



Rezension

Eigenspannungen in Produkten aus der additiven Fertigung mit Lichtbogendraht und ihre Messtechniken: Eine systematische Überprüfung

Fakada Dabalo Gurmesa 1,*¹, Hirpa Gelgele Lemu 2,*²³, Josef Wakjira Adugna² und Mesfin Demise Harsibo 3¹ Fakultät für Maschinenbau, Jimma Institute of Technology, Jimma University, Jimma PO Box 378, Äthiopien; Department² für Maschinenbau, Bauingenieurwesen und Materialwissenschaften, Fakultät für Naturwissenschaften und Technologie, Universität Stavanger, N-4036 Stavanger, Norwegen; yosef.w.adugna@uis.no;³ Department für Maschinenbau, College of Engineering and Technology, Wolkite University, Wolkite PO Box 07, Äthiopien; mesfine2021@gmail.com

* Korrespondenz: fd.gurmesa@stud.uis.no (FDG); hirpa.g.lemu@uis.no (HGL)

Zusammenfassung: Diese Literaturübersicht bietet eine eingehende Untersuchung der Forschung zu Eigenspannungen (RS) in Produkten aus Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) und konzentriert sich insbesondere darauf, wie Prozessparameter das Phänomen beeinflussen. Die Motivation der Studie ist der wachsende Fokus auf die WAAM-Technologie und die Beobachtung, dass Eigenspannungen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung des mechanischen Verhaltens und der strukturellen Integrität von WAAM-Komponenten spielen. Daher soll die Übersicht ein besseres Verständnis der Beziehung zwischen Prozessparametern und RS bieten, um den WAAM-Prozess zu optimieren und die Haltbarkeit der Endprodukte sicherzustellen. Sie fasst auch die wichtigsten Erkenntnisse, Messtechniken, Herausforderungen und zukünftigen Richtungen in diesem sich entwickelnden Bereich zusammen. Die Übersicht analysiert auch Messtechniken, die verwendet werden, um Eigenspannungen in Produkten zu charakterisieren, die durch WAAM als Funktion der Prozessparameter hergestellt werden. Es wurden experimentelle Messtechniken und numerische Analysen von Eigenspannungen zur Bestimmung der Auswirkungen von Eigenspannungen auf mechanische Reaktionen. Experimentelle Messtechniken wie Röntgenbeugung, Neutronenbeugung (ND), Kontur und ND, digitale Bildkorrelation, thermomechanische Kopplung und Kontur sowie Lochbohrmethoden werden zusammen mit numerischen Simulationen wie der Finite-Elemente-Analyse diskutiert, um die Auswirkungen von RS auf die mechanischen Reaktionen von WAAM-Produkten zu bestimmen. Darüber hinaus wird der Einfluss von thermischen Zyklen, Abkühlungsraten und Ablagerungsstrategien auf die RS-Bildung behandelt. Die Rolle von Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und Ausdehnungskoeffizienten bei der RS-Entwicklung wird ebenfalls berücksichtigt. Indem dieser Bericht einen umfassenden Überblick über aktuelle Forschungstrends und Erkenntnisse bietet, dient er als wertvolle Ressource für zukünftige Untersuchungen und fördert die Weiterentwicklung von WAAM als robuste und effiziente Fertigungstechnologie. Der Bericht unterstreicht auch die Bedeutung interdisziplinärer Ansätze, die experimentelle und numerische Methoden kombinieren, um die komplexen Probleme von RS in WAAM anzugehen und die Leistung und Zuverlässigkeit additiv gefertigter Komponenten zu verbessern.

Schlüsselwörter: Eigenspannung, additive Fertigung mit Lichtbogendraht; Prozessparameter; Messung der Eigenspannung; Bewertung der additiven Fertigung mit Lichtbogendraht



Zitat: Gurmesa, FD; Lemu, HG;

Adugna, YW; Harsibo, MD Rest

Spannungen im Drahtlichtbogenadditiv

Herstellung von Produkten und ihre

Messtechniken: Eine systematische

Überprüfung. Appl. Mech. **2024**, *5*, 420–449.<https://doi.org/10.3390/applmech5030025>

Empfangen: 27. April 2024

Überarbeitet: 15. Juni 2024

Akzeptiert: 27. Juni 2024

Veröffentlicht: 10. Juli 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel

vertrieben unter den Bedingungen und

Bedingungen der Creative Commons

Namensnennunglizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) ist ein fortschrittliches Fertigungsverfahren, das als additive Fertigung (AM) oder 3D-Druck kategorisiert wird. Es ist das unverzichtbare Metallfertigungsverfahren für große und komplexe Komponenten, bei dem Drahtmetalle oder Legierungen als Ausgangsmaterial verwendet werden. Darüber hinaus sind die metallurgischen Eigenschaften von WAAM-gefertigten Teilen, wie chemische Zusammensetzung und Phasenbildung, aufgrund der schnellen Aufbauraten besser als die anderer AM-Techniken [1–3]. Ein wichtiger Aspekt, der diese Technologie noch behindert, ist die Standardisierung und Zertifizierung im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung der Teile, die in der Literatur diskutiert wird [4]. In diesem Zusammenhang gibt es kein

und keine In-situ-Beobachtung und Überwachungstechniken für die sofortige Bildung von Defekten (Restspannungen), die nach ihrer Entstehung behoben werden können, was zu Materialabfall und Zeitaufwand für die Reproduktion führt. WAAM ist eine innovative und vielseitige 3D-Drucktechnologie mit einer umfangreichen Anwendungsvielfalt und mehreren Vorteilen in der Fertigung.

Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Einsatz von AM-Technologien im Bauwesen potenziell die Arbeitskosten senken, Materialabfälle verringern und die Herstellung komplexer Sonderformen ermöglichen könnte, die für Hersteller mit herkömmlichen Bautechniken normalerweise eine Herausforderung darstellen [5–7]. Der WAAM-Sektor ist jedoch an großformatigen Techniken mit hohen AM-Abscheidungsraten zur Herstellung von Komponenten im Größenbereich von Hunderten Millimetern bis hin zu Metern interessiert [8]. Aufgrund seiner kosteneffizienten Herstellung von großformatigen Metallteilen bei hohen Abscheidungsraten erfreut es sich in der industriellen Fertigung großer Aufmerksamkeit [9]. Darüber hinaus schlagen Williams et al. [10] vor, dass WAAM ein geeigneter Kandidat für den Ersatz des bestehenden Herstellungsverfahrens mit massiven Knüppeln oder umfangreichen Schmiedeteilen ist, insbesondere für Komponenten mit geringer bis mittlerer Komplexität.

Im Zusammenhang mit WAAM-Produkten wird das Vorhandensein von RS und Verformungen aufgrund von Prozessparametern zu einem erheblichen Problem, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Qualität, die Kosten und die Präzision des Druckprozesses haben [11–13]. Darüber hinaus stößt WAAM, eine Untergruppe von AM, aufgrund seiner verschiedenen Vorteile bei allen Forschern auf großes Interesse, einschließlich der Fähigkeit, hohe Metallabscheidungsraten zu erreichen und nahezu fertige Formen herzustellen, wobei es mit seinen höheren thermischen Restspannungen (RS) konventionelle Fertigungsmethoden übertrifft [3,14–16]. Es handelt sich um eine aufkommende additive Fertigungstechnik für Metalle, die allmählich einen Wettbewerbsvorteil gegenüber herkömmlichen Schmiede- und Gussmethoden bietet [17]. Abhängig von den Wärmequellen wird das WAAM-Verfahren in drei Kategorien eingeteilt: Schutzgasschweißen, Metalllichtbogenschweißen und Plasmalichtbogenschweißen [18,19].

Die Notwendigkeit und der Zweck dieses Übersichtsartikels besteht darin, Messtechniken für RS in WAAM-Produkten zu untersuchen. Insbesondere ist diese Übersicht wichtig, um ein tiefes Verständnis dafür zu erlangen, wie RS in WAAM-Produkten verteilt ist und wie es mit den Ablagerungsparametern korreliert. In dieser Studie wurden Methoden zur Untersuchung und Messung von RS, die Auswirkungen von RS auf die Materialeigenschaften von WAAM-Produkten und Prozessparameter auf der Grundlage sowohl experimenteller als auch numerischer Analysen erörtert, während die Milderung von RS und die Verfeinerung der Kornstruktur der erzeugten Schichtteile, die auf der Grundlage der experimentellen Methoden verbessert wurden, erörtert wurden. In dieser Übersicht werden die Auswirkungen von Prozessparametern wie Drahtdurchmesser, Scanlänge mit Breite, Höhe (Dicke) der Perle, Lichtbogenstromverhalten [20], Spannung, Fahrgeschwindigkeit, Schweißsequenz (Schweißposition) [21], Arten von Schutzgas und dessen Durchflussrate auf RS berücksichtigt. Außerdem wurden Studien zu den Auswirkungen des Zustands der Zwischenschichtperlenoberfläche und der Zwischendurchgangszeit auf die Ablagerungsform und wie diese die Höhe additiv erhöht, berücksichtigt.

Dieser Bericht konzentriert sich auch hauptsächlich darauf, wie mit WAAM hergestellte RS gemessen werden können, wobei relevante Daten aus der vorhandenen Literatur herangezogen werden. Die Techniken zur Messung von RS durch experimentelle Ansätze sind hauptsächlich Neutronenbeugung [22–24] und Röntgenbeugung (XRD) [25–27], die innerhalb einer begrenzten Schichttiefe von Druckerzeugnissen durchgeführt werden, während die Synchrotron-basierte Röntgenstrahlung mehrere Millimeter in Metalle und Legierungen eindringen kann. Andere Methoden wie die Lochbohr-Dehnungsmessstreifenmethode, die Ultraschallspannungsmessung (USM), die Barkhausenrauschenanalyse, die Schichtentfernung (Tieflochbohren), die Konturmethode und die inkrementelle Lochbohrtechnik wurden eingesetzt, und einige von ihnen wurden noch nicht verwendet. Wichtig ist, dass dieser Bericht explizit diejenigen Methoden beschreibt, die verwendet wurden und diejenigen, die nicht verwendet wurden.

Der Artikel ist wie folgt aufgebaut: Nach diesem Einführungsabschnitt enthält Abschnitt 2 Einzelheiten zu den in der Forschung verwendeten Materialien und Methoden. Darauf folgen die Abschnitte 3 und 4, die jeweils einen Überblick über die Produkte von WAAM bieten und die Auswirkungen von RS auf die mechanischen Eigenschaften von WAAM-Komponenten erörtern.

Abschnitt 5 konzentriert sich auf die Erläuterung der Minderungsstrategien für RS und untersucht praktische Anwendungen. Abschnitt 6 dient als Diskussionsteil und bietet eine detaillierte Analyse und

Interpretation der Ergebnisse. Schließlich fasst Abschnitt 7 den Artikel zusammen, indem er die wichtigsten Punkte und gibt Einblicke in zukünftige Forschungsrichtungen.

2. Materialien und Methoden

Dieser Bericht konzentriert sich auf die wissenschaftliche Literatur der letzten zehn Jahre. die hauptsächlich Quellen umfasst, die zwischen 2015 und 2024 veröffentlicht wurden. Diese Forschung ist basierend auf der Bewertungsstruktur des PRISMA-Statements, dargestellt in Abbildung 1. Umfassende Abdeckung der entsprechenden Forschung zu gewährleisten, zielt die Untersuchung auf die Mängel hauptsächlich auf der RS der WAAM-Produkte basierend auf den vielen Prozess- und Betriebs Parameter. Um das Ziel dieses Übersichtsartikels zu erreichen, konzentriert sich der Bericht auf die neuesten Veröffentlichungen (wie auf Grundlage der in Abbildung 2 angegebenen Daten angegeben, mit thematisch nach bestimmten Themen geordnet. Die Suche wurde auf Quellen beschränkt, die ausschließlich in englischer Sprache veröffentlichte Artikel enthalten. Sie umfasst Artikel in den folgenden wissenschaftlichen Datenbanken: scientific.net, Scopus, Elsevier, Science Direct, Web of Science, Compendia, Google Scholar, IEEE Xplore, ProQuest, ASM Digital Library, SpringerLink, Mendeley und ResearchGate, Semantikwissenschaftler, SCISPACE, PubMed, DOAJ, JSTOR, MDPI, BASE, SAGE, Taylor und Francis und andere. Es verwendete den englischen Ausdruck für die Suche nach Begriffen wie AM-, WAAM-, RS-Messung, Prozessparameteranalyse, Qualitätsbewertung im WAAM, WAAM-Produktdefekte, Charakterisierung der Mikrostruktur in WAAM-Produkten, WAAM Qualitätskontrolle, WAAM RS Untersuchung und häufig genutzte zusätzliche beschreibende Begriffe, die genau mit den Zielen der Überprüfung übereinstimmen. Um dieses Ziel zu erreichen,

Appl. Mech. 2024, 5, FOR PEER REVIEW
statistische Kombinationen und Analysen von Daten aus mehreren Studien wurden verwendet, um allgemeine Schlussfolgerungen.

4

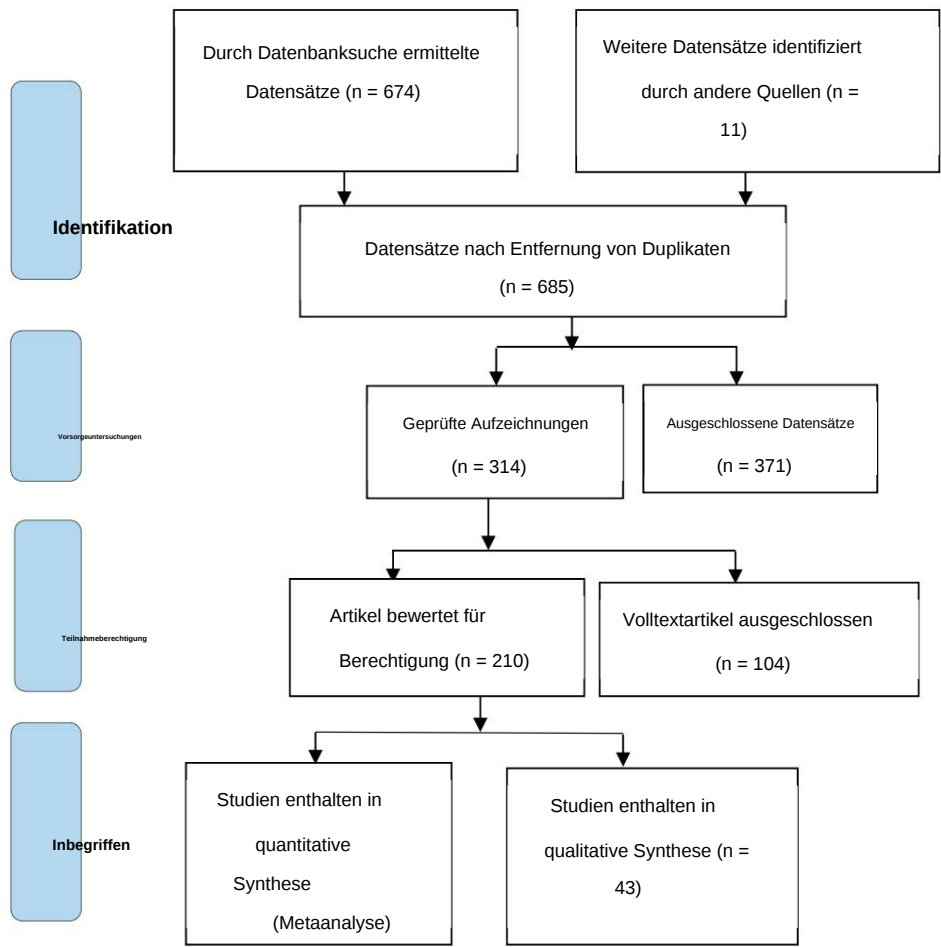


Abbildung 1. Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Screening- und Auswahlprozesses von Studien.

Abbildung 1. Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Screening- und Auswahlprozesses von Studien.

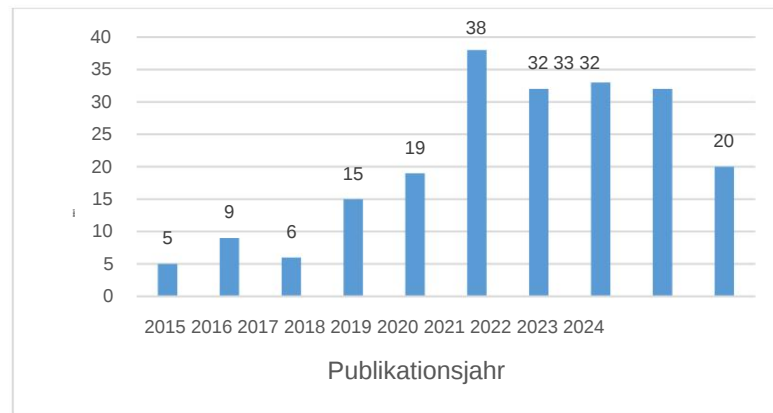


Abbildung 22 Statistische Parameter der Stichprobenartikels WäreAM/RedeAM/ModifacMan/ModifacWing (WAAM) 2024-Veröffentlichung von 2015 bis 2024. Prozessveröffentlichung von 2015 bis 2024.

3. Übersicht über WAAM-Prozesse und -Produkte Die ermittelte Anzahl der Forschungsprojekte bezogen auf WAAM ist in Abbildung 1 dargestellt.

[illegible]

3. Überblick über WAAM von Prozessen und Produkten

Bei dieser Technologie werden große und komplexe Komponenten aus mehreren Materialien mit einer hohen Abscheidungsrate hergestellt, was mit herkömmlichen AM-Methoden nur schwer zu erreichen ist [28,29]. In diesem Fall wird Draht dem Schweißbrenner zugeführt und durch einen Lichtbogen geschmolzen [30]. Entweder Roboter- oder CAD-Portale werden verwendet, um die Bewegung des Druckprozesses Schicht für Schicht einzustellen, bis die gewünschten Komponenten das gewünschte Aussehen haben [10]. Das digitale 3D-Modell dient als Blaupause für diesen WAAM-Prozess. Der Einsatz von Roboterführung bei WAAM ermöglicht eine wirksame Kombination aus Automatisierung und Designflexibilität, gepaart mit effizienten Produktionsprozessen. Das Verhalten der Materialeigenschaften von im Drahtlichtbogenverfahren additiv hergestellten (WAAMed) Produkten wird jedoch sowohl von automatisierten Robotern als auch von CAD-Portalen zum Aufbau der Teile und der damit verbundenen Wärmezufuhr beeinflusst [31].

Grundsätzlich umfassen die Schritte des Druckprozesses bei WAAM-Produkten in jeder Phase viele Aktivitäten, beginnend mit dem CAD-Modell. Diese Schritte skizzieren den allgemeinen Arbeitsablauf zur Herstellung von Komponenten mit WAAM und gewährleisten eine effiziente und zuverlässige Herstellung komplexer Metallteile. Der WAAM-Prozess wird in sechs Hauptphasen unterteilt, von der CAD-Dateivorbereitung über die Komponententrennung bis hin zur Nachbearbeitung [10]. Die Verfahrensplanungsschritte zur Herstellung von Komponenten mit WAAM sind in Abbildung 3 dargestellt.

Im Wesentlichen ist die RS in WAAM-Komponenten aufgrund der verschiedenen Prozessparameter inhärent, die die mechanischen Eigenschaften, die Lebensdauer und die strukturelle Integrität der Teile negativ beeinflussen können. Darüber hinaus ist die Messung der RS in WAAM-Strukturen aufgrund des zeitaufwändigen Prozesses und der mangelnden Auflösung eine Herausforderung [32]. Die Bedeutung des Verständnisses der RS in WAAM-Produkten ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität, um vorzeitigen Ausfällen vorzubeugen und die mechanische Leistung der Produkte sicherzustellen [18,33]. Die Eigenschaften der aufgetragenen Materialien können sich während des WAAM-Prozesses ändern und die Entwicklung der RS beeinflussen [34], was auf die Wärmeeinflusszone (WEZ) in der Nähe des Schweißbades zurückzuführen ist [35]. Die RS-Messung hilft auch beim Verständnis, der Vorhersage und der Korrektur von Maßungenauigkeiten, die durch Verzerrungen verursacht werden, und stellt sicher, dass WAAM-Produkte die gewünschten Toleranzen einhalten [36,37]. Ebenso ist eine genaue Kenntnis der RS wichtig, um die Produktqualität zu verbessern und sicherzustellen, dass WAAM-Komponenten ihre Leistung erfüllen. Durch die Reduzierung der

und die Lebensdauer teurer Geräte und Maschinen zu verlängern [40,41]. Darüber hinaus ist es sehr gut geeignet, große und/oder komplexe, kostengünstige Metallstrukturen zu bauen, vor allem aufgrund seiner überlegenen Abscheidungsrate [3,7,30,42–47]. WAAM eignet sich gut für die Herstellung großer Metallteile und bietet unter verschiedenen AM-Methoden Potenzial für den Einsatz in der Bauindustrie [20]. Die Hauptvorteile dieser Fertigungsmethoden sind ihre Produktivität, ihre Eignung für industrielle Anwendungen und die Fähigkeit, das Risiko von Defekten, Ausfällen, Nacharbeit und/oder Neufertigung zu verringern. Es kann die Produktionskosten senken und den Materialabfall im Vergleich zu anderen AM-Techniken [48,49]. Minimieren Sie Materialabfall [36,38,39].

