BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Sicherheit in Technik und Chemie

ADDITIVE FERTIGUNG AN DER BAM
Sicherheit im Fokus

ADDITIVE MANUFACTURING
We focus on safety

VORWORT
PREFACE

Die additive Fertigung ermöglicht eine passgenaue Herstellung komplexer Bauteile durch schichtweisen Auftrag von Material. Durch das hohe Maß an Flexibilität ist das Potenzial für Innovationen in verschiedenen Anwendungsbereichen entsprechend groß: vom Maschinen- und Anlagenbau über Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Medizintechnik bis hin zum Bauwesen.

Der zuverlässige Einsatz additiver Fertigungsverfahren bedarf jedoch, insbesondere in sicherheitsrelevanten Anwendungen, eines eingehenden Verständnisses des additiven Fertigungsprozesses und seiner Produkte. Das umfasst die Reproduzierbarkeit, die Bauteileigenschaften und den gesamten Lebenszyklus.

Als Kompetenzzentrum für Sicherheit in Technik und Chemie leistet die BAM gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung die Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren. Wir wollen zum Beispiel wissen: Wie lässt sich ein zuverlässiges Prozessmonitoring entwickeln, um aufwendige Bauteilprüfungen zu vermeiden? Wie können wir voraussagen, wie belastbar additiv gefertigte Produkte sind? Können Ersatzteile auf einer Raumstation gedruckt werden?

Im Themenfeld Material bündelt die BAM ihre vielseitige Expertise – von der Charakterisierung der Ausgangsmaterialien über die flexible Fertigung bis zu Prüftechniken und Bauteilprüfungen für eine hohe Produktvariabilität. Darüber hinaus engagiert sich die BAM in der Normung und für den Transfer der Ergebnisse in Standards. Die Arbeit trägt dazu bei, das Potenzial additiver Fertigungsverfahren weiter zu erschließen und in anerkannte und standardisierte Verfahren für die industrielle Fertigung zu überführen.

So leisten wir einen Beitrag, die Potenziale der Zukunftstechnologie zu erschließen und in die Praxis zu bringen.

Prof. Dr. Ulrich Panne

Präsident der
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)

Additive manufacturing enables the customised production of complex components, which is achieved by layer-upon-layer deposition of material. Directly related to the high degree of flexibility is the high innovation potential of additive manufacturing, which exists in various areas of application: from mechanical and plant engineering to aerospace, automotive, medical technology and civil engineering.

However, the reliable use of additive manufacturing – particularly in safety-related applications – requires an in-depth understanding of additive manufacturing processes and their products. This includes reproducibility, component properties, and the entire life cycle.

As a centre of excellence for safety in technology and chemistry, BAM, along with partners from industry and research, is working to further develop additive manufacturing processes. For example, we want to know: How can reliable process monitoring be developed in order to avoid complex component testing? How can we predict the resilience of additive manufactured products? Could replacement parts be printed in a space station?

Within the focus area materials, BAM is combining its multifaceted expertise – from the characterisation of the feedstock and flexible manufacturing to testing techniques and component testing for high product variability. Furthermore, BAM is involved in standardisation and in the transfer of results into standards. This work is helping to open up the potential even further, and to transforming additive manufacturing into recognised and standardised processes for industrial manufacturing.

It is in this way we contribute to tapping the potential of this future technology and its implementation into practice.

Prof. Dr. Ulrich Panne,

President of the
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)

INHALT
CONTENT

Sicherheit macht Märkte 6
Safety creates markets

Kompetenzzentrum für sichere Bauteile aus der additiven Fertigung 8
Competence centre for safe components produced by additive manufacturing

In-situ-Monitoring 10
In-situ monitoring

Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung 14
Non-destructive materials characterisation

Ermüdung und Schadenstoleranz metallischer AM-Bauteile 18
Fatigue and damage tolerance of metallic AM components

Prozess- und Anlagenentwicklung 22
Process and machine development

Einflüsse additiver Fertigungsprozesse auf die Umwelt 26
Influences of additive manufacturing processes on the environment

Von der Entwicklung zur sicheren Anwendung 28
From development to safe application

Normung und Standardisierung zu additiven Fertigungsverfahren 30
Standardization of additive manufacturing processes

SICHERHEIT MACHT MÄRKTE
SAFETY CREATES MARKETS

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gewährleistet Sicherheit in Technik und Chemie.

Die BAM forscht, prüft und berät zum Schutz von Mensch, Umwelt und Sachgütern. Ihre Aktivitäten bündelt die BAM in den fünf Themenfeldern Energie, Infrastruktur, Umwelt, Material und Analytical Sciences. In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet die BAM einen entscheidenden Beitrag zur technischen Sicherheit von Produkten, Prozessen und der Lebens- und Arbeitswelt der Menschen. Dazu werden Substanzen, Werkstoffe, Bauteile, Komponenten und Anlagen sowie natürliche und technische Systeme von volkswirtschaftlicher Dimension und gesellschaftlicher Relevanz erforscht und auf sicheren Umgang oder Betrieb geprüft und bewertet. Die BAM entwickelt und validiert Analyseverfahren und Bewertungsmethoden, Modelle und erforderliche Standards und erbringt wissenschaftsbasierte Dienstleistungen für die deutsche Wirtschaft im europäischen und internationalen Rahmen.

Sicherheit macht Märkte.

Die BAM setzt und vertritt für Deutschland und seine globalen Märkte hohe Standards für Sicherheit in Technik und Chemie zur Weiterentwicklung der erfolgreichen deutschen Qualitätskultur „Made in Germany“. Die BAM ist eine Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

The Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ensures safety in technology and chemistry. BAM tests, researches and advises to protect people, the environment and material goods.

BAM carries out a broad range of research activities in the five focus areas energy, infrastructure, environment, materials and analytical sciences. At the cutting-edge of key technologies of materials science, materials engineering and chemistry, we make a crucial contribution to the technical safety of products, processes and to people’s life and work environment.

BAM’s research is directed towards substances, materials, building elements, components and facilities as well as natural and technical systems important for the national economy and relevant to society. It also tests and assesses their safe handling and operation. BAM develops and validates analysis procedures and assessment methods, models and necessary standards and provides science-based services for the German industry in a European and international framework.

Safety creates markets.

BAM sets and represents high standards for safety in technology and chemistry for Germany and its global markets to further develop the successful German quality culture “Made in Germany“. BAM is a senior scientific and technical federal institute with responsibility to the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

KOMPETENZZENTRUM FÜR SICHERE BAUTEILE AUS DER ADDITIVEN FERTIGUNG

COMPETENCE CENTRE FOR SAFE COMPONENTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Additiv gefertigte Bauteile werden derzeit – mit wenigen Ausnahmen – nicht in sicherheitskritischen Bereichen eingesetzt. Der Grund hierfür liegt in fehlenden Kriterien, nach denen additiv gefertigte Bauteile auszulegen, zu prüfen und zu qualifizieren sind. Bestehende Regelwerke und Erkenntnisse lassen sich aufgrund vielfältiger prozessbedingter Einflussgrößen, der geometrischen Freiheitsgrade der Produkte und der komplexen Werkstoffbeeinflussung nicht ohne Weiteres übertragen.

© BAM Z.8

Arbeit an der Anlage für das Laser-Pulver-Auftragschweißen an der BAM

Work at the laser metal deposition machine at BAM

Im Zentrum der Aktivitäten der BAM stehen daher die Fragestellungen: Welche werkstofftechnischen Eigenschaften und Versagensmechanischen liegen bei additiv gefertigten Bauteilen vor? Wie kann durch prozesstechnische und metallurgische Maßnahmen die Qualität der Bauteile verbessert werden? Wie lässt sich prozessbegleitend die Qualität auch bei komplexen Geometrien zuverlässig erfassen und sicherstellen?

Die BAM bündelt hierfür die Expertise unterschiedlicher Fachgebiete mit dem Ziel, diese in einem Kompetenzzentrum für Anwender aus der Forschung und Wirtschaft sichtbar und nutzbar zu machen. Sie nutzt dabei ihr breites Wissen über die Werkstoffanalytik, die zerstörungsfreie Materialprüfung und über die schweißtechnische Verarbeitung von Werkstoffen. Der BAM ist es dabei möglich, selbst additiv zu fertigen, um Prüfkörper und industrienahe Bauteile herzustellen, um u.a. an Vergleichs- und Ringversuchen teilzunehmen. Hierfür stehen Anlagen für die derzeitig wesentlichsten industriellen additiven Fertigungsverfahren metallischer Werkstoffe zur Verfügung: Laserstrahlschmelzen (LPBF), Laser-Pulver-Auftragschweißen (LMD) und Lichtbogengenerieren (WAAM).

Der BAM ist es damit unter einem Dach möglich, von der Charakterisierung der Ausgangsmaterialien über den additiven Aufbauprozess und die Prozessüberwachung bis zur Charakterisierung von Proben und Bauteilen und der Ermittlung mechanischer Kennwerte Erkenntnisse und Zusammenhänge zu gewinnen, um den zukünftigen Einsatz additiv gefertigter Bauteile in sicherheitsrelevanten Anwendungen zu ermöglichen.

Additively manufactured components are currently – with a few exceptions – not used in safety-critical areas. The reason for this is the lack of criteria to design, test and qualify additively manufactured components. Existing rules and regulations cannot be easily transferred due to the wide variety of process-related influencing variables, the geometrical degrees of freedom of the products and the complex influence of the material.

