

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Carolin Körner

Verbund: Röntgen-Angström-Cluster, Projekt Track-AM, Teilprojekt 2

Thema: **Echtzeituntersuchungen des Elektronenstrahlschmelzens von Metallen, Teilprojekt 2**

Zusammenfassung

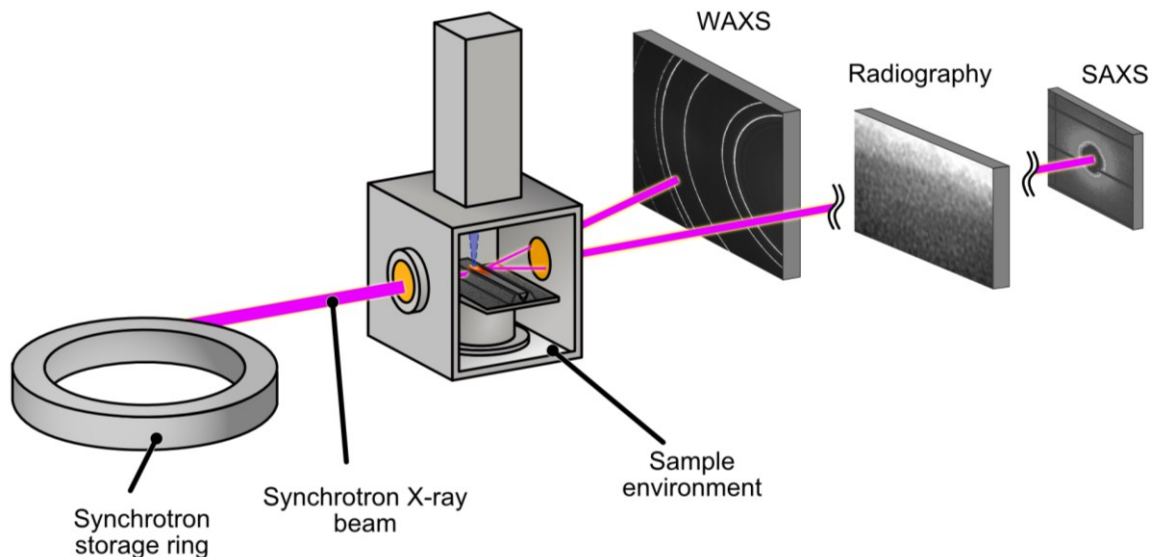


Abbildung 1: Schematische Darstellung des experimentellen Setups der Versuchsanlage mitsamt der verfügbaren Synchrotron-Messverfahren.

Im Rahmen des Röntgen-Angström-Clusters wurde über einen Zeitraum von über 4 Jahren weltweit erstmalig eine miniaturisierte Elektronenstrahl-Pulverbettenschmelzanlage (kurz PBF-EB) entwickelt und an zwei Beamlines der PETRA III-Einrichtung des DESY (P61A & P21.2) in Betrieb genommen. Mit dieser Anlage wurden dann Echtzeituntersuchungen des Elektronenstrahlschmelzprozesses durchgeführt. Insgesamt waren 3 Partner finanziell und wirkend an dem Projekt beteiligt, zwei davon auf deutscher und einer auf schwedischer Seite. Die Initiierung des Projektes, sowie dessen ganzheitliche Leitung und Koordination lag dabei auf schwedischer Seite bei der Königlichen Technischen Hochschule (KTH) Stockholm. Auf der deutschen Seite war auf der einen Seite der Lehrstuhl WTM der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) als Projektpartner an der Entwicklung der PBF-EB-Versuchs-

anlage sowie der Durchführung aller wissenschaftlichen Arbeiten im Anschluss an die Fertigstellung beteiligt. Dabei trug der WTM mit seiner Expertise im Bereich des PBF-EB Verfahrens zum Projekt bei und war für die Definition der Versuchsanforderungen, die Entwicklung der Probenumgebung der Anlage, sowie die Entwicklung der für die Prozesssteuerung der Anlage notwendigen Software verantwortlich. Der zweite deutsche Projektpartner war das HZG (nun Hereon, Geesthacht), welches mit Expertise im Bereich der Synchrotronradiographie zum Projekt beitrug und für die Entwicklung eines neuen Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystems verantwortlich zeichnete, welches ebenfalls im Rahmen des Track-AM Projektes finanziert wurde. Auf der schwedischen Seite war die KTH für die Koordinierung des Projektes verantwortlich und steuerte mit ihrer Expertise im Bereich der Röntgenbeugung und Materialentwicklung zum Projekt bei. Sie ermittelte zudem die äußeren Anforderungen (Maße, Gewicht, etc.) der PBF-EB-Versuchsanlage und koordinierte dessen Entwicklung und Fertigung. Für den Bau der eigentlichen Versuchsanlage wurde das schwedische Unternehmen Freemelt AB – ein Experte im Bau von PBF-EB Anlagen – beauftragt.