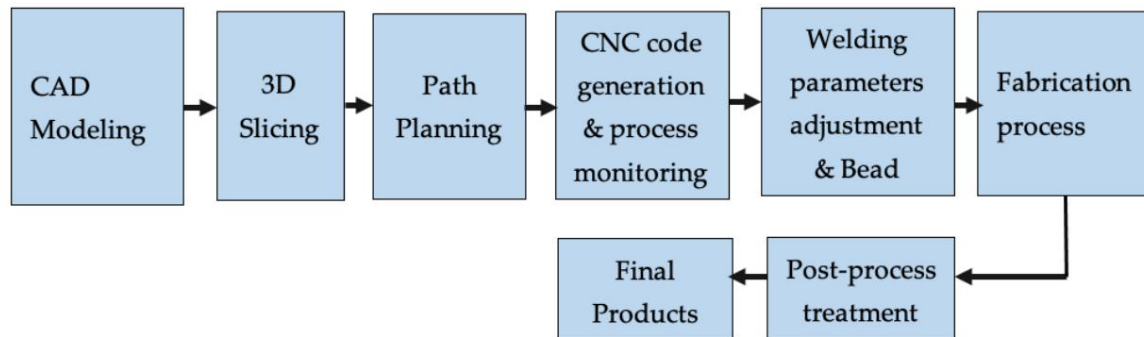


Abbildung 3. Schritte, die für WAAM zum Herstellen von Komponenten verwendet werden.

WAAM kann zur Reparatur und Wiederherstellung beschädigter oder verschlissener Komponenten eingesetzt werden und die Lebensdauer teurer Geräte und Maschinen verlängern [40,41]. Darüber hinaus ist es Robotersysteme spielen eine wichtige Rolle in WAAM-Prozessen, da sie vielseitig einsetzbar sind und große und/oder komplexe, kostengünstige Metallstrukturen bauen können, vor allem und Automatisierung, die eine präzise Kontrolle der Abscheidungsparameter und der Kapazität aufgrund der überlegenen Abscheidungsrate ermöglichen [3,7,30,42–47]. WAAM eignet sich gut für die Erstellung zur Handhabung komplexer Geometrien [50,51]. Diese Systeme enthalten fortschrittliche Sensoren und große Metallteile und bieten Potenzial für den Einsatz in der Bauindustrie unter anderem in verschiedenen AM-Verfahren [20]. Die Hauptvorteile dieser Fertigungsverfahren sind ihre Produktivität, Eignung für industrielle Anwendungen und die Fähigkeit, Material zu reduzieren Abfall im Vergleich zu anderen AM-Techniken [48,49].

3.1. Ein Robotersystem für WAAM

Robotersysteme spielen eine wichtige Rolle in WAAM-Prozessen und sorgen für Vielseitigkeit und Automatisierung, die eine präzise Kontrolle der Abscheidungsparameter und der Kapazität ermöglichen zur Handhabung komplexer Geometrien [50,51]. Diese Systeme enthalten hochentwickelte Sensoren und Automatisierungstechnologie zur Überwachung und Anpassung der Druckparameter in Echtzeit und gewährleistet gleichbleibende Qualität und präzise Ablagerung von Materialien. Die in [52] berichtete Studie konzentrierte sich auf zwei WAAM-Parameter, nämlich (1) die Geschwindigkeit der Drahtzufuhr und (2) die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters und untersuchten ihre Auswirkungen auf die metallurgischen, dimensional Stabilität und mechanische Eigenschaften von Materialien. Die Studie umfasste die Herstellung von feinwandigen 308L Edelstahlteilen mit dem WAAM-System, durchgeführt in zwei Schritte. Zunächst wurde die Auswirkung von Schweißstrom, Spannung und Vorschubgeschwindigkeit auf die Form der einzelnen Schweißraupen untersucht und diese Faktoren für die Konstruktion feinabgestimmt. von 308L Stahlwänden. Zweitens wurde eine umfassende Analyse des Einflusses durchgeführt der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften der Wände aus WAAM 308L-Stahl, was zu verbesserten mechanischen Eigenschaften führt, die für industrielle Anwendungen geeignet sind. Roboter Komponenten für den Druckprozess mit dem Eindruckpfad (Abbildung 4a), dem Aufbau für Das Experiment (Abbildung 4b) und der Pfad des Ablagerungswerkzeugs sind in Abbildung 4 dargestellt.

Genetische Algorithmen (GAs) werden verwendet, um den Parameterauswahlprozess zu verbessern in Near-Net-Shape-Abscheidung zur Minimierung von Hohlräumen und überschüssigen Substanzen im WAAM [53]. Ein unterbrechungsfreier Abscheidungsprozess wird durch die Überprüfung überlappender Bedingungen innerhalb der Roboterwechselzonen, um Kollisionen zu vermeiden [54,55]. Ebenso ist eine kontinuierliche Der Ablagerungsprozess wird sorgfältig geplant, indem Bereiche überprüft werden, in denen sich Roboter überschneiden könnten oder sich in Robotertauschzonen nahe kommen. Diese sorgfältige Planung wird durchgeführt, um zu verhindern Kollisionen zwischen den Robotern werden vermieden, was einen reibungslosen und sicheren Betrieb gewährleistet. Führung wird auf die gewünschte Schweißgeschwindigkeit festgelegt, die die Wärmeansammlung beeinflusst und führt zu Variationen des RS in den Produkten, sowie die Roboterführung zu Überwachung des in Abbildung 4 beschriebenen Prozesses im WAAM. Der Einsatz von Pfadplanung war schlug vor [53,54], eine Perlenüberlappung einzubauen und die innere Strukturstabilität zu erhöhen durch Minimierung der Höhe; letztendlich beeinflusst es den RS in WAAM-Produkten.



Im Vergleich zur Messung von RS mit anderen herkömmlichen Methoden ist die Messung von RS mit WAAM Produkte sind aufgrund der komplexen thermischen Vorgeschichte, der mikrostrukturellen Heterogenität, der geometrischen Komplexität und der Notwendigkeit spezieller Messtechniken anspruchsvoller . Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert eine Kombination aus fortschrittlichen experimentellen Methoden, genaue Kalibrierungsstandards und robuste Modellierungs- und Simulationswerkzeuge. Verständnis und die Überwindung dieser Herausforderungen ist entscheidend für die Gewährleistung der strukturellen Integrität und Leistung von WAAM-Komponenten in praktischen Anwendungen. Im Allgemeinen gibt es zwei Messmethoden Techniken der RS für WAAM-gefertigte Teile, nämlich experimentelle und numerische Methoden, die in den folgenden Unterabschnitten überprüft und berichtet werden.

3.3.1. Experimentelle Methoden zur RS-Messung in WAAM-Teilen

In mehreren Übersichtsartikeln aus unterschiedlichen Literaturbereichen wurde die Untersuchung von RS in WAAM-Produkten unter Verwendung verschiedener Techniken untersucht [71]. Zunächst konzentrierten sich diese Studien auf die Spannung in den Mittellinien des Querschnitts der allgemeinen Balkentheorie und führten eine theoretische Analyse der Spannungsentwicklung entlang dieser Linien durch, ohne eine bestimmte Spannungsverteilung anzunehmen, die als RS betrachtet wird. Anschließend wurde die Forschung auf die Verbesserung von Prognosemodellen für Verzug auf Grundlage der allgemeinen Balkentheorie ausgeweitet [72]. Andere Techniken umfassen Neutronenbeugung (ND) [22–24,73], Röntgenbeugung (XRD) [25–27,74], die Konturmethode [13,75–77], Bohrlochmethoden [31], das thermomechanische Kopplungsmodell [78], digitale Bildkorrelation (DIC) [79], Tieflöcherbohren (DHD) [80], Operando -Synchrotron und Synchrotron-Röntgenbeugung (SXR) [81,82]. Die Auswahl der Methoden hängt von Elementen wie Material, Bauteilgröße, Geometrie und der für die Messung erforderlichen Genauigkeit ab. Eine genaue Modellierung des Prozesses ist entscheidend für das Verständnis und die Kontrolle von RS. Beispielsweise wird die XRD-Analyse verwendet, um die in den dünnen Streifen und Ferriten von Bainit beobachtete Korngröße zu identifizieren, die durch thermische Zyklen entstehen, während Farbpenetrationstests verwendet werden, um Oberflächendefekte und Korrosionsverhalten von WAAM-Komponenten zu untersuchen [65,66,68,83].

Die Wahl der geeigneten Messmethode wird von Faktoren wie Zugänglichkeit, Auflösung, Genauigkeit und der gewünschten Spannungseindringtiefe bestimmt. Tabelle 1 listet die für die RS-Messung an verschiedenen Materialien verwendeten Methoden zusammen mit der Zusammenfassung der experimentellen Studien auf. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind die am häufigsten verwendeten Methoden laut Literaturübersicht XRD, ND, digitale Bildkorrelation (DIC), SXR, Schichtabtrag (Tieflöcherbohren), die Konturmethode und die inkrementelle Lochbohrmethode.

Tabelle 1. Zusammenfassung der experimentellen Methoden zur Messung von Eigenspannungen (RS).

Methoden	Materialien	Ergebnisse	Referenzen
ND	316L Edelstahl	Der Einfluss der Prozessparameter auf RS ist in der Schmelzzone kaum spürbar.	[22]
	Fe3Al-Legierung	Große säulenförmige Körner führen zu Anisotropie und RS ist in Aufbaurichtung zugbelastet, und die Zug-Druck-Kurve steigt vom Anfang bis zum Ende des Ablagerungswegs progressiv an.	[23]
	AA6061	RS weist auf das Auftreten größerer Zugspannungen in den konstruierten Teilen hin, während das Substrat weniger Druckspannungen aufweist. Bei den mechanischen Eigenschaften wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.	[59]
	2319 Aluminiumlegierung	RS entlang der Baurichtung in der abgelagerten Wand ist Zugspannung, die bis zum Boden reicht. Die zwischen den Lagen gewalzten Wände reduzierten RS, um die Festigkeit in Längsrichtung zu erhöhen.	[24]
	Fe3Al	RS und Verzerrungen, die durch den WAAM-Prozess entstehen, sind ein großes Problem, da sie nicht nur die Teiletoleranz beeinflussen, sondern auch während des Betriebs zu vorzeitigem Ausfall der Endkomponente führen können.	[83]
	Edelstahl 304L	Die Änderung des RS in der Probe nach Einführung einer neuen Ablagerung. Die Längsspannung war überwiegend Zugspannung und erreichte ihren Höhepunkt an der Grenze zwischen dem Grundmaterial und den Schichten, wo die thermische Belastung einwirkte.	[84]
	Inconel 625	Messungen zeigten, dass sich in den funktional abgestuften Materialien (FGM) mit direkter Schnittstelle ein geringerer RS bildete als in den FGM mit glattem Gradienten.	[85]
Kontur und ND	Ti-6Al-4V-Legierung, Edelstahl	Die Spannung in der Grundplatte variiert RS. Die Gitterparameter waren in der Grundplatte für ND-Messungen nicht gültig. Zur Korrektur der Referenzproben wurde ein spannungsfreier Ausgang ausgeschnitten .	[73,74,86]

Tabelle 1. Fortsetzung

Methoden	Materialien	Ergebnisse	Referenzen
Röntgenbeugung	Legierung C-276	Die Amplitude der Zug-RS wurde in der Bewegungsrichtung im Vergleich zur Aufbaurichtung wahrgenommen. Die Restspannung im Gitter zeigt die RS im Material. Die größere Amplitude der Druck-RS wurde in der Aufbauachse gefunden.	[87]
	Al-5356-Legierung	Die Höhe des Strahls kann sowohl das Niveau als auch das Muster der Längs-RS im Substrat und im Strahl beeinflussen. Diese Variation betrifft hauptsächlich die Quer-RS im Substrat und hat nur minimalen Einfluss auf den Strahl selbst.	[88]
	G 79 5 M21 Mn4Ni1,5CrMo (EN ISO 16834-A) [89]	RS, Härte und Mikrostruktur werden durch Schweißparameter, Geometrie und Komponentendesign beeinflusst. Durch Wärmezufuhr verringert sich der Zugfestigkeits-RS, was zu einer ungünstigen Kornstruktur und mechanischen Reaktion führt.	[25]
	SS308L austenitischer Edelstahl (SS)	Ansammlung von Druck-RS aufgrund erhöhter Wärmezufuhr und schneller Abkühlungsgeschwindigkeit. Näher an der Schweißbasis traten größere Spannungen auf als in anderen Bereichen.	[26]
	Al-6Cu-Mn-Legierung	Der Anstieg von RS weist darauf hin, dass der kritischste Bereich der Probe in der Nähe des Substrats liegt, wo erhebliche Zugspannungen in der Nähe der Streckgrenze des Materials vorherrschen.	[27]
	Klasse 91 (modifiziert 9Cr-1Mo)-Stahl	RS variiert die Eigenschaften des Materials und seine mikroskopische Struktur WAAMed ferritisch/martensitisch (FM). Die Wärmebehandlung des ursprünglich hergestellten Stahls hat seine anisotropen Eigenschaften nicht entfernt.	[80]
DIC	Inconel 625	Wärmeprozesse nach der Behandlung können die Korrosionsbeständigkeit verbessern und RS verringern. Messungen zeigten, dass der sanfte Gradientenansatz sekundäre Phasen wie die d-Phase (Ni3Nb) und Carbide erzeugte, die bei der Direktschnittstellenmethode fehlten.	[85,90]
	Weichstahl (AWS ER70S-6)	Mittels DIC wurde die Biegeverzerrung der WAAM-Komponenten beim Lösen aus den geklemmten H-Profilen überwacht. Aus der beim Lösen der Klemmen beobachteten Dehnungsverteilung wurden Restspannungen abgeleitet .	[77,91]
	Weichstahl (G3Si1) und austenitischer Edelstahl (SS304)	RSs stehen im Weichstahlabschnitt unter Druck und im Abschnitt aus austenitischem Edelstahl (SS) unter Zug. Diese Spannungen schwanken über die Dicke aufgrund unterschiedlicher Abkühlungsraten auf den Innen- und Außenflächen.	[78]
Lochbohren	Ti-6Al-4V	Die Korngröße nahm nach der Ultraschall-Aufpralltherapie ab und der RS der gefertigten Teile in WAAM nach der UIT verbesserte sich.	[76,92]
Thermomechanische Kopplung & Kontur	Rostfreier Stahl (SS) SUS308LSi	RS wirkt als Zugspannung in den Schichten, die an die Oberseite der Oberfläche grenzen, als Druckspannung in den Schichten nahe der Substratoberfläche und als Zugspannung in der Nähe der Unterseite des Substrats.	[13]

Die in Tabelle 1 aufgeführten RS-Messtechniken können im Allgemeinen in drei Kategorien eingeteilt werden : (1) zerstörungsfrei; (2) halbzerstörungsfrei; und (3) zerstörend werden in Tabelle 1 mit kurzen Beschreibungen aufgeführt, wobei einige der Techniken in früheren Untersuchungen nicht angewendet wurden. Zerstörungsfreie Techniken (NDT) wie XRD und ND sind gängige hochpräzise Methoden und werden häufig bevorzugt, um RS in WAAM-Komponenten zu messen. Die Wahl der Methoden hängt von grundlegenden Faktoren wie Material, Komponentengröße, Geometrie und dem für die Messung erforderlichen Genauigkeitsgrad ab.

Es ist klar, dass von den RS-Messtechniken ND von Forschern aufgrund seiner zerstörungsfreien Natur, die zur Aufrechterhaltung der Echtheit der Teile beiträgt, häufiger verwendet wurde, während die Röntgenbeugung die zweite verwendete Methode ist. Das Kreisdiagramm in Abbildung 5 stellt die Hierarchien der Techniken dar, die zur Messung von RS in WAAM-Produkten verwendet werden. Die elastische Dehnung in RS wird aus der Änderung des Gitterabstands berechnet [23]. In diesem Fall wird jede Span

10



RS stehen mathematische Modelle im Hintergrund. In der numerischen Analyse von RS stehen mathematische Modelle, die oft auf Hinter der numerischen Analyse von Finite-Elemente-Analyse (FEA) oder andere rechnerische Methoden und die gleichen Verfahren Finite-Elemente-Analyse (FEA) werden durchgeführt, um RS im WAAM-Prozess zur Simulation thermischer und mechanischer Prozesse zu bestimmen, die während der additiven Fertigung auftreten. Diese Modelle berücksichtigen Materialeigenschaften, mechanische Prozesse, die während der additiven Fertigung auftreten. Diese Modelle berücksichtigen Materialeigenschaften, mechanische Prozesse, die während der additiven Fertigung auftreten. Prozessparameter [68] und Randbedingungen zur Simulation der Ablagerung, während Wärme- Prozessparameter [69] und Randbedingungen zur Simulation der Ablagerung, während Wärme- Messtechniken erwähnen den höchsten Anteil und/oder den niedrigsten Anteil Messtechniken erwähnen den höchsten Anteil und/oder den niedrigsten Anteil Übertragung sowie nachfolgende Kühlprozesse. Durch Lösen der maßgeblichen Gleichungen für die Wärmeübertragung sowie nachfolgende Kühlprozesse. Durch Lösen der maßgeblichen Gleichungen für Übertragung, numerische Simulationen sagen die Entwicklung von RS innerhalb des Teils voraus. In ähnlicher Weise sagen numerische Simulationen die Entwicklung von RS innerhalb des Teils voraus. In ähnlicher Weise sagen numerische Simulationen die Entwicklung von RS innerhalb des Teils voraus. In ähnlicher Weise sagen numerische Simulationen die Entwicklung von RS innerhalb des Teils voraus.

numerische Analysen untersuchen, wie sich Ablagerungsmuster und Reizesatz entwickeln und auf RS-Bau auswirken. Die numerischen Analysen untersuchen, wie sich Ablagerungsmuster und Reizesatz entwickeln und auf RS-Bau auswirken. Die numerischen Analysen untersuchen, wie sich Ablagerungsmuster und Reizesatz entwickeln und auf RS-Bau auswirken. Die numerischen Analysen untersuchen, wie sich Ablagerungsmuster und Reizesatz entwickeln und auf RS-Bau auswirken.

Auf der WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Auf der WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Auf der WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Auf der WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse

Verzug in WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Verzug in WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Verzug in WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse Verzug in WAAM-Komponenten [93], Tabelle 2 gibt einen Überblick über die numerische Analyse

Techniken, Ausgangsmaterialien und ihre Ergebnisse bei Verwendung im WAAM-Prozess. Techniken, Ausgangsmaterialien und ihre Ergebnisse bei Verwendung im WAAM-Prozess. Techniken, Ausgangsmaterialien und ihre Ergebnisse bei Verwendung im WAAM-Prozess. Techniken, Ausgangsmaterialien und ihre Ergebnisse bei Verwendung im WAAM-Prozess.

Tabelle 2. Übersicht über die gemeldete numerische Analyse mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM), Werkzeuge und Materialien im Zusammenhang mit WAAM-Technologien.