BAM's activities, therefore, focus on the issues at hand: Which material properties and failure-mechanisms are present in additively manufactured components? How can the quality of the components be improved by process engineering and metallurgical measures? How can the quality even of complex geometries be reliably measured and guaranteed during the process?

For this purpose, BAM combines the expertise of various specialist areas in a competence center with the aim of making expertise available for users from research and industry. BAM uses its broad knowledge of materials analysis, non-destructive material testing and the welding-based processing of materials. BAM is also able to additively manufacture test specimens and industry-related components itself in order to take part in comparative and round robin interlaboratory tests, amongst other research activities. For this purpose, facilities are available for the industrial additive manufacturing processes of metallic materials that are currently most important: Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Laser Metal Deposition (LMD) and Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

BAM is, thus, able to gain in-depth knowledge and cross-functional capabilities under one roof. These capabilities range from the characterization of the starting materials through the additive build-up process and process monitoring, to the characterization of samples and components and the determination of mechanical properties, to enable the future use of additive manufactured components in safety-relevant applications.

© BAM Z.8

Anlage für das Laserstrahlschmelzen im Pulverbett an der BAM

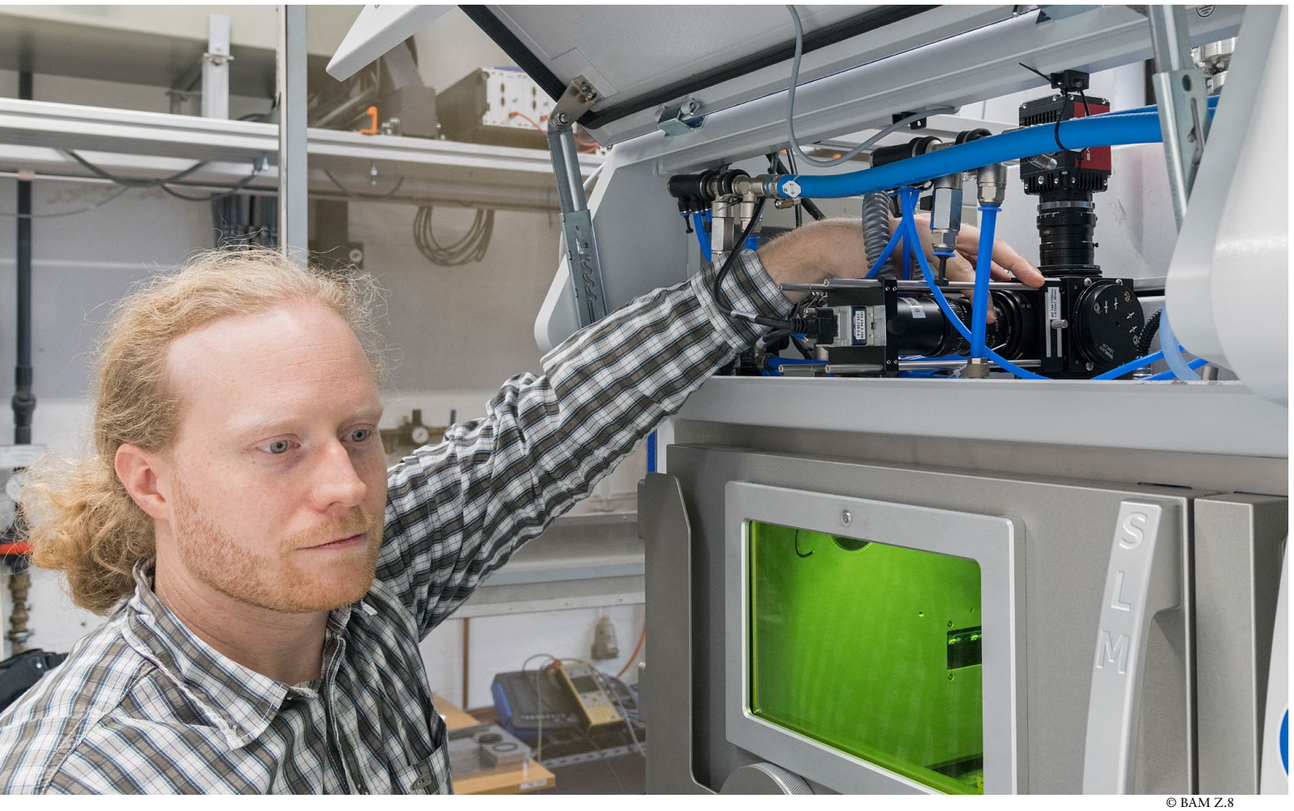
Machine for laser powder bed fusion at BAM

KONTAKT/CONTACT
Prof. Dr. Kai Hilgenberg
Kai.Hilgenberg@bam.de

Schweißtechnische Fertigungsverfahren
Welding Technology

© BAM Z.8

IN-SITU-MONITORING
IN-SITU MONITORING



© BAM Z.8

Einstellung der Kamera, die für die optische Tomografie an einer Anlage zum Laserstrahlschmelzen genutzt wird

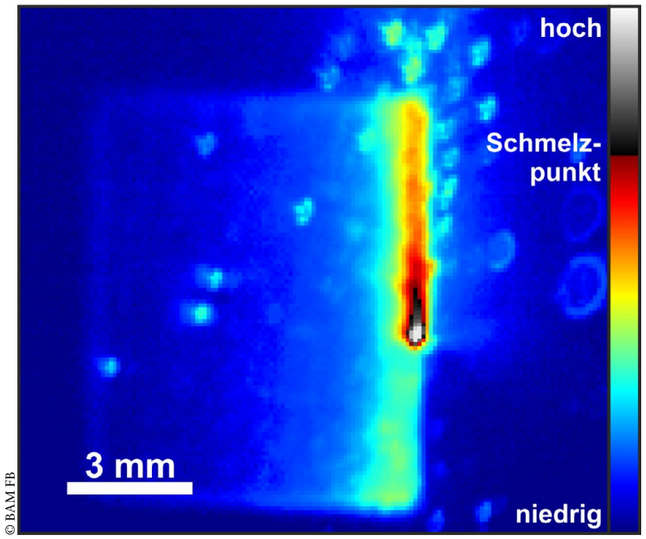
Adjustment of the camera used for optical tomography at a powder bed fusion machine

Die Qualität additiv gefertigter Bauteile wird wesentlich durch die Prozessparameter während der Fertigung beeinflusst. Für die Prozessüberwachung werden daher Sensoren und Messsysteme zur Kontrolle der Energiequelle, des Bauraums, des Schmelzbades und der Bauteilgeometrie zumindest in der metallbasierten additiven Fertigung (Additive Manufacturing, AM) schon kommerziell angeboten. Diese ermöglichen es bisher aber noch nicht, Defekte und Inhomogenitäten direkt oder indirekt nachzuweisen.

Das Projekt Prozessmonitoring in der Additiven Fertigung (ProMoAM) der BAM im Themenfeld Material hat daher das Ziel, Verfahren der Spektroskopie und

Thermogramm, aufgenommen mit einer Mittelwelleninfrarotkamera während eines Fertigungsprozesses eines Würfels aus nichtrostendem Stahl in einer Anlage zum Laserstrahlschmelzen. Der Bereich flüssigen Materials ist durch die Graustufenfarbpalette gesondert dargestellt.

Thermogram, recorded with a midwave infrared camera during the manufacturing process of a cube of stainless steel in a laser powder bed fusion machine. The area of liquid material is shown in a separate grayscale.



© BAM FB

zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur In-situ-Bewertung der Qualität additiv gefertigter Metallbauteile in laser- oder lichtbogenbasierten AM-Prozessen zu entwickeln. Dies beinhaltet neben passiven und aktiven Verfahren der Thermografie die optische Tomografie, die optische Emissionsspektroskopie, die Wirbelstromprüfung, die Laminografie (Radiografie), die Röntgenrückstreuung und fotoakustische Verfahren. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass z. B. mit der Thermografie die Temperaturverteilung erfasst werden kann. Prognosen zur Defektentstehung werden jedoch erst über die Auswertung von Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeiten und von räumlichen Temperaturgradienten möglich.

Diese Verfahren werden in verschiedenen AM-Systemen zum Laserstrahlschmelzen, zum Laser-Pulver-Auftragschweißen und zum Lichtbogengenerieren zum Einsatz gebracht. Merkmale der Messdaten werden in Korrelation zu Fehlern und Inhomogenitäten extrahiert und mit den Fertigungsparametern korreliert. Im Anschluss werden die Resultate dieser Auswertungen mit Referenzverfahren wie Computertomografie und Ultraschall-Tauchtechnik verglichen. Diese Prozessüberwachung soll eine deutliche Reduzierung aufwendiger und zeitintensiver zerstörender oder zerstörungsfreier Prüfungen nach der Fertigung des Bauteiles und zugleich eine Verringerung der Ausschussproduktion bewirken. Da während der Fertigung von AM-Bauteilen jedes spätere Volumenelement zunächst auch als Oberfläche zugänglich ist, wird zudem erwartet, dass Inhomogenitäten ebenfalls detektiert werden können, die aufgrund z. B. komplexer Bauteilgeometrien am fertigen Bauteil mit herkömmlichen ZfP-Verfahren nicht nachgewiesen werden können.

