. Für die Auswertemethode ist allerdings eine Referenzmessung notwendig, mit der zunächst das Temperaturverhalten beim Druck eines Gut-Bauteils ermittelt wird.

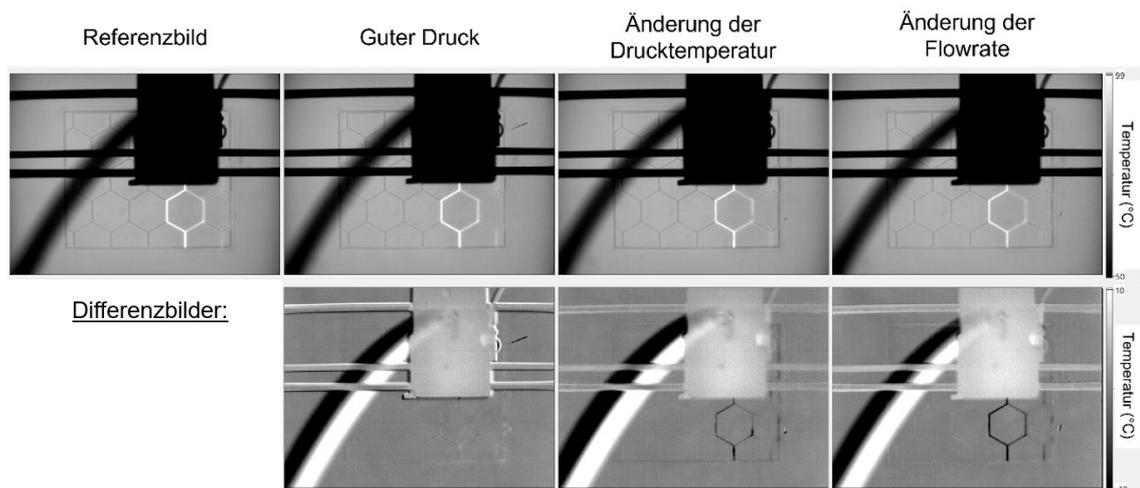


Abbildung 17: Thermogramme beim Druck mit unterschiedlichen Einstellungen (oben) und Differenzbilder, die durch Subtraktion des Referenzbildes erstellt wurden (unten)

6.3 Auswertung des zeitlichen und räumlichen Abkühlverhaltens

6.3.1 Messkonfiguration 1

Für die Entwicklung weiterer Auswertestrategien wurde zunächst Messkonfiguration 1 verwendet, bei der die horizontale Ebene von oben überwacht werden kann. Wie bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben, ist ein maßgeblicher Nachteil dieser Konfiguration, dass der Strang nicht direkt ab Düsenaustritt überwacht werden kann, sondern die Temperatur erst gemessen werden kann, wenn das gedruckte Bauteil nicht mehr vom Druckkopf und der Verfahreinheit verdeckt ist. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchung ein lineares Bauteil, bei dem eine Lage aus lediglich einem Strang besteht, gewählt und nach dem Druck jeder Schicht der Druckkopf zur Seite aus dem Sichtfeld der IR-Kamera verfahren.

Resultierende Thermogramme sind exemplarisch in Abbildung 18 (oben) dargestellt. Das auf der linken Seite dargestellte Bauteil wurde unter idealen Einstellungen gedruckt, während beim auf der rechten Seite dargestellten Bauteil die Extrusionsmenge reduziert wurde, wodurch eine Unterextrusion hervorgerufen wurde. Die entsprechenden räumlichen Temperaturverläufe entlang des Strangs sind in Abbildung 18 (unten) aufgeführt. Der Temperaturverlauf zeigt das Abkühlverhalten und damit auch die Extrusionsrichtung auf. Weiterhin ist erkennbar, dass Oszillationen in der Temperatur aufgrund von fehlendem Material auftreten, wodurch Rückschlüsse über die Qualität des gedruckten Bauteils möglich sind. Die Temperatursprünge, die vereinzelt in den Temperaturverläufen erkennbar sind, sind dabei durch den Messaufbau bedingt, da das Bauteil nicht exakt horizontal ausgerichtet ist und zwischen den Pixeln somit nicht immer ein glatter Temperaturübergang vorliegt.

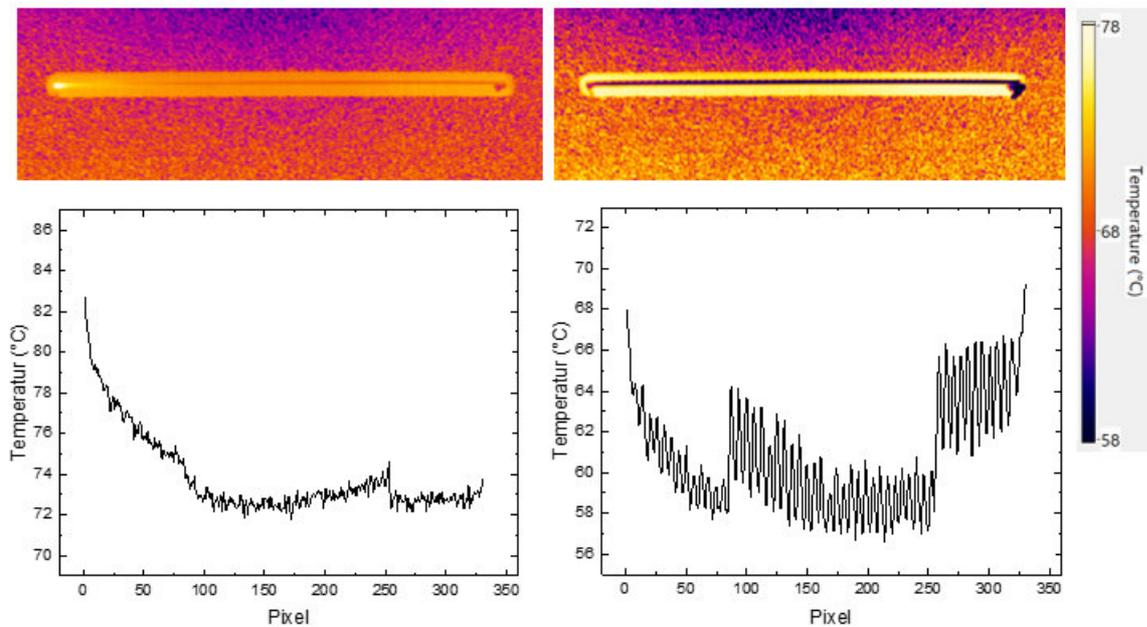


Abbildung 18: Thermogramme während des Drucks von linearen Bauteilen (oben) und räumlicher Temperaturverlauf entlang des Strangs (unten). Auf der linken Seite ist ein als gut eingestuftes Bauteil dargestellt und auf der rechten Seite ein als schlecht eingestuftes Bauteil.

Darüber hinaus kann mittels Thermografie auch der Druck von komplexeren Bauteilen überwacht werden. Dies wurde anhand des Drucks eines Quaders mit zylindrischem Hohlraum untersucht. Abbildung 19 zeigt exemplarisch zwei Thermogramme zu unterschiedlichen Druck-Zeitpunkten (unten) sowie die entsprechenden schematischen Zeich-

nungen (oben). Die Thermogramme verdeutlichen zum einen die Problematik bei bestimmten 3D-Druckern, dass sich das Bauteil während des schichtweisen Aufbaus aus dem Fokus der IR-Kamera bewegt und dadurch eine zunehmende Unschärfe im Ergebnisbild entsteht, sofern keine Korrektur stattfindet. Zum anderen ist anhand der Farbgebung und somit anhand des Temperaturverhaltens der zeitliche Verlauf der Druckbahn erkennbar. Nach Aufnahme des gesamten Druckprozesses ermöglicht eine schichtweise Überlagerung der Thermogramme schließlich, den Aufbau und die Struktur des gedruckten Bauteils mit vorliegenden Inhomogenitäten zu rekonstruieren.

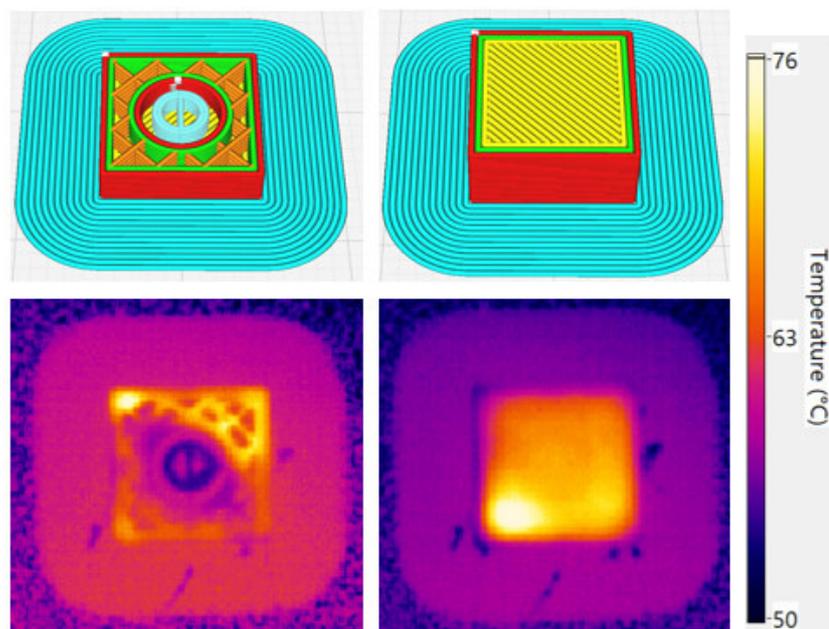


Abbildung 19: Thermogramme während des Drucks zu unterschiedlichen Zeitpunkten (unten) und die entsprechenden schematischen Zeichnungen (oben)

6.3.2 Messkonfiguration 2

In diesem Abschnitt sind Ergebnisse aus der Überwachung mittels Messkonfiguration 2 zusammengefasst, bei der die IR-Kamera direkt an der Verfahreinheit angebracht wurde und mittels eines Goldspiegels die Temperatur des Strangs direkt ab Düsenaustritt überwacht wurde (vgl. Abbildung 12). Für die Messung wurde ein Pixel direkt am Düsenaustritt verwendet, wie in Abbildung 20 aufgeführt. In Abbildung 21 ist ein resultierender zeitlicher Temperaturverlauf beim Druck eines Quadrats mit vier Wandschichten und In-fill dargestellt, der den starken Einfluss der Druckrichtung verdeutlicht. Der Druck der

ersten bis vierten Wandschicht ist jeweils als Wandlinie 1 bis 4 markiert. Bei jeder Wandschicht wurden alle vier Seiten gedruckt, die anhand der teilweise nur leicht ausgeprägten Temperatursprünge erkennbar sind. Insbesondere bei der dritten und vierten Seite liegt ein großer Unterschied bei der gemessenen Temperatur vor. Während bei Seite 3 meist der niedrigste Temperaturwert gemessen wurde, liegt bei Seite 4 der höchste Temperaturwert vor. Da die Drucktemperatur während des Drucks nicht variiert wurde, lässt sich dieses Verhalten auf die Messung selbst zurückführen. Je nach Druckrichtung neigt sich der Strang beim Düsenaustritt in eine andere Richtung, wodurch der Messpixel nicht immer an der gleichen Position des Strangquerschnitts liegt und insbesondere bei Seite 3 auch anteilig die Umgebung misst. Dies führt auch dazu, dass beim Druck des Infills aufgrund der variierenden Druckrichtung die reale Temperatur nicht bestimmt werden konnte und auch der Verfahrensweg des Druckkopfes nicht nachvollziehbar ist. Um eine Temperaturüberwachung unabhängig von der Druckrichtung an der gleichen Position zu realisieren, wurde softwareseitig der Strang über eine Kantendetektion ermittelt und der Messpixel mittig positioniert. Allerdings liegen dabei beim Verfahrensweg in die Ebene oder aus der Ebene heraus dennoch starke Einschränkungen vor. Insbesondere beim Druck komplexerer Bauteile ist hier eine Interpretation im Vergleich zu den anderen Messkonfigurationen mit einem großen Aufwand verbunden.