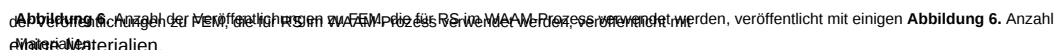
Tabelle 2. Übersicht über die gemeldete numerische Analyse mit der Methode der finiten Elemente (FEM), Werkzeuge und

FEM Software	Material	Materialzusammenfassung	Art.-Nr.
ANSYS 2019	B91 Stahl (ER90S-B91 Stahl)	Eine thermomechanische Bewertung von WAAM B91 Stahl wurde durchgeführt B91 Stahl (ER90S-sequenziell zur Bewertung der Variation der Restspannungsbewertung von B91 Stahls WAAM B91 wurde sequenziell durchgeführt, um die Variation der Eigenspannung zu bewerten	[11]
Simufact Additive 2023.2	Stähle	Die dynamischen Temperaturänderungen, Veränderungen, Spannungsakkumulationen und Verformungen sind für Anwendungen mit hohen Temperaturen von großer Bedeutung. Die dynamischen Temperaturänderungen, Veränderungen, Spannungsakkumulationen und Verformungen sind für Anwendungen mit hohen Temperaturen von großer Bedeutung.	[40]
ABAQUS 2019	Aluminiumlegierung	Das Ablagerungsmuster und die Bewegungsgeschwindigkeit haben einen Einfluss auf RS und Verzug in WAAM-Teller. Ergebnisse thermomechanischer FE-Simulationen zeigen, dass das Ablagerungsmuster einen entscheidenden Einfluss auf RS und Verzug hat. Das Ablagerungsmuster beeinflusst die thermischen Gradienten in der nächsten RS- und Verzugswerten. Verzug Simulationen zeigen, dass das Querkorn-Ablagerungsmuster zu einer Verringerung der Spitzentemperatur und thermischer Gradienten in der Ablagerung, wodurch RS reduziert wird. Verwendet wurde ein umfassendes 3D-Modell der transienten Wärmeübertragung zur Berechnung der Temperaturverteilung und des Temperaturgradienten im WAAM-Prozess für verschiedene Prozessparameter, die zu RS führen. Die abgeleiteten Temperaturdaten wurden in einem mechanischen Modell verwendet, um RS und Verzerrung vorherzusagen.	[94]

Tabelle 2. Fortsetzung

FEM Software	Material		Art.-Nr.
ABAQUS 2010	Inconel 718	Zusammenfassung: Ein umfassendes 3D-Modell zur transienten Wärmeübertragung wurde verwendet, um die Temperaturverteilung und den Temperaturgradienten im WAAM- Prozess für verschiedene Prozessparameter zu berechnen, was zu RS führt. Die abgeleiteten Temperaturdaten wurden in einem mechanischen Modell verwendet, um RS und Verzerrung vorherzusagen.	[95]
	Kohlenstoffstahl	Die Modellergebnisse zeigen, dass mit der Anzahl der abgelagerten Schichten die Maximaltemperatur steigt, was zu RS führt, während die durchschnittliche Abkühlungsrate abnimmt.	[96]
	Austenitischem Edelstahl (304) und kohlenstoffarmer Stahl (A36)	Durch systematisches Ändern jeweils einer mechanischen Eigenschaft konnten wir den Einfluss jeder einzelnen Eigenschaft auf die RS-Bildung in unterschiedlichen Schweißnähten isolieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Längseigenspannung sowohl bei gleichen als auch bei unterschiedlichen Schweißnähten innerhalb der Schweißzone um einen Betrag verringert werden kann, der der Spannung entspricht, die durch die angewandte mechanische Zugkraft verursacht wird, sobald die Spannkraft nach dem Abkühlen freigegeben wird.	[97]
	API X65 Stahl	Die thermischen Bedingungen und der RS werden präzise vorhergesagt, um die Form, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften der Schmelzzone in der Unterpulverschweißverbindung regulieren zu können.	[98]
ABAQUS 2019	Baustahl ER70S-6-Kabel	Die Restspannung und Verformung von zwei umfangreichen Konstruktionen wurden untersucht. Dabei ergaben sich äußerst konsistente numerische Ergebnisse und eine positive Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.	[99]
	EH36 Stahl	Die Auswirkung der Scangeschwindigkeit auf thermische Profile und RS zeigt, dass höhere Scangeschwindigkeiten zu niedrigeren Spitzentemperaturen und höheren Abkühlungsraten führen und somit zu einer Erhöhung des Volumenanteils von Martensit innerhalb der Ablagerung.	[100]
	Aluminiumlegierung	RS und Verformung wurden mithilfe der Methode der bewegten Wärmequellen (MHS) und der Methode der segmentierten Temperaturfunktion (STF) berechnet.	[101]
	Ti-6Al-4V, S355JR-Stahl und AA2319	Reduzierte Profilradien der Walze eliminieren effektiv fast alle Zugbelastungen in der Nähe der Oberflächen.	[32]
MSC. März 2021	Y309L	Erhöhte RS werden innerhalb der Abscheidungsschichten und auch in der Mitte des Substrats erzeugt.	[102]
MSC.Marc 2014.2.0	Schweißzusatz G3Si1	Die Simulation und Validierung hinsichtlich Geometrie- und Mikrostrukturvariationen innerhalb der Schweißlagen wurde mit RS Reality und Simulation unter Verwendung der Messträgheit der Thermolemente durchgeführt.	[103]
	S316L	Die Abweichungen im RS werden sowohl von der schwankenden Temperaturverteilung während der Gefrierphase als auch von den Kräften beeinflusst, die nach dem Abkühlungsprozess auf die WAAM-Struktur einwirken.	[104]
COMSOL-5.4 2018	304 Edelstahl	Mittels großflächiger Bilder und Hochgeschwindigkeitsaufzeichnungen der errichteten Wand wurde die Genauigkeit der Messungen des Schmelzbades überprüft und die Form der Ablagerung ermittelt, die in Teilen über die RS entschied.	[105]

Drexler et al. [106] befassten sich mit der numerischen Modellierung von RS und Verzerrungen, die in WAAM-Teilen mit Webablagerung auftreten. Numerisch prognostizierte thermische Spannungen über verschiedene Schweißschichten hinweg wurden für die anschließende experimentelle Auswertung in [107] dargestellt. In ähnlicher Weise generierte die Finite-Elemente-Simulation (FE) zusammen mit der thermischen Analyse geeignete Pfade durch Segmentierung eines 3D-Oberflächenscans des vorgesehenen Reparaturbereichs [41]. Wie im Kreisdiagramm in Abbildung 6 dargestellt (siehe auch Tabelle 2), wurde der Großteil der numerischen Analyse von RS mit ABAQUS 2010 und 2019 untersucht.



Forscher und Ingenieure können das RS-Verhalten in WAAM charakterisieren und verstehen. Forscher und Ingenieure können das RS-Verhalten in Komponenten durch den Einsatz experimenteller Methoden und der Finite-Elemente-Analyse (FEA) charakterisieren und verstehen, was zu einer verbesserten Prozesskontrolle, Teilequalität und Produktleistung führt. Viele Parameter (FEA), was zu einer verbesserten Prozesskontrolle, Teilequalität und Produktleistung führt. Viele Faktoren, die den RS in WAAM-Teilen beeinflussen können, werden in [18] diskutiert, während ein Profil untersucht wird, das die Gesamtheit der Parameter, die RS erzeugen und in [108] berichteten Materials, Abscheidungsparameter [109], Wärmeeintrag, Zwischenschichttemperatur, Wand wurde untersucht und in [108] berichtet. Abscheidungsparameter [109], Wärmeeintrag, Zwischenschicht und die Dauer der Zwischenschichtpausen waren wichtige Faktoren, die die Bildung beeinflussen. Die Porenverteilung in Aluminium-5183-Legierungen beeinflussten, die im WAAM-Prozess gedruckt wurden [110]. Bildung und Verteilung von Poren in Aluminiumlegierungen 5183, die im WAAM-Verfahren gedruckt wurden. Ebenso bedeuten unterschiedliche Schweißgeschwindigkeiten, bei denen Defekte sichtbar werden, Prozess [110]. Ebenso gibt es unterschiedliche Schweißgeschwindigkeiten, bei denen sich Defekte bemerkbar machen, sowohl die Drahtvorschubgeschwindigkeit als auch die Vorschubgeschwindigkeit im Schweißprozess [111]. Im Gegensatz dazu implizieren auch die Drahtvorschubgeschwindigkeit und die Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen [111]. Im Gegensatz dazu wurde festgestellt, dass die Dicke (Bett oder Grundplatte) einen großen Einfluss auf die RS-Verteilung hat. Es wurde festgestellt, dass die Dicke des Substrats (Bett oder Grundplatte) einen großen Einfluss auf die RS-Distanzhöhe hat. Aufgrund des Substrats ist die Zugfestigkeit RS so hoch wie der Wert des Materials. Verteilung entlang der Beschichtungszone. Aufgrund des Substrats wurde in [112] eine Zugfestigkeit von bis zu dem Wert der Streckgrenze diskutiert. Die RS-Verteilungen sowohl in Längs- als auch in die Streckgrenze des Materials wurde in [112] diskutiert. Die RS-Verteilungen in Längs- und Querrichtung deuten darauf hin, dass sich die Längsspannungen deutlich von der Druck- In Längs- und Querrichtung ist zu erkennen, dass sich die Längsspannungen während der Abscheidung deutlich von den Spannungen in der Grundplatte verschieben [113].

Tuer Gralplapate verschneiden [113].

Druckbelastung während der Abscheidung zu Spannungen in der Grundplatte [113].

Darüber hinaus induziert ein dickeres Substrat einen größeren RS als ein dünneres Substrat. Ein Substrat darüber hinaus induziert ein dickeres Substrat einen größeren RS als ein dünneres Substrat. Ein Substrat , das für den Schmelzbadaufguss (Druckprozess) verwendet wird, kann aus einem 2xxx die für das geschmolzene Bad verwendet wird (Druckverfahren) kann aus einer 2xxx Aluminium-Aluminiumlegierungsplatte für Aluminiumlegierungsrohstoff hergestellt werden [114,115]. Im direkten 3D-Druck num-Legierungsplatte für Aluminiumlegierungsrohmaterial [114,115]. Beim direkten 3D-Druckverfahren ist die Position der gedruckten Probe für die Qualität der gedruckten Teile von Bedeutung [64].

Die Position der gedruckten Probe ist für die Qualität der gedruckten Teile von Bedeutung [64]. Dies liegt daran, dass die Ausdehnung der Isothermen den Boden einer dicken Platte nicht erreicht, was zu weil die Ausdehnung der Isothermen nicht bis zum Boden einer dicken Platte reicht, was zu einer erhöhten Wärmestauung führt [116,117]. Die Technik zur Kontrolle der inhärenten RS und erhöhte Wärmeansammlung [116,117]. Die Technik zur Kontrolle inhärenter RS- und Verzerrungsverzerrungen steht bei den WAAM-Produkten vor zahlreichen Herausforderungen, was zu unvorhersehbaren tionen stehen bei den WAAM-Produkten vor zahlreichen Herausforderungen, die zu unvorhersehbarer struktureller Integrität der gedruckten Teile führen. Aus diesem Grund wird in der Literatur festgestellt, dass turale Integrität in den gedruckten Teilen. Aus diesem Grund wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass verschiedene Prozessparameter wie Drahtvorschubgeschwindigkeit, Bewegungsgeschwindigkeit, Wärmezufuhr, hinterlegter Pfad Prozessparameter wie Drahtvorschubgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Wärmeeintrag, aufgetragene Bahnlänge, Länge, Breite und Tiefe (Dicke) der gedruckten Komponenten haben Auswirkungen [46,55,118]. Die Breite und Tiefe (Dicke) der gedruckten Komponenten haben Auswirkungen [46,55,118]. Die Hauptdefekte, die in Metallfertigungs-komponenten aufgrund dieser Parameter induziert werden, sind Defekte, die durch diese Parameter im WAAM-Prozess in Metallfertigungs-komponenten verursacht werden, sind RS, Deformierung, Porosität, Risse, Rissart.

Defekte, die durch diese Parameter im WAAM-Prozess in Metallfertigungs-komponenten verursacht werden, sind RS, Deformierung, Porosität, Risse, Rissart.

Somit sind die häufigsten Faktoren für Defekte bei WAAM-Produkten der Prozess Verformung. Die häufigsten Ursachen für Mängel bei WAAM-Produkten sind also die Prozessparameter , die die Akzeptanz dieser Technologie einschränken [119–123]. In anderer Hinsicht Parameter, die die Akzeptanz dieser Technologie einschränken [119–123]. In anderer Hinsicht Humpfen die häufigsten Defekte bei WAAM-Produkten, während die Breite und stabiler Schnitt die häufigsten Defekte bei WAAM-Produkten, während die Haupteinflüsse von Ablagerungshöhe, die wiederum die Depositionshöhe, -breite und der stabilen Schicht führen zu einem Wärmeeintrag gemäß den angegebenen Werten [111].

Längere Ablagerungsbedingungen beeinflussen die Temperatur zwischen den Schichten, die Höhe der Ablagerung und die Auswirkung der Verarbeitungsbedingungen, wenn die Zwischenschichttemperatur zu Beschichtungsstörungen der Substrate zeigte die löhnende komprimierende RS, während die 12,124,125]. Die Abwesenheit des Substrats wie eine Lösung des Druckausbaus Systemlagerungsprozesse. Das Ablagerungssystem hat zu dem Distanzmessung ist in das WAAM-Paten, um das WAAM-System wieder zu überprüfend, mit zentraler Ablagerung, Plan und der Prüfstandung wurden auch sachliche Ergebnisse der Fehlervolumenvermessung während der Prozesse. Mikrometernmessungen per Hand und Laserlinien-Prozessen auch nach der Ablageschlusschichtabklärung verwendet. WAAM umfasst eine Vielzahl

Spannung, Strom, Vorschubgeschwindigkeit und Schichthöhe [128]. Diese Parameter bestimmen verschiedene Aspekte des Abscheidungsprozesses, darunter Wärmezufuhr, Abkühlrate und thermische Gradienten. Das Verständnis, wie Änderungen dieser Parameter den RS beeinflussen, ist entscheidend für die Erzielung optimaler WAAM-Produktleistungen [111]. Die Auswahl der Parameter für die Perlengeometrie im WAAM-Prozess ist erforderlich, um überschüssiges Material zu optimieren und die in den mehreren Schichten der Perlenablagerungen entstehenden Hohlräume zu minimieren . Prozessparameter und andere Faktoren, die den RS in WAAM-Komponenten beeinflussen, sind in Tabelle 3 zusammengefasst und aufgeführt .

Tabelle 3. Faktoren, die RS bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen beeinflussen.

Prozessparameter und Andere Faktoren	kurze Beschreibung	Referenzen
Werkstoffeigenschaften: Schweißbarkeit der Werkstoffe	Nicht alle Materialien sind gleichermaßen für WAAM geeignet. Der Prozess erfordert oft Materialien mit guten Schweißigenschaften, wie z. B. geringe Rissanfälligkeit und gute Schmelzeigenschaften . Beispielsweise können die Wärmeleitfähigkeit, der Wärmeausdehnungskoeffizient und die Phasenumwandlungen der Materialien Einfluss auf die induzierte RS haben.	[13,34,129,130]
Abscheidungsleistung: Lichtbogenstrom und -spannung	Beim WAAM-Prozess ist die Kontrolle der Wärmezufuhr entscheidend, um Überhitzung, Verformung und metallurgische Probleme wie übermäßiges Kornwachstum oder Phasenumwandlungen zu vermeiden. Schwankungen bei der Wärmezufuhr verändern die Schweißbarkeit der Materialien und führen zu Folgeschäden durch RS.	[25,65,66,114,130,131]
Geschwindigkeit: Drahtvorschubgeschwindigkeit, Schweißgeschwindigkeit und Abschmelzleistung	Schnelle Ablagerung und Abkühlung können zu erhöhtem RS führen, insbesondere in der Nähe der Ablagerungszone. Die schnelle Erstarrung und die höhere Abscheidungsrate können zu thermischen Gradienten und unterschiedlichen Abkühlungsraten führen, was zu höheren Zugfestigkeitswerten führt. Eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit verringert die Zeit, die das Material in der Hochtemperaturzone verbringt, und führt zu einer Verringerung der Festigkeitswerte.	[113,132–134]
Schutzgas: Arten von Schutzgas und Schutzgasdurchflussrate	Schutzgas spielt bei WAAM-Prozessen eine entscheidende Rolle, da es das geschmolzene Schweißbad vor atmosphärischer Verunreinigung schützt und die Wärmeübertragungseigenschaften während der Abscheidung beeinflusst. Die Art des Schutzgases, Gasdurchflussraten wie Argon und Helium sowie reaktive Gase wie CO2 und O2 können erhebliche Auswirkungen auf die RS-Bildung in WAAM-Produkten haben.	[3,37,135]
Düsenabstand: Abstand von der Düsen Spitze zum Werkstück (Abstände zwischen Schweißbrenner)	Der Abstand des Schweißbrenners bei WAAM-Prozessen kann einen erheblichen Einfluss auf den RS in den Endprodukten haben. Die Optimierung des Abstands zwischen Düsen Spitze und Werkstück bei WAAM-Prozessen umfasst das Ausbalancieren von Wärmezufuhr, Abkühlraten, Verformungskontrolle, Zwischenschichtbindung und Defektbildung, um den RS zu minimieren und die Produktion hochwertiger Teile sicherzustellen.	[23,24]
Druckposition: Winkel Elektrode zu Schicht (Draht) (γ) und Schichthöhe	Die Druckposition beeinflusst die Wärmeableitung und -entwicklung und beeinflusst die Abkühlrate und die thermischen Gradienten innerhalb des Teils. Die Druckposition beeinflusst den Fluss des geschmolzenen Metalls und die Geometrie der abgelagerten Perlen führt zu einer Variation des RS.	[36,64,128,136,137]
Schichtdicke: Substratdicke, Beschichtungsdicke	Eine Verringerung der Schichtdicke bei der WAAM-Herstellung kann zu kürzeren thermischen Zyklen und einer geringeren Wärmezufuhr pro Schicht führen. Dies kann aufgrund geringerer thermischer Verformung und reduzierter HAZ-Größe zu einem niedrigeren Gesamt-RS führen.	[124,138]
Abkühlrate: Abscheidungszeit der Schicht, Verweilzeit zwischen den Schichten	Die schnellen Heiz- und Kühlzyklen bei WAAM können zur Entwicklung von erheblichen RS und Verformungen in den gefertigten Teilen führen. Diese können sich negativ auf die strukturelle Integrität und Maßgenauigkeit der Komponenten auswirken, was das Erreichen der gewünschten Schweißigenschaften erschwert und infolgedessen die RS in gedruckten Teilen verändert.	[57-60,102,136]
Vorwärmen des Substrats (Grundplatte)	Das Vorwärmen des Substrats in WAAM-Prozessen bietet mehrere Vorteile für die RS-Steuerung in den Endprodukten. Durch die Reduzierung thermischer Gradienten, die Minderung von Verzerrungen, die Verbesserung der metallurgischen Bindung, die Steigerung der Duktilität und die Optimierung der Abkühlraten trägt das Vorwärmen dazu bei, Teile mit niedrigerem RS-Niveau und verbesserten mechanischen Eigenschaften herzustellen.	[96,137,138]
Teilegeometrie: Gedruckte Teileformen und Volumen der Teile	Die Geometrie der gedruckten Teile in WAAM-Prozessen beeinflusst RS erheblich. Das Verständnis, wie sich Formkomplexität, Teileausrichtung, Volumen und Materialsammlungsmuster auf Wärmegradienten und Abkühlungsraten auswirken, ist von entscheidender Bedeutung für die Verwaltung von RS und die Gewährleistung der Produktion hochwertiger Teile mit den gewünschten mechanischen Eigenschaften und der Maßgenauigkeit in WAAM.	[9,26]
Wärmenachbehandlung (PWHT)	PWHT spielt eine entscheidende Rolle bei der Verwaltung von RS in WAAM-Produkten. Indem die Teile kontrollierten Heiz- und Kühlzyklen unterzogen werden, kann PWHT RS effektiv verringern, Materialeigenschaften verbessern und die Gesamtqualität und Implementierung der hergestellten Teile verbessern.	[1,4,60,112,139]
Scanmuster	Das Scanmuster spielt eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung der Wärmeakkumulation, der Abkühlungsraten während der AM-Abscheidung und folglich der RS-Bildung.	[100]
Drahtfüller: Drahtfüller Durchmesser und Drahtgüte	Der Durchmesser und die Drahtgüte des Fülldrahts sind zwei Schlüsselfaktoren, die den RS-Wert in WAAM-Produkten erheblich beeinflussen können.	Nicht untersucht

Appl. Mech. 2024, 5, FOR PEER REVIEW,

15


$$\text{Wärmezufuhr (J/mm)} = \frac{\text{Volt} \times \text{Ampere} \times 60}{\text{Fahrgeschwindigkeit (mm/min)}} = \quad \times \text{A} \quad (2)$$

wobei v die Laufgeschwindigkeit ist. Vora et al. [147] stellten fest, dass die Spannung den größten Einfluss auf die Perlenbreite hat, gefolgt von der Laufgeschwindigkeit und dem Verhältnis der Gasmischung.

Eigenschaften [143]. Basierend auf der Energiedissipationshypothese und den zugehörigen Gleichungen können verschiedene additive Fertigungsverfahren unter Verwendung von Energiestrahlen bei gleichem Energieeintrag genauer verglichen werden. Dieser Vergleich dient als Grundlage für die Bestimmung der anfänglichen Prozessparameter und die dynamische Anpassung der Hauptparameter [146]. Die im Schweißlichtbogen erzeugte Wärmemenge pro Längeneinheit der Schweißnaht wird in Kilojoule pro Millimeter Länge der Schweißnaht (kJ/mm) ausgedrückt, wie in Gleichung (1) gezeigt.

$$\text{Lichtbogenenergie (kJ/mm)} = \text{Volt} \times \text{Ampere} = V \times I \quad (1)$$

wobei V in Volt und I in Ampere (A) angegeben ist. Die im Schweißlichtbogen erzeugte Wärmemenge pro Längeneinheit des Schweißprozesses wird in Gleichung (2) dargestellt, und zwar auf unterschiedliche Weise gemäß der Norm ASME IX QW-409.1 der American Society of Mechanical Engineers [132].

$$\text{Wärmezufuhr (J/mm)} = \frac{\text{Volt} \times \text{Ampere} \times 60}{\text{Fahrgeschwindigkeit (mm/min)}} = \frac{V \times A}{v} \quad (2)$$

wobei v die Laufgeschwindigkeit ist. Vora et al. [147] stellten fest, dass die Spannung den größten Einfluss auf die Perlenbreite hat, gefolgt von der Laufgeschwindigkeit und dem Verhältnis der Gasmischung.

Die während des Herstellungsprozesses zur Bildung von Perlen abgeschiedene Schicht wird als halbkreisförmig angenommen. Die Abscheidungsrate R, die von Drahtdurchmesser, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Drahtdicke beeinflusst wird, wird durch Gleichung (3) ausgedrückt.

$$R = \frac{\dot{y} d 2v}{4} = \dot{y} v A_{ww} \quad (3)$$

Dabei ist d der Drahtdurchmesser, v die Drahtvorschubgeschwindigkeit (WFS), $\dot{y}$ die Drahtdicke und A_{ww} der Querschnittsbereich des Schweißdrahts.

4. Einfluss von RS auf die mechanischen Eigenschaften von WAAM-

Komponenten Obwohl WAAM seine Fähigkeit zur Herstellung mittelgroßer bis großer Komponenten aus Aluminium für die Automobilindustrie und verwandte Branchen unter Beweis gestellt hat, kann es aufgrund praktischer Herausforderungen wie unübertroffener mechanischer Eigenschaften und erheblicher RS [148] noch nicht als umfassende Produktionsmethode dienen. RS beeinflusst die Materialien und mechanischen Eigenschaften der hergestellten Komponente erheblich. Beispielsweise kann es die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Härte und Duktilität von Produkten beeinflussen, indem es sie von den intrinsischen Eigenschaften des Materials abweichen lässt. Eine hohe Wärmezufuhr im WAAM- Prozess führt zu einer verringerten Zugspannung innerhalb der Komponente und kann zu unerwünschten mechanischen Eigenschaften und Mikrostrukturen führen [149,150].