Die BAM nutzt in diesem Projekt jahrzehntelange Erfahrungen in der forschungsbasierten und industrienahen Entwicklung von zerstörungsfreien und chemischen Analyseverfahren in industriellen Prozessen. Abteilungsübergreifend gibt es ein umfassendes Verständnis der prozessseitigen Einflüsse auf Schweißnahteigenschaften und zu Strategien der Vermeidung von prozessbedingten Rissen und anderen Inhomogenitäten.

The quality of additively manufactured components is significantly influenced by the process parameters used during production. Thus, sensors and measuring systems for controlling the energy source, the installation space, the melt pool and the component geometry are already commercially available for process monitoring, at least in metal-based additive manufacturing (AM). However, it is not yet possible to detect defects and inhomogeneities directly or indirectly during the

© BAM Z.8

Justage der Fokusposition eines Aufbaus für die optische Emissionsspektroskopie an einer Anlage zum Laser-Pulver-Auftragschweißen

Adjustment of the focus position of an optical emission spectroscopy setup in a machine for laser metal deposition

building process. The project Process Monitoring in Additive Manufacturing (ProMoAM), conducted at BAM within the focus area materials, aims to develop spectroscopic and non-destructive testing (NDT) methods for the in-situ evaluation of the quality of additively manufactured metal components in laser- or arc-based AM processes. In addition to passive and active methods of thermography, this includes optical tomography, optical emission spectroscopy, eddy current testing, laminography (radiography), X-ray backscattering, particle emission spectroscopy and photoacoustic methods. Previous investigations have shown that, for example, thermography can be used to record the temperature distribution. However, predictions of the occurrence of defects are only possible by evaluating heating and cooling rates and spatial temperature gradients.

These processes are used in various AM systems for LPBF, LMD and WAAM. Key characteristics of the measured data are extracted to correlate defects and inhomogeneities with the production parameters. The results of these evaluations are then compared with results from reference methods such as X-ray computer tomography and ultrasonic testing using immersion technology.

This process monitoring should result in a significant reduction in expensive and time-consuming destructive or non-destructive tests performed after the production of the component and at the same time lead to a reduction in scrap production. Since each subsequent volume element is initially accessible as a surface during the production of AM components, it is also expected that inhomogeneities can be detected that cannot be detected with conventional NDT methods due to, for example, complex geometries of the finished component.

In this project, BAM uses decades of experience in the research-based and industry-oriented development of non-destructive and chemical analysis methods for industrial processes. There is a comprehensive understanding across departments of the process-related influences on weld seam properties and of strategies for avoiding process-related cracks and other inhomogeneities.

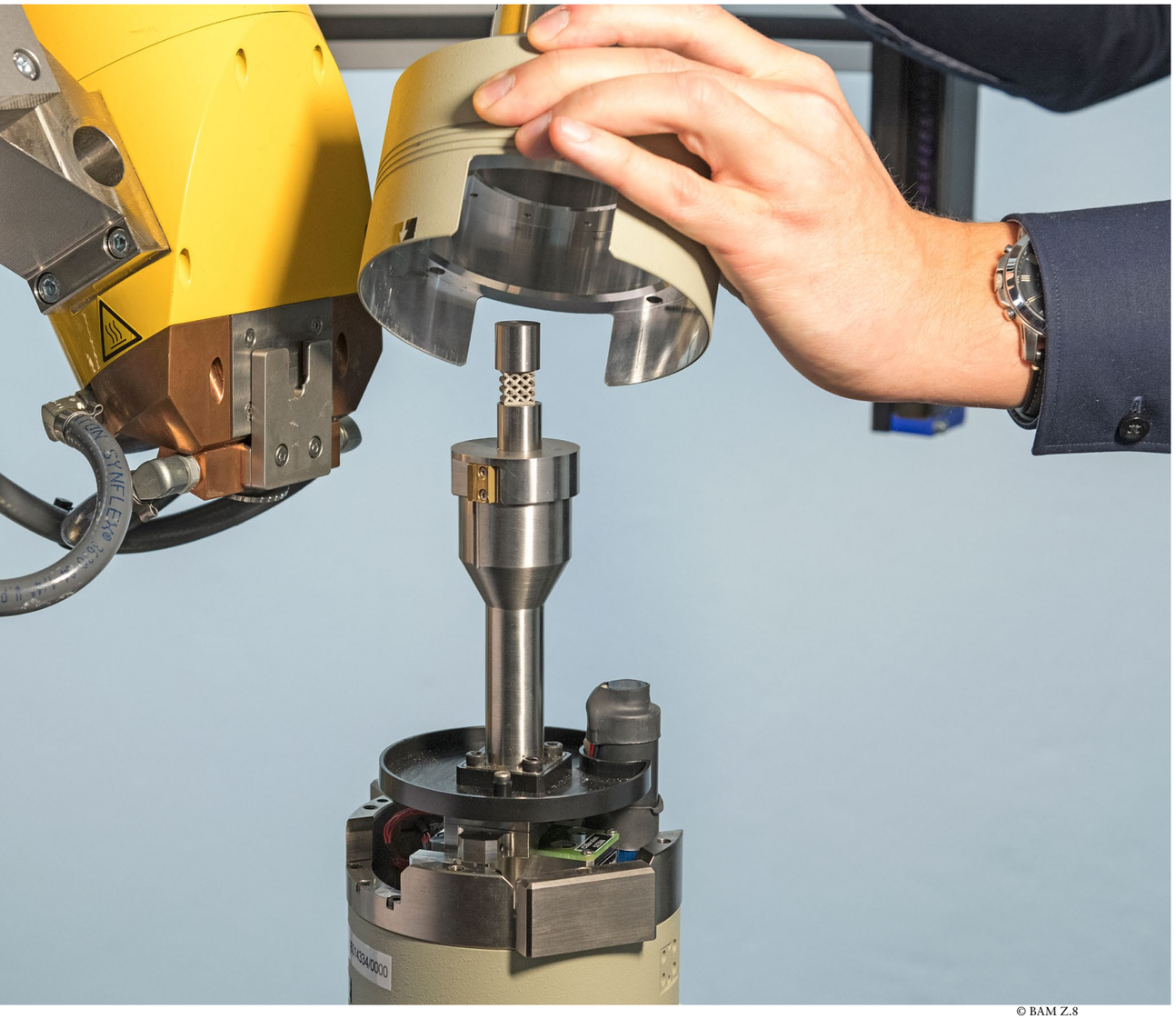
KONTAKT/CONTACT
Dr. Christiane Maierhofer
Christiane.Maierhofer@bam.de

Thermografische Verfahren
Thermographic Methods

© BAM Z.8

ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALCHARAKTERISIERUNG

NON-DESTRUCTIVE MATERIALS CHARACTERISATION



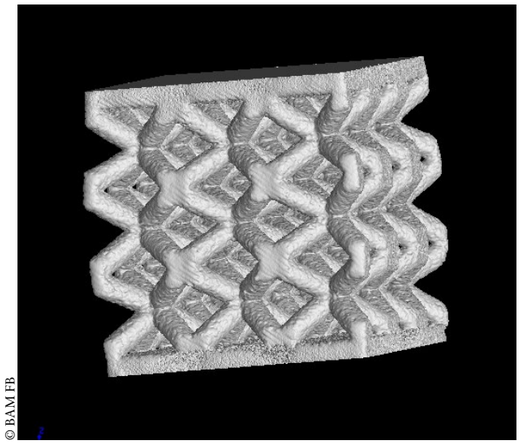
© BAM Z.8

Anwendung der Zug- und Druckmaschine für die Durchführung von In-situ-Druckversuchen an additiv gefertigten Gitterstrukturen (mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG) am Röntgen-Mikro-Computertomographen der BAM

Setting up the loading machine to perform in-situ compression testing of additively manufactured lattice structures (courtesy of Siemens AG) using X-ray micro computer tomography at BAM

Gerendertes Volumen der additiv hergestellten Gitterstruktur (mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG), das während der Druckprüfung mit Röntgen-Mikro-Computertomographie aufgenommen wurde

Rendered volume of the additively manufactured lattice structure (courtesy of Siemens AG) during compression testing measured by means of X-ray micro computed tomography