Da der überwiegende Teil der Versuchsarbeiten erst mit Fertigstellung und Kommissionierung der Versuchsanlage anlaufen konnte, lässt sich das Projekt in eine Anlagen-Entwicklungsphase und eine wissenschaftliche Versuchsphase einteilen. Die erste Phase nahm den längeren Teil der Projektdauer in Anspruch und konnte bis April 2023 erfolgreich abgeschlossen werden. In der zweiten, kürzeren Phase wurden dann wissenschaftliche Experimente durchgeführt und fortlaufend Verbesserungen an Software und Hardware vorgenommen. In dieser Phase wurden die meisten der wissenschaftlichen Zielsetzungen des Projektes erreicht. Der wissenschaftliche Schwerpunkt von Teilprojekt 2 lag bei der Untersuchung von Schmelzpooldynamiken mittels Hochgeschwindigkeits-Synchrotron-Radiographie.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt Track-AM verfolgte zwei Ziele, die im Folgenden getrennt betrachtet werden sollen. Das erste Ziel des Projektes war die Entwicklung einer miniaturisierten PBF-EB-Versuchsanlage, welche mit mindestens zwei Beamlines der PETRA III-Einrichtung des DESY kompatibel sein sollte. Mit Ausnahme von Hereon waren alle Projektpartner an der Entwicklung dieser Anlage gemeinschaftlich beteiligt. Die Entwicklung der Versuchsanlage stellte die Grundvoraussetzung aller wissenschaftlichen Ziele des Projektes dar, da die formulierten wissenschaftlichen Fragestellungen mit keinem anderen bis zu Beginn des Projektes existierendem experimentellen Aufbau hätten untersucht werden können. Dabei wurden bereits existierende Synchrotron-Versuchsanlagen für das konzeptionell verwandte Laserstrahl-Pulverbettenschmelzverfahren (PBF-LB) als Grundlage herangezogen und für die deutlich höheren technischen Anforderungen einer PBF-EB Anlage (hohe Temperaturen, Störstrahlung, Vakuum, etc.) angepasst und weiterentwickelt.

Zeitgleich mit der Entwicklung der PBF-EB-Versuchsanlage war Projektpartner Hereon für die Entwicklung eines neuen Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystems für die P61A Beamline verantwortlich, welches in der zweiten Projektphase vor allem für die Untersuchung von Schmelzpooldynamiken verwendet werden sollte.

In der zweiten Projektphase sollten dann die entwickelten Systeme für die eigentlichen wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet werden. Die KTH Stockholm fokussierte sich hierbei auf Röntgenbeugungsuntersuchungen (WAXS & SAXS) an der P21.2 um das Phasenumwandlungsverhalten von Stählen während des PBF-EB-Prozesses zeitaufgelöst zu untersuchen. Der Fokus der FAU lag dafür auf der Untersuchung von Schmelzpooldynamiken während des Elektronenstrahl-Pulverbettenschmelzens von Ni-basis Superlegierungen mittels Radiographie. Diese Experimente wurden an der P61A Beamline mit dem neuen Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystem durchgeführt. Trotz des jeweiligen Forschungsfokus der Projektpartner KTH & FAU wurden sämtliche experimentellen Arbeiten an beiden Beamlines stets gemeinschaftlich durchgeführt, unter anderem auch da der komplexe Aufbau eine mehrköpfige Versuchsmannschaft erforderte. Neben den Projektpartnern waren auch die verantwortlichen Wissenschaftler an den Beamlines maßgeblich an dem Erfolg der experimentellen Arbeiten beteiligt, da die Neuheit und Komplexität der Versuchsanlage und der Messsysteme ständig vor Ort abgestimmt werden mussten und im Laufe der Messzeiten so auch kontinuierlich optimiert werden konnten.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Für die Entwicklung der PBF-EB-Versuchsanlage gab es vor Beginn des Track-AM-Projektes keinen direkten wissenschaftlichen Vergleichsfall. Die Entwicklung der PBF-EB-Versuchsanlage wurde maßgeblich durch bereits existierende für experimentelle Arbeiten an diversen Synchrotroneinrichtungen entwickelte Laserstrahl-Pulverbettenschmelzanlagen (kurz PBF-LB, z.B.: *Calta et al., 2018* [1] oder *Hocine et al., 2020* [2]) inspiriert. Diese befinden sich bereits