Mikrostrukturelle Eigenschaften wirken sich auf die Materialeigenschaften von WAAM- gefertigten Produkten aus, einschließlich der Restspannungsniveaus. Die Mikrostruktur von WAAM- Produkten spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung und Verteilung von RS, was sich auf die vielen miteinander verbundenen mechanischen Eigenschaften auswirkt. Aufgrund der Existenz von RS in WAAM-Produkten, die durch die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit oder des Wärmeverteilungsparameters verursacht wird, können die Materialeigenschaften erheblich variieren [103,151]. Die resultierende Mikrostruktur und das RS-Niveau in WAAM korrelieren direkt mit den endgültigen mechanischen Eigenschaften. Untersuchungen zur inneren Porosität in gebildeten Perlen und ihrer Fähigkeit, großformatige Komponenten herzustellen, zeigen unzureichende Zug- und Ermüdungseigenschaften [152]. Diese Porosität ist ein Ergebnis von RS, da sie den Erstarrungsprozess und die Fähigkeit des Gases, während der Abscheidung zu entweichen, beeinflusst [153,154]. In ähnlicher Weise kann RS verschiedene mechanische Eigenschaften der hergestellten Teile auf verschiedene Weise beeinflussen, indem es Festigkeit, Zähigkeit, Mikrostruktur, Lebensdauer, Rissbildung und Delamination der WAAM-Produkte verändert [152,155].

RS, die während des Herstellungsprozesses entstehen, beeinflussen die mechanische Leistung deutlich und können zur Ablösung von Stützstrukturen, unerwünschter Formverformung und vorzeitiger Rissbildung führen [76]. Die Eingangsparameter, die resultierende Mikrostruktur, die Nachbehandlungen und RS haben erhebliche Auswirkungen auf die endgültige mechanische

Abbildung 8. Diagramm zur Veranschaulichung des Umschmelzphänomens, das während des Abscheidungsprozesses auftritt. [32]. Copyright 2019, gemäß CC BY-Lizenz, Open Access. [32]. Copyright 2019, gemäß CC BY-Lizenz, Open Access.

Insgesamt sind das Verständnis und die Kontrolle von RS wesentlich für die Gewährleistung der mechanischen Zuverlässigkeit, Maßgenauigkeit und Funktionsleistung von WAAM-Produkten in verschiedenen Anwendungen. Viele Forschungsbemühungen konzentrierten sich auf die Charakterisierung von RS, die Entwicklung prädiktiver Modelle und die Implementierung fortschrittlicher Fertigungstechniken, die für die Weiterentwicklung des WAAM-Bereichs und die Ausschöpfung seines vollen Potenzials in industriellen Anwendungen von entscheidender Bedeutung sind [100]. Verständnis der Verteilung der Wärmezufuhr und ihrer Auswirkungen, einschließlich vorübergehender Temperaturverteilung, Werkstoffumwandlung, Spannungsakkumulation und Verformung, ist für Anwendungen mit hochfesten Stählen von großer Bedeutung. Die numerische Simulation kann wertvolle Erkenntnisse zur Bewertung dieser Faktoren liefern [40]. Die RS und die Verformung die Leistungsfähigkeit der Komponenten erheblich beeinträchtigen [97]. Durch sich wiederholende Zyklen RS wird in den Komponenten eingeschlossen und verursacht eine Reihe von Defekten wie Risse, Verformungen, Verzug und verkürzte Lebensdauer der Bauteile [163].

Die Erzeugung von RS und Verzerrungen in Teilen behindert die breite Akzeptanz aufgrund der komplizierte thermische Aufbaugeschichten, die für WAAM-Komponenten charakteristisch sind [164]. Minderungsstrategien für RS in verschiedenen Herstellungsprozessen in WAAM beinhalten mehrere Techniken zur Reduzierung oder Verwaltung des RS, die die Zuverlässigkeit und Funktionalität beeinträchtigen können gefertigte Komponenten. Ein Hybridverfahren aus WAAM und Hochdruckwalzen kann Der Bau großer Bauteile führt zu geringen schädlichen RS und Verzerrungen [165,166]. In der Ebenso können numerische Methoden ein zusätzliches Verständnis dafür bieten, wie das Rollen

effektiv genutzt, um RS zu verringern und die notwendigen plastischen Dehnungen zu erzeugen, um mikrostrukturelle Eigenschaften [32]. Die Kombination des WAAM-Prozesses mit anderen Fertigungsverfahren Prozesse, einschließlich Bearbeitung oder subtraktive Techniken können bei der Entfernung von überschüssigem Material. Diese Hybridfertigung wird in der Medizintechnik eingesetzt, um spannungsarme WAAM-Teile mit komplexen Geometrien oder ergänzende Funktionen zur Reduzierung RS [167].

Die Kontrolle des RS ist für die Gewährleistung der Haltbarkeit und Zuverlässigkeit dieser kritischen Komponenten von entscheidender Bedeutung [130]. Eine Zusammenstellung verschiedener Methoden zur Minderung des RS und der Verzerrung in WAAM wurde entwickelt, um eine Blaupause für zukünftige Fortschritte zu bieten [168]. Endliche Die Element-Prozess-Simulation bietet eine effektive Methode zur Erforschung von Strategien zur Minderung dieser Verzerrungen und RS [169]. Einige Methoden lieferten Techniken zur Handhabung von RS, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Beseitigung von Defekten wie Porosität [10,170]. Einige gängige Minderungsmaßnahmen Strategien und praktische Anwendungen werden aufgelistet und mit praktischen Anwendungen erklärt in Tabelle 4.

Tabelle 4. Minderungsstrategien für RS und praktische Anwendungen.

Methoden	Material und Strategien	Praktische Anwendungen und Ergebnisse	Referenzen
Zwischenlagenwalzen	Ti-6Al-4V-Legierung	Verbessert die Bindung und Haftung zwischen den einzelnen Schichten von Material. Es hilft auch, Spannungen durch Anwendung von Druckkraft umzuverteilen, Dies führt zu verfeinerten Kornstrukturen und minimiert Verzerrungsergebnisse in RS.	[24,75,76,171]
Wärmebehandlung (HT)	Stahl der Güteklasse 91, Ti-6Al-4V	Die HT-Nachbearbeitung umfasst kontrollierte Heiz- und Kühlzyklen zur Entlastung RS. HT wird in der Luft- und Raumfahrtindustrie häufig eingesetzt, um RS zu reduzieren in WAAM zur Herstellung von Turbinenschaufeln mit verbesserter Lebensdauer und Leistung.	[82,139,172]
Kugelstrahlen	2319 Aluminiumlegierung	Beim Kugelstrahlen wird die Oberfläche eines Bauteils einem Beschuss ausgesetzt mit kleinen, schnellen Partikeln, um Druckspannungen zu erzeugen, die Zugfestigkeit entgegenzuwirken. Es wird im Automobilbereich eingesetzt, um die Ermüdungsbeständigkeit von mit WAAM hergestellten Aufhängungskomponenten.	[173,174]
Walzen und Lasern Schockstrahlen	Kohlenstoffarmen Stahl	Die Methoden eliminieren schädliche Zug-RS an der Oberseite der WAAM-Wand, Dadurch wird die Lebensdauer verlängert und das Risswachstum verlangsamt. Der untere Bereich der WAAM-Wand weist verbesserte RS-Bedingungen auf, was zu einer verbesserten Ermüdungsleistung führt, und das alles ohne Oberflächen Rollbehandlung.	[175]
Rollen	AA2319, S335JR-Stahl	Erhöhte Rolllasten führen zu einer Erhöhung der maximalen äquivalenten plastischen Dehnung und ein tieferes Eindringen der äquivalenten plastischen Dehnung führt zu RS.	[32]
Parameter Optimierung	Al-Cu4,3-Mg1,5-Legierung	Anpassen der WAAM-Prozessparameter wie Abscheidungs-geschwindigkeit und Schichtdicke Dicke, können die Baubedingungen optimieren, um RS zu verringern. Systematische Parameteroptimierung wird in der Bauindustrie angewandt, um RS zu reduzieren in großformatigen WAAM-gedruckten Metallstrukturen.	[36]
Materialauswahl	Aluminiumlegierungen	Auswahl von Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften, wie z. B. geringer Wärmeausdehnung Koeffizienten können die RS-Bildung während WAAM minimieren. Spezialisierte Materialien werden im Energiesektor verwendet, um Hochleistungs-WAAM zu schaffen Komponenten mit reduziertem RS.	[176,177]
In-Prozess-Überwachung und Kontrolle	IN718 Superlegierung	Echtzeit-Überwachungs- und Kontrollsysteme passen Prozessparameter an während WAAM zur Minimierung der RS-Bildung. In-Prozess-Überwachung und Kontrolle sind Wird in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet, um RS-Abweichungen in kritischen Motorkomponenten.	[178]
Warmwalz- und Kaltumformung	ER70S-6 Schweißdraht	Der Einbau von WAAM-Versteifungen an den Flanschen von warmgewalzten I-Profile führen nachweislich zur Schaffung günstiger Zugfestigkeits-RS, die sich positiv auf die strukturelle Stabilität auswirken und Höchstwerte erreichen entspricht der Streckgrenze des Materials.	[179]
Strahlen und UITs	Ti-Legierung und Al-Legierung	Durch Ultraschall-Schlagbehandlung (UIT), Kornverfeinerung und die Randomisierung der Orientierung erreicht werden, was zur Verbesserung von RS und mechanischer Festigkeit.	[180]
Rollen	Titanlegierungen	Bietet wesentliche Vorteile wie die Verringerung von RS und Verzerrung sowie sowie zur Verfeinerung der Kornstruktur.	[181]

In dieser Studie untersuchen wir, wie verschiedene Faktoren wie Prozessparameter, Substrat Erwärmung und Abkühlung beeinflussen das Aussehen der Perlen, die während der WAAM von Inconel 625 gebildet werden

Während Prozessüberwachung und -kontrolle die während des Druckvorgangs eingesetzten Minderungsmethoden sind.

Es wurde ein Ansatz entwickelt, um die Form der gebauten Wand zu analysieren, wobei der Schwerpunkt auf EN 8-Stahl lag. Zusätzlich wurde der Temperaturverlauf des Schmelzbades während der Abscheidung auf seine inhärente Symmetrie, um eine effiziente Materialnutzung zu gewährleisten. Darüber hinaus wird ein Infrarot-Pyrometer verwendet, um zu untersuchen, wie sich diese Faktoren auf die Thermographie zur Überwachung der Symmetrie des Schmelzbades [18]. Diese Volumenkurve beeinflusst wiederum die Perlengeometrie [137,182]. Für die morphologischen Die Ablagerungsgeometrie V (m³) kann leicht aus dem Pfad (genauer gesagt dem Aspekt der Perlen) abgeleitet werden. Es ist wichtig, das Volumen des zugeführten Materials und die Größe zu beachten. Verhältnisse der Schweißbahn (scan (m), die Geschwindigkeit des Drahtes, v_w (m/sv1), der Durchmesser des Teils [183]. Die Grafiken in Abbildung 9 veranschaulichen die Verteilung der veröffentlichten Arbeiten über den Draht (m) und der Schweißgeschwindigkeit (m/sv1) [26,142], wie in Gleichung (4) ausgedrückt. Ansätze zur Minderung von Restspannungen und Angabe der Häufigkeit ihrer Anwendung in WAAM-Anwendungen. Diese Grafiken zeigen verschiedene Methoden zur Minderung von RS in der WAAM-Prozess im Vergleich zur verwendeten Anzahl der in Artikeln veröffentlichten Methoden.

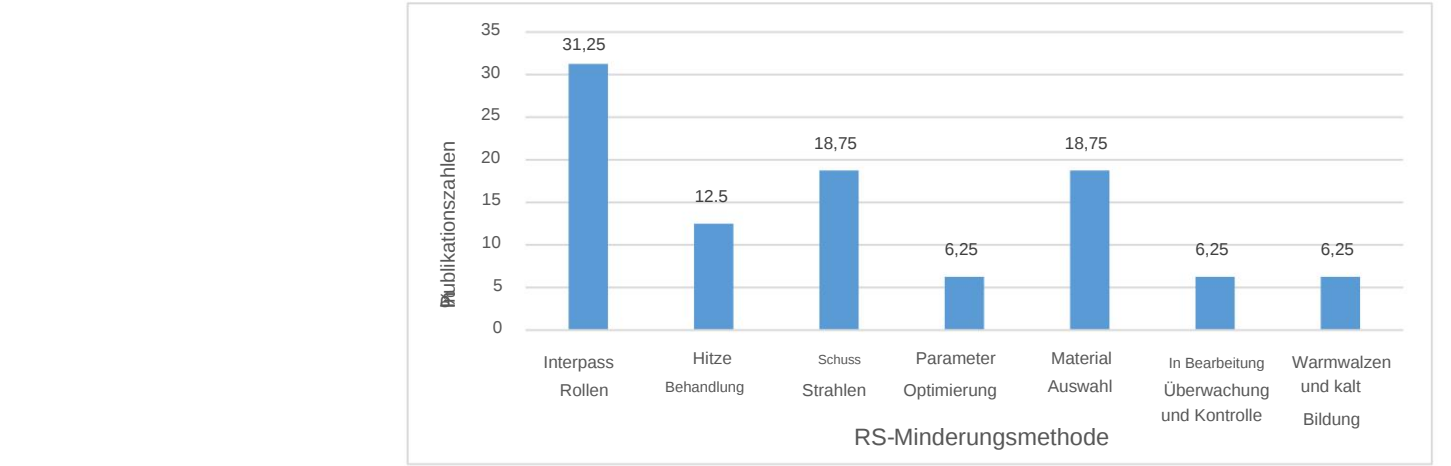


Abbildung 9. Minderungsmethoden von RS im Vergleich zur Veröffentlichungszahl prozent.

den die jeweilige Perle (m) Schichtstärken (μ) und Eindringtiefe (p) der Die Grafik veranschaulicht die Hierarchie abgeordneten Schichten während des WAAM-Prozesses. Behandlung nach der Produktion beinhaltet. Für Abbildung 10. Diese Parameter sind wichtig, da der Druckvorgang ein besseres Material ausbildet. Beispiele Bildung und Wartung zwischen glatten Oberflächen und Oberflächen, die sich bilden, während ein kontrollierter Partikelstrahl wird. Wärmeeinbringung und Kugelstrahlen der einen glatten Oberfläche. Die Verwendung einer Modellierung der Perle Druckbeziehung zwischen verschiedenen Prozessparametern herzustellen, ist ein Profil erforderlich. Während des Studie wurde ein Ansatz entwickelt, um die Form der erhalteten Wände zu analysieren, mit Fokus auf der WAAM-Verfahren, um zu gewährleisten, dass die Qualität des Schweißraupen Schweißraupen hergestellt wird. Die Verwendung einer Schweißraupen unterhalb der Spannung des Schmelzbades zu gewährleisten [13]. Dieses Volumen Die Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit der gefertigten Teile. Dies beginnt mit der Entwicklung der Verhältnisse des Schweißbades (scan (m), der Geschwindigkeit des Drahtes, v_w (m/sv1), des Durchmessers des Drahtes d_w (m) und der Schweißgeschwindigkeit (v_w (m/sv1) [26,142], wie in Gleichung (4) ausgedrückt. Das Ergebnis der Untersuchung verschiedener Kurvenanpassungsverfahren [186,187] auf einen Algorithmus, bestimmt die Prozessbedingungen, die erforderlich sind, damit beide Materialien eine gleichmäßige Verteilung gleichbleibende Wulstschichthöhen [188]. Ein geometrisches Segment einer Wulst oder ein geometrisches Defekt, ist ein Fehler, der zu Hohlräumen im fertigen gedruckten Teil führt, weil zwei unregelmäßig geformte, überlappende Perlensegmente nicht vollständig miteinander verschmelzen [189]. Es ist vorzuziehen, die jeweilige Breite (w), Schichtdicke (h) und Eindringtiefe (p) der Perle aus dem Schmelzbad während des WAAM-Prozesses, die Form der Perle ist in dargestellt. Schreiben Sie die gleiche Parabel in Bezug auf die Prozessparameter, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Brennergeschwindigkeit. Die geometrische Konfiguration der Schweißnaht, die durch WAAM erzeugt wird, unterscheidet sich von Abbildung 10. Diese Parameter sind wichtig, da breitere Schweißnähte eine bessere Materialbeständigkeit bieten, von denen herkömmlicher Schweißverfahren [190,191]. Das Wulstprofil auf der Substratbedeckung führt zu einer glatteren Oberflächenbeschaffenheit bei gleichzeitiger Beibehaltung einer kontrollierten Wulsthöhe kann als symmetrische Parabel modelliert werden, die in Abbildung 10 dargestellt ist. Daher ist eine Modellierung der Perle dargestellt in Gleichung (5). Das Profil ist erforderlich, um Beziehungen zwischen verschiedenen Prozessparametern herzustellen. Einige Studien betrachten die Formen der im WAAM-Prozess gebildeten Perlen als Ellipsen [184,185]. Die Der WAAM-Prozess konstruiert komplizierte Teile durch das Aufschichten von Schweißnähten. Es ist wichtig, beides zu modellieren. Um a und c in Gleichung (5) zu lösen, sind die Dicke (Höhe) und Breite der Perlen einzelne Schweißraupen und die Überlappung mehrerer Raupen sorgen für eine hervorragende Oberfläche in die Parabelgleichung eingesetzt, um die Konstanten a und c zu finden. Die Wendepunkte oder Qualität und Maßgenauigkeit der gefertigten Teile. Dies beginnt mit der Entwicklung von Modellen für einzelne Schweißraupen unter Verwendung verschiedener Kurvenanpassungsverfahren [186,187].

Der Volumenstrom wird durch Gleichung (8) ausgedrückt,

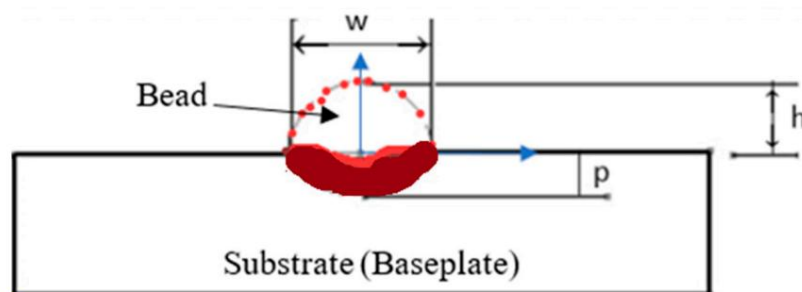


Abbildung 10. Perlenbildung des parabolischen Profils während des WAAM-Prozesses.

Die geometrische Darstellung des beginnenden Prozesses überlappender Perlen, bei denen Materialen erforderlich sind, um eine gleichbleibende

Wulstschichthöhen [188]. Ein geometrisch fehlerhafter Abschnitt einer Wulst oder ein geometrischer Defekt, ist ein Fehler, der zu Hohlräumen im endgültigen Druckteil aufgrund unvollständiger Verschmelzung führt (9) zwischen zwei unregelmäßig geformten, sich überlappenden Perlensegmenten [189]. Es ist vorzuziehen, wobei dw der Drahtdurchmesser und die Geschwindigkeit des Drahtes ist. Gleichungen (8) und die gleiche Parabel in Bezug auf die Prozessparameter v_w , Drahtvorschubgeschwindigkeit und v_t - Brenner gleichsetzen (9) wird die Breite w der Naht aus Gleichung (10) bestimmt. Geschwindigkeit.

Die geometrische Konfiguration der Schweißnaht, die durch WAAM erzeugt wird, unterscheidet sich von als bei konventionellen Schweißverfahren [190,191]. Das Schweißprofil auf dem Substrat kann als symmetrische Parabelform betrachtet, die in Abbildung 10 dargestellt ist und

Gleichung (9). Ausgehend von Gleichung (10) führt das Ersetzen von w in Gleichung (6) zu Gleichung (11). in

$$y = a + cx^2 \quad (5)$$

$$= \dot{\gamma} \quad (11)$$

Um a und c in Gleichung (5) zu lösen, sind die Dicke (Höhe) und Breite der Perlen

in die Parabelgleichung eingesetzt, um die Konstanten a und c zu finden. Die Wendepunkte der Perlen bei verschiedenen Drahtdurchmessern variieren die gebildeten Perlen in Dicke und Breite. Wie- oder Die Formeln liegen den Parametern nahe, die die Gleichung der Parabelschweißparameter beeinflusst, da das Ergebnis von $c < 0$, wie in Abbildung 10 dargestellt, und das Nahtprofil ausgedrückt als einschließlichen Brennerwinkel, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Füllstoffzufuhr und Abkühlbedingungen [192]. Für die parabolische Gleichung kann sie als Gleichung (6) gelöst werden.

Bei einer bestimmten Schichtdicke (m), Nahtbreite (w) und Brennergeschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) ergibt sich der für die vollständige Füllung erforderliche Volumenstrom (Q) aus Gleichung (12). $4h$

$$a = h; c = \frac{\dot{\gamma}}{w^2} \quad (12)$$

Die Einstellung der optimalen Parameter im WAAM-Prozess wäre vorteilhaft für $y = h \quad \dot{\gamma}$ (6)

das stufenweise Aufbringen von Schweißperlen Schicht für Schicht bei der additiven Fertigung von Bauteilen [193,194].

Koli et al. [128] untersuchten die WAAM-Produkte aus Draht aus SS308L mit einem Durchmesser von 1,2 mm.