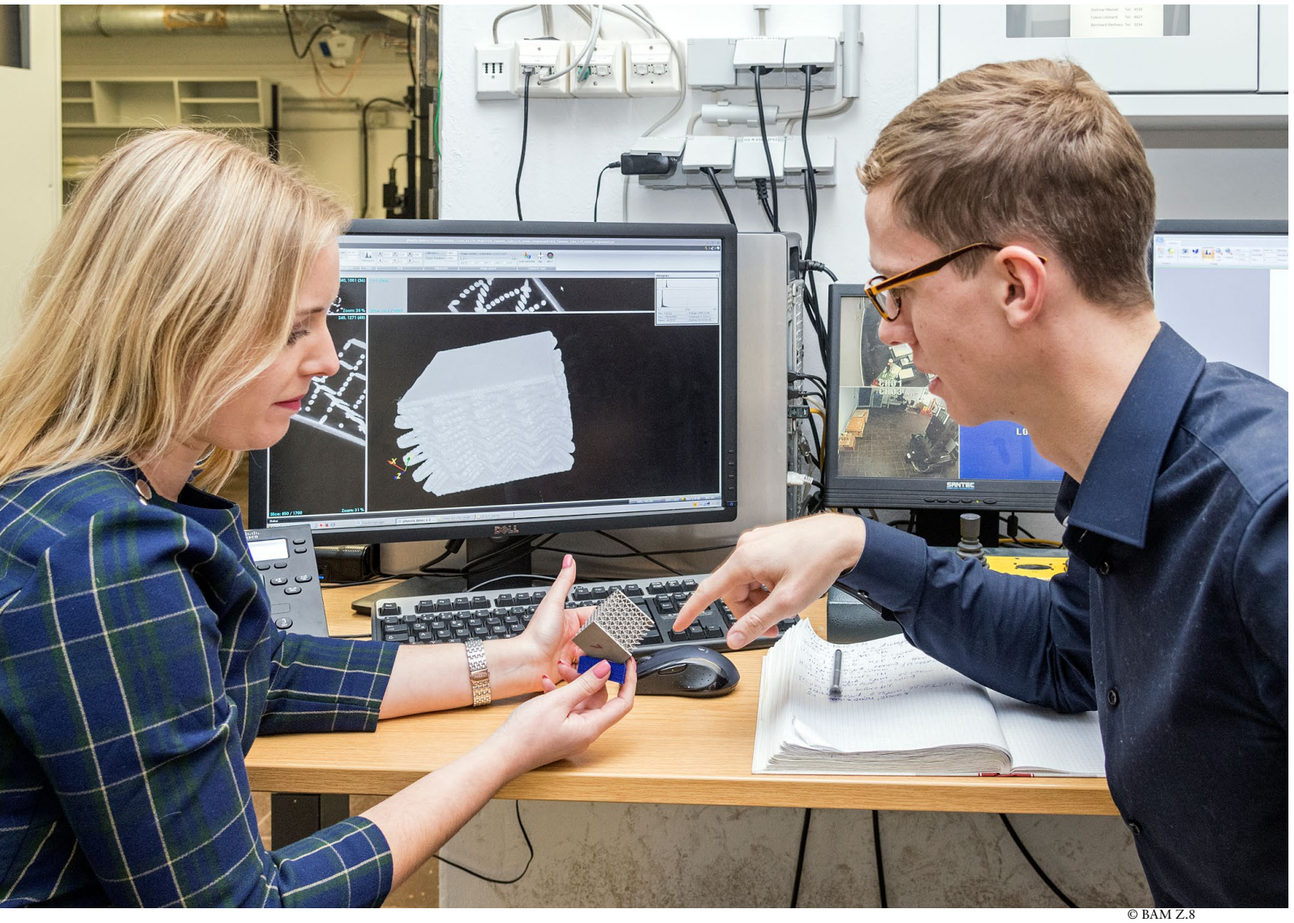
© BAM FB

Die BAM entwickelt und bewertet zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Charakterisierung von inneren Strukturen und Fehlstellen im Mikrometerbereich und darunter. Eine quantitative 3D-Materialcharakterisierung wird durch den Einsatz von höchstauflösenden bildgebenden Röntgenmethoden realisiert. Die BAM hat jahrzehntelange Erfahrung mit der Entwicklung von Mikro-Computertomographen (µ-CT), deren Möglichkeiten mittels Synchrotron-µ-CT an der BAMLine am Berliner Elektronsynchrotron BESSY erweitert wurde. Dies erlaubt eine visuelle und quantitative Defektcharakterisierung in der Längenskala von bis zu 0,001 mm. Für die Untersuchung kleinerer Defekte eignet sich die Synchrotron-Röntgenrefraktion (SynRef-CT) aufgrund der Detektierbarkeit kleiner Inhomogenitäten (Hohlräume oder Risse) unterhalb der räumlichen Auflösung von optischer Mikroskopie und µ-CT. Zusätzlich wird bei der SynRef-CT die Statistik der Defektanalyse durch einen größeren Untersuchungsbereich verbessert.

Darüber hinaus befasst sich die BAM mit der Spannungsanalyse mittels Röntgen-, Synchrotron- und Neutronenbeugung, die es erlauben den Spannungszustand eines Bauteils von der Oberfläche bis in das Vollmaterial zerstörungsfrei zu bewerten. Die mikromechanischen Grundlagen des Verformungsverhaltens von Metallen und Keramiken werden bei In-situ-Tests mit hochenergetischen Röntgenstrahlen sowie mit Neutronen untersucht.

Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung ist ein zentraler Baustein für das Verständnis von metallischen Legierungen, Keramiken und Kompositen. Diese Untersuchungsmethoden dienen als Referenzverfahren und werden für die Charakterisierung und Validierung additiv gefertigter Materialien vom Pulver bis zum Bauteilversagen genutzt.

Andere zerstörungsfreie Techniken werden zur Qualitätsbewertung und zur Mikrostrukturuntersuchung von Bauteilen eingesetzt. Insbesondere ist die hochauflösende Ultraschallprüfung mittels Tauchtechnik eine standardisierte nichtinvasive Methode der Materialcharakterisierung, die sich zur Lokalisierung von makroskopischen Inhomogenitäten und auch zur Untersuchung von mesoskaligen Materialverteilungen



© BAM Z.8

3D-Analyse von In-situ-Druckversuchen an additiv gefertigten Gitterstrukturen (mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG) mittels Röntgen- Mikro- Computertomographie

3D-analysis of in-situ compression testing of additively manufactured lattice structures (courtesy of Siemens AG) using X-ray micro computer tomography

eignet. An der BAM sind Tauchtechnik-Anlagen für drei unterschiedliche Bauteilgrößen verfügbar. Mit der Tauchtechnik wird eine deutlich höhere Auflösung als mit der üblichen Kontakttechnik erreicht. Mit der komplementären Nutzung von Röntgentechniken und Ultraschallprüfung können bei additiv gefertigten Bauteilen verschiedene Längenskalen von Merkmalen (Defekte, Körner, Poren) und Probengrößen abgedeckt werden.

Non-destructive material characterization is a central component for the understanding of metallic alloys, ceramics and composites. These methods serve as reference methods and are used for the characterization and validation of additive materials, from powder to component failure.

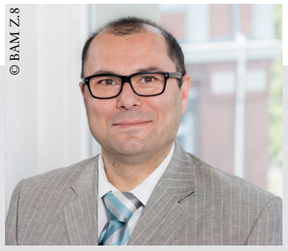
BAM develops and evaluates non-destructive testing methods for the characterization of internal structures and defects in the micrometer range and below. Quantitative 3D material characterization is realized using high-resolution X-ray imaging methods. BAM has decades of experience in the development of micro Computed Tomography (µ-CT), the possibilities of which have been extended by means of synchrotron µ-CT at the BAMLine of the Berlin Electron Synchrotron BESSY. Depending on the specimen size, this technique allows visualisation and quantitative defect characterization in the length scale from as low as 0.001 mm. Synchrotron X-ray refraction Tomography (SynRef-CT) is suitable for the investigation of smaller defects due to the detectability of inhomogeneities (cavities or cracks) below the spatial resolution of optical microscopy and µ-CT. In addition, the Syn-Ref-CT improves the statistics of defect analysis by examining a larger assessment area.

BAM also has extensive experience with residual stress analysis using laboratory-scale X-ray, synchrotron X-ray, and neutron diffraction. They all allow the non-destructive evaluation of the residual stress state of a component both at the surface and internally. The micromechanical fundamentals of the deformation behaviour of metals and ceramics are also investigated by BAM via in-situ tests with high-energy X-rays and neutrons.

Other non-destructive techniques are used for quality assessment and microstructural analysis of components. In particular, high-resolution ultrasonic testing using immersion technology is a standardized non-invasive method of material characterization that is suitable for localizing macroscopic inhomogeneities and also for investigating mesoscale material distributions. At BAM, immersion technology systems are available for three different component sizes. In comparison to the usual contact technique, a significantly higher resolution is achieved with the immersion technique. Through the complementary use of X-ray techniques and ultrasonic testing, different length scales of features (defects, grains, pores) and sample sizes can be investigated for additively manufactured components.