seit vielen Jahren im Einsatz und haben zu einem verbesserten Verständnis der Schmelzpooldynamiken (z.B. *Kouraytem et al., 2019 [3]*), welche während des PBF-LB-Prozesses auftreten können, beigetragen. Auch Einblicke in das Verfestigungsverhalten von mit Lasern geschmolzenen Metallen (z.B. *Calta et al., 2020 [4]*), die Ausprägung von Defekten (z.B. *Martin et al., 2019 [5]*), sowie Spannungs- und Rissbildung (z.B. *Schmeiser et al., 2020 [6]*) konnten mit Hilfe solcher Anlagen bereits erfolgreich untersucht werden. Mit Hilfe solcher zeitaufgelöster Experimente konnten auch bereits numerische Modelle validiert oder verbessert/weiterentwickelt werden, ein Ziel, dass langfristig auch durch das Track-AM-Projekt erreichbar gemacht werden soll.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse, welche auf solchen laserbasierten Anlagen gewonnen werden, sind nicht auf den PBF-EB-Prozess übertragbar und können daher für entsprechende Untersuchungen und vor allem für Simulationsvalidierungen nicht herangezogen werden. Grund hierfür sind grundsätzlich andere thermische Prozessbedingungen, die zum Beispiel zu stark unterschiedlichen Verfestigungsraten, sowie Phasen- und Mikrostrukturausbildungen führen können. Darüber hinaus stehen dem PBF-EB-Prozess Funktionen und Strategien zur Verfügung, die mit einem Laser nicht abbildbar sind. So wird im PBF-EB-Verfahren das Pulverbett vor dem Schmelzen mit dem Elektronenstrahl leicht versintert (*C. Körner, 2016 [7]*), was mit einem Laser weder nötig noch möglich ist. Weiterhin bringt der Elektronenstrahl Ladungsträger in das Pulverbett ein, welche auch zu Prozessproblemen führen können (wie z.B. das Smoke-Phänomen), welche mit einem Laser nicht abbildbar sind und somit nicht untersucht werden können.

Für die Durchführung des Projektes wurde an die bereits existierende Expertise der Projektpartner in diversen relevanten Feldern angeknüpft. KTH verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich der Synchrotronbeugung und kann vor allem auf vertiefte Erfahrungen an Einrichtungen des DESY zurückblicken. Darüber hinaus ist die KTH bereits seit längerem in der Legierungsentwicklung für die laserbasierte additive Fertigung tätig. Die FAU konnte zu Beginn des Projektes auf fast 20 Jahre Erfahrung im Bereich des Elektronenstrahlschmelzens zurückblicken und war weltweit eine der ersten Einrichtungen, die in diesem Bereich forschend tätig wurde. Sie verfügt dabei über Erfahrung im Bereich der Material- und Prozessentwicklung für das PBF-EB-Verfahren, welches sowohl experimentell als auch computergestützt erforscht wurde. Hereon, welches selbst einige Beamlines an der PETRA III-Einrichtung mit einem Fokus auf Materialwissenschaften betreibt, war und ist ebenfalls hervorragend aufgestellt, um als Partner im Track-AM-Projekt ein neues Messinstrument für materialwissenschaftliche Untersuchungen während des PBF-EB-Prozesses zu entwickeln.

[1] N. P. Calta *et al.*, "An instrument for *in situ* time-resolved X-ray imaging and diffraction of laser powder bed fusion additive manufacturing processes," *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, no. 5, p. 051101, May 2018, doi: [10.1063/1.5017236](https://doi.org/10.1063/1.5017236).

[2] S. Hocine *et al.*, "A miniaturized selective laser melting device for operando X-ray diffraction studies," *Additive Manufacturing*, vol. 34, p. 101194, Aug. 2020, doi: [10.1016/j.addma.2020.101194](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101194).

[3] N. Kouraytem *et al.*, "Effect of Laser-Matter Interaction on Molten Pool Flow and Keyhole Dynamics," *Phys. Rev. Applied*, vol. 11, no. 6, p. 064054, Jun. 2019, doi: [10.1103/PhysRevApplied.11.064054](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.064054).

[4] N. P. Calta *et al.*, "Cooling dynamics of two titanium alloys during laser powder bed fusion probed with *in situ* X-ray imaging and diffraction," *Materials & Design*, vol. 195, p. 108987, Oct. 2020, doi: [10.1016/j.matdes.2020.108987](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108987).

[5] A. A. Martin *et al.*, "Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing," *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, p. 1987, Dec. 2019, doi: [10.1038/s41467-019-10009-2](https://doi.org/10.1038/s41467-019-10009-2).