Die Fläche einer Perle (Fläche der parabolischen Perle) relativ zu ihrer geometrischen Parameter ist Zur Herstellung der Proben verwendete Messgeräte. Die Parameter wie Schweißgeschwindigkeit und Lichtbogenstrom werden aus Gleichung (7) abgeleitet.

$$A = \frac{2 \text{ Stunden}}{3} \quad (7)$$

Der Volumenstrom wird durch Gleichung (8) ausgedrückt,

$$Q = \frac{2}{3} h w \times v_t \quad (8)$$

Für den Draht ergibt sich beim Fließen des Schmelzbades der Volumenstrom aus Gleichung (9).

$$Q = \frac{\dot{\gamma}}{4} D_m^2 \times v_w \quad (9)$$

wobei dw der Drahtdurchmesser und v_w die Geschwindigkeit des Drahtes ist. Gleichungen (8) und (9) gleichsetzen, Die Breite w der Perle wird aus Gleichung (10) bestimmt.

$$w = \frac{3\dot{\gamma} D_m^2}{8v_t} \quad (10)$$

Wenn man aus Gleichung (10) w in Gleichung (6) ersetzt, erhält man Gleichung (11).

$$y = h \cdot 1 \cdot \frac{16hvtx}{3\sqrt{vwd} \cdot 2_m}^2 \quad (11)$$

Bei den verschiedenen Drahtdurchmessern variieren die gebildeten Raupen in Dicke und Breite. Die Form der aufgetragenen Raupe wird jedoch stark von vielen Schweißparametern beeinflusst, einschließlich Brennerwinkel, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Füllstoffzufuhr und Abkühlbedingungen [192]. Für eine bestimmte Schichtdicke (h), Raupenbreite (w) und Brennergeschwindigkeit (vt) ergibt sich der für eine vollständige Füllung erforderliche Volumenstrom (Q) aus Gleichung (12).

$$Q = vtwh \quad (12)$$

Die Einstellung der optimalen Parameter im WAAM-Prozess wäre für die schrittweise Ablagerung von Schweißperlen Schicht für Schicht bei der additiven Fertigung von Bauteilen von Vorteil [193,194]. Koli et al. [128] untersuchten die zur Herstellung der Proben verwendeten WAAM-Produkte aus SS308L-Draht mit einem Durchmesser von 1,2 mm. Die Parameter wie Schweißgeschwindigkeit, Lichtbogenstrom und Schutzgasdurchflussrate hatten den größten Einfluss auf die vielfältigen Reaktionen der WAAM-Produkte.

Die praktischen Anwendungen von Komponenten, die mit WAAM-Verfahren gedruckt werden, finden sich vor allem in der Automobil- [155], Luft- und Raumfahrtindustrie [195], im Marine- und Verteidigungssektor [196,197], wo Materialien wie Aluminium aufgrund ihrer hohen Qualität und Festigkeit bei geringer Masse verwendet werden. Generell ist WAAM in Branchen wie der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie, Chemieanlagen, Schifffahrt, Nuklearindustrie, Schiffbau und Energie stark gefragt, wo es zur Herstellung von Komponenten wie Flugzeugteilen, Fahrzeugrahmen und Schiffspropellern verwendet wird [8,65,88,148,151,198–204]. Im WAAM-Verfahren werden in diesen Branchen häufig Aluminiumlegierungen wie 2xxx (Al-Cu), 4xxx (Al-Si) und 5xxx (Al-Mg) [199,205,206] verwendet. Im WAAM-Verfahren hergestellte Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Turbinenschaufeln, Tragflächenprofile und Strukturelemente müssen im RS sorgfältig kontrolliert werden, um vorzeitige Ausfälle zu vermeiden und hohe Leistungsstandards einzuhalten [86,129,207,208]. WAAM wird auch zur Herstellung von Motorteilen wie Zylinderköpfen und Kolben verwendet [129].

6. Diskussion

Neben der bereits erwähnten RS-Messung können in WAAM-Komponenten möglicherweise auch bestimmte schweißbedingte Defekte auftreten. Diese Messungen umfassen viele Faktoren, die die Größenordnungen des RS WAAM beeinflussen und in Tabelle 1 mit mehreren Referenzen beschrieben werden. Die Einschlüsse bestehen hauptsächlich aus drei Klassifizierungen von RS-Messmethoden, die in Abschnitt 3.4 [erörtert werden](#). Von diesen drei sind zerstörungsfreie Messtechniken meist anwendbar. Bei großen Proben kann die Dehnung bestimmter Komponenten jedoch aufgrund von Variationen unterschiedlicher RS in der Eindringtiefe des Lichtstrahls durch die Komponenten [209] [schwierig zu bestimmen sein oder nicht genau identifiziert werden](#). Dennoch sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die in WAAM-Produkten vorhandene RS, die aus unterschiedlichen Prozessparametern resultiert, gründlich zu untersuchen. Wärmebehandlungsprozesse nach der Herstellung können die Beseitigung von Defekten erheblich beeinflussen. Obwohl viele Defekte in WAAM-Produkten beseitigt werden konnten, wurde RS nur durch Wärmebehandlung [137] und andere in Tabelle 4 erwähnte Prozesse so weit wie möglich minimiert.

Die Qualität von Metallkomponenten, die in WAAM hergestellt werden, hängt stark von Schlüsselparametern wie Vorschubgeschwindigkeit, Wärmezufuhr, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Abscheidungsrichtung, Materialeigenschaften usw. ab. Weitere sind in Tabelle 1 aufgeführt. Während eine hohe Wärmezufuhr erforderlich ist, um eine schnelle Abscheidungsrate in WAAM zu erreichen, bringt sie auch Herausforderungen wie RS und Verzerrungen mit sich. Daher ist die Steuerung der Wärmezufuhr von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei der Herstellung großer Metallkomponenten mit WAAM, da sie sowohl die Abscheidungsrate als auch die strukturelle Integrität direkt beeinflusst [1,47].

6.1. Herausforderungen und Einschränkungen

Wie jede Fertigungstechnik bringt WAAM seine eigenen Herausforderungen und Einschränkungen bei der Messung und Steuerung von RS mit sich. Es kann zur Herstellung komplexer Geometrien verwendet werden, was es schwierig macht, RS genau vorherzusagen und zu messen, insbesondere bei komplizierten Strukturen. WAAM-Produkte weisen aufgrund der schnellen Verfestigung und der thermischen Zyklen während der Abscheidung häufig heterogene Mikrostrukturen und Materialeigenschaften auf. Die Variationen wie Materialzusammensetzung, Kornstruktur und Phasenumwandlungen können die Größe und Verteilung von RS beeinflussen und so die Messung und Interpretation erschweren. Die Messung von RS in WAAM-Produkten stellt aufgrund der einzigartigen Eigenschaften des Herstellungsprozesses und der daraus resultierenden Materialeigenschaften mehrere Herausforderungen dar. Beispielsweise sind zerstörungsfreie Prüftechniken wie Ultraschallprüfung oder Röntgenbeugung vielversprechend für die Messung von RS in WAAM-Produkten; die Anpassung dieser Techniken an die einzigartigen Eigenschaften von Materialien und Geometrien der additiven Fertigung stellt technische Herausforderungen dar. Die gemeinsame Herausforderung während des Tests ist die Kapazität der Eindringtiefe des Lichtstrahls durch die gedruckten Produkte. WAAM beinhaltet die sukzessive Abscheidung von Materialschichten, was zu Die genaue Messung und Charakterisierung dieser komplexen Spannungsmuster erfordert fortgeschrittene Techniken, mit denen sich Spannungsschwankungen in verschiedenen Richtungen und Tiefen innerhalb des Materials analysieren lassen [210].

Die Eigenschaften und das Verhalten verschiedener Materialien können sich in unterschiedlicher Weise erheblich unterscheiden und es schwierig machen, einen universellen Ansatz für die Messung und Kontrolle von RS zu entwickeln. Das Management von RS ist ein kritischer Aspekt im WAAM, um die Qualität und Leistung der hergestellten Komponenten sicherzustellen. Es gab nur begrenzte Industriestandards für die Messung und Kontrolle von RS im WAAM. Das Fehlen standardisierter Verfahren kann die Einführung dieser Technologie in kritischen Anwendungen behindern. Viele Untersuchungen können keine spezifische Größe von RS liefern. Vielmehr geben sie numerische Ergebnisse an und zeigen den Charakter während der gesamten Herstellungsvorgänge von WAAM durch Modellierung.

Die Quantifizierung dieses RS ist nicht für alle Prozess- und Schweißparameter vorgesehen. Beispielsweise wird er nicht aus den Eingangsparametern wie Drahtdurchmesser, Schweißrichtung, Länge, Breite, Dicke und Volumen der Produkte ermittelt, sondern aus einem Vergleich der gedruckten Komponenten. Ebenso wird er nicht aus schweißbezogenen Parametern wie Schweißgeschwindigkeit, Schweißgas, Gasdurchflussrate, Volt, Spitzenströme und Schutzgas ermittelt [1,4]. Die in früheren Untersuchungen zur Messung des RS in den WAAMed-Produkten verwendeten Techniken sind bereits in Tabelle 2 aufgeführt.

Im anderen Fall beeinflussen Schutzgas, Schutzgasarten und Schutzgasdurchflussrate die Verteilung und Menge von RS in WAAM-Produkten. Ebenso können die Schutzgasarten mit ihrer Durchflussrate, wie Argon und Helium, und reaktive Gase wie Kohlendioxid und Sauerstoff erhebliche Auswirkungen auf die RS-Bildung in WAAM-Produkten haben [3,138,149]. Allerdings gelang es den Forschern nicht, die optimale Schutzgasmenge und die Schutzgasarten in Bezug auf andere Prozesse und Eingangsparameter während des WAAM-Prozesses zu ermitteln. Weitere Gründe, die RS in WAAM erforderlich machen, sind schnelles Aufheizen und Abkühlen, Mehrschichtabscheidung, Prozessparameter, Materialphasenumwandlungen und Teilegeometrie.

Die Literaturübersicht zeigt im Allgemeinen, dass kontinuierliche Untersuchungen und Verbesserungen in diesen Bereichen für ein besseres Verständnis und eine bessere Kontrolle von RS in WAAM-Produktanwendungen unabdingbar sind.

6.2. Zukünftige Richtungen

Herausforderungen und Einschränkungen bei der Kontrolle von RS in WAAM-Produkten werden in Abschnitt 6.1 erörtert. Basierend auf den in der bisherigen Forschung festgestellten Messungen, Abschwächungen und Einschränkungen, die erwähnt und empfohlen werden können, könnten sich künftige Studien auf die Optimierung der Parameter des WAAM-Prozesses konzentrieren. Durch die Erläuterung der komplexen Beziehung zwischen Prozessparametern in WAAM und RS trägt diese Überprüfung zur Optimierung des Parameterprozesses bei und führt dazu, RS-Mes-

Gewährleistung der Produktzuverlässigkeit [69]. Ebenso sind einige der RS-Messmethoden, die in früheren Untersuchungen nicht in den Produkten von WAAM durchgeführt wurden, folgende:

(1) Zerstörungsfreie Verfahren	☿	Ultraschallwellen
	☿	Magnetisches Barkhausen
(2) Halbzerstörende Verfahren	☿	Ringkern
	☿	Tieflochverfahren
(3) Destruktive Methoden	☿	Brückenkrümmung
	☿	Schnitttechniken
	☿	Schlitz- oder Risskonformität

In anderer Hinsicht beeinflusst der Durchmesser des Fülldrahts direkt die Abscheidungsrate und die erzeugte Wärme bei WAAM. Größere Drahtdurchmesser führen typischerweise zu höheren Abscheidungsraten, aber auch zu einer erhöhten Wärmezufuhr pro Längeneinheit. Diese erhöhte Wärmezufuhr kann die Abkühlungs- und Wärmezufuhrgradienten innerhalb des abgelagerten Materials beeinflussen und sich auf die Ausbreitung und das Ausmaß von RS auswirken. Der Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Abscheidung im Schmelzbad zur Bildung von Perlen wird in Abschnitt 6 beschrieben, wobei Formeln verwendet werden, um die Beziehungen zwischen Höhe und Breite während des gesamten WAAM-Prozesses darzustellen. Aufgrund des erheblichen Einflusses der Drahtgröße konnte die optimale Größe der Drahtdurchmesser auf den RS in den WAAM-Produkten in früheren Untersuchungen nicht ermittelt werden. Außerdem wurden unter den Kategorien zur Messung von RS die geeigneten Techniken und Einschränkungen bei der Geometrie geformter Perlen nicht

Da bisherige Forschungen Materialabhängigkeit, methodologische Modifikationen, Anwendungsbereich und verwandte Forschungsfragen von WAAM in der vorhandenen Literatur nicht vollständig abdecken, gibt es reichlich Gelegenheit für künftige Forschungen, verschiedene Möglichkeiten zu erkunden, darunter: 1.

Die meisten Forscher verwendeten häufig zerstörungsfreie Methoden wie XRd, ND und einige andere halb- und vollständig zerstörungsfreie Techniken zur Messung von RS in WAAM-Komponenten. Daher können zukünftige Studien die oben aufgeführten Techniken anwenden.

2. Zukünftig sollten Forscher neben anderen Prozess- und Eingangsparametern die am besten geeignete Menge und Art des Schutzgases für den gesamten WAAM-Prozess bestimmen.

3. Wie in Abschnitt 5 erläutert, liefert die mathematische Formel eine bestimmte Bildung des Perlenprofils und die Beziehung des Drahtdurchmessers zur Breite und Dicke (Höhe) der Perlen. Infolgedessen können Drahtdurchmesser, Dicke und Breite der Perlen variieren. Folglich führt die Wärmeverteilung des Prozesses zu einer Variation des RS in WAAM-Teilen. Daher kann sich zukünftige Forschung auf eine Vielzahl von Drahtdurchmessern konzentrieren, um den RS in WAAM-Teilen mit geringerem Drahtdurchmesser zu reduzieren.

4. Die Schweißbarkeit von Materialien hängt von ihren physikalischen Eigenschaften ab, die die Ansammlung von RS in WAAM-Produkten beeinflussen. Zukünftig sollten weitere Forschungsanstrengungen darauf abzielen, diese physikalischen Eigenschaften von Materialien, die in Tabelle 3 aufgeführt sind, und andere robotergesteuert einstellbare Effekte auf RS-gefertigte Komponenten durch WAAM zu untersuchen.

7. Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Literaturübersicht tief in die umfangreiche Forschung rund um die Untersuchung und Messung von RS in WAAM-Produkten eintaucht, wobei der Einfluss von Fertigungsparametern besonders hervorgehoben wird. Die Bedeutung von RS bei der Bestimmung der Materialeigenschaften und der strukturellen Integrität von WAAM-Komponenten wurde in der gesamten Übersichtsarbeit unterstrichen. Darüber hinaus bietet die Studie eine umfassende Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse, Messmethoden, Probleme und zukünftigen Richtungen im dynamischen WAAM-Bereich.

Die Überprüfung unterstreicht die entscheidende Rolle von RS bei der Gestaltung der Dimensionskonstanz von WAAM-Produkten und betont die Notwendigkeit präziser Messungen und Kontrollen für eine effektive Nutzung. Die Überprüfungsarbeit, die verschiedene Forschungsstudien, Techniken und Methoden zusammenfasst, hat ein wertvolles Verständnis des gegenwärtigen Forschungsstatus in diesem Bereich geboten. Darüber hinaus dient diese Überprüfung als Leitfaden für zukünftige Forscher, um die anderen RS-Messtechniken zu verwenden, die noch nicht durchgeführt wurden, und um frühere Techniken zu vergleichen, die in der Literatur verwendet wurden. Insbesondere ergab die Überprüfung, dass keine signifikanten

Es wurde über die Auswirkungen von RS in WAAM-gefertigten Teilen auf die Ermüdungs- und Kriechfestigkeit berichtet, die wir in unseren fortlaufenden Arbeiten auf diesem Gebiet gerne berücksichtigen möchten. Zur Messung von RS-WAAM-Produkten wurden experimentelle Methoden gemeldet, darunter halbdestruktive (nur Lochbohren), destruktive (Konturmethode) und zerstörungsfreie Techniken (wie Neutronenkristallographie und Röntgenbeugung, digitale Bildkorrelation und Synchrotron -Röntgenbeugung).

Insgesamt umfasst diese Überprüfung die Untersuchung und Messung von RS-Techniken in WAAM-Produkten auf der Grundlage von Eingabeparametern und anderen Einflüssen von RS-Produkten. Durch sorgfältige Auswertung und Koordination der vorhandenen Literatur unterstreicht diese Überprüfung die Bedeutung des Verständnisses der Faktoren, die RS-Methoden in WAAM-Produkten beeinflussen und mildern.

Beiträge der Autoren: Die Rollen der Autoren in dieser Studie sind wie folgt: FDG hat den Titel entwickelt und zur Konzeptualisierung, Methodik, Untersuchung und Vorbereitung des ursprünglichen Entwurfs beigetragen. HGL hat zur Konzeptualisierung beigetragen und Ressourcen, Aufsicht, Projektverwaltung, Bearbeitung, Überprüfung des Manuskripts und Sicherstellung der Finanzierung bereitgestellt. YWA hat an der Bearbeitung und Überprüfung des Manuskripts teilgenommen. MDH hat auch an der Organisation und Datenanalyse des Manuskripts teilgenommen. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und ihr zugestimmt.

Finanzierung: Diese Studie wurde von der INDMET-Initiative unter der Zuschussnummer 62862 unterstützt, die über das NORHED II-Programm finanziert wurde.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die in der Studie vorgestellten Originalbeiträge sind im Artikel enthalten, weitere Anfragen können an die entsprechenden Autoren gerichtet werden.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

Verweise

1. Kumar, MB; Sathiya, P.; Senthil, SM Eine kritische Überprüfung der additiven Drahtlichtbogenfertigung von Nickellegierungen: Prinzipien, Prozessparameter, Mikrostruktur, mechanische Eigenschaften, Wärmebehandlungseffekte und Defekte. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **2023**, *45*, 1–27.
2. Tangestani, R.; Farrahi, GH; Shishegar, M.; Aghchekhandi, BP; Ganguly, S.; Mehmanparast, A. Auswirkungen von vertikalem und Pinch- Rolling auf die Restspannungsverteilung in additiv gefertigten Draht- und Lichtbogenkomponenten. *J. Mater. Eng. Perform.* **2020**, *29*, 2073–2084. [\[CrossRef\]](#)
3. Derekar, KS Aspekte der additiven Drahtlichtbogenfertigung (WAAM) der Aluminiumlegierung 5183. Doktorarbeit, Coventry University, Coventry, Großbritannien, 2020; S. 1–227.
4. Rodrigues, TA; Duarte, V.; Miranda, RM; Santos, TG; Oliveira, JP Aktueller Stand und Perspektiven der additiven Draht- und Lichtbogenfertigung (WAAM). *Materials* **2019**, *12*, 1121. [\[CrossRef\]](#)
5. Laghi, V.; Palermo, M.; Gasparini, G.; Veljkovic, M.; Trombetti, T. Bewertung mechanischer Konstruktionsparameter und Teilsicherheitsfaktoren für additiv gefertigten Edelstahl aus Draht- und Lichtbogenverfahren. *Eng. Struct.* **2020**, *225*, 111314. [\[CrossRef\]](#)
6. Cunningham, CR; Flynn, JM; Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, ST Eingeladener Übersichtsartikel: Strategien und Prozesse für hohe Hochwertige additive Fertigung mit Lichtbogendraht. *Addit. Manuf.* **2018**, *22*, 672–686. [\[CrossRef\]](#)
7. Klobýcar, D.; Baloš, S.; Bašić, M.; Djurić, A.; Lindijc, M.; Šycetinec, A. WAAM und andere unkonventionelle additive Fertigungstechnologien für Metalle. *Adv. Technol. Mater.* **2020**, *45*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
8. Mathews, R.; Karandikar, J.; Tyler, C.; Smith, S. Akkumulation von Eigenspannungen bei der additiven Fertigung von Ti-6Al-4V-Drahtlichtbogen-Großanlagen. *Procedia CIRP* **2024**, *121*, 180–185. [\[CrossRef\]](#)
9. Wu, B.; Pan, Z.; van Duin, S.; Li, H. Thermisches Verhalten beim additiven Drahtlichtbogenverfahren: Eigenschaften, Auswirkungen und Kontrolle. In *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*; Springer: Singapur, 2019; S. 3–18.
10. Williams, SW; Martina, F.; Addison, AC; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P. Draht + Lichtbogen additive Fertigung. *Mater. Sci. Technol.* **2016**, *32*, 641–647.
11. Jimenez, X.; Dong, W.; Paul, S.; Klecka, MA; To, AC-Eigenspannungsmodellierung mit Phasentransformation für Drahtlichtbogenadditiv Herstellung von B91-Stahl. *JOM* **2020**, *72*, 4178–4186. [\[CrossRef\]](#)
12. Jin, W.; Zhang, C.; Jin, S.; Tian, Y.; Wellmann, D.; Liu, W. Drahtlichtbogen-Additive Fertigung von rostfreiem Stahl: Ein Überblick. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 1563. [\[CrossRef\]](#)
13. Huang, W.; Wang, Q.; Ma, N.; Kitano, H. Verteilungseigenschaften von Eigenspannungen in typischen Wand- und Rohrkomponenten hergestellt durch additive Drahtlichtbogenfertigung. *J. Manuf. Process.* **2022**, *82*, 434–447. [\[CrossRef\]](#)
14. Mohan Kumar, S.; Rajesh Kannan, A.; Pravin Kumar, N.; Pramod, R.; Siva Shanmugam, N.; Vishnu, AS; Channabasavanna, SG Mikrostrukturelle Merkmale und mechanische Integrität des additiv hergestellten drahtlichtbogengeformten SS321/Inconel 625-Funktionsgradientenmaterials. *J. Mater. Eng. Perform.* **2021**, *30*, 5692–5703. [\[CrossRef\]](#)