KONTAKT/CONTACT
Prof. Dr. Giovanni Bruno
Giovanni.Bruno@bam.de

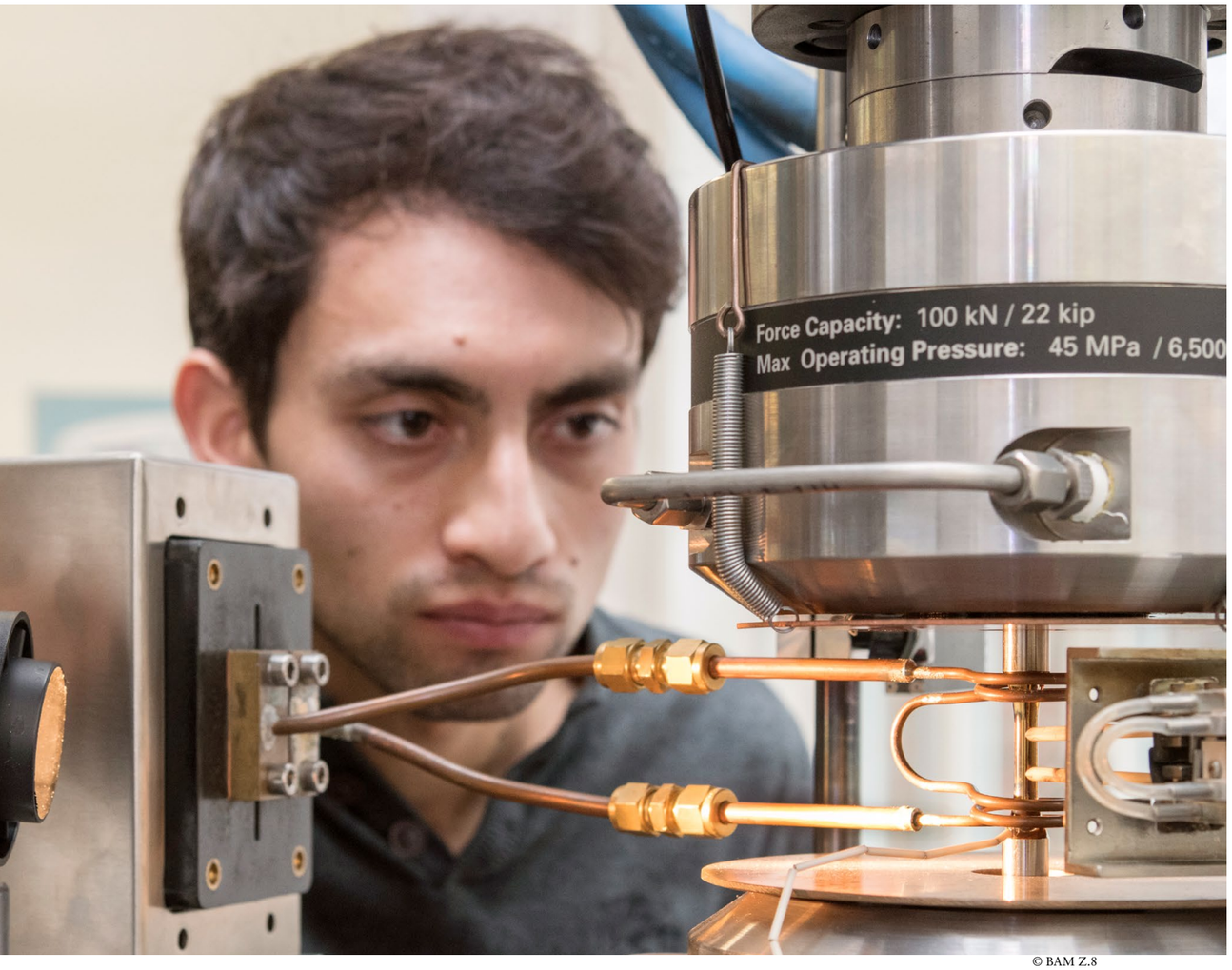
Mikro-Zerstörungsfreie Prüfung
Micro Non-Destructive Testing



© BAM Z.8

ERMÜDUNG UND SCHADENSTOLERANZ METALLISCHER AM-BAUTEILE

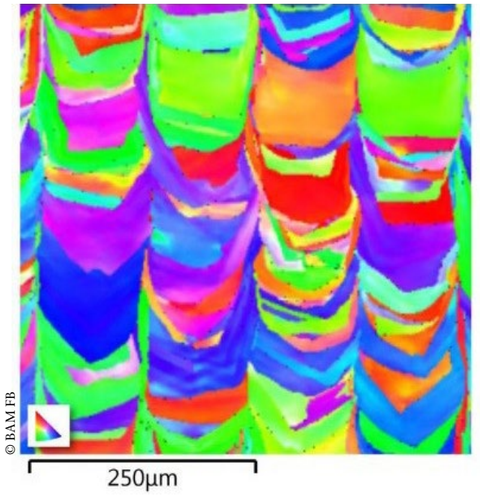
FATIGUE AND DAMAGE TOLERANCE OF METALLIC AM COMPONENTS

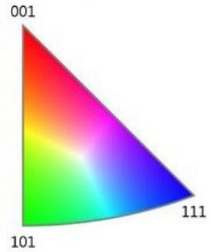


© BAM Z.8

Mechanische Hochtemperaturprüfung von additiv gefertigten Proben

High temperature mechanical testing of additively manufactured specimens





REM/EBSD-Aufnahme der Kristallstruktur von dem additiv gefertigten Edelstahl in Baurichtung

EBSD image of the crystal structure of additive manufactured stainless steel in the building direction

Die Ermüdungsschädigung von additiv gefertigten metallischen Strukturen ist hinsichtlich der Tragfähigkeit und Integrität dieser Bauteile anwendungsbegrenzend. Ungeachtet intensiver Forschungsarbeit kann das Problem bis heute nicht als gelöst betrachtet werden. Die wichtigsten Faktoren, welche die Gesamtlebensdauer und Schwingfestigkeit sowie das Ermüdungsrisswachstum einschließlich seines Schwellenwertes auf unterschiedliche Weise beeinflussen, sind die Oberflächenintegrität einschließlich der Rauheit, Hohlräume wie Poren und, viel ungünstiger, nicht aufgeschmolzene Materialbereiche. Weiterhin spielen die Inhomogenität und Anisotropie des Werkstoffs bis hin zu Texturverhalten mit Vorgabe des Risslaufwegs, etwa in Abhängigkeit von Aufbaurichtung und Hatching-Strategie, eine wichtige Rolle. Schließlich ist auch ein Einfluss von Eigenspannungen zu erwarten, wobei in Rechnung zu stellen ist, dass sich diese unter Schwingbelastung umlagern und im günstigsten Fall relaxieren.

Eine der Aktivitäten in dem BAM-Themenfeldprojekt AGIL (Mikrostrukturentwicklung in additiv gefertigten metallischen Komponenten) besteht in der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens mittels bruchmechanischer Methoden. Dabei werden theoretische Modellierung und Experiment miteinander verbunden. Abgedeckt werden sowohl Lang- als auch Kurzrisswachstum, was neben der klassischen Rissausbreitungs- und Restlebensdaueranalyse auch die Ermittlung der Gesamtlebensdauer bzw. der Schwingfestigkeit ermöglich soll.

Ein weiterer Aspekt der Modellierung ist die mikrostrukturbasierte Simulation des mechanischen Verhaltens von AM-Werkstoffen. Dazu werden reale Kornstrukturen aus der Mikrostrukturanalyse durch 3D-Rekonstruktion aus EBSD-Daten in virtuelle Kornstrukturen überführt und mithilfe von Kristallplastizitätsmodellen Verformungen und Spannungen berechnet. Mittels EBSD (Electron Backscattering Diffraction) werden Phasen und deren Orientierung, also die Kristallstruktur, ermittelt und abgebildet. Die Aufbaustruktur mit ihren lagenweisen Aufschmelzungen wird von der Kristallstruktur überlagert; beide sind nicht ortsidentisch. Die Untersuchungstechniken der BAM beinhalten neben der Ermittlung der Schwingfestigkeit auch die Untersuchung des Bruchverhaltens mittels Fraktografie. Dadurch kann das Risswachstum in additiv gefertigten metallischen Werkstoffen nachvollzogen werden.

The effects of fatigue damage on the load-bearing capacity and integrity of AM metallic structural components limits their suitability for fatigue-related applications. Despite intensive research work, this problem cannot yet be regarded as solved. The most

© BAM Z.8

important factors, which influence the overall service life and fatigue strength as well as the fatigue crack growth, including the threshold value, are the surface integrity including roughness, cavities such as pores and, much less favourable, non-fused regions of material. Furthermore, the inhomogeneity and anisotropy of the material as well as the way in which material texture affects the cracking propagation path, such as through build-up direction and hatching strategy, play an important role. Finally, the residual stresses also are expected to influence fatigue behaviour, whereby the redistribution and, in the best case, relaxation of these stresses under vibration loading needs to be considered.

One of the activities in the BAM project AGIL (Microstructure Development in Additively Manufactured Metallic Components) is the investigation of fatigue behaviour by means of fracture-mechanical methods, whereby theoretical modelling and experiments are combined. In this approach, both long and short crack growth are considered, which, along with classical crack propagation and residual service life analysis, should also enable the determination of the total service life and the fatigue strength.

A further aspect of the modelling is the microstructure-based simulation of the mechanical behaviour of AM materials. Real grain structures from microstructure analysis are transformed into virtual grain structures by 3D reconstruction from EBSD (Electron Backscattering Diffraction) data and deformations and stresses are calculated using crystal plasticity models. EBSD is used to determine and map phases and their orientation, i.e. the crystal structure of the material.
The built-up structure with its layered beds of melted material is overlaid by the crystal structure. The geometric characteristics of these structures do not identically match. In addition to determing the fatigue strength, the fracture behaviour is also investigated via fractography. Fractography can be used to follow the crack propagation through additively manufactured microstructures of metals.