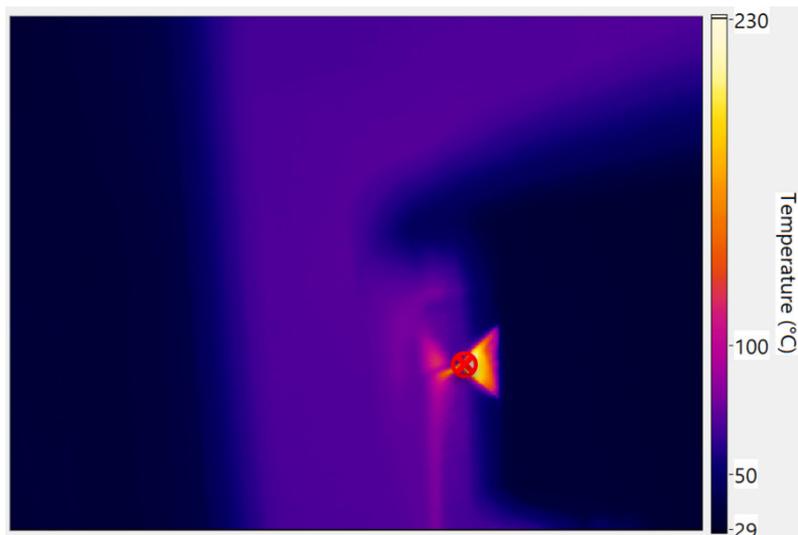


Abbildung 20: Thermogramm während des Drucks eines Quadrats bei Messung in Messkonfiguration 2. Die rote Markierung stellt den für die nachfolgende Auswertung verwendeten Pixel dar.

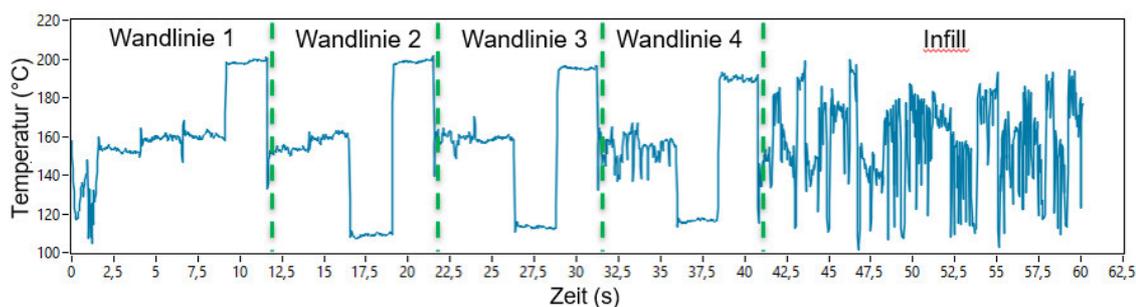


Abbildung 21: Zeitlicher Temperaturverlauf beim Druck eines Quadrats mit vier Wandschichten und Infill und Messung in Messkonfiguration 2. Für die Auswertung wurde der Messpixel aus Abbildung 20 verwendet.

Unabhängig von der messtechnisch bedingten Schwankung der gemessenen Temperatur lassen sich Veränderungen in der Drucktemperatur detektieren. Dies veranschaulicht Abbildung 22, die den zeitlichen Temperaturverlauf über einen längeren Zeitraum zeigt, während die Drucktemperatur von 205 °C auf 185 °C verringert und anschließend wieder erhöht wurde. Anhand der unterschiedlichen Temperaturniveaus lassen sich daran Unregelmäßigkeiten in der Drucktemperatur eindeutig nachvollziehen. Ebenso konnte eine Verringerung der Extrusionmenge anhand der zeitlichen Temperaturentwicklung unabhängig von der messtechnisch bedingten Schwankung der gemessenen Temperatur ermittelt werden, wie Abbildung 23 veranschaulicht. Die Abnahme der Temperatur mit abnehmender Extrusionsmenge lässt sich darauf zurückführen, dass das Material schneller abkühlt, wenn weniger Material vorliegt.

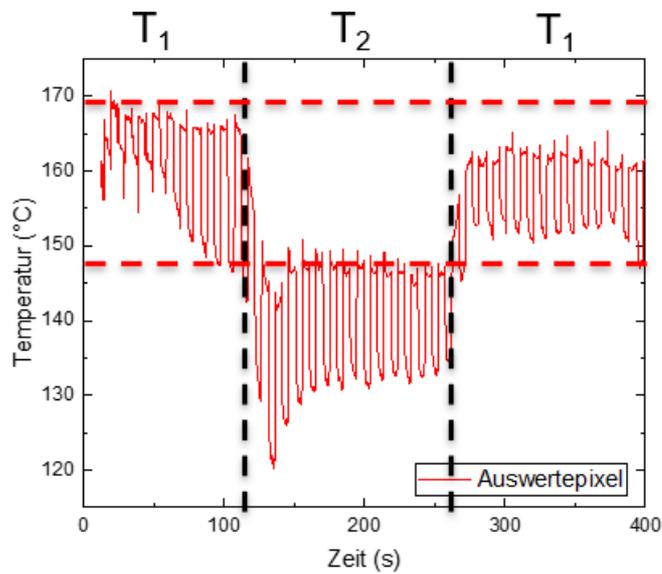


Abbildung 22: Zeitlicher Temperaturverlauf bei gezielter Veränderung der Drucktemperatur während des Druckprozesses von 205 °C auf 185 °C und wieder auf 205 °C. Es wurde Messkonfiguration 2 verwendet.

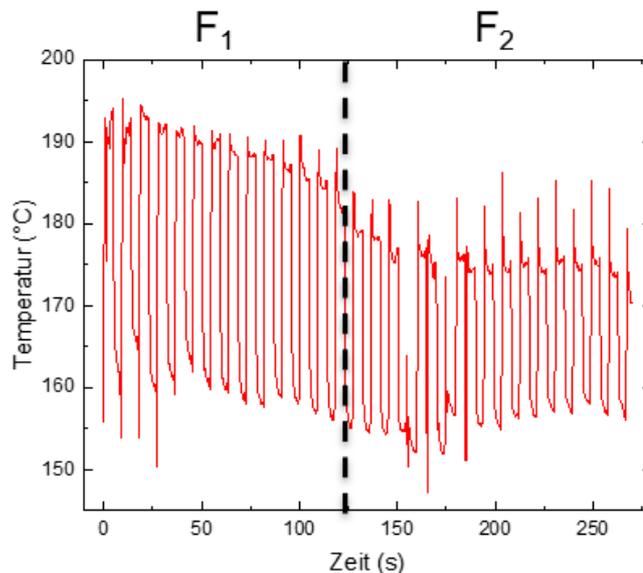


Abbildung 23: Zeitlicher Temperaturverlauf bei Verringerung der Extrusionsmenge unter Verwendung der Messkonfiguration 2. Die Extrusionsmenge wurde während des Druckprozesses von F_1 zu F_2 verringert.

In Abbildung 24 ist beispielhaft das Ergebnis bei räumlicher Auswertung der Thermografiedaten bei Verwendung von Messkonfiguration 2 dargestellt. Im Thermogramm (Abbildung 24, rechts) sind die Düse und die Druckrichtung anhand des Temperaturverlaufs erkennbar. Weiterhin ist die Richtung der Messlinie angegeben, die für die Erstellung des

räumlichen Temperaturverlaufs verwendet wurde (Abbildung 24, links). Zum einen fällt anhand des Temperaturverlaufs auf, dass die Temperatur mit zunehmendem Abstand zur Düse wie zu erwarten abnimmt. Zum anderen ist erkennbar, dass das Material an den Positionen deutlich schneller abkühlt, an denen sich Stege in der darunterliegenden Schicht befinden (vgl. rote Markierungen). Dies lässt sich auf einen deutlich schnelleren Wärmeabtransport in das darunterliegende Material in diesen Bereichen zurückführen. Folglich können mithilfe von Thermografie-Messungen Informationen über darunterliegende Strukturen und innenliegendes überschüssiges Material gewonnen werden.

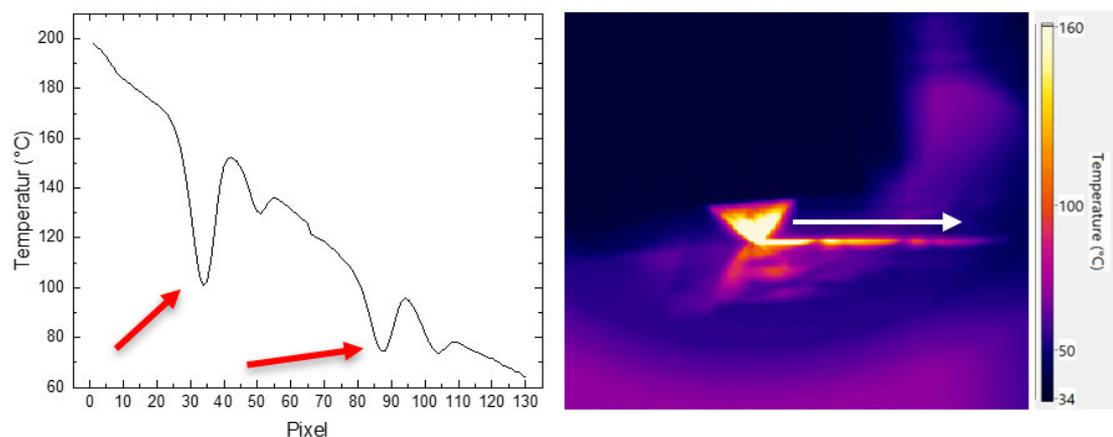


Abbildung 24: Räumlicher Temperaturverlauf bei Verwendung der Messkonfiguration 2 (IR-Kamera direkt an der Verfahreinheit) (links) und das entsprechende Thermogramm (rechts). Die roten Pfeile markieren Temperaturabweichungen aufgrund des darunterliegenden Infills, während der weiße Pfeil die Richtung des Temperaturverlaufs anzeigt.