15. Kumar, V.; Singh, A.; Bishwakarma, H.; Mandal, A. Simulation des metallischen Drahtbogen-Additiv-Fertigungsprozesses (Waam) Verwendung der Simufact-Schweißsoftware. *J. Manuf. Eng.* **2023**, *18*, 080–085. [\[CrossRef\]](#)
16. Knezović, N.; Topić, A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – ein neuer Fortschritt in der Fertigung. In *Lecture Notes in Networks and Systems*; Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2019; Band 42, S. 65–71.
17. Costello, SCA; Cunningham, CR; Xu, F.; Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, ST Der neueste Stand der Lichtbogen-Drahtenergieabscheidung (WA-DED) als additives Fertigungsverfahren für die Herstellung großer Metallkomponenten. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* **2023**, *36*, 469–510. [\[CrossRef\]](#)
18. Barath Kumar, MD; Manikandan, M. Bewertung von Prozess, Parametern, Minderung von Eigenspannungen, Nachbehandlungen und Finite- Elemente-Analyse-Simulationen der Wire Arc Additive Manufacturing-Technik. *Metals and Materials International. Korean Inst. Met. Mater.* **2022**, *28*, 54–111. [\[CrossRef\]](#)
19. Paskual, A.; Álvarez, P.; Suárez, A. Studie zu Lichtbogenschweißverfahren für additive Fertigung mit hoher Abscheidungsrate. *Procedia CIRP* **2018**, *68*, 358–362.
20. Shukla, P.; Dash, B.; Kiran, DV; Bukkapatnam, S. Lichtbogenverhalten im additiven Drahtlichtbogen-Herstellungsprozess. *Procedia Manuf.* **2020**, *48*, 725–729. [\[CrossRef\]](#)
21. Zhao, XF; Wimmer, A.; Zaeh, MF Experimentelle und simulative Untersuchung von Schweißsequenzen an thermisch induzierten Verzerrungen bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen. *Rapid Prototype J.* **2023**, *29*, 53–63. [\[CrossRef\]](#)
22. Cambon, C.; Bendaoud, I.; Rouquette, S.; Soulié, F. Ein WAAM-Benchmark: Von Prozessparametern zu thermischen Auswirkungen auf Schweißnähte Poolform, Mikrostruktur und Eigenspannungen. *Mater. Today Commun.* **2022**, *33*, 104235. [\[CrossRef\]](#)
23. Hönnige, J.; Seow, CE; Ganguly, S.; Xu, X.; Cabeza, S.; Coules, H.; Williams, S. Untersuchung von Eigenspannungen und mikrostruktureller Entwicklung in abgeschiedenen und zwischen den Lagen gewalztem Draht sowie additiv hergestellter Inconel 718-Legierung nach Alterungsbehandlung. *Mater. Sci. Eng. A* **2020**, *801*, 140368. [\[CrossRef\]](#)
24. Hönnige, JR; Colegrove, PA; Ganguly, S.; Eimer, E.; Kabra, S.; Williams, S. Kontrolle von Eigenspannungen und Verformungen in Additive Fertigung von Aluminiumdraht und Lichtbogen mit Walzen. *Addit Manuf.* **2018**, *22*, 775–783. [\[CrossRef\]](#)
25. Schroepfer, KWD; Wildenhain, RS; Kannengiesser, AHT; Hensel, AKJ Einfluss des WAAM-Prozesses und Designaspekte über Eigenspannungen in hochfesten Baustählen. *Weld World* **2023**, *67*, 987–996.
26. Geng, R.; Du, J.; Wei, Z.; Xu, S.; Ma, N. Modellierung und experimentelle Beobachtung der Ablagerungsgeometrie und der Mikrostrukturentwicklung einer Aluminiumlegierung, die durch additive Drahtlichtbogenfertigung hergestellt wurde. *J. Manuf. Process.* **2021**, *64*, 369–378. [\[CrossRef\]](#)
27. Klein, T.; Spoerk-Erdely, P.; Schneider-Broeskamp, C.; Oliveira, JP; Faria, GA Eigenspannungen in einer draht- und lichtbogengerichteten energieabgeschiedenen Al-6Cu-Mn (ER2319)-Legierung, bestimmt durch energiedispersive hochenergetische Röntgenbeugung. *Met. Mater. Übers. A* **2024**, *55*, 736–744. [\[CrossRef\]](#)
28. Ermakova, A.; Mehmanparast, A.; Ganguly, S.; Razavi, N.; Berto, F. Untersuchung der mechanischen und Brucheigenschaften von Draht und additiv gefertigte Bauteile aus kohlenstoffarmem Stahl. *Theor. Appl. Fract. Mech.* **2020**, *109*, 102685. [\[CrossRef\]](#)
29. Derekar, KS Ein Überblick über die additive Drahtlichtbogenfertigung und Fortschritte bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung von Aluminium. *Mater. Sci. Technol.* **2018**, *34*, 895–916. [\[CrossRef\]](#)
30. Taşdemir, A.; Nohut, S. Ein Überblick über Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) in der Schiffbauindustrie. *Schiffe, Offshore-Struktur.* **2020**, *16*, 1–18. [\[CrossRef\]](#)
31. Müller, J.; Grabowski, M.; Müller, C.; Hensel, J.; Unglaub, J.; Thiele, K.; Kloft, H.; Dilger, K. Design und Parameteridentifikation von draht- und lichtbogenadditiv gefertigten (WAAM) Stahlstäben für den Einsatz im Bauwesen. *Metals* **2019**, *9*, 725. [\[CrossRef\]](#)
32. Abbaszadeh, M.; Hönnige, JR; Martina, F.; Neto, L.; Kashaev, N.; Colegrove, P.; Williams, S.; Klusemann, B. Numerische Untersuchung der Auswirkung des Walzens auf die lokale Spannungs- und Dehnungsinduktion für additiv gefertigte Draht- und Lichtbogenstrukturen. *J. Mater. Eng. Perform.* **2019**, *28*, 4931–4942. [\[CrossRef\]](#)
33. Song, SS; Chen, J.; Quan, G.; Ye, J.; Zhao, Y. Numerische Analyse und Design von betongefüllten Drahtbögen, additiv hergestellt Stahlrohr unter axialer Kompression. *Eng. Struct.* **2024**, *301*, 117294. [\[CrossRef\]](#)
34. Wu, Q.; Mukherjee, T.; De, A.; DebRoy, T. Eigenspannungen bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen – Hierarchie der Einflussvariablen. *Addit. Manuf.* **2020**, *35*, 101355. [\[CrossRef\]](#)
35. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Drahtvorschub-Additive Fertigung von Metallkomponenten: Technologien, Entwicklungen und zukünftige Interessen. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2015**, *81*, 465–481. [\[CrossRef\]](#)
36. Jafari, D.; Vaneker, THJ; Gibson, I. Draht- und Lichtbogen-Additive Fertigung: Chancen und Herausforderungen bei der Qualitätskontrolle und Genauigkeit der hergestellten Teile. *Mater. Des.* **2021**, *202*, 109471. [\[CrossRef\]](#)
37. Wu, B.; Pan, Z.; Chen, G.; Ding, D.; Yuan, L.; Cuiuri, D.; Li, H. Milderung der thermischen Verformung bei additiv gefertigten Drahtbogen Ti6Al4V-Teil mit aktiver Zwischenlagenkühlung. *Sci. Technol. Weld. Join.* **2019**, *24*, 484–494. [\[CrossRef\]](#)
38. Rozaimi, M.; Yusof, F. Forschungsherausforderungen, Qualitätskontroll- und Überwachungsstrategie für die additive Fertigung mit Drahtlichtbogenverfahren. *J. Mater. Res. Technol.* **2023**, *24*, 2769–2794.
39. Ahmad, B.; Zhang, X.; Guo, H.; Fitzpatrick, ME; Neto, LMSC; Williams, S. Einfluss von Ablagerungsstrategien auf Rest Spannung in Draht + Lichtbogen Additiv gefertigtes Titan Ti-6Al-4V. *Metals* **2022**, *12*, 253. [\[CrossRef\]](#)
40. Schönegger, S.; Moschinger, M.; Enzinger, N. Computergestützte Schweißsimulation eines Plasmadrahtlichtbogen-Additivverfahrens Verfahren zur Herstellung hochfester Stähle. *Eur. J. Mater.* **2024**, *4*, 2297051. [\[CrossRef\]](#)
41. Qvale, P.; Njaastad, EB; Bræin, T.; Ren, X. Eine schnelle Simulationsmethode für das Wärmemanagement in der additiven Drahtlichtbogenfertigung Reparatur einer dünnwandigen Struktur. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2024**, *132*, 1573–1583. [\[CrossRef\]](#)

42. Wang, C.; Suder, W.; Ding, J.; Williams, S. Der Einfluss der Drahtgröße auf die additive Fertigung von Drähten mit hoher Abscheidungsrate und Plasmalichtbogen von Ti-6Al-4V. *J. Am. Acad. Dermatol.* **2021**, *288*, 116842. [\[CrossRef\]](#)
43. Gupta, AK; Bansal, H.; Madan, A. Studie zum CNC-Drahtlichtbogen-Additiv-Herstellungsprozess für höhere Ablagerungsrate und mechanische Festigkeit. *Adv. Robot. Autom.* **2022**, *10*, 9695.
44. Ananda, PA WAAM-Anwendung für EPC-Unternehmen. *MATEC Web Conf.* **2019**, *269*, 05002. [\[CrossRef\]](#)
45. Li, Y.; Dong, Z.; Miao, J.; Liu, H.; Babkin, A.; Chang, Y. Verbesserung der Formgenauigkeit bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen (WAAM): Eine Übersicht. *Rapid Prototyp. J.* **2022**, *29*, 673–686. [\[CrossRef\]](#)
46. Chaurasia, M.; Sinha, MK Untersuchungen zu Prozessparametern der additiven Drahtlichtbogenfertigung (WAAM): Ein Überblick; Vorlesungsunterlagen im Maschinenbau; Springer Nature: Singapur, 2021; S. 845–853.
47. Gowthaman, PS; Jeyakumar, S.; Sarathchandra, D. Einfluss der Wärmezufuhr auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften von 316L Edelstahl hergestellt durch additive Drahtlichtbogenfertigung. *J. Mater. Eng. Perform.* **2024**, *33*, 5536–5546. [\[CrossRef\]](#)
48. Tomar, B.; Shiva, S.; Nath, T. Ein Überblick über die additive Fertigung mit Drahtlichtbogenverfahren: Verarbeitungsparameter, Defekte, Qualitätsverbesserung und aktuelle Fortschritte. *Mater. Today Commun.* **2022**, *31*, 103739. [\[CrossRef\]](#)
49. Voropaev, A.; Korsmik, R.; Tsibulskiy, I. Merkmale des Schmelzens und Übertragens von Fülldrähten bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung von Metallwerkstücke. *Werkstoffe* **2021**, *14*, 5077. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Chen, C.; He, H.; Zhou, S.; Lian, G.; Huang, X.; Feng, M. Vorhersage des Mehrperlenprofils von additiv gefertigten Roboterdraht- und Lichtbogenkomponenten rekursiv mithilfe einer rotationssymmetrischen Tropfenformanalyse. *Virtual Phys. Prototyp.* **2023**, *18*, 1–24. [\[CrossRef\]](#)
51. Ayed, A.; Valencia, A.; Bras, G.; Bernard, H.; Michaud, P.; Balcaen, Y.; Alexis, J. Auswirkungen von WAAM-Prozessparametern auf metallurgische und mechanische Eigenschaften von Ti-6Al-4V-Lagerstätten. In *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing: Proceedings der zweiten internationalen Konferenz über fortschrittliche Materialien, Mechanik und Fertigung (A3M'2018)*, Hammamet, Tunesien, 17.–19. Dezember 2018; *Lecture Notes in Mechanical Engineering*; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Deutschland, 2020; S. 26–35.
52. Mai, DS; Doan, TK; Paris, H. Engineering Science and Technology, eine internationale Zeitschrift Draht- und Lichtbogen-Additive Fertigung von 308L-Edelstahlkomponenten: Optimierung der Verarbeitungsparameter und Materialeigenschaften. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* **2021**, *24*, 1015–1026.
53. Lin, Z.; Goulas, C.; Ya, W.; Hermans, MJ Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von mittelkohlenstoffhaltigen Stahlablagerungen über Wire and Arc Additive Manufacturing mit Metallkerndrähten. *Metals* **2019**, *9*, 673. [\[CrossRef\]](#)
54. Song, GH; Lee, CM; Kim, DH Untersuchung der Pfadplanung zur Reduzierung von Höhenfehlern von Schnittpunkten bei der additiven Fertigung mit Drahtbogen. *Materials* **2021**, *14*, 6477. [\[CrossRef\]](#)
55. Zhou, Z.; Shen, H.; Liu, B.; Du, W.; Jin, J.; Lin, J. Vorhersage der thermischen Restspannung für kontinuierliche Werkzeugwege beim Drahtlichtbogen-Additiv Fertigung: Eine dreistufige datengesteuerte Methode. *Virtual Phys. Prototyp.* **2022**, *17*, 105–124. [\[CrossRef\]](#)
56. Guo, C.; Li, G.; Li, S.; Hu, X.; Lu, H.; Li, X.; Xu, Z.; Chen, Y.; Li, Q.; Lu, J.; et al. Additive Fertigung von Ni-basierten Superlegierungen: Eigenspannung, Mechanismen der Rissbildung und Strategien zur Risshemmung. *Nano Mater. Sci.* **2023**, *5*, 53–77. [\[CrossRef\]](#)
57. Scotti, FM; Teixeira, FR; da Silva, LJ; de Araújo, DB; Reis, RP; Scotti, A. Wärmemanagement in WAAM durch das CMT Fortschrittlicher Prozess und eine aktive Kühltechnik. *J. Manuf. Process.* **2020**, *57*, 23–35. [\[CrossRef\]](#)
58. Ahsan, MRU; Tanvir, ANM; Ross, T.; Elsayy, A.; Oh, MS; Kim, DB Herstellung einer bimetalischen additiv gefertigten Struktur (BAMS) aus kohlenstoffarmem Stahl und austenitischem Edelstahl 316L mit Draht- und Lichtbogen-Additivfertigung. *Rapid Prototype J.* **2020**, *26*, 519–530.
59. Wu, Q.; Ma, Z.; Chen, G.; Liu, C.; Ma, D.; Ma, S. Erzielung feiner Mikrostrukturen und ungestützter Überhänge durch additive Fertigung mit geringem Wärmeeintrag und Impulslichtbogen. *J. Manuf. Process.* **2017**, *27*, 198–206. [\[CrossRef\]](#)
60. Doumenc, G.; Couturier, L.; Courant, B.; Paillard, P.; Benoit, A.; Gautron, E.; Girault, B.; Pirling, T.; Cabeza, S.; Gloaguen, D. Untersuchung der Mikrostruktur, Härte und Eigenspannungen von Draht und Lichtbogen aus additiv gefertigter Aluminiumlegierung 6061. Zitieren Sie diese Version: HAL Id: Hal-03827007. *Materialia* **2022**, *25*, 101520. [\[CrossRef\]](#)
61. Tröger, J.-A.; Hartmann, S.; Treutler, K.; Potschka, A.; Wesling, V. Simulationsbasierte Prozessparameteroptimierung für die additive Drahtlichtbogenfertigung. *Prog. Addit. Manuf.* **2024**. [\[CrossRef\]](#)
62. Nagallapati, V.; Khare, VK; Sharma, A.; Simhambhatla, S. Aktives und passives Wärmemanagement in der Drahtlichtbogenadditivierung Fertigung. *Metals* **2023**, *13*, 682. [\[CrossRef\]](#)
63. Ahsan, M.; Seo, G.-J.; Fan, X.; Liaw, PK; Motaman, S.; Haase, C.; Kim, DB Auswirkungen von Prozessparametern auf Perlenform, Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften bei der additiven Fertigung von Al0,1CoCrFeNi-Hochentropielegierungen mittels Draht und Lichtbogen. *J. Manuf. Prozess.* **2021**, *68*, 1314–1327. [\[CrossRef\]](#)
64. He, T.; Yu, S.; Shi, Y.; Huang, A. Formgebung und mechanische Eigenschaften der additiven Drahtlichtbogenfertigung für Schiffspropellerhalterungen. *J. Manuf. Process.* **2020**, *52*, 96–105. [\[CrossRef\]](#)
65. Su, C.; Chen, X.; Gao, C.; Wang, Y. Einfluss der Wärmezufuhr auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften von Al-Mg-Legierungen, die durch WAAM hergestellt wurden. *Appl. Surf. Sci.* **2019**, *486*, 431–440. [\[CrossRef\]](#)
66. Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J.; Wandtke, K.; Schroepfer, D.; Kromm, A.; Kannengiesser, T. Einfluss der Wärmeführung auf Eigenschaften und Eigenspannungen additiv geschweißter hochfester Stahlbauteile. *Metals* **2022**, *12*, 951. [\[CrossRef\]](#)
67. Javadi, Y.; Smith, M.; Venkata, KA; Naveed, N.; Forsey, A.; Francis, J.; Ainsworth, R.; Truman, C.; Smith, D.; Hosseinzadeh, F.; et al. Ringversuch zur Messung der Eigenspannung an einer Elektronenstrahlschweißverbindung zwischen austenitischem Edelstahl 316L(N) und ferritischem Stahl P91. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* **2017**, *154*, 41–57.

68. Saleh, B.; Fathi, R.; Tian, Y.; Radhika, N.; Jiang, J.; Ma, A. Grundlagen und Fortschritte der additiven Drahtlichtbogenfertigung: Materialien, Prozessparameter, potenzielle Anwendungen und zukünftige Trends. In *Archives of Civil and Mechanical Engineering*; Springer: London, Großbritannien, 2023; Band 23, S. 1–71.
69. Rosli, NA; Alkahari, MR; bin Abdollah, MF; Maidin, S.; Ramli, FR; Herawan, SG Übersicht über die Wirkung der Wärmezufuhr beim Drahtlichtbogen additiver Fertigungsprozess. *J. Mater. Res. Technol.* **2021**, *11*, 2127–2145. [\[CrossRef\]](#)
70. Li, JZ; Alkahari, MR; Rosli, NAB; Hasan, R.; Sudin, MN; Ramli, FR Überprüfung der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogenverfahren für den 3D- Metalldruck Überprüfung der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogenverfahren für den 3D-Metalldruck. *Int. J. Autom. Technol.* **2019**, *13*, 346–353.
71. Woo, W.; Kim, D.-K.; Kingston, E.; Luzin, V.; Salvemini, F.; Hill, MR Einfluss von Zwischenschichten und Scanstrategien auf die Verteilung von Eigenspannungen durch die Dicke in additiv gefertigten ferritisch-austenitischen Stahlstrukturen. *Mater. Sci. Eng. A* **2019**, *744*, 618–629.
72. Geng, H.; Li, J.; Gao, J.; Lin, X. Theoretische Modelle für Eigenspannung und Verzug bei der additiven Draht- und Lichtbogenfertigung Versteifte Platten. *Metals* **2020**, *10*, 666. [\[CrossRef\]](#)
73. Rouquette, S.; Cambon, C.; Bendaoud, I.; Soulié, F. Restspannungen in SS316L-Proben nach Abscheidung von geschmolzenem Fülldraht. In *Proceedings of the ICRS 11 – Die 11. Internationale Konferenz zu Restspannungen*, Nancy, Frankreich, 27.–30. März 2022.
74. Kumaran, M.; Senthilkumar, V.; Panicke, CJ; Shishir, R. Untersuchung der Eigenspannung bei der additiven Fertigung von Reparaturarbeiten durch gerichtete Energieabscheidung auf SS316L-Warmwalzstahlsubstrat. *Mater. Today Proc.* **2021**, *47*, 4475–4478. [\[CrossRef\]](#)
75. Mishurova, T.; Sydow, B.; Thiede, T.; Sizova, I.; Ulbricht, A.; Bambach, M.; Bruno, G. Eigenspannung und Mikrostruktur eines Ti-6Al-4V Drahtlichtbogen-Hybrid-Demonstrator für additive Fertigung. *Metals* **2020**, *10*, 701. [\[CrossRef\]](#)
76. Martina, F.; Roy, MJ; Szost, BA; Terzi, S.; Colegrove, PA; Williams, SW; Withers, PJ; Meyer, J.; Hofmann, M. Restspannung von Ti-6Al-4V-Komponenten im aufgetragenen und gewalzten Zustand aus Draht + Lichtbogenadditiver Fertigung. *Mater. Sci. Technol.* **2016**, *32*, 1439–1448. [\[Querverweis\]](#)
77. Liu, C.; Lin, C.; Wang, J.; Wang, J.; Yan, L.; Luo, Y.; Yang, M. Restspannungsverteilungen in dicken Proben aus einem großes kreisförmiges Draht-plus-Lichtbogen-Modell für additive Fertigung. *J. Manuf. Process.* **2020**, *56*, 474–481.
78. Yang, Y.; Jin, X.; Liu, C.; Xiao, M.; Lu, J.; Fan, H.; Ma, S. Restspannung, mechanische Eigenschaften und Kornmorphologie einer Ti-6Al-4V-Legierung, hergestellt durch Ultraschall-Schlagbehandlung mit Draht- und Lichtbogen-Additivfertigung. *Metals* **2018**, *8*, 934. [\[Querverweis\]](#)
79. Boruah, D.; Dewagtere, N.; Ahmad, B.; Nunes, R.; Tacq, J.; Zhang, X.; Guo, H.; Verlinde, W.; De Waele, W. Digitale Bildkorrelation zur Messung von Vollfeld-Eigenspannungen in additiv gefertigten Draht- und Lichtbogenkomponenten. *Materials* **2023**, *16*, 1702. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. Rani, KU; Kumar, R.; Mahapatra, MM; Mulik, RS; Swierczyńska, A.; Fydrych, D.; Pandey, C. Drahtbogenadditiv gefertigter Weichstahl und austenitische Eigenschaften und Eigenspannungen. *Materials* **2022**, *15*, 7094. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
81. Gao, L.; Chuang, AC; Kenesei, P.; Ren, Z.; Balderson, L.; Sun, T. Eine Operando-Synchrotronstudie über die Auswirkung des Schmelzzustands von Drähten auf die Erstarrungsmikrostrukturen von Inconel 718 bei der drahtlasergerichteten Energieabscheidung. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **2024**, *194*, 104089. [\[CrossRef\]](#)
82. Robin, IK; Sprouster, DJ; Sridharan, N.; Snead, LL; Zinkle, SJ Synchrotronbasierte Untersuchung der Anisotropie und Mikrostruktur von additiv hergestelltem Drahtlichtbogenstahl der Güteklasse 91. *J. Mater. Res. Technol.* **2024**, *29*, 5010–5021. [\[CrossRef\]](#)
83. Kumar, V.; Mandal, A.; Das, AK; Kumar, S. Parametrische Untersuchung und Charakterisierung von additiv hergestelltem Stahl mittels Lichtbogendraht Strukturen. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *115*, 1723–1733. [\[CrossRef\]](#)
84. Shen, C.; Reid, M.; Liss, K.-D.; Pan, Z.; Ma, Y.; Cuiuri, D.; van Duin, S.; Li, H. Neutronenbeugungs-Eigenspannungsbestimmungen in Fe3Al-basierten Eisenaluminidkomponenten, die mittels Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) hergestellt wurden. *Addit. Manuf.* **2019**, *29*, 100774. [\[CrossRef\]](#)
85. Rouquette, S.; Cambon, C.; Bendaoud, I.; Cabeza, S.; Soulié, F. Auswirkung der Schichtaddition auf die Eigenspannungen des Drahtlichtbogenadditivs Hergestellte Edelstahlproben. *J. Manuf. Sci. Eng.* **2024**, *146*, 1–12. [\[CrossRef\]](#)
86. Rodrigues, TA; Farias, FWC; Zhang, K.; Shamsolhodaei, A.; Shen, J.; Zhou, N.; Schell, N.; Capek, J.; Polatidis, E.; Santos, TG; et al. Draht- und Lichtbogen- Additive Fertigung von funktionell abgestuftem Material aus Edelstahl 316L/Inconel 625: Entwicklung und Charakterisierung. *J. Mater. Res. Technol.* **2022**, *21*, 237–251. [\[CrossRef\]](#)
87. Théodore, J.; Couturier, L.; Girault, B.; Cabeza, S.; Pirling, T.; Frapier, R.; Bazin, G.; Courant, B. Beziehung zwischen Mikrostruktur und Restspannung in rostfreien Stählen, die in-situ durch das Double-Wire Arc Additive Manufacturing (D-WAAM) -Verfahren legiert wurden. *Materialia* **2023**, *30*, 101850. [\[CrossRef\]](#)
88. Kumar, MB; Manikandan, M. Bewertung der Mikrostruktur, der Eigenspannung und der mechanischen Eigenschaften in verschiedenen Ebenen einer additiv hergestellten Superlegierung auf Nickelbasis mit Draht- und Lichtbogenverfahren. *Met. Mater. Int.* **2022**, *28*, 3033–3056. [\[CrossRef\]](#)
89. Schweißzusätze für Stähle mit Streckgrenze > 460 MPa. Online verfügbar: <https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/2-SM-pro-oceli-s-mez%C3%AD-kuzu-nad-460-MPa.pdf> (abgerufen am 26. Juni 2024).
90. Sun, J.; Hensel, J.; Köhler, M.; Dilger, K. Eigenspannungen in draht- und lichtbogenadditiv gefertigten Aluminiumbauteilen. *J. Manuf. Prozess.* **2021**, *65*, 97–111. [\[CrossRef\]](#)
91. Rodrigues, TA; Farias, FWC; Avila, JA; Maawad, E.; Schell, N.; Santos, TG; Oliveira, JP Wirkung von Wärmebehandlungen auf Inconel 625, hergestellt durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung: Eine In-situ-Synchrotron-Röntgenbeugungsanalyse. *Sci. Technol. Schweißen. Verbinden.* **2023**, *28*, 534–539. [\[CrossRef\]](#)