Bruchfläche einer additiv gefertigten Zugprobe

Fracture surface of an additively manufactured tensile test specimen

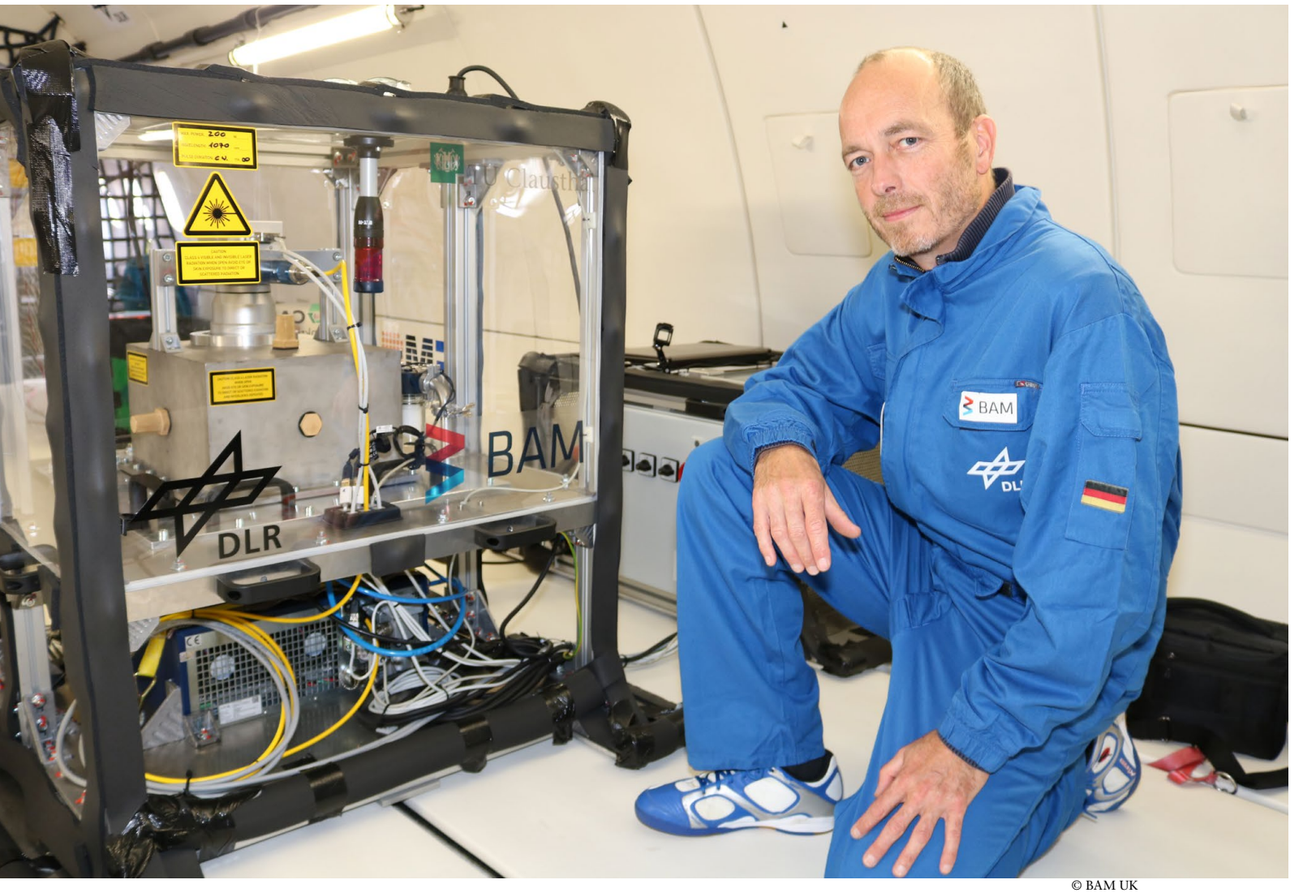
KONTAKT/CONTACT
Prof. Dr. Birgit Skrotzki
Birgit.Skrotzki@bam.de

Experimentelle und modellbasierte Werkstoffmechanik
Experimental and Model Based Mechanical Behaviour of Materials

© Michael Danner

PROZESS- UND ANLAGENENTWICKLUNG

PROCESS AND MACHINE DEVELOPMENT



© BAM UK

An Bord des Airbus 310: In Experimenten testen Prof. Jens Günster und sein Team pulverbasierte additive Fertigungsverfahren in der Schwerelosigkeit.

On board the Airbus 310: Prof. Jens Günster and his team conduct experiments to test powder-based additive manufacturing processes in weightlessness.

Bei der Weiterentwicklung der additiven Fertigung mit keramischen Werkstoffen konzentriert sich die BAM derzeit auf zwei Forschungsschwerpunkte:

Schwerpunkt 1: Prozesse für die pulverbasierte additive Fertigung im Weltraum

Warum 3D-Druck im Weltall? Komponenten, Ersatzteile oder Werkzeuge könnten je nach Bedarf gefertigt werden. Es müsste dann nur das Material, hier das Pulver, zur Raumstation transportiert werden und nicht ein ganzes Sortiment an Teilen. Das ist ein enormer Vorteil für lange Missionen mit begrenzten Gewichtskapazitäten und begrenztem Stauraum. Derzeit setzt die NASA auf der Internationalen Raumstation ISS das filamentbasierte additive Fertigungsverfahren ein, bei dem ein Filament aus aufgeheiztem Kunststoff Schicht für Schicht extrudiert wird, um ein dreidimensionales Objekt herzustellen.

Im Gegensatz zur NASA untersucht die BAM die industriell sehr erfolgreichen pulverbasierten additiven Fertigungsverfahren auf ihre Eignung für einen Einsatz in Schwerelosigkeit. In einem ersten Zero-G-Experiment, einem Parabelflug im September 2017, lag der Fokus auf dem Schichtauftrag des Pulvers. Da die Schwerkraft eine entscheidende Voraussetzung für das Auftragen einer dünnen Schicht fließfähigen Pulvers ist, besteht die Herausforderung darin, den Schichtauftrag des Pulvers unabhängig von der Schwerkraft auszuführen. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein Gasstrom durch das Pulver die Gravitation ersetzen kann – die Partikel werden angesaugt.

In einem zweiten Zero-G-Experiment im Frühjahr 2018 wurden erstmals metallische Pulver unter Schwerelosigkeit als Schichten aufgetragen und mittels Laserstrahlung lokal zu einem Bauteil verschmolzen. Damit soll das große Potenzial des Laserstrahlschmelzprozesses für die additive Fertigung gebrauchsfertiger metallischer Bauteile künftigen Weltraummissionen zugänglich gemacht werden.

Forschungsschwerpunkt 2: Technologie-Rollout LSD-basierter 3D-Druck von Keramik

Die lagenweise Schlickerdeposition (LSD) nutzt den in der keramischen Prozesstechnik bekannten Schlickerguss zur Darstellung dichtgepackter Pulverschichten und Pulverbetten für den 3D-Druck von Keramik. Sowohl Komponenten aus Silikatkeramik als auch Komponenten aus Hochleistungskeramik können mit diesem Prozess dargestellt werden.

Da der Prozess anderen auf dem Markt bereits etablierten Technologien zur additiven Fertigung von Keramik

© BAM Z.8

Ein während der Zero-G-Experimente additiv gefertigter Schraubenschlüssel

A spanner additively manufactured during the Zero G experiment

© BAM Z.8

Bauteile aus Siliciumcarbid (SiC), die mittels LSD Prozess hergestellt wurden

Silicon Carbide (SiC) specimens produced by LSD process

© BAM Z.8

Bauteile aus Silikatkeramik, die mittels LSD Prozess hergestellt wurden

Silicate ceramics specimens produced by LSD process

überlegen ist oder diese gut ergänzt, wurde der Technologie-Rollout im Rahmen der EXIST-Forschungstransferinitiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert. Ziel ist die Entwicklung, Konstruktion und Erprobung einer additiven Fertigungsmaschine zur Herstellung dichter Keramikteile. Die Teile könnten individuell designte Porzellanteile oder Spezialteile für den Anlagen- und Maschinenbau sein.

BAM is currently concentrating on two main areas of research in the further development of additive manufacturing with ceramic materials:

Focus 1: Processes for powder-based additive manufacturing in space

Why focus on additive manufacturing in space? Components, spare parts or tools could be manufactured as required. Then only the material, here the powder, would have to be transported to the space station and not a whole range of parts. This is an enormous advantage for long missions with limited weight capacities and limited storage space. NASA is currently using the filament-based additive manufacturing process on the International Space Station (ISS), in which a filament of heated plastic is extruded layer by layer to produce a three-dimensional object.

In contrast to NASA, BAM is investigating the industrially very successful powder-based additive manufacturing processes for their suitability for use in a weightless environment. In a first Zero-G experiment, a parabolic flight in September 2017, the focus was on the layered application of the powder. Since gravity is a decisive prerequisite for the application of a thin layer of flowable powder, the challenge is to apply the powder layer independently of gravity. It has been demonstrated that a gas flow through the powder can supplant the need for gravity. In this method, the powder particles are effectively sucked into place.

In a second Zero-G experiment in spring 2018, metallic powders were applied as layers under weightlessness for the first time and fused locally into a component by means of laser radiation. The aim is to make the great potential of the laser beam melting process for the additive manufacture of ready-to-use metallic components accessible to future space missions.

Research focus 2: Technology rollout for LSD-based 3D printing of ceramics:

Layer-wise slurry deposition (LSD) uses the slurry casting technique developed for ceramic processing to produce densely-packed powder layers and powder beds for the 3D printing of ceramics. Components made of both silicate ceramics and of high-performance ceramics can be manufactured with this process.

Since the LSD process is superior or highly complementary to other technologies already established on the market for the additive production of ceramics, the technology rollout was funded as part of the EXIST research transfer initiative of the Federal Ministry of Economics and Energy. The aim is to develop, design and test an additive production machine for the manufacture of dense ceramic parts. The parts could be individually designed porcelain parts or special parts for plant and mechanical engineering.