6.3.3 Messkonfiguration 3

Nachfolgend sind Ergebnisse der thermografischen Untersuchungen unter Verwendung der Messkonfiguration 3 aufgeführt. Abbildung 25 zeigt den räumlichen Temperaturverlauf sowie das entsprechende Thermogramm beim Druck eines linearen Bauteils unter Verwendung der als gut eingestuften Druckeinstellungen. Der weiße Pfeil im Thermogramm gibt auch hier wieder die Richtung der Messlinie vor. Im Thermogramm sind außerdem der Düsenkopf und das Abkühlverhalten der obersten Schicht erkennbar. Anhand des räumlichen Temperaturverlaufs kann das Abkühlverhalten anhand von konkreten Temperaturwerten zum Zeitpunkt der Thermogramm-Aufnahme visualisiert werden. In Abbildung 26 (links) ist ein Vergleich von zwei räumlichen Temperaturverläufen beim Druckprozess mit richtigen und mit falschen Parametern aufgeführt. Der Verlauf beim

Druck mit als schlecht eingestufte Parameter weist dabei im Vergleich zum als gut eingestuftem Temperaturverlauf starke Oszillationen auf. Diese Oszillationen sind auch im Temperaturverlauf der darüberliegenden Schichten noch in abgeschwächter Form erkennbar, wie Abbildung 26 (rechts) verdeutlicht. Demnach lassen sich Druckvorgänge, bei denen ungeeignete Parametereinstellungen verwendet wurden, anhand von Momentaufnahmen mittels Thermografie ermitteln.

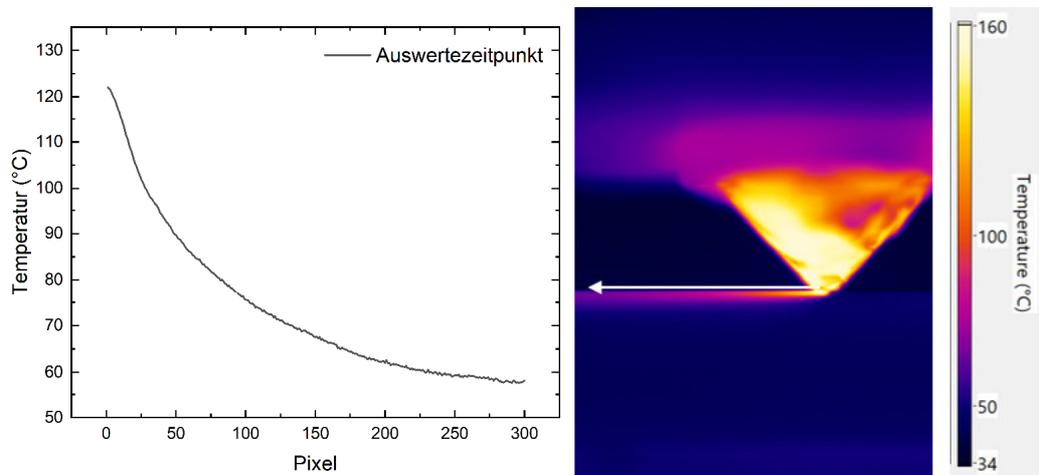


Abbildung 25: Räumlicher Temperaturverlauf bei Verwendung der Messkonfiguration 3 (IR-Kamera vor 3D-Drucker) (links) und das entsprechende Thermogramm (rechts). Der weiße Pfeil zeigt die Richtung des Temperaturverlaufs an.

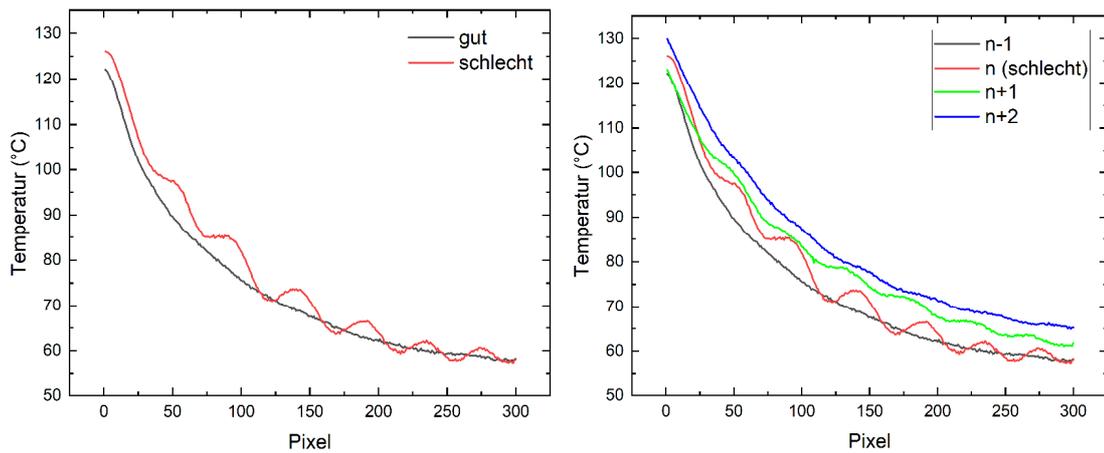


Abbildung 26: Vergleich des räumlichen Temperaturverlaufs beim Druck mit richtigen und falschen Parametern unter Verwendung der Messkonfiguration 3 (IR-Kamera vor 3D-Drucker) (links) sowie räumliche Temperaturverläufe beim Druck unterschiedlicher Schichten (rechts)

Nachfolgend wird das zeitliche Abkühlverhalten des Filaments ab Düsenaustritt untersucht. Hierfür wurde der in Abbildung 27 (rechts) dargestellte Messpixel definiert. In Abbildung 27 (links) ist der resultierende Temperaturverlauf beim Druck mehrerer Schichten für einen längeren Zeitraum gezeigt. In dem Diagramm sind sowohl die Abkühlung innerhalb weniger Sekunden als auch die Erwärmung durch nachfolgende Schichten anhand der Temperaturerhöhungen klar erkennbar. Die periodische Erhöhung der Temperatur aufgrund der anschließend gedruckten Schichten wird dabei kontinuierlich geringer, wobei die erkennbaren Doppelpeaks durch den Druck der Vorder- und Rückwand zustande kommen. Diese Temperaturerhöhungen stellen ein wichtiges Indiz für eine hinreichende Verbindung zwischen den Materialsträngen dar, da die Temperaturzunahme bei einer schlechten Verbindung aufgrund des geringeren Wärmeflusses deutlich geringer ausfällt, und geben somit Aufschluss über die Qualität des Druckbauteils. Abbildung 28 (links) zeigt das zeitliche Abkühlverhalten beim Druck von einer einzelnen Schicht. Diese zeitlichen Temperaturverläufe liefern Informationen über die Qualität des gedruckten Bauteils, wie Abbildung 28 (rechts) anhand der Verläufe bei geeigneten und ungeeigneten Parametereinstellungen exemplarisch verdeutlicht, in der messbare Unterschiede im Abkühlverhalten erkennbar sind. Um die vorliegenden Unterschiede quantifizieren zu können, wurden die zeitlichen Temperaturverläufe mithilfe einer mathematischen Funktion gefittet. Hierfür wurde die nachfolgende exponentielle Funktion definiert:

$$T(t) = (A - T_0) \cdot e^{-(t/t_1)} + T_0 \quad (1)$$

$T(t)$ stellt dabei die gemessene Temperatur dar, während T_0 das Ausgangstemperaturniveau und $(A - T_0)$ die Steigung der Kurve unter Berücksichtigung des Offsets beschreibt. Die Fitparameter lassen dabei Rückschlüsse auf die Qualität des Drucks zu, wie nachfolgend im Detail dargestellt wird.

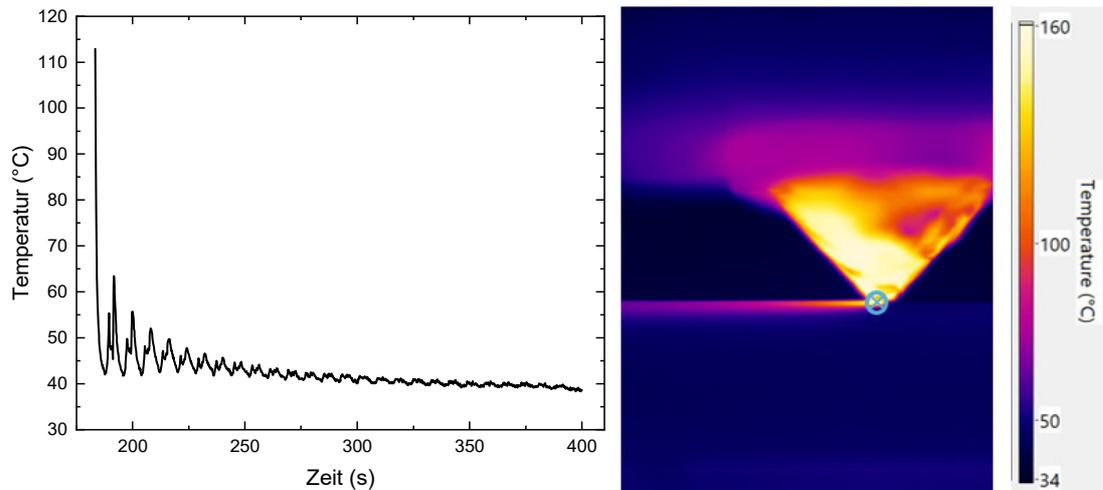


Abbildung 27: Zeitlicher Temperaturverlauf während des Drucks von mehreren Schichten unter Verwendung der Messkonfiguration 3 (links) und das entsprechende Thermogramm (rechts). Die hellblaue Markierung zeigt den für die Auswertung verwendeten Messpixel auf.