92. Wandtke, K.; Becker, A.; Schroeffer, D.; Kromm, A.; Kannengiesser, T.; Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J. Entwicklung von Eigenspannungen beim Nutenfräsen für Reparaturschweißen und additive Fertigung hochfester Stahlkomponenten mittels Drahtlichtbogen. *Metals* **2024**, *14*, 82. [\[CrossRef\]](#)
93. Wu, Q.; Mukherjee, T.; Liu, C.; Lu, J.; DebRoy, T. Restspannungen und Verzerrungen beim Musterdruck von Titan und Nickel Legierungen. *Addit. Manuf.* **2019**, *29*, 100808. [\[CrossRef\]](#)
94. Han, Y. Eine Finite-Elemente-Studie zur additiven Fertigung von Aluminiumlegierungen mittels Drahtlichtbogen. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 810. [\[CrossRef\]](#)
95. Khaled, H.; Abusalma, J. Parametrische Untersuchung von Eigenspannungen in additiv gefertigten Draht- und Lichtbogenteilen. Masterarbeit, Old Dominion University, Norfolk, VA, USA, 2020.
96. Saadatmand, M.; Talemi, R. Untersuchung des thermischen Zyklus einer mit Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) hergestellten Kohlenstoffstahlwand unter Verwendung numerische Simulation. *Frat. Ed Integrita Strutt.* **2020**, *14*, 98–104. [\[CrossRef\]](#)
97. Eisazadeh, H.; Achuthan, A.; Goldak, J.; Aidun, D. Einfluss von Materialeigenschaften und mechanischer Zugbelastung auf die Eigenspannung Bildung in GTA 304-A36 ungleichartige Schweißnaht. *J. Mater. Process. Technol.* **2015**, *222*, 344–355. [\[CrossRef\]](#)
98. Nezamdoost, MR; Esfahani, MRN; Hashemi, SH; Mirbozorgi, SA Untersuchung von Temperatur und Eigenspannungen beim Unterpulverschweißen mit der Methode der finiten Elemente und Experimenten. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2016**, *87*, 615–624. [\[CrossRef\]](#)
99. Huang, H.; Ma, N.; Chen, J.; Feng, Z.; Murakawa, H. Zur groß angelegten Simulation von Eigenspannungen und Verformungen in Draht und Arc Additive Manufacturing. *Addit. Manuf.* **2020**, *34*, 101248. [\[CrossRef\]](#)
100. Han, YS Wire Arc Additive Manufacturing: Eine Untersuchung von Prozessparametern mittels Multiphysik-Simulationen. *Materials* **2023**, *16*, 7267. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
101. Jia, J.; Zhao, Y.; Dong, M.; Wu, A.; Li, Q. Numerische Simulation von Eigenspannung und Verformung für WAAM-Teile aus Aluminiumlegierung basierend auf der Temperaturfunktionsmethode. *Trans. China Weld. Inst.* **2020**, *29*, 1–8.
102. Feng, G.; Wang, HWY; Deng, D.; Zhang, J. Numerische Simulation von Eigenspannungen und Deformationen beim Drahtlichtbogenadditiv Herstellung. *Crystals* **2022**, *12*, 803. [\[CrossRef\]](#)
103. Graf, M.; Pradjadhiana, KP; Hälsig, A.; Manurung, YHP; Awiszus, B. Numerische Simulation der additiven Fertigung mit metallischem Drahtbogen (WAAM). In AIP Conference Proceedings; AIP Publishing: Long Island, NY, USA, 2018; Band 960, S. 140010.
104. Ahmad, SN; Manurung, YH; Mat, MF; Minggu, Z.; Jaffar, A.; Pruller, S.; Leitner, M. FEM-Simulationsverfahren zur Verzerrungs- und Eigenspannungsanalyse bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; Band 834, S. 012083.
105. Cadiou, S.; Courtois, M.; Carin, M.; Berckmans, W.; Le masson, P. 3D-Wärmeübertragung, Flüssigkeitsströmung und elektromagnetisches Modell für kalte Additive Fertigung mittels Metalltransferdrahtlichtbogen (Cmt-Waam). *Addit. Manuf.* **2020**, *36*, 101541. [\[CrossRef\]](#)
106. Drexler, H.; Haunreiter, F.; Raberger, L.; Reiter, L.; Hütter, A.; Enzinger, N. Numerische Modellierung von Verformungen und Eigenspannungen während der additiven Drahtlichtbogenfertigung einer ER 5183-Legierung mit Webabscheidung. *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte* **2024**, *169*, 38–47. [\[CrossRef\]](#)
107. Bonifaz, EA; Palomeque, JS Ein mechanisches Modell im additiven Draht- und Lichtbogenfertigungsprozess. *Prog. Addit. Manuf.* **2020**, *5*, 163–169. [\[CrossRef\]](#)
108. Reyes-Gordillo, E.; Gómez-Ortega, A.; Morales-Estrella, R.; Pérez-Barrera, J.; Gonzalez-Carmona, J.; Escudero-García, R.; Alvarado-Orozco, J. Einfluss der Kaltmetallübertragungsparameter während der additiven Drahtlichtbogenfertigung von Ti6Al4V-Mehrschichtwänden . 2022. Online verfügbar: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1946459/v1> (abgerufen am 26. Juni 2024).
109. Silva, WF Bewertung der Eigenschaften von Inconel ® 625-Vorformendie mit WAAM-Technologie hergestellt wurden. *Res. Sq.* **2024**. Online verfügbar : <https://www.researchsquare.com/article/rs-3591195/v1> (abgerufen am 26. Juni 2024).
110. Derekar, KS; Addison, A.; Joshi, SS; Zhang, X.; Lawrence, J.; Xu, L.; Melton, G.; Griffiths, D. Wirkung von gepulsten Metall-Inertgas- (Puls-MIG) und Kaltmetalltransfer-(CMT)-Techniken auf die Wasserstoffauflösung bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung (WAAM) von Aluminium. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *107*, 311–331. [\[CrossRef\]](#)
111. Rosli, NA; Alkahari, MR; Ramli, FR; Sudin, MN; Maidin, S. Einfluss von Prozessparametern bei Draht- und Lichtbogenadditivierung Fertigung (WAAM). *Prozess. J. Mech. Eng.* **2020**, *17*, 69–78. [\[CrossRef\]](#)
112. Derekar, KS; Ahmad, B.; Zhang, X.; Joshi, SS; Lawrence, J.; Xu, L.; Melton, G.; Addison, A. Auswirkungen von Prozessvarianten auf Eigenspannungen bei der additiven Fertigung von Aluminiumlegierungen im Drahtlichtbogenverfahren 5183. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans.* **2022**, *144*, 071005 [\[Querverweis\]](#)
113. Yuan, Q.; Liu, C.; Wang, W.; Wang, M. Verteilung der Eigenspannung in einer großen Probe, die durch additive Drahtlichtbogenfertigung hergestellt wurde . *Sci. Technol. Weld. Join.* **2023**, *28*, 137–144. [\[CrossRef\]](#)
114. Fu, R.; Tang, S.; Lu, J.; Cui, Y.; Li, Z.; Zhang, H.; Xu, T.; Chen, Z.; Liu, C. Additive Fertigung von Aluminiumlegierungen mittels Heißdrahtlichtbogen mit reduzierter Porosität und hoher Abscheidungsrate. *Mater. Des.* **2021**, *199*, 199109370. [\[CrossRef\]](#)
115. Zhang, C.; Li, Y.; Gao, M.; Zeng, X. Additive Fertigung einer Al-6Mg-Legierung mittels Lichtbogenverfahren mit variabler Polarität und Kaltmetalltransfer Lichtbogen als Energiequelle. *Mater. Sci. Eng. A* **2018**, *711*, 415–423. [\[CrossRef\]](#)
116. Corbin, DJ; Nassar, AR; Reutzel, EW; Kistler, NA; Beese, AM; Michaleris, P. Einfluss der Parameter der gerichteten Energieabscheidung auf die mechanische Verzerrung von laserabgeschiedenem Ti-6Al-4V. In Proceedings des 27. jährlichen internationalen Symposiums zur Festkörper-Freiformfertigung – eine Konferenz zur additiven Fertigung SFF, Austin, TX, USA, 8.–10. August 2016; S. 670–679.
117. Xiong, J.; Lei, Y.; Li, R. Finite-Elemente-Analyse und experimentelle Validierung des thermischen Verhaltens dünnwandiger Teile in der GMAW-basierten additiven Fertigung mit verschiedenen Substratvorwärmtemperaturen. *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *126*, 43–52. [\[Querverweis\]](#)

118. Zhao, J.; Quan, GZ; Zhang, YQ; Ma, YY; Jiang, LH; Dai, WW; Jiang, Q. Einfluss der Ablagerungspfadstrategie auf Eigenspannung und Verformung bei der additiven Fertigung von Scheibenteilen mittels Webdrahtlichtbogen. *J. Mater. Res. Technol.* **2024**, *30*, 2242–2256. [\[CrossRef\]](#)
119. Ouellet, T.; Croteau, M.; Bois-Brochu, A.; Lévesque, J. Wire Arc Additive Manufacturing von Aluminiumlegierungen. *Ing. Proz.* **2023**, *43*, 16. [\[CrossRef\]](#)
120. Zhang, J.; Wang, X.; Paddea, S.; Zhang, X. Ermüdungsrisssausbreitungsverhalten in additiv mittels Draht+Lichtbogen hergestelltem Ti-6Al-4V: Auswirkungen von Mikrostruktur und Eigenspannung. *Mater. Des.* **2016**, *90*, 551–561. [\[CrossRef\]](#)
121. Gu, J.; Gao, M.; Yang, S.; Bai, J.; Zhai, Y.; Ding, J. Mikrostruktur, Defekte und mechanische Eigenschaften einer additiv hergestellten Al[$\text{Cu}_{4,3}\text{Mg}_{1,5}$]-Legierung aus Draht und Lichtbogen. *Mater. Des.* **2020**, *186*, 108357. [\[CrossRef\]](#)
122. Kindermann, RM; Roy, MJ; Morana, R.; Francis, JA Auswirkungen mikrostruktureller Heterogenität und struktureller Defekte auf das mechanische Verhalten von additiv mit Draht und Lichtbogen hergestellten Inconel 718-Komponenten. *Mater. Sci. Eng. A* **2022**, *839*, 142826. [\[Querverweis\]](#)
123. Yildiz, AS; Koc, BI; Yilmaz, O. Bestimmung des thermischen Verhaltens für den additiven Drahtlichtbogen-Herstellungsprozess. *Procedia Manuf.* **2020**, *54*, 233–237. [\[CrossRef\]](#)
124. Pawlik, J.; Cieřlik, J.; Bembenek, M.; Góral, T.; Kapayeva, S.; Kapkenova, M. Über den Einfluss des linearen Energie-/Wärmeeintragskoeffizienten auf Härte und Schweißnahtgeometrie in chromreichen Stringer-GMAW-Beschichtungen. *Materials* **2022**, *15*, 6019. [\[Querverweis\]](#)
125. Romanenko, D.; Prakash, VJ; Kuhn, T.; Moeller, C.; Hintze, W.; Emmelmann, C. Einfluss von DED-Prozessparametern auf Verzerrung und Eigenspannungszustand additiv gefertigter Ti-6Al-4V-Komponenten während der Bearbeitung. *Procedia CIRP* **2022**, *11*, 271–276. [\[Querverweis\]](#)
126. Mu, H.; Polden, J.; Li, Y.; He, F.; Xia, C.; Pan, Z. Schichtweise modellbasierte adaptive Steuerung für die additive Drahtlichtbogenfertigung von Dünnwandstrukturen. *J. Intell. Manuf.* **2022**, *33*, 1165–1180. [\[CrossRef\]](#)
127. Liu, B.; Lan, J.; Liu, H.; Chen, X.; Zhang, X.; Jiang, Z.; Han, J. Die Auswirkungen von Verarbeitungsparametern während der additiven Drahtlichtbogenfertigung von 308L-Edelstahl auf die Bildung einer dünnwandigen Struktur. *Materials* **2024**, *17*, 1337. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
128. Ali, MH; Han, YS Eine Finite-Elemente-Analyse der Auswirkungen von Scanmuster und Energie auf Eigenspannung und Verformung in Wire Arc Additive Manufacturing von EH36-Stahl. *Materials* **2023**, *16*, 4698. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
129. Chen, S.; He, T.; Wu, X.; Lei, G. Synergistische Wirkung von Carbiden und Restspannung auf das mechanische Verhalten von Ni-17 Mo-7Cr- Superlegierungen, die durch additive Drahtlichtbogenfertigung hergestellt wurden. *Mater. Lett.* **2021**, *287*, 129291. [\[CrossRef\]](#)
130. Winczek, J.; Gucwa, M.; Makles, K.; Mięcian, M.; Yadav, A. Die Wärmezufuhr zum Schweißen pro Längeneinheit und pro Einheit Band. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2021**, *1199*, 012067. [\[CrossRef\]](#)
131. Koli, Y.; Arora, S.; Ahmad, S.; Priya Yuvaraj, N.; Khan, ZA Untersuchungen und Multi-Response-Optimierung von Parametern des Kaltmetalltransferprozesses bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung zur Herstellung von SS308L-Proben. *J. Mater. Eng. Perform.* **2023**, *32*, 2463–2475. [\[CrossRef\]](#)
132. Cambon, C.; Rouquette, S.; Bendaoud, I.; Bordreuil, C.; Wimpory, R.; Soulie, F. Thermomechanische Simulation von übereinander geschichteten Schichten, hergestellt mit Draht + Lichtbogen-Additivfertigung und GMAW-Kaltmetalltransfer. *Weld World* **2020**, *64*, 1427–1435. [\[CrossRef\]](#)
133. Omiyale, BO; Olugbade, TO; Abioye, TE; Farayibi, PK Drahtlichtbogen-Additive Fertigung von Aluminiumlegierungen für die Luft- und Raumfahrt und Automobilanwendungen: Ein Überblick. *Mater. Sci. Technol.* **2022**, *38*, 391–408. [\[CrossRef\]](#)
134. Wang, J.; Pan, Z.; Carpenter, K.; Han, J.; Wang, Z.; Li, H. Vergleichende Studie zur kristallografischen Orientierung, Ausfällung, Phasenumwandlung und mechanischen Reaktion einer Ni-reichen NiTi-Legierung, hergestellt durch WAAM bei erhöhten Substratheitemperaturen. *Mater. Sci. Eng. A* **2021**, *800*, 140307. [\[CrossRef\]](#)
135. Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams, S.; Wiktorowicz, R.; Palt, MR Entwicklung einer lokalen Abschirmvorrichtung mit laminarer Strömung für die additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen. *J. Mater. Process. Technol.* **2015**, *226*, 99–105. [\[CrossRef\]](#)
136. Tonelli, L.; Laghi, V.; Palermo, M.; Trombetti, T.; Ceschini, L. AA5083 (Al-Mg)-Platten, hergestellt durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung: Einfluss der Probenausrichtung auf Mikrostruktur und Zugfestigkeitseigenschaften. *Prog. Addit. Manuf.* **2021**, *6*, 479–494. [\[Querverweis\]](#)
137. Zhang, C.; Shen, C.; Hua, X.; Li, F.; Zhang, Y.; Zhu, Y. Einfluss der Drahtlichtbogen-Pfadplanungsstrategie für additive Fertigungsverfahren auf den Restspannungsstatus in einer einzigen Aufbauschicht. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *111*, 797–806. [\[CrossRef\]](#)
138. Denlinger, ER; Heigel, JC; Michaleris, P.; Palmer, TA Einfluss der Verweilzeit zwischen den Schichten auf Verformung und Eigenspannung bei der additiven Fertigung von Titan- und Nickellegierungen. *J. Mater. Process. Technol.* **2015**, *215*, 123–131. [\[CrossRef\]](#)
139. Gudur, S.; Nagallapati, V.; Pawar, S.; Muvvala, G.; Simhambhatla, S. Eine Studie über die Auswirkungen der Substraterwärmung und -kühlung auf die Perlengometrie bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung und deren Korrelation mit der Abkühlrate. *Mater. Today Proc.* **2019**, *41*, 431–436. [\[Querverweis\]](#)
140. Singh, S.; Jinoop, AN; Tarun Kumar, GTA; Palani, IA; Paul, CP; Prashanth, KG Einfluss der Zwischenschichtverzögerung auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigten Wandstrukturen im Drahtlichtbogenverfahren. *Materials* **2021**, *14*, 4187. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
141. Bermingham, MJ; Nicastro, L.; Kent, D.; Chen, Y.; Dargusch, MS Optimierung der mechanischen Eigenschaften von Ti-6Al-4V-Komponenten, die durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung mit nachträglicher Wärmebehandlung hergestellt wurden. *J. Alloys Compd.* **2018**, *753*, 247–255. [\[CrossRef\]](#)
142. Kumar, A.; Maji, K. Auswahl von Prozessparametern für Near-Net Shape Deposition in Wire Arc Additive Manufacturing durch Genetischer Algorithmus. *J. Mater. Eng. Perform.* **2020**, *29*, 3334–3352. [\[CrossRef\]](#)
143. Ali, Y.; Henckell, P.; Hildebrand, J.; Reimann, J.; Bergmann, JP; Barnikol-Oettler, S. Drahtlichtbogen-Additive Fertigung von Warmwerkstoffen Werkzeugstahl mit CMT-Verfahren. *J. Mater. Process. Technol.* **2019**, *269*, 109–116. [\[CrossRef\]](#)