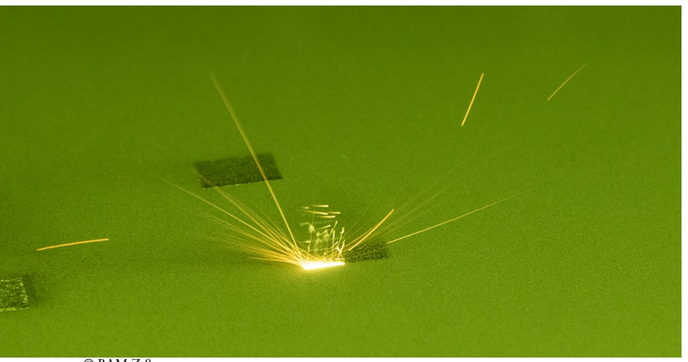
KONTAKT/CONTACT
Prof. Dr. Jens Günster
Jens.Guenster@bam.de

Keramische Prozesstechnik und Biowerkstoffe
Ceramic Processing

© Michael Danner

EINFLÜSSE ADDITIVER FERTIGUNGSPROZESSE AUF DIE UMWELT

INFLUENCES OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES ON THE ENVIRONMENT



© BAM Z.8

Emissionen während des Bauprozesses mit LPBF, die in-situ mittels Partikelemissions-spektroskopie analysiert werden

Emissions during the building process using LPBF which is analysed in-situ using particle emission spectroscopy

Momentan reicht das Wissen noch nicht aus, um positive und schädliche Auswirkungen von additiven Fertigungsprozessen auf die Umwelt umfassend und abschließend zu bilanzieren. Umweltrisiken in der Fertigung liegen zum einen in der unerwünschten Aufnahme über Mund, Atemwege und Haut von insbesondere pulverförmigen Baumaterialien, die unsachgemäß verwendet werden. Zum anderen stellen Partikel und Schadgase, die unkontrolliert aus dem Bauraum in die direkte Umgebung der Anlage freigesetzt werden, ein Risiko dar. Entnahme und mechanisch-chemische Nachbehandlungen von Bauteilen kommen ebenfalls als lufthygienische umweltrelevante Emissionsquellen in Betracht. Die damit verbundenen potenziellen Risiken können mit entsprechenden Messmethoden charakterisiert und quantifiziert werden. Darauf basierend lassen sich geeignete Schutzstrategien und Vorbeugemaßnahmen ableiten.

Bezüglich der generellen Umweltrelevanz von additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungsprozessen müssen u.a. folgende Aspekte betrachtet werden: die Herstellung und der Transport der Ausgangsmaterialien, spezifische Material- und Energieverbräuche der Aufbauprozesse, Auswirkungen von Bauteil-Nachbehandlungsprozessen sowie die Produktlebensdauern, Konsumrisiken und Recyclingfähigkeit.

Die Umweltauswirkung der Produktion von AM-Bauteilen ist Thema aktueller Forschung. Einige Aspekte lassen sich bereits deutlich benennen: Die spezifischen Energieverbräuche bei der additiven Fertigung sind deutlich höher als bei konventionellen Fertigungsverfahren. Wenn neben den Energieaufwendungen aber auch die jeweils eingesetzten Materialmengen und Produktionsabfälle berücksichtigt werden, kann additive Fertigung Vorteile aufweisen. Ein weiterer positiver Effekt liegt in den erreichbaren funktionalen Optimierungen, z. B. Gewichtsreduzierungen ohne Leistungseinbußen. Weiterhin können kostengünstig und aufwandsarm Ersatzteile gefertigt werden. Hierin liegt die Chance für neue industrielle Aktivitäten, die zu längeren Produktlebensdauern führen können. Nachteilig werden sich Einschränkungen beim Recycling und der Wiederverwendbarkeit von AM-Produkten auswirken, insbesondere von denen mit Materialmix.

Einige dieser Umweltfaktoren wie z. B. Materialeinsatz, Materialkombination, Energieaufwendungen und Gewichtsreduzierungen können unter Versuchsbedingungen in der BAM für eine Auswahl von AM-Verfahren und Materialklassen erforscht werden.

Detektor für Partikelemissionsspektroskopie, installiert in dem Bauraum der LPBF-Maschine an der BAM

Particle emission spectroscopy detector installed in the build chamber of the LPBF machine at BAM

© BAM FB

At present, there is not enough knowledge to comprehensively and conclusively assess and balance the positive and harmful effects of additive manufacturing processes on the environment. Environmental risks in production are associated with, on the one hand, the unwanted ingestion, inhalation and contamination due to improper handling of the powder materials and, on the other hand, with particles and harmful gases that are released uncontrolled from the manufacturing area into the direct vicinity of the plant. The removal and mechanical-chemical post treatment of components can also be considered as air-hygienic environmentally relevant emission sources. The associated potential risks can be characterised and quantified using appropriate measurement methods. On this basis, suitable protection strategies and preventive measures can be derived.

Regarding the general environmental relevance of additive manufacturing processes in comparison to conventional manufacturing processes, the following aspects need to be considered: The production and transport of the starting materials, the specific material and energy requirements of the construction processes, the effects of component after-treatment processes as well as product lifetimes, consumption risks and recyclability.

The environmental impact of the production of AM components is a topic of current research. Some aspects can already be clearly identified: The specific energy consumption in additive manufacturing is significantly higher than in conventional manufacturing processes. If, in addition to energy costs, the quantities of materials used, and production waste are also considered, additive manufacturing can have advantages. A further positive effect lies in the functional optimizations that can be achieved, such as weight reductions without loss of performance. In addition, spare parts can be manufactured at low cost and with minimal effort. This is an opportunity for new industrial activities that can lead to longer product lifetimes. Restrictions on the recycling and reusability of AM products, especially those with a mix of materials, are, however, disadvantages of this technique.

Some of these environmental factors such as material use, material combination, energy consumption and weight reductions can be investigated under test conditions at BAM for a variety of AM processes and material classes.

KONTAKT/CONTACT
Dr. Stefan Seeger
Stefan.Seeger@bam.de

Materialien und Luftschadstoffe
Materials and Air Pollutants

© BAM Z.8

VON DER ENTWICKLUNG ZUR SICHEREN ANWENDUNG

FROM DEVELOPMENT TO SAFE APPLICATION

Die BAM entwickelt und erprobt in interdisziplinärer Zusammenarbeit In-situ-Messsysteme für die additive Fertigung. Für die Qualitätsbewertung ist es notwendig, die Vielzahl von Einflussgrößen bei der additiven Fertigung und die gewonnenen Prozessdaten mit Qualitätsmerkmalen der gefertigten Bauteile zu korrelieren. Durch den Einsatz geeigneter Prozesssensoren sollen sich dokumentierte Fertigungsprozesse und unter optimalen Prozessrandbedingungen Bauteile mit sichergestellten Eigenschaften ergeben.

Die Extraktion, Verwaltung und Analyse der durch diese Sensoren erzeugten sehr großen Datenmengen (Big Data) stellen dabei eine Herausforderung dar. Um aus der Datenmenge Wertschöpfung zu generieren, muss zunächst die Reduktion, Visualisierung und Korrelation der erzeugten Datensätze aus den einzelnen Verfahren (Datenfusion) erfolgen. Die BAM arbeitet hierbei mit Kooperationspartnern wie dem Zuse-Institut Berlin (ZIB) zusammen.

Über den Einsatz moderner Datenanalyseverfahren wird sowohl an der Entwicklung einer Methode zur Prozessvalidierung gearbeitet als auch der Einfluss verschiedener Prozessgrößen auf die Qualität der gefertigten Bauteile untersucht. Die BAM plant hierfür die Nutzung von Algorithmen der multivariaten Statistik und des maschinellen Lernens, um über die Modellierung größerer Datenmengen Muster zu erkennen bzw. quantitative Zusammenhänge zu erfassen und somit Vorhersagen von Eigenschaften und Prozessereignissen anhand neuer Daten zu ermöglichen.

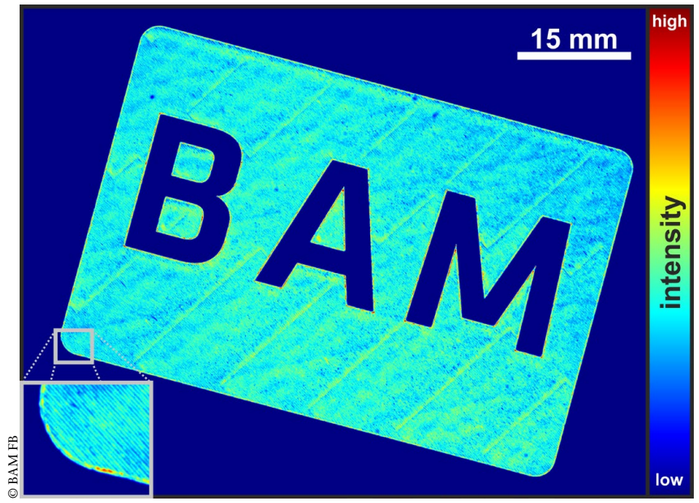
Gegenwärtig ist bereits zu erkennen, dass die Optimierung von Fertigungsparametern (z.B. Aufbaurate) über diese Algorithmen grundsätzlich erfolgen kann. Bisher ist jedoch nur die Qualifizierung von bereits additiv gefertigten Bauteilen über die zerstörungsfreie oder die zerstörende Prüfung zusätzlicher Bauteile möglich, nicht jedoch des Herstellungsprozesses. Zielstellung ist es daher, zunächst anhand der Prozessdaten der Fertigung die resultierenden Bauteileigenschaften vorherzusagen und zukünftig eine Anpassung der Fertigungsparameter während des Fertigungsprozesses zu realisieren.