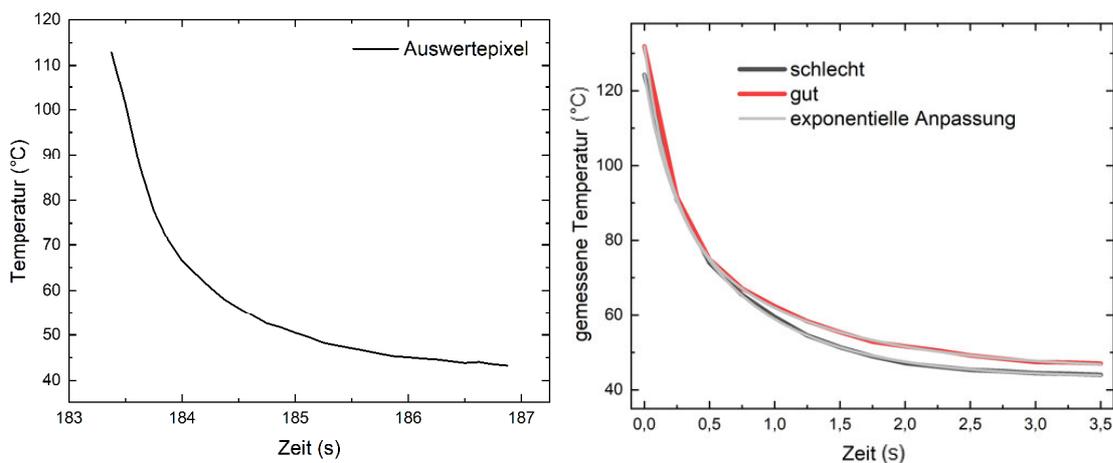


Abbildung 28: Zeitlicher Temperaturverlauf während des Drucks einer Schicht unter Verwendung der Messkonfiguration 3 (links) und ein Vergleich des Abkühlverhaltens bei richtig und falsch eingestellten Parametern (rechts)

Die Auswertung des zeitlichen Temperaturverhaltens lässt sich auf mehrere Messpixels entlang des Strangs ausweiten, wie Abbildung 29 exemplarisch veranschaulicht. In der Grafik sind die zeitlichen Temperaturverläufe für unterschiedliche Strangpositionen dargestellt. Jede Strangposition wurde direkt ab Düsenaustritt gemessen, weswegen ein zeitlicher Versatz zwischen den Verläufen vorliegt. In der Abbildung ist erkennbar, dass die Strangpositionen parallel verlaufende Abkühlkurven und somit vergleichbare Abkühlvorgänge aufweisen, die als „gut“ eingestuft werden können.

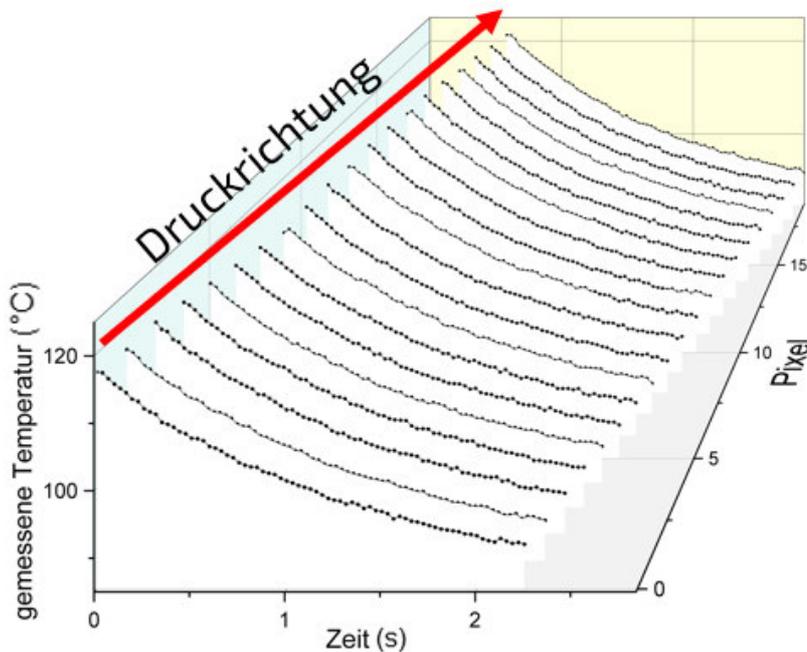


Abbildung 29: Zeitliche Temperaturverläufe für mehrere Messpositionen entlang des Strangs bei Verwendung der Messkonfiguration 3. Der rote Pfeil gibt die Druckrichtung an.

Durch Fitten der jeweiligen Abkühlkurven mit der in Gleichung 1 definierten mathematischen Funktion können jeder Kurve Werte für die Fitparameter A , T_0 und t_1 zugeordnet werden. Um dieses Vorgehen zu evaluieren, wurden Fitparameter anhand der Abkühlkurven für verschiedene Druckprozesse mit jeweils unterschiedlichen Druckparametern berechnet. Abbildung 30 zeigt die entsprechenden Parameterwerte für mehrere Messpositionen unter Verwendung von als gut eingestuften Parametern (schwarze Graphen), beim Druck mit niedriger Flowrate (rote Graphen) und beim Druck mit zu geringer Temperatur (blaue Graphen). Jeder aufgeführte Messwert stellt dabei einen Mittelwert dar, für den dieselbe Messposition von drei aufeinanderfolgenden Druckprozessen verwendet wurde.

Anhand der Abbildungen ist erkennbar, dass von Messposition zu Messposition geringfügige Unterschiede vorliegen. Ebenso variieren die Werte vereinzelt auch von Druckprozess zu Druckprozess, wie die Standardabweichung der jeweiligen Werte verdeutlicht. Mit Ausnahme vom Fitparameter t_1 , bei dem der Druck mit niedriger Flowrate nicht eindeutig von dem als gut eingestuftem Druckprozess unterschieden werden kann, liefern die Werte der Fitparameter eindeutige Rückschlüsse über die Qualität des Drucks. Hierbei erscheint die Betrachtung von allen drei Fitparametern als sinnvoll, um eine zuverlässige Qualitätskontrolle zu ermöglichen.

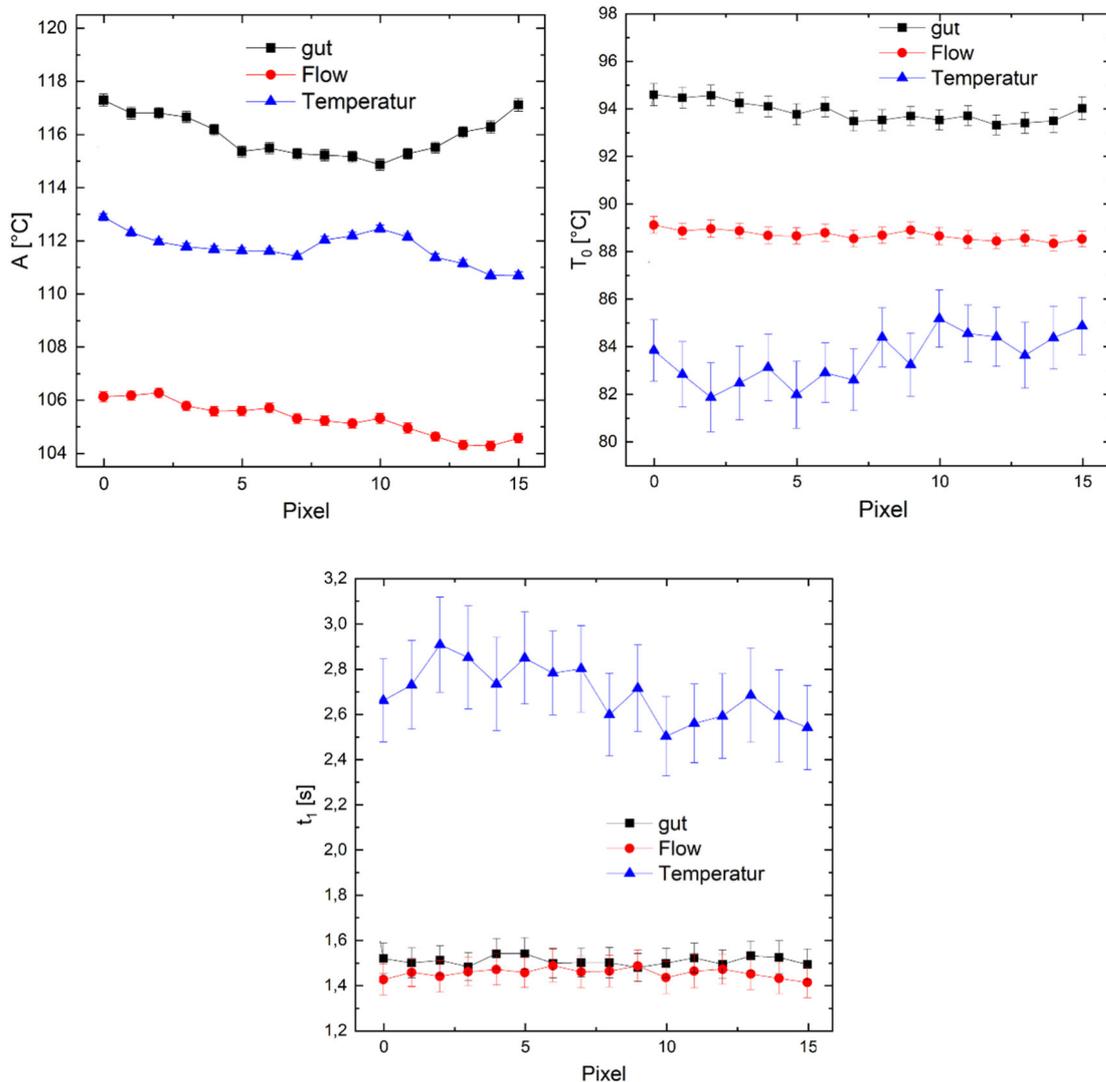


Abbildung 30: Fitparameter A (oben, links) und T_0 (oben, rechts) und t_1 (unten) für mehrere Messpositionen und bei Verwendung unterschiedlicher Druckparameter. Der schwarze Graph zeigt einen Druck mit als gut eingestuftem Parametern, der blaue Graph einen Druckprozess mit zu niedriger Temperatur und der rote Graph den Druck mit verringerter Flowrate.