144. Laghi, V.; Palermo, M.; Tonelli, L.; Gasparini, G.; Ceschini, L.; Trombetti, T. Zugfestigkeit und mikrostrukturelle Eigenschaften von austenitischem Edelstahl 304L, hergestellt durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *106*, 3693–3705. [\[Querverweis\]](#)
145. Dinovitzer, M.; Chen, X.; Laliberte, J.; Huang, X.; Frei, H. Einfluss der Prozessparameter der additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen (WAAM) auf die Perlengeometrie und Mikrostruktur. *Addit. Manuf.* **2019**, *26*, 138–146. [\[CrossRef\]](#)
146. Naveen Srinivas, M.; Vimal, KEK; Manikandan, N.; Sritharanandh, G. Parametrische Optimierung und multiple Regressionsmodellierung für die Herstellung dünner Platten aus Aluminiumlegierungen mittels additiver Drahtlichtbogenfertigung. *Int. J. Interact. Des. Manuf.* **2022**. [\[Querverweis\]](#)
147. Zavdoveev, A.; Pozniakov, V.; Baudin, T.; Kim, HS; Klochkov, I.; Motrunich, S.; Heaton, M.; Aquier, P.; Rogante, M.; Denisenko, A.; et al. Optimierung der Parameter des Impulslichtbogenschweißens für die additive Fertigung mit Drahtlichtbogen bei Anwendungen mit austenitischem Stahl. **2022**, *119*, 5175–5193. [\[CrossRef\]](#)
148. Lu, X.; Li, MV; Yang, H. Vergleich der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen und Pulverlaser für die Superlegierung IN718: Einheitliche Überlegungen zur Auswahl von Prozessparametern basierend auf der volumetrischen Energiedichte. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *114*, 1517–1531. [\[CrossRef\]](#)
149. Vora, J.; Pandey, R.; Dodiya, P.; Patel, V.; Khanna, S.; Vaghasia, V.; Chaudhari, R. Herstellung einer mehrwandigen Struktur durch parametrische Untersuchung der Perlengeometrie des GMAW-basierten WAAM-Prozesses von SS309L. *Materials* **2023**, *16*, 5147. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
150. Athaib, NH; Haleem, AH; Al-Zubaidy, B. Eine Übersicht über Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) von Aluminiumverbundwerkstoffen, Verfahren, Klassifizierung, Vorteile, Herausforderungen und Anwendung. *J. Phys. Conf. Ser.* **2021**, *1973*, 012083. [\[CrossRef\]](#)
151. Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J.; Wandtke, K.; Schroeffer, D.; Kannengiesser, T. Wärmeführung und konstruktive Auswirkungen auf die Eigenschaften und Schweißspannungen in WAAM-Bauteilen aus hochfesten Baustählen. *Weld World* **2023**, *67*, 55–65. [\[CrossRef\]](#)
152. Zhang, J.; Zhang, X.; Wang, X.; Ding, J.; Traoré, Y.; Paddea, S.; Williams, S. Rissverlaufsauswahl an der Schnittstelle von Schmiede- und Draht + Lichtbogen additiv hergestelltes Ti-6Al-4V. *Mater. Des.* **2016**, *104*, 365–375. [\[CrossRef\]](#)
153. Yang, YH; Guan, ZP; Ma, PK; Ren, MW; Jia, HL; Zhao, P.; Zha, M.; Wang, HY Drahtlichtbogen-Additive Fertigung einer neuartigen ATZM31 Mg-Legierung: Mikrostrukturentwicklung und mechanische Eigenschaften. *J. Magnes. Alloys* **2023**, *10*, 44. [\[CrossRef\]](#)
154. Koli, Y.; Yuvaraj, N.; Sivanandam, A.; Vipin. Kontrolle des Buckelphänomens und Analyse der mechanischen Eigenschaften von Al-Si -Drahtlichtbogen-Additiv gefertigten Proben unter Verwendung des Kaltmetalltransferverfahrens. *Proc. Inst. Mech. Eng. Teil C J. Mech. Eng.* **2022**, *236*, 984–996. [\[CrossRef\]](#)
155. Jing, Y.; Fang, X.; Xi, N.; Chang, T.; Duan, Y.; Huang, K. Verbesserte Zugfestigkeit und Ermüdungseigenschaften der additiv hergestellten Aluminiumlegierung 2319 durch Oberflächen-Laser-Schockstrahlen. *Mater. Sci. Eng. A* **2023**, *864*, 144599. [\[CrossRef\]](#)
156. Chi, J.; Cai, Z.; Wan, Z.; Zhang, H.; Chen, Z.; Li, L.; Li, Y.; Peng, P.; Guo, W. Auswirkungen einer Wärmebehandlung in Kombination mit Laser-Schock-Strahlen auf die per Draht und Lichtbogen additiv hergestellte Titanlegierung Ti17: Mikrostrukturen, Restspannungen und mechanische Eigenschaften. *Surf. Coat. Technol.* **2020**, *396*, 125908. [\[CrossRef\]](#)
157. Sousa, BM; Coelho, FGF; Júnior, GMM; de Oliveira, HCP; da Silva, NN Thermische und mikrostrukturelle Analyse von Kreuzungen, die durch Lichtbogen-Additiv-Fertigung (WAAM) hergestellt wurden. *Weld World* **2024**, *68*, 1653–1669. [\[CrossRef\]](#)
158. Ma, D.; Xu, C.; Sui, S.; Tian, J.; Guo, C.; Wu, X.; Zhang, Z.; Remennik, S.; Shechtman, D. Mikrostrukturentwicklung und mechanische Eigenschaften einer additiv hergestellten Mg-Gd-Y-Zr-Legierung mittels Lichtbogenschweißen durch nachträgliche Wärmebehandlung. *Virtual Phys. Prototyp.* **2023**, *18*, 1–22. [\[Querverweis\]](#)
159. Szost, BA; Terzi, S.; Martina, F.; Boisselier, D.; Prytulak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, DJ Eine vergleichende Studie additiver Fertigungstechniken: Restspannung und mikrostrukturelle Analyse von CLAD- und WAAM-gedruckten Ti-6Al-4V-Komponenten. *Mater. Des.* **2016**, *89*, 559–567. [\[CrossRef\]](#)
160. Kumar, A.; Maji, K.; Shrivastava, A. Untersuchungen zur Ablagerungsgeometrie und den mechanischen Eigenschaften von Drahtlichtbogenadditiv Hergestellt aus Inconel 625. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2023**, *24*, 1483–1500. [\[CrossRef\]](#)
161. Vazquez, L.; Rodriguez, MN; Rodriguez, I.; Alvarez, P. Einfluss von Wärmebehandlungen nach der Abscheidung auf die Mikrostruktur und Zugfestigkeitseigenschaften von Ti-6Al-4V-Teilen, hergestellt von CMT-Waam. *Metals* **2021**, *11*, 1161. [\[CrossRef\]](#)
162. Geng, H.; Li, J.; Xiong, J.; Lin, X.; Zhang, F. Optimierung der Drahtzufuhr für GTAW-basierte additive Fertigung. *J. Mater. Process. Technol.* **2017**, *243*, 40–47.
163. Li, R.; Xiong, J.; Lei, Y. Untersuchung der thermischen Spannungsentwicklung durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung für kreisförmige dünnwandige Teile. *J. Manuf. Process.* **2019**, *40*, 59–67. [\[CrossRef\]](#)
164. Gupta, NK; Ganesan, GB; Karade, S.; Mehta, AK; Karunakaran, KP Wirkung mehrerer Technologien auf die Minimierung der Eigenspannungen in der additiven Fertigung. In *Proceedings of the ICRS 11 – Die 11. Internationale Konferenz zu Eigenspannungen*, Nancy, Frankreich, 27.–30. März 2022; S. 040150.
165. Ali, MH; Han, YS Einfluss von Phasentransformationen auf die Scanstrategie bei der Waam-Herstellung. *Materials* **2021**, *14*, 7871. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
166. Gornyakov, V.; Sun, Y.; Ding, J.; Williams, S. Modellierung und Optimierung des Hybridprozesses der additiven Drahtlichtbogenfertigung und Hochdruckwalzen. *Mater. Des.* **2022**, *223*, 111121. [\[CrossRef\]](#)
167. Gornyakov, V. Effiziente Modellierung und Bewertung des Walzens zur Minderung von Eigenspannungen und Verformungen beim Drahtlichtbogenadditiv Fertigung. Dissertation, Cranfield University, Cranfield, Großbritannien, 2021. Band 7. S. 265.

168. Zhang, T.; Li, H.; Gong, H.; Ding, J.; Wu, Y.; Diao, C.; Zhang, X.; Williams, S. Hybride additive Drahtlichtbogenfertigung und Auswirkung des Walzprozesses auf Mikrostruktur und Zugfestigkeitseigenschaften von Inconel 718. *J. Mater. Process. Technol.* **2022**, *299*, 321–326. [\[CrossRef\]](#)
169. Srivastava, S.; Garg, RK; Sharma, VS; Sachdeva, A. Messung und Minderung von Eigenspannungen bei der additiven Fertigung mit Drahtlichtbogen: Eine Überprüfung des Ansatzes der Kontinuumsmodellierung im Makromaßstab. *Arch. Comput. Methods Eng.* **2021**, *28*, 3491–3515. [\[Querverweis\]](#)
170. Monteverocchi, F.; Venturini, G.; Scippa, A.; Campatelli, G. Finite-Elemente-Modellierung des Drahtbogen-Additive-Manufacturing-Prozesses. *Procedia CIRP* **2016**, *55*, 109–114. [\[CrossRef\]](#)
171. Bankong, BD; Abioye, TE; Olugbade, TO; Zuhailawati, H.; Gbadeyan, OO; Ogedengbe, TI Überprüfung von Nachbearbeitungsmethoden für die hochwertige additive Drahtlichtbogenfertigung. *Mater. Sci. Technol.* **2023**, *39*, 129–146. [\[CrossRef\]](#)
172. Hönnige, JR; Colegrove, PA; Ahmad, B.; Fitzpatrick, ME; Ganguly, S.; Lee, TL; Williams, SW Kontrolle von Eigenspannung und Textur in Ti-6Al-4V-Draht + Lichtbogen additiv gefertigten Kreuzungspunkten durch Spannungsabbau und Walzen. *Mater. Des.* **2018**, *150*, 193–205. [\[Querverweis\]](#)
173. Li, K.; Klecka, MA; Chen, S.; Xiong, W. Drahtlichtbogen-Additive Fertigung und Optimierung der Mikrostruktur durch Wärmenachbehandlung und mechanische Eigenschaften von Stahl der Güteklasse 91. *Addit. Manuf.* **2021**, *37*, 101734. [\[CrossRef\]](#)
174. Nie, L.; Wu, Y.; Gong, H.; Chen, D.; Guo, X. Einfluss des Kugelstrahlens auf die Umverteilung des Eigenspannungsfelds beim Reibrührschweißen einer Aluminiumlegierung 2219. *Materials* **2020**, *13*, 3169. [\[CrossRef\]](#)
175. Sun, R.; Li, L.; Zhu, Y.; Guo, W.; Peng, P.; Cong, B.; Sun, J.; Che, Z.; Li, B.; Guo, C.; et al. Mikrostruktur, Eigenspannung und Zugfestigkeitseigenschaften der additiv hergestellten Aluminiumlegierung 2319 mit Lichtbogenschweißen und Laser-Schock-Strahlen. *J. Alloys Compd.* **2018**, *747*, 255–265. [\[CrossRef\]](#)
176. Ermakova, A.; Razavi, N.; Cabeza, S.; Gadalinska, E.; Reid, M.; Paradowska, A.; Ganguly, S.; Berto, F.; Mehmanparast, A. Die Auswirkung der Oberflächenbehandlung und -orientierung auf die Ermüdungsrisswachstumsrate und die Eigenspannungsverteilung von additiv hergestellten Bauteilen aus kohlenstoffarmem Stahl mit Lichtbogenschweißen. *J. Mater. Res. Technol.* **2023**, *24*, 2988–3004. [\[CrossRef\]](#)
177. Ding, Y.; Muñiz-Lerma, JA; Trask, M.; Chou, S.; Walker, A.; Brochu, M. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften in der additiven Fertigung von Aluminiumlegierungen. *MRS Bull.* **2016**, *41*, 745–751. [\[CrossRef\]](#)
178. Busachi, A.; Erkoynucu, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Ding, J. Entwicklung eines WAAM-basierten Fertigungssystems für Verteidigungsanwendungen. *Procedia CIRP* **2015**, *37*, 48–53. [\[CrossRef\]](#)
179. Abusalma, H.; Eisazadeh, H.; Hejripour, F.; Bunn, J.; Aidun, D. Parametrische Untersuchung der Bildung von Eigenspannungen in Draht und Lichtbogen Additive Fertigung. *J. Manuf. Process.* **2022**, *75*, 863–876. [\[CrossRef\]](#)
180. Kyvelou, P.; Huang, C.; Li, J.; Gardner, L. Restspannungen in Stahl-I-Profilen, verstärkt durch additive Fertigung mit Lichtbogendraht. In *Strukturen*; Elsevier: Amsterdam, Niederlande, 2024; Band 60.
181. Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Xu, J.; Norrish, J. Eine Übersicht über die additive Fertigung von Metallen mit Drahtlichtbogen: Eigenschaften, Defekte und Qualitätsverbesserung. *J. Manuf. Process.* **2018**, *35*, 127–139. [\[CrossRef\]](#)
182. Colegrove, PA; Donoghue, J.; Martina, F.; Gu, J.; Prangnell, P.; Hönnige, J. Anwendung von Methoden der Volumenverformung zur Verbesserung der Mikrostruktur und der Materialeigenschaften sowie zur Kontrolle von Eigenspannungen und Verformungen in additiv gefertigten Komponenten. *Scr. Mater.* **2017**, *135*, 111–118. [\[CrossRef\]](#)
183. Karmuhilan, M.; Sood, AK Intelligentes Prozessmodell zur Vorhersage der Perlengeometrie in WAAM. *Mater. Today Proc.* **2018**, *5*, 24005–24013. [\[CrossRef\]](#)
184. Tang, S.; Wang, G.; Huang, C.; Li, R.; Zhou, S.; Zhang, H. Untersuchung, Modellierung und Optimierung abnormaler Bereiche von Schweißraupen bei der additiven Draht- und Lichtbogenfertigung. *Rapid Prototyp J.* **2020**, *26*, 183–195. [\[CrossRef\]](#)
185. Veiga, F.; Suárez, A.; Aldalur, E.; Bhujangrao, T. Einfluss des Metalltransfermodus auf die Symmetrie der Perlengeometrie in Waam Aluminium. *Symmetry* **2021**, *13*, 1245. [\[CrossRef\]](#)
186. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Ein Mehrperlen-Überlappungsmodell für die robotergestützte additive Draht- und Lichtbogenfertigung (WAAM). *Robot Comput. Integr. Manuf.* **2015**, *31*, 101–110. [\[CrossRef\]](#)
187. Geng, H.; Xiong, J.; Huang, D.; Lin, X.; Li, J. Ein Vorhersagemodell der geometrischen Schichtgröße bei der additiven Fertigung von Drähten und Lichtbögen unter Verwendung der Response Surface Methodology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2017**, *93*, 175–186. [\[CrossRef\]](#)
188. Banaee, SA; Kapil, A.; Marefat, F.; Sharma, A. Verallgemeinertes Überlappungsmodell für die additive Fertigung mit Drahtlichtbogen aus mehreren Materialien (WAAM). *Virtual Phys. Prototyp.* **2023**, *18*, e2210541. [\[CrossRef\]](#)
189. Surovi, NA; Soh, GS Akustische Merkmalsbasierte Identifizierung geometrischer Defekte bei der additiven Drahtlichtbogenfertigung. *Virtual Phys. Prototyp.* **2023**, *18*, e2210553. [\[CrossRef\]](#)
190. Zhao, YT; Li, WG; Liu, A. Optimierung des Geometriequalitätsmodells für die additive Fertigung von Drähten und Bögen basierend auf dem adaptiven multiobjektiven Grey-Wolf-Algorithmus. *Soft Comput.* **2020**, *24*, 17401–17416. [\[CrossRef\]](#)
191. Alomari, Y.; Biroz, MT; Andó, M. Optimierung der Teileorientierung für Wire and Arc Additive Manufacturing-Prozesse für konvexe und nicht-konvexe Formen. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 2203. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
192. Wani, ZK; Abdullah, AB Kontrolle der Perlengeometrie in additiv gefertigten Drahtbogenprofilen – eine Übersicht. *Pertanika J. Sci. Technol.* **2024**, *32*, 917–942. [\[CrossRef\]](#)
193. Vora, J.; Parikh, N.; Chaudhari, R.; Patel, VK; Paramar, H.; Pimenov, DY; Giasin, K. Optimierung der Perlenmorphologie für GMAW-basierten Drahtlichtbogen aus 2,25 Cr-1,0 Mo-Stahl unter Verwendung von Metallkerndrähten. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 5060. [\[CrossRef\]](#)
194. Wang, C.; Bai, H.; Ren, C.; Fang, X.; Lu, B. Ein umfassendes Vorhersagemodell der Perlengeometrie in Draht- und Lichtbogenadditiv Herstellung. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, *1624*, 022018. [\[CrossRef\]](#)

195. Chintala, A.; Tejaswi Kumar, M.; Sathishkumar, M.; Arivazhagan, N.; Manikandan, M. Technologieentwicklung zur Herstellung von Inconel 625 in der Luft- und Raumfahrt unter Verwendung des Drahtlichtbogen-Additivherstellungsverfahrens. *J. Mater. Eng. Perform.* **2021**, *30*, 5333–5341.
[\[Querverweis\]](#)
196. Hamrani, A.; Bouarab, FZ; Agarwal, A.; Ju, K.; Akbarzadeh, H. Fortschritte und Anwendungen von Mehrdrahtprozessen in der additiven Fertigung: Eine umfassende systematische Übersicht. *Virtual Phys. Prototyp.* **2023**, *18*, e2273303. [\[CrossRef\]](#)
197. Queguineur, A.; Rückert, G.; Cortial, F.; Hascoët, JY Bewertung der additiven Drahtlichtbogenfertigung für großformatige Komponenten in Marineanwendungen. *Weld World* **2018**, *62*, 259–266. [\[CrossRef\]](#)
198. Li, J.; Cui, Q.; Pang, C.; Xu, P.; Luo, W.; Li, J. Integriertes Fahrzeugchassis, hergestellt durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung: Strukturerzeugung, Druckradiantoptimierung und Leistungsvorhersage. *Virtual Phys. Prototyp.* **2024**, *19*, e2301483.
[\[Querverweis\]](#)
199. Singh, SR; Khanna, P. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): Ein neues Verfahren zur Formgebung von technischen Werkstoffen. *Mater. Heute Proc.* **2021**, *44*, 118–128. [\[CrossRef\]](#)
200. Vishnukumar, M.; Pramod, R.; Rajesh Kannan, A. Drahtlichtbogen-Additive Fertigung zur Reparatur von Aluminiumstrukturen in maritimen Anwendungen. *Mater. Lett.* **2021**, *299*, 130112. [\[CrossRef\]](#)
201. Shah, A.; Aliyev, R.; Zeidler, H.; Krinke, S. Ein Überblick über die jüngsten Entwicklungen und Herausforderungen im Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)-Prozess. *J. Manuf. Mater. Process.* **2023**, *7*, 97. [\[CrossRef\]](#)
202. Chaturvedi, M.; Scutelnicu, E.; Rusu, CC; Mistodie, LR; Mihailescu, D.; Subbiah, AV Wire Arc Additive Manufacturing: Überblick über aktuelle Erkenntnisse und Herausforderungen bei industriellen Anwendungen und der Materialcharakterisierung. *Metals* **2021**, *11*, 939.
[\[Querverweis\]](#)
203. Bo, tilý, LN Überlegungen zu Aluminiumlegierungen, die in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet werden, und zur Verwendung von Drahtlichtbogenadditiven Herstellung von WAAM für ihre industriellen Anwendungen. *Test* **2020**, *4*, 9–24.
204. Liu, J.; Xu, Y.; Ge, Y.; Hou, Z.; Chen, S. Additive Fertigung von Metallkomponenten mittels Draht und Lichtbogen: Ein Überblick über die aktuelle Forschung Entwicklungen. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *111*, 149–198. [\[CrossRef\]](#)
205. Arana, M.; Ukar, E.; Rodriguez, I.; Aguilar, D.; Álvarez, P. Einfluss der Abscheidungsstrategie und Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften und die Mikrostruktur von 2319 Aluminium-WAAM-Komponenten. *Mater. Des.* **2022**, *221*, 110974. [\[CrossRef\]](#)
206. Thapliyal, S. Herausforderungen im Zusammenhang mit der additiven Drahtlichtbogenfertigung (WAAM) von Aluminiumlegierungen. *Mater. Today Proc.* **2019**, *221*, 112006. [\[CrossRef\]](#)
207. Zhao, Y.; Li, F.; Chen, S.; Lu, Z. Einheitsblockbasierte Prozessplanungsstrategie von WAAM für komplexe schalenförmige Komponenten. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2019**, *104*, 3915–3927. [\[CrossRef\]](#)
208. Pant, H.; Arora, A.; Gopakumar, GS; Chadha, U.; Saeidi, A.; Patterson, AE Anwendungen der additiven Drahtlichtbogenfertigung (WAAM) für die Herstellung von Bauteilen in der Luft- und Raumfahrt. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2023**, *127*, 4995–5011. [\[CrossRef\]](#)
209. Bachus, NA; Strantza, M.; Clausen, B.; D'Elia, CR; Hill, MR; Ko, JP; Pagan, DC; Brown, DW Neuartige triaxiale Restspannungskartierung in einer additiv gefertigten Brückenprobe durch Kopplung von energiedispersiver Röntgenbeugung und Konturmethode-messungen. *Addit. Manuf.* **2024**, *83*, 104070. [\[CrossRef\]](#)
210. Gordon, JV; Haden, CV; Nied, HF; Vinci, RP; Harlow, DG Anisotropie des Ermüdungsrisswachstums, Textur und Eigenspannung in austenitischem Stahl, hergestellt durch additive Draht- und Lichtbogenfertigung. *Mater. Sci. Eng. A* **2018**, *115*, 60–66. [\[CrossRef\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.