BAM develops and tests in-situ measurement systems for additive manufacturing through interdisciplinary cooperation. For quality assessment, it is necessary to correlate the multitude of influencing variables in additive manufacturing processes and in-situ monitoring data with the characteristics of the resulting components. The use of suitable sensors should result in documented manufacturing processes, whereby, under optimum process conditions, components with assured properties are produced.

The extraction, processing and analysis of the very large amounts of data generated by these sensors (Big Data) poses a challenge. In order to generate added value from the data volume, a reduction, visualization and correlation of the generated data sets from the individual processes must be performed (data fusion). In this domain, BAM cooperates with partners such as the Zuse Institute Berlin (ZIB).

Using modern data analysis methods, BAM is developing a technique for process validation and evaluation of the influence of different process variables on the quality of the manufactured components. To predict part properties and process events based on the measured data, BAM is planning to use multivariate statistic and machine learning algorithms in combination with modelling to identify patterns and quantitative correlations within large data sets.

It can already be recognised that the optimization of manufacturing parameters (e.g. the build-up rate) can be performed using these algorithms. However, thus far, it has only been possible to qualify additively manufactured components after production using non-destructive testing or destructive testing of additional components. Qualification of components during the manufacturing is not possible yet. Therefore, the initial objective in the future is to predict the resulting component properties based on the in-situ measurement data and eventually also to implement an online adjustment of the process parameters during the manufacturing process.



Einzelbild der optischen Tomografie, aufgenommen bei einer Wellenlänge von 880 nm. Dies ist eine Langzeitbelichtung über den Aufbau einer gesamten Lage eines Demonstrationsprobekörpers, in dem der Schriftzug „BAM“ als pulvergefüllter Hohlraum verbleibt. Inset: Detaildarstellung.

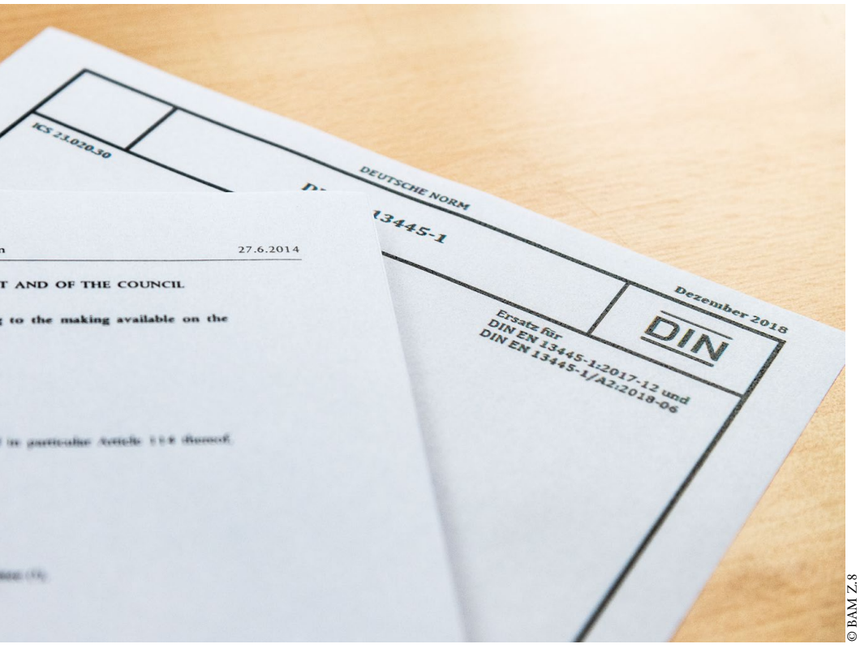
Single image of the optical tomography, recorded at a wavelength of 880 nm. This is a bulb exposure of the build of a complete layer of a demonstration test specimen, in which the letters “BAM” remain as powder filled cavity. Inset: detail view.

KONTAKT/CONTACT
Dr. Christiane Maierhofer
Christiane.Maierhofer@bam.de

Thermografische Verfahren
Thermographic Methods

NORMUNG UND STANDARDISIERUNG ZU ADDITIVEN FERTIGUNGSVERFAHREN

STANDARDIZATION OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES



© BAM Z.8

Die BAM ist intensiv an der Entwicklung der Normungsdokumentation für die additive Fertigung beteiligt.

BAM is extensively involved in the development of standardisation documentation for additive manufacturing.

Die Normung additiver Fertigungsverfahren schreitet mit hoher Geschwindigkeit voran und zeigt sich in einer jährlich steigenden Anzahl an Normungsentwürfen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der BAM beteiligen sich intensiv in den entsprechenden Gremien. Auch bietet die BAM Plattformen für den Expertenaustausch an, beispielsweise zur Etablierung additiv gefertigter Druckgeräte aus metallischen Werkstoffen.

Mit den Möglichkeiten der additiven Fertigung lassen sich Druckgeräte aus metallischen Werkstoffen für verfahrenstechnische Anlagen herstellen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Rohrleitungen, Ventile und kleine Druckbehälter. Eine Vielzahl besonders sicherheitsrelevanter Druckbehälter fällt unter die europäische Druckgeräterichtlinie. Um entsprechende Druckgeräte einzusetzen, wird eine Herstellung und Prüfung gemäß dieser Richtlinie gefordert. Derzeit existieren weder Normen noch sonstige Standards für derartige additiv gefertigte Druckgeräte, auf die sich Hersteller oder notifizierte Stellen stützen könnten.

Für den Informationsaustausch zum Stand der Technik auf diesem Gebiet zwischen Industrie, Forschungseinrichtungen, Normungsgremien und Zertifizierungsstellen hat die BAM in den Jahren 2018 und 2019 Round-Table-Gespräche ausgerichtet. Bei diesen Round-Table-Gesprächen wurden Analogien zu bereits bestehenden Normen und Regelwerken aufgezeigt. Wichtig war, dass bei diesen Gesprächen eine Quervernetzung zwischen Experten unterschiedlicher Fachdisziplinen wie Anlagenbau, Material- und Werkstoffwissenschaft, Schweißtechnik und zerstörungsfreier Prüfung erfolgte. So zeigten sich u. a. gleiche Ursachen für Defekte beim Schweißen und bei der additiven Fertigung. Intensiv diskutiert wurde, wie eine ausreichende sicherheitstechnische Klassifizierung von Defekten möglich ist und wie darauf aufbauend geeignete Prüfkonzepte und -methoden für die additive Fertigung entwickelt werden könnten. Insbesondere konnte die Zusammenarbeit wichtiger Normungsgremien auf diesem Gebiet initiiert werden.

Die BAM wird weiterhin und gemeinsam mit ihren Forschungspartnern die wissenschaftlichen Grundlagen für die Erarbeitung geeigneter Normen in der additiven Fertigung entwickeln. Als neutrale Plattform und Bindeglied zwischen Normung, Forschung und Anwendung konnte die BAM mit den Round-Table-Gesprächen einen erfolgreichen Austausch zur Etablierung einer neuen Technologie aufbauen.

The standardization of additive manufacturing processes is progressing rapidly and is reflected by an annually increasing number of draft standards. The scientists at BAM are intensively involved in the relevant standardisation committees. BAM also offers platforms for the exchange of experts, for example for the establishment of additively manufactured pressure equipment made of metallic materials.

With the possibilities of additive manufacturing, pressure equipment made of metallic materials can be manufactured for process equipment systems. These include, for example, pipes, valves and small pressure vessels. Many particularly safety-relevant pressure vessels are covered by the European Pressure Equipment Directive. To use the corresponding pressure equipment, manufacturing and testing in accordance with this directive is required. There are currently no standards for such additively manufactured pressure equipment on which manufacturers or notified bodies can rely.

In order to exchange information on the state of the art in this field between industry, research institutions, standardization bodies and certification bodies, BAM has held round-table discussions in 2018/19. During the round-table discussions, analogies with existing standards and regulations were identified. It was important that during these discussions there was a cross-linking between experts from different disciplines such as plant engineering, materials science, welding technology and non-destructive testing. Among other things, the same causes for defects in welding and additive manufacturing were found. Intensive discussions were held on how a safety-related classification of defects is possible and, on this basis, how suitable test concepts and methods for additive manufacturing can be developed. A consequence of this work is that it has been possible to initiate cooperation between important standardization bodies in this field.

BAM will continue to develop, together with its research partners, the scientific basis for the development of suitable standards in additive manufacturing. As a neutral platform and a link between standardization, research and application, BAM was able to develop a successful exchange for the establishment of a new technology with the round-table discussions.

KONTAKT/CONTACT
Dr. Michael Nitsche
Michael.Nitsche@bam.de

Qualitätsinfrastruktur
Quality Infrastructure

© Michael Danner

20180207I - BAM Medienteam

BAM

Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin, Germany

Info@bam.de
www.bam.de