Das vorgestellte Vorgehen zur Bestimmung fehlerbehafteter Druckprozesse soll nachfolgend durch künstliche Einbringung von Fehlstellen weiter evaluiert werden. Hierfür wurde ein Strangabriss durch künstliche Einbringung eines Hohlraums (vgl. Abbildung 9, unten) simuliert und das Abkühlverhalten entlang des Strangs gemessen. Die resultierenden Fitparameter sind für einen Hohlraum mit einer Breite von 10 mm in Abbildung 31 aufgeführt. Fitparameter A kann hier die Breite der Fehlstelle am besten wiedergeben, während die Fitparameter T_0 und t_1 ebenfalls auf einen fehlerbehafteten Bereich hindeuten, wobei allerdings die exakte Lage und Größe nicht eindeutig ermittelt werden kann. Bei einem Fehler der Breite 4 mm können vergleichbare Erkenntnisse ermittelt werden, wie Abbildung 32 veranschaulicht. Hier lässt sich ebenfalls die Breite des Fehlers am besten anhand von Fitparameter A aufzeigen, wobei auch die Parameter T_0 und t_1 abweichende Werte aufweisen, die auf das Vorhandensein eines Mangels hinweisen.

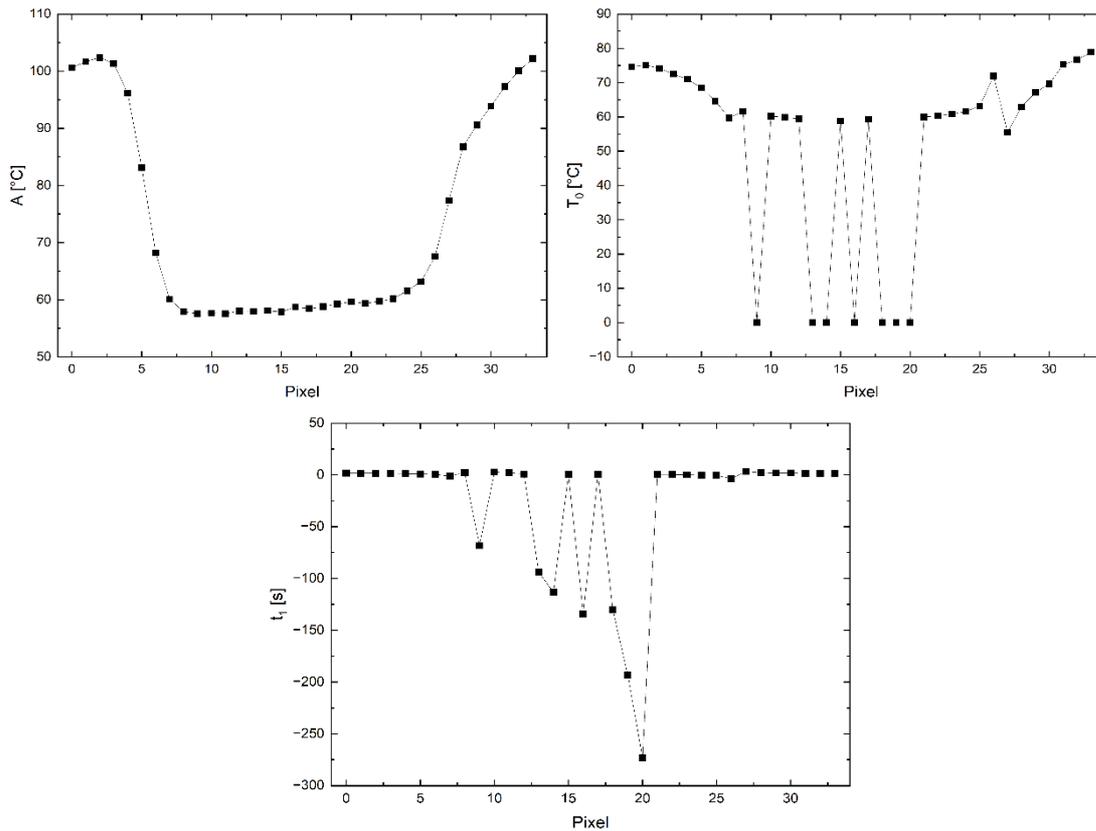


Abbildung 31: Fitparameter von Messpunkten entlang eines Strangs mit Hohlraum der Breite 10 mm. Die Breite entspricht ca. 22 Kamerapixeln.

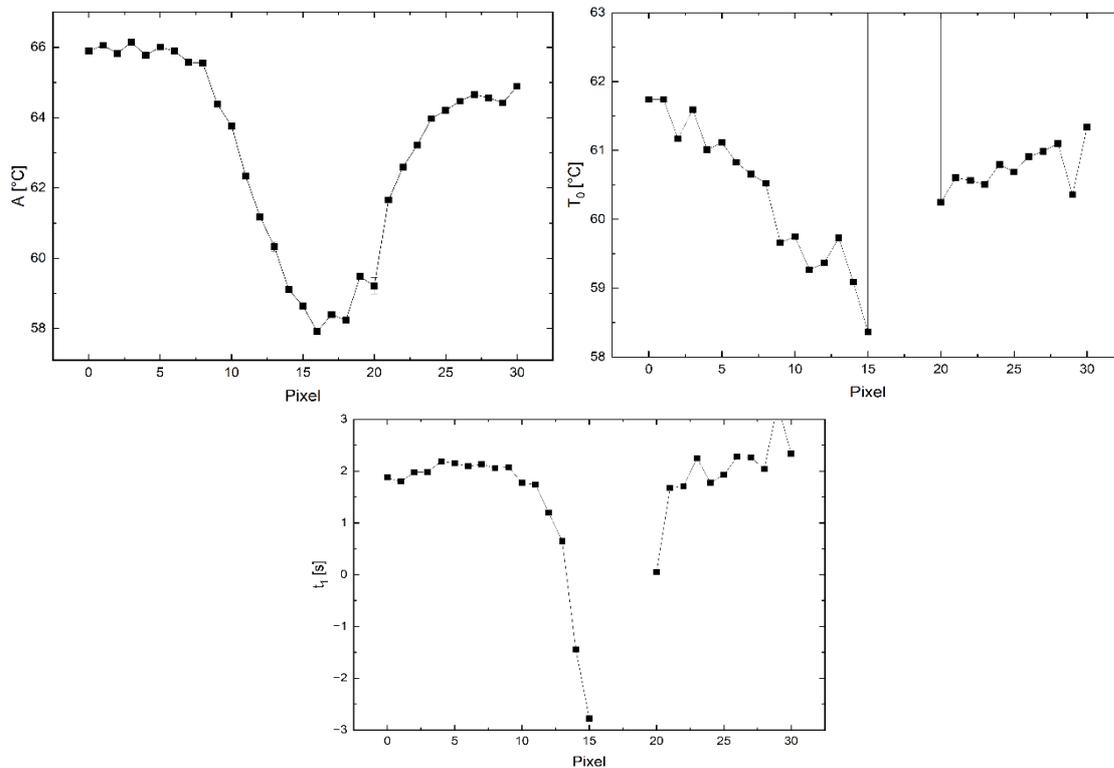


Abbildung 32: Fitparameter von Messpunkten entlang eines Strangs mit Hohlraum der Breite 4 mm. Die Breite entspricht ca. 9 Kamerapixeln.

Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass der Mangel nicht nur in der Schicht, in der der Hohlraum vorliegt, sondern auch in der darüberliegenden Schicht detektiert werden kann. Die entsprechenden Fitparameter entlang des Strangs sind exemplarisch in Abbildung 33 aufgeführt. Anhand der Graphen ist erkennbar, dass die Fitparameter A und T_0 auch hier Hinweise über das Vorhandensein des Fehlers geben, während der Parameter t_1 keine abweichenden Werte liefert, die auf den Fehler hindeuten. Durch Berücksichtigung von allen drei Werten ist somit auch eine Detektion von Strangabrissen, die erst während des Abkühlens entstehen, beim Druck der darüberliegenden Schicht möglich.

Da die Absolutwerte der Fitparameter von Druck zu Druck variieren können, z. B. bei unterschiedlichen Druckrichtungen, bei variierenden Umgebungseinflüssen oder bei der Verwendung eines anderen Materials, ist eine allgemeingültige Definition von absoluten Toleranzwerten nur schwer möglich. Um dies zu ermöglichen, kann die erste Ableitung der Fitfunktion zusätzlich berechnet und mit einbezogen werden. In Abbildung 34 ist exemplarisch der Fitparameter A der ersten Ableitung beim Druck einer fehlerbehafteten Schicht und beim Druck der darüberliegenden Schicht gezeigt. Der blaue Bereich zeigt einen möglichen Toleranzbereich auf, der hier genutzt werden kann, um Mängel beim Druck zu identifizieren. Durch die Verwendung der ersten Ableitung liegt hierbei kein Offset vor, obwohl der Fitparameter A von Schicht zu Schicht unterschiedliche Absolutniveaus aufgrund der variierenden Druckrichtung aufweist. Die Eignung der Ableitungsfunktion zur Definition von Toleranzwerten wird auch in Abbildung 35 exemplarisch demonstriert. Hier sind die Fitparameter A der Ableitungsfunktion beim Druck einer fehlerfreien Schicht und beim Druck einer Schicht, in der zufällig Inhomogenitäten entstanden sind, gezeigt. Die Messwerte entlang des Strangs weisen hier eine deutlich größere Schwankung beim fehlerhaften Druck auf und ermöglichen somit durch die Definition eines Toleranzbereichs (blauer Bereich in der Abbildung) die Detektion von Mängeln während des Druckprozesses.

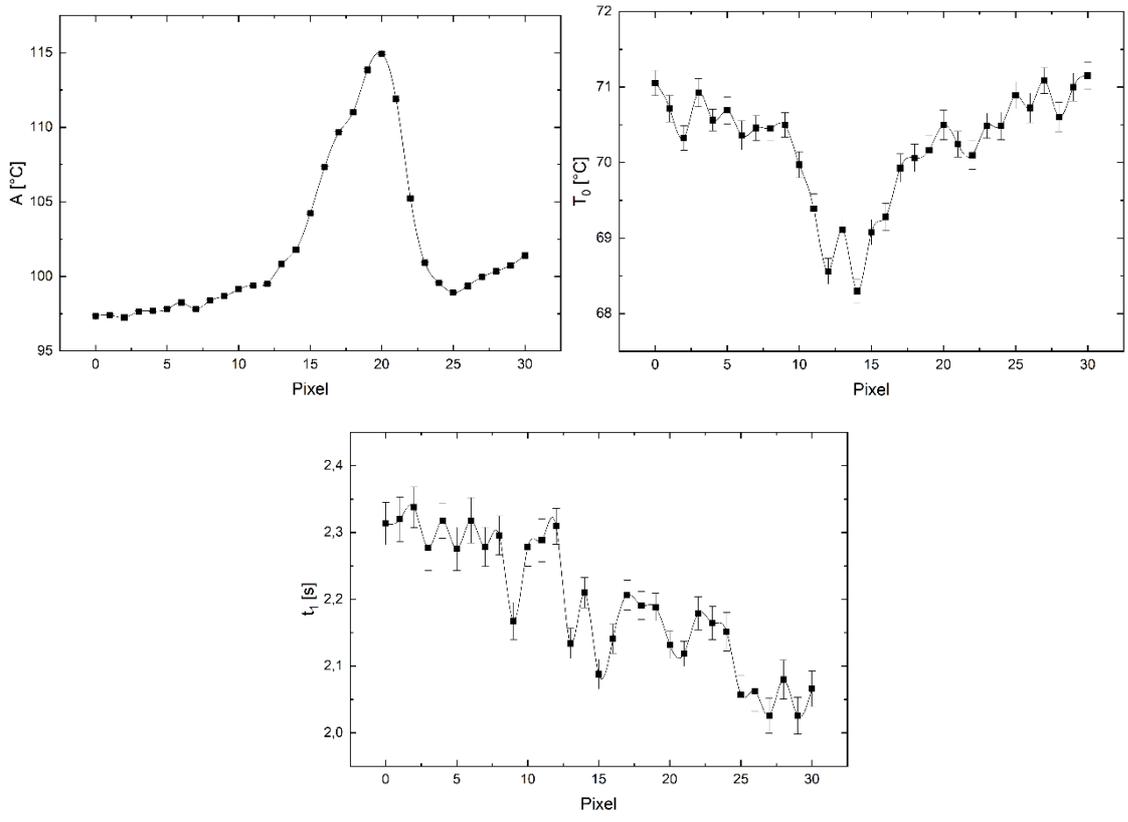


Abbildung 33: Fitparameter beim Druck der über dem Fehler liegenden Schicht

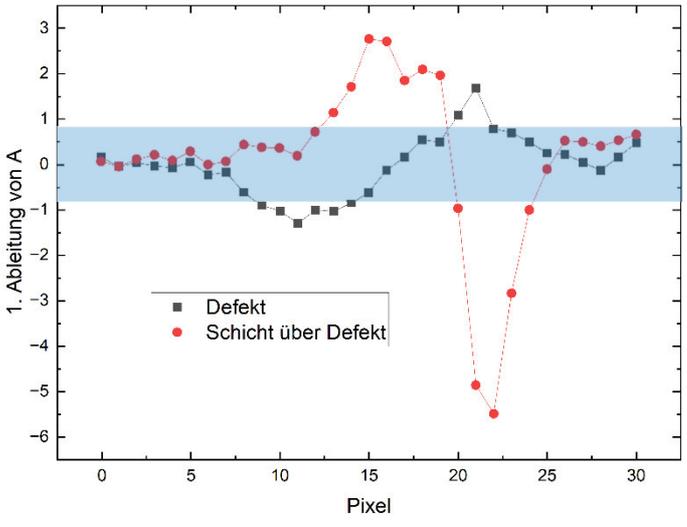


Abbildung 34: Erste Ableitung des Fitparameters A beim Druck einer fehlerbehafteten Schicht (schwarz) und beim Druck der darüberliegenden Schicht (rot). Der blaue Bereich zeigt einen möglichen Toleranzbereich für den fehlerfreien Druck auf.

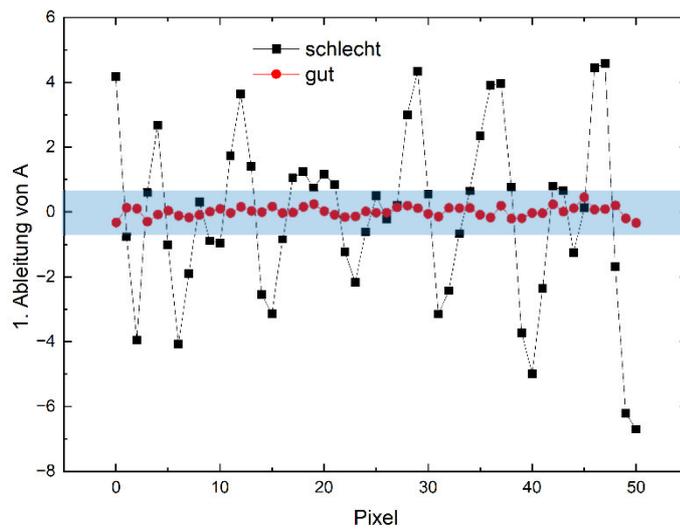


Abbildung 35: Erste Ableitung des Fitparameters A während des Drucks eines Bauteils. Der rote Graph zeigt Werte beim Druck eines als gut eingestuften Strangs. Beim schwarzen Graph liegen Schwankungen in der Strangdicke und somit zufällig entstandene Mängel vor. Der blaue Bereich zeigt einen möglichen Toleranzbereich auf.

6.4 Auswertemethode des maschinellen Lernens

Zur automatisierten Bewertung und Klassifizierung der Abkühlkurven wurden aufbauend auf den in Kapitel 6.3 beschriebenen Auswertemethoden Algorithmen auf Basis von Autoencodern und künstlichen neuronalen Netzwerken (KNN) entwickelt. Dies ermöglicht eine robustere Detektion von fehlerhaften Druckprozessen.

6.4.1 Autoencoder zur Rekonstruktion der Messdaten

Ein Autoencoder ist ein spezieller Typ von KNN, das darauf trainiert ist, beliebige Eingabedatei zu reproduzieren. Zunächst wird die Datei in eine niedrigdimensionale latente

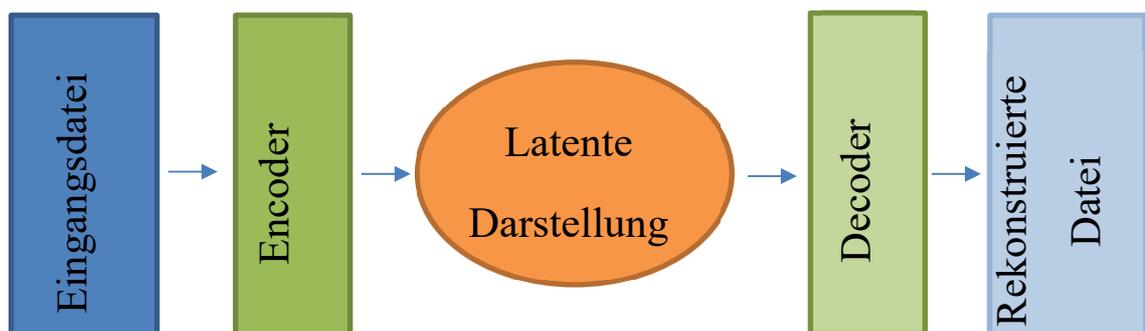


Abbildung 36: Allgemeine Struktur eines Autoencoders

Darstellung kodiert und danach wird die latente Darstellung wieder in eine Datei dekodiert (Abbildung 36). Beim Training lernt der Autoencoder, die Daten zu komprimieren und Rekonstruktionsfehler zu minimieren.

Ein Autoencoder kann darauf trainiert werden, anstatt einfaches Reproduzieren des Eingangssignals ein Rauschen aus das Messsignal zu entfernen oder neue Daten aufgrund von Eingangsdaten zu generieren. Für die Rekonstruktion von thermografischen Messdaten wurde ein Autoencoder mit einem zweidimensionalen latenten Raum erstellt, indem sowohl der Encoder als auch der Decoder aus zwei 1D-Konvolutionsschichten und zwei Aktivierungsschichten aufgebaut wurden (vgl. Abbildung 37). Als Aktivierungsfunktion wurde die Leaky Variante von Rectified Linear Unit (LeakyReLU) implementiert. Diese Funktion verhindert ein „Absterben“ von Neuronen, indem sie eine kleine positive Steigung für negative Werte gibt. Deswegen wird die LeakyReLU-Funktion oftmals bei Empfehlungssystemen, die auf Deep Learning basieren, verwendet.

Der Autoencoder wurde auf einem Satz von 18.400 Messkurven (Temperatur-Zeit-Daten) trainiert und weitere 4.600 Messkurven wurden zum Test genutzt. Eine hohe Qualität der rekonstruierten Daten konnte mithilfe des beschriebenen Autoencoder erreicht werden. Die Medianabweichung zwischen den originalen und den rekonstruierten Daten lag dabei lediglich bei 0,7 K, wie ein Vergleich der originalen und rekonstruierten Temperaturdaten in Abbildung 38 exemplarisch veranschaulicht.

Die KI-basierte Auswertung mittels Autoencoder hat es somit ermöglicht, jede Temperatur-Zeit-Messkurve mithilfe von lediglich fünf Parametern darzustellen. Diese Parameter wurden als Eingangsdatei für die KNN genutzt, mit der eine Ermittlung von Mängeln beim 3D-Druck möglich ist.

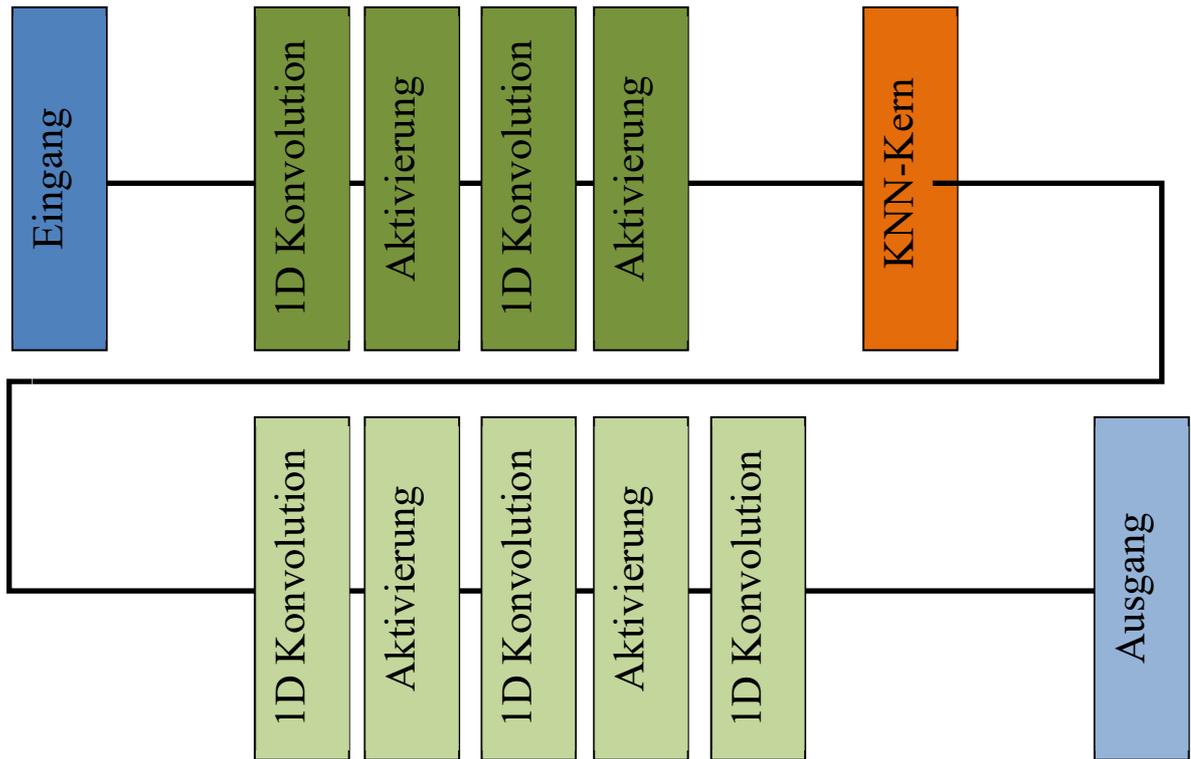


Abbildung 37: Struktur von Autoencoderschichten

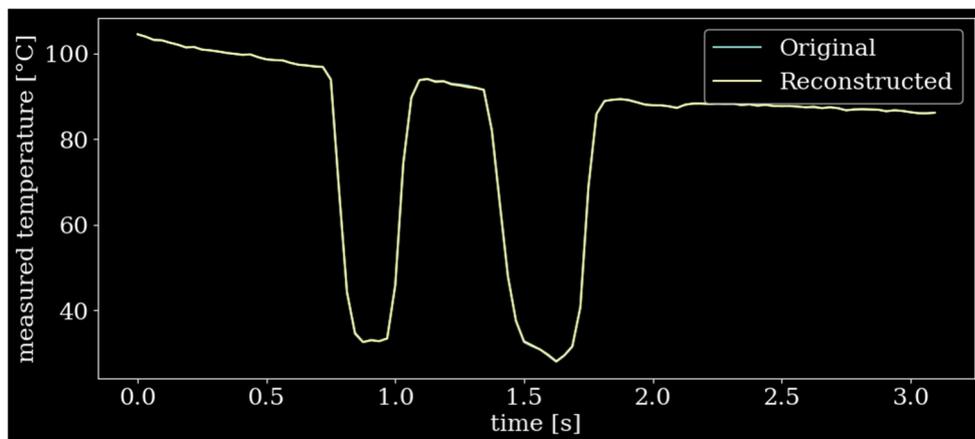


Abbildung 38: Exemplarischer Vergleich von originalen und rekonstruierten Temperaturdaten. Unterschiede zwischen den Kurven sind aufgrund der hohen Übereinstimmung nicht erkennbar.

6.4.2 Klassifikation mittels künstlicher neuronaler Netze

Um fehlerhafte Druckprozesse zu erkennen, wurde eine KNN mit 3 verborgenen Schichten konstruiert. Die LeakyReLU-Funktion wurde als Aktivierungsfunktion, wie beim Au-

toencoder, verwendet. Um ein Training zu ermöglichen, wurden 1106 gespeicherte thermografische Messdaten mit einem „i. O“- oder „n. i. O“-Label manuell markiert und auf zwei Gruppen (80 % für Training und 20 % für Testen) zufällig aufgeteilt.

Die KNN wurde trainiert, um Fehlstellen und unzureichend eingestellte Parameter in den 3D-gedruckten Bauteilen zu detektieren. Als Eingangsdaten wurden die fünf Parameter gewählt, die jede thermographische Messkurve mithilfe des Autoencoders beschreiben konnten. Die KNN wurde über 5.000 Epochen trainiert. Die resultierende Verlustfunktion (Loss) und die Genauigkeit (Accuracy) während des Trainings sind exemplarisch in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt.

Das Modell, das sich für die vorliegenden Messdaten am besten geeignet hat, wurde schließlich ausgewählt und für 20.000 Epochen trainiert. Nach Epoche 15.409 wurde die Validierungsgenauigkeit von 0,95 erreicht. Die resultierende Konfusionsmatrix vom am besten performten Modell ist in Abbildung 41 dargestellt. Diese zeigt, dass 1.600 Daten als richtig positiv und 59 als richtig negativ eingestuft wurden, während lediglich 7 der Ergebnisse als falsch positiv oder falsch negativ eingestuft wurden. Das konstruierte KNN-Modell hat demnach in 99,58 % der Fälle einen Mangel richtig erkannt.

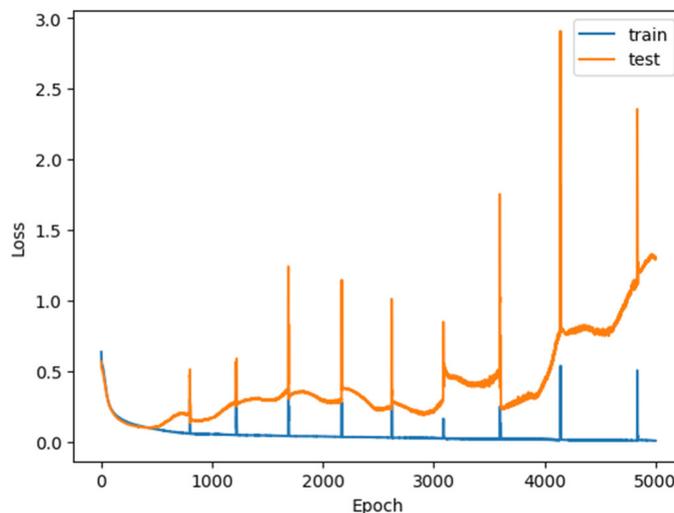


Abbildung 39: Verlustfunktion aus dem KNN-Training

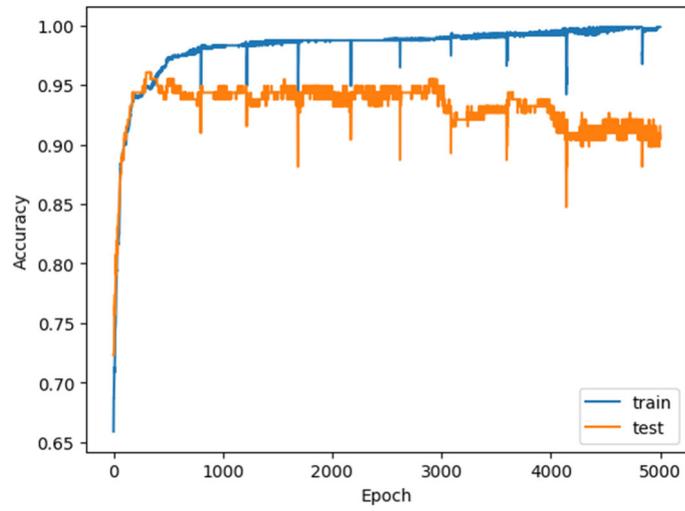


Abbildung 40: Genauigkeit beim eingesetzten KNN-Modell

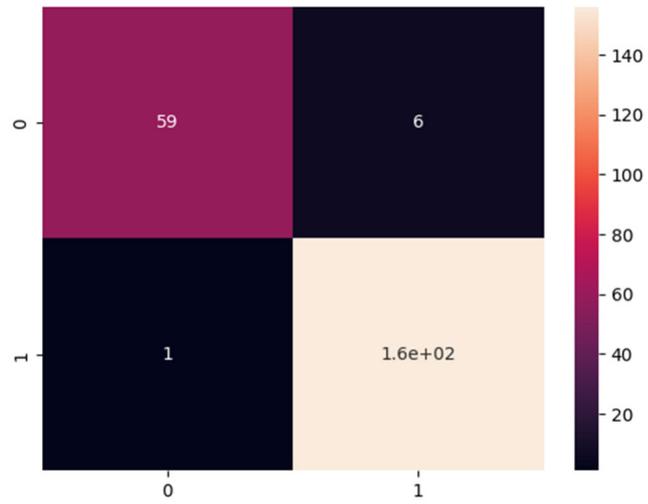


Abbildung 41: Konfusionsmatrix von dem eingesetzten KNN-Modell

7 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich ein FLM-Druckprozess mittels Thermografie überwachen lässt und Rückschlüsse über die Qualität des gedruckten Bauteils ermöglicht. In dem Forschungsprojekt wurden zunächst relevante Fehlermerkmale über Ringversuche identifiziert und klassifiziert, auf die der Fokus im weiteren Verlauf des Projektes gelegt wurde. Dabei konnten Tropfenbildung als häufigstes Fehlermerkmal identifiziert werden, während eine fehlerhafte Verbindung am geringsten vertreten war und überschüssiges Material sowie Deformationen bei allen Teilnehmern des Ringversuchs gleichermaßen detektiert werden konnten. Anders als im Antrag angenommen, konnte dabei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Fehlerhäufigkeit und dem Wissensstand des Unternehmens festgestellt werden. Ein zweiter Ringversuch, wie im Antrag vorgesehen, wurde aufgrund des geringen Nutzens bei verhältnismäßig großem Aufwand bei den Unternehmen in Abstimmung mit dem pbA nicht durchgeführt. Stattdessen wurde die entwickelte Messtechnik interessierten Firmen am SKZ und in Online-Meetings demonstriert und die individuellen Anforderungen verschiedener Unternehmen abgefragt, um die Messtechnik und die entwickelte Software für verschiedene Benutzerprofile entwickeln zu können. Die zur Verfügung stehenden Kapazitäten konnten weiterhin dafür genutzt werden, die gleichermaßen relevanten Messkonfigurationen umfassender als im Antrag geplant zu untersuchen, Limitationen und Vorzüge zu erarbeiten und entsprechende Auswertemethoden zu entwickeln. Die Wahl der optimalen Messkonfiguration hängt dabei insbesondere von anwendungsspezifischen Faktoren wie dem Aufbau des Druckers oder der Kameragröße ab. Für eine automatisierte Auswertung konnten für alle Messkonfigurationen Signalverarbeitungsstrategien entwickelt werden. Hierbei haben sich sowohl die Betrachtung des zeitlichen als auch des räumlichen Abkühlverhaltens als hilfreich erwiesen. Durch Betrachtung der zeitlichen Abkühlverhalten von mehreren Kamerapixeln, die auf dem gedruckten Strang liegen, konnten dabei sowohl zeitliche als auch räumliche Informationen erlangt werden. Die jeweiligen Abkühlkurven lassen sich mathematisch über eine Exponentialfunktion beschreiben, deren Fitparameter wiederum Rückschlüsse auf die Qualität des gedruckten Bauteils ermöglichen. Insbesondere die Parameter der Ableitungsfunktion haben sich hier aufgrund des allgemeingültigeren Charakters als geeignet erwiesen, sodass über die Angabe von Toleranzwerten falsch eingestellte Druckparameter oder Mängel an dem Bauteil direkt während des Druckprozesses

ermittelt werden konnten. Zur Rekonstruktion der Messdaten wurde ein Autoencoder verwendet, der jedes Temperatur-Zeit-Diagramm über fünf Parameter beschreiben konnte. Unter Verwendung dieser fünf Parameter konnte ein KNN-Modell entwickelt werden, das auf 885 Messdaten trainiert wurde und schließlich mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,58 % einen mangelhaften Prozess erkennen konnte. Die im Antrag gestellte Arbeitshypothese, dass sich die Methoden des maschinellen Lernens der Shearografie (aus IGF-Projekt 19345 BG) auf die Thermografie übertragen lassen, hat sich dabei bestätigt. Ebenfalls konnte die Arbeitshypothese bzgl. einer zuverlässigen Detektion von anwendungsrelevanten Fehlern und einer Anwendung der Messtechnik an weiteren Druckvorlagen mit geringem zusätzlichem Aufwand bestätigt werden. Aus den bisherigen Forschungsergebnissen lassen sich folgende Handlungsanweisungen ableiten:

Für Anwender:

- Durch Einsatz von IR-Messtechnik kann der Prozess überwacht und Mängel an gedruckten Bauteilen detektiert werden, die einen Rückschluss auf richtig oder falsch eingestellte Prozessparameter ermöglichen.
- Die Zugänglichkeit zum Druckprozess kann über Fenster oder über verfügbarem Platz im Druckraum realisiert werden, sofern die IR-Kamera bei der vorliegenden Umgebungstemperatur eingesetzt werden kann.
- Beim Aufbau der Messtechnik sollten die Vor- und Nachteile der jeweiligen Messkonfiguration (vgl. Kapitel 5.3) berücksichtigt werden.
- Wenn sich der Abstand zwischen gedruckter Schicht und Objektiv der Kamera während des Druckprozesses ändert, bewegt sich das Prüfobjekt zunehmend aus dem Fokus. Um diesen Einfluss zu minimieren, kann eine Ebene auf mittlerer Entfernung fokussiert werden.
- Es hat sich gezeigt, dass eine kostengünstigere Mikrobolometer-Kamera für die Detektion der vorliegenden thermischen Unterschiede ausreichend ist und im Vergleich zur hochpreisigeren Quantendetektorkamera deutlich leichter bei Druckprozessen integriert werden kann.
- Die IR-Kamera sollte eine ausreichend hohe geometrische Auflösung aufweisen, sodass der abgelegte Strang in der Breite durch mindestens drei Kamerapixel abgebildet wird.
- Eine thermische Empfindlichkeit der IR-Kamera von 80 mK und eine Aufnahme Frequenz von wenigen Hz ist für die Qualitätsprüfung ausreichend.

- Die Temperatur sollte möglichst ab Düsenaustritt über mehrere Sekunden gemessen werden.
- Um die flächige Einsatzmöglichkeit der IR-Kamera vollständig zu nutzen und eine 100%-Kontrolle zu realisieren, sollte zusätzlich zum zeitlichen Abkühlverhalten auch eine räumliche Überwachung stattfinden, indem Messpositionen entlang des Strangs definiert werden (vgl. Abbildung 29).
- Auswerteseitig wird empfohlen, die Abkühlkurve nach Gleichung 1 zu fitten und eine Qualitätseinstufung anhand der Fitparameter vorzunehmen.

Für Systemhersteller:

- Für die Qualitätskontrolle beim 3D-Druck stellt eine möglichst kompakte IR-Kamera mit geringem Gewicht und geringer Größe die geeignetste Wahl dar.
- Die technischen Voraussetzungen hängen stark von der jeweiligen Anwendung ab, bei konventionellen Druckprozessen ist eine thermische Empfindlichkeit von 80 mK, eine Aufnahmefrequenz von 2 Hz und eine geometrische Auflösung von 382 x 288 Pixel² jedoch ausreichend.
- Ein Objektivwechsel ist bei der Anwendung nicht notwendig, sodass die Kosten reduziert werden können, indem eine i. d. R. kostengünstigere IR-Kamera mit festem Objektiv eingesetzt wird.
- Bei manchen Druckprozessen variiert der Abstand zwischen Bauteil und Objektiv der IR-Kamera, sodass eine automatisierte und an den Druckprozess angepasste Fokussierung eine sinnvolle Erweiterung zu bestehender Kameratechnik liefert.
- Es ist hilfreich, wenn die IR-Kamera bei höheren Temperaturen betrieben werden kann, um einen Einsatz in einem beheizten Druckraum des 3D-Druckers zu ermöglichen.

Um das in dem Forschungsprojekt erarbeitete Prüfkonzept weiterzuentwickeln, wird weiterhin ein Nachfolgeprojekt angestrebt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] VDI-Richtlinie 3405, 2014-12: Additive Fertigungsverfahren, 2014.
- [2] Gebhardt A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5, Hanser Verlag, München, 2016.
- [3] Mireles J. et al.: Fused Deposition Modeling of Metals: University of Texas at Austin, [2012](https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/88457). Online verfügbar unter: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/88457>
- [4] He K. et al.: Profile monitoring based quality control method for fused deposition modeling process. J Intell Manuf 30, 2, 947–958. DOI: 10.1007/s10845-018-1424-9, 2019.
- [5] Coogan T. et al.: In-line rheological monitoring of fused deposition modeling. J. Rheol. 63, 1, 141-155. DOI: 10.1122/1.5054648, 2019.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE-Richtlinie 3511 Blatt 4.5: Technische Temperaturmessung – Strahlungsthermometrie, Praktische Anwendung von Strahlungsthermometern, Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [7] Neubig B. et al.: Transmissions- und Emissionsgrade von Kunststoffhalbzeugen für die berührunglose Temperaturmessung in Thermoformmaschinen, Proceedings, 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 2013.
- [8] Sackewitz M.: Leitfaden zur Wärmefluss-Thermografie, Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung, Fraunhofer Verlag, 2011.
- [9] Bendada A. et al.: Advances in Infrared Technology for the Online Monitoring of Injection Moulding: Application to the Understanding of the Nature of Contact at the Polymer-Mould Interface, Transactions of the Institute of Measurement and Control 29, 5, 2007.
- [10] Bula K. et al.: The Use of IR Thermography to Show the Mold and Part Temperature Evolution in Injection Molding, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 36, 2016.

- [11] Schwalm G.: Inline Infrared Thermography Applied for Quality Gates and for Mould Temperature Control in the Injection Moulding Process, 58. ilmenau scientific colloquium, Ilmenau, 2014.
- [12] Horlemann S. et al.: Passive Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren beim Schweißen von Kunststoffen, *Joining Plastics*, 2, 9, 2015.
- [13] Leicht H. et al.: Active and Passive Thermography for Defect Detection in Polymer Joints, *Proceedings, 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, Berlin, 2018.
- [14] Rojek M. et al.: Thermography in Plastics Welding Processes Assessment, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 41, 2010.
- [15] <https://quality-engineering.industrie.de/branchen/kunststoff/fuer-den-perfekten-durchblick/>, zuletzt aufgerufen am 02.11.2023.
- [16] Meinschmidt P. et al.: Feasibility Study for the Inline Monitoring of Thermal Conductivity and Structural Quality of Plastics in the Hot Extrusion Process by means of Infrared Thermography, *Technisches Messen*, 3, 85, 2018.
- [17] Aderhold J. et al.: Suitability of Infrared Thermography for Monitoring the Hot Extrusion of Insulating Materials, *Proceedings, 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, Berlin, 2018.
- [18] Balageas D. et al.: Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection, *Journal of nondestructive Evaluation*, 35, 1, 2016.
- [19] Sanati H. et al.: Condition Monitoring of Wind Turbine Blades Using Active and Passive Thermography, *Applied Science*, 8, 10, 2018.
- [20] Meola C. et al.: Infrared Thermography for Inline Monitoring of Glass/ Epoxy under Impact and Quasi-Static Bending, *Applied Science*, 8, 2, 2018.
- [21] Boccardi S. et al.: Inline Monitoring of Basalt-Based Composites under Impact Tests, *Composite Structures*, 210, 2019.

- [22] C. Meola et al.: Impact Damaging of Composites through Online Monitoring and Non-Destructive Evaluation with Infrared Thermography, NDT & E International, 85, 2017.
- [23] Yi Q. et al.: New Features for Delamination Depth Evaluation in Carbon Fiber Reinforced Plastic Materials using Eddy Current Pulse-Compression Thermography, NDT & E International, 102, 2019.
- [24] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Qualität im 3D-Druck automatisiert sichern, Mediendienst, 2017.
- [25] Krauss H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung, Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- [26] Wegner A.: Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [27] Wegner A. et al.: Thermographie zur Temperaturmessung beim Laser-Sintern – Ein Beitrag zur Qualitätssicherung, RT eJournal Forum für Rapid Technologie, 10, 2013.
- [28] Dinwiddie R. B. et al.: Infrared Imaging of the Polymer 3D-Printing Process, Thermal Infrared Applications, SPIE International Society for Optics and Photonics, 9, 105, 2014.
- [29] Traxler G. et al.: Process Monitoring by Thermography during Fused Deposition Modeling, Proceedings, 32th International Conference of the Polymer Processing Society PPS, Lyon, 2016.
- [30] Pierce J.: Defect Detection in Additive Manufacturing Utilizing Long Pulse Thermography, Masterarbeit, University of South Florida, 2018.
- [31] Bishop C. M.: Pattern recognition and machine learning (Computer science). New York, Springer, 2006. Online verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0818/2006922522-d.html>

- [32] Hastie T. et al.: The Elements of Statistical Learning. New York, Springer, 2009.
- [33] MachineLearningMastery.com: Deep Learning for Time Series Forecasting. Online verfügbar unter: <https://machinelearningmastery.com/deep-learning-for-time-series-forecasting/>, zuletzt aufgerufen am 10.11.2023.
- [34] Chollet F.: Deep learning with Python. Shelter Island, Manning, 2018.
- [35] Gamboa J. C. B.: Deep Learning for Time-Series Analysis. 2017. Online verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1701.01887.pdf>
- [36] Bank D. et al.: Autoencoders. Machine Learning for Data Science. Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, 353-374, 2023.
- [37] Ferraris E. et al: Thermography based in-process monitoring of Fused Filament Fabrication of polymeric parts. CIRP Annals, 68, 1, 213-216, 2019.
- [38] Vanaei H. R. et al.: A comparative in-process monitoring of temperature profile in fused filament fabrication. Polymer Engineering Science, 61, 1, 68-76, 2021.