[6] F. Schmeiser, E. Krohmer, N. Schell, E. Uhlmann, and W. Reimers, "Experimental observation of stress formation during selective laser melting using *in situ* X-ray diffraction," *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101028, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.addma.2019.101028](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101028).

[7] C. Körner, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review," *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 5, pp. 361–377, Jul. 2016, doi: [10.1080/09506608.2016.1176289](https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289).

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Projekt Track-AM war ursprünglich in 6 Arbeitspakete (WP) unterteilt, welche teilweise nacheinander, teilweise parallel von den Projektpartnern bearbeitet wurden. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- WP1: Entwicklung und Konstruktion der PBF-EB-Versuchsanlage, sowie der Probenumgebung
- WP2: Entwicklung des Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystems
- WP3: Implementierung & Kommissionierung der Versuchsanlage, sowie des Radiographiesystems an den vorgesehenen Beamlines
- WP4: Elektronenstrahl-Materieinteraktionen: Untersuchung zu Schmelzpooldynamiken mittels Radiographie
- WP5: Festkörper-Phasenumwandlungen: Untersuchungen zu Phasenumwandlungen mittels WAXS & SAXS
- WP6: Projektmanagement: Projekttreffen, wissenschaftlicher Austausch zwischen den Partnern, etc.

Basierend auf dieser Aufstellung stellen die ersten 3 Arbeitspakete die erste Phase des Track-AM-Projektes dar, während welchem die Entwicklung der notwendigen Instrumente, Software, etc. im Vordergrund stand. WP4 & 5 behandeln die Untersuchungen wissenschaftlicher Fragestellungen nach Fertigstellung der Instrumente, wobei sich WP4 explizit auf Radiographiemessungen an der P61A und WP5 auf WAXS & SAXS-Messungen an der P21.2 Beamline bezieht.

Da das Track-AM-Projekt fast zeitgleich mit Beginn der Coronapandemie startete, waren die Grundvoraussetzungen zu Beginn des Projektes denkbar schlecht. Die Anlagen-Entwicklungsphase wurde durch einen erschwerten Austausch zwischen den Projektpartnern untereinander, sowie zwischen KTH und Einrichtungen des DESY für die Definition der äußeren Anlagenanforderungen verzögert. Zusammen mit Lieferkettenproblemen führte dies zu einem verspäteten Projektbeginn, aber letztlich dennoch einer nur leicht verspäteten Fertigstellung der Versuchsanlage. Als viel gravierender als die Coronapandemie erwiesen sich bürokratische Hürden in Bezug auf den notwendigen Strahlenschutz für die Anlage, welcher für die *DESY Safety Group* einen noch nie dagewesenen Präzedenzfall darstellte. Trotz einer Fertigstellung der PBF-EB-Anlage im April 2022 verzögerte sich die Kommissionierung dieser an den DESY Beamlines P21.2 & P61A daher um fast ein ganzes Jahr und fand erst im April und Juni 2023 statt. In Hinsicht auf die ursprüngliche Projektplanung ergab sich hieraus jedoch lediglich eine Verspätung der zweiten Projektphase von etwa 6 Monaten, da für die Kommissionierung selbst deutlich weniger Zeit als ursprünglich geplant erforderlich war. Während dieser ersten Projektphase wurde neben der Entwicklung der PBF-EB-Anlage auch eine Software für deren Betrieb an der FAU entwickelt und erprobt. Durch die verlängerte erste Projektphase stand hierfür mehr Zeit als erwartet zur Verfügung, weswegen letztlich wieder viel Zeit in der Versuchsphase eingeholt werden konnte.

Zeitgleich mit der Entwicklung der PBF-EB-Versuchsanlage sollte vom Projektpartner Hereon ein neues Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystem entwickelt werden. Dies verzögerte sich jedoch bereits zu Beginn des Projektes aufgrund der Corona-Pandemie unter anderem aufgrund von Lieferkettenproblemen und dem eingeschränkten Betrieb am DESY, weshalb des Radiographiesystem ebenfalls erst zum April 2023 fertiggestellt werden konnte.

Auf die erste Projektphase folgte im April 2024 mit der Kommissionierung der fertiggestellten PBF-EB-Versuchsanlage an der P61A die zweite Phase des Projektes, in welcher mit Hilfe von Radiographie, WAXS & SAXS-Experimenten neue Erkenntnisse über den PBF-EB-Prozess gewonnen werden sollten. Für die Erreichung der wissenschaftlichen Ziele der WP4 & 5 wurden bis zum Ende der Projektlaufzeit mehrere Strahlzeiten an den beiden Beamlines mit der Versuchsanlage durchgeführt. Hierbei fokussierten sich die Experimente der KTH vor allem auf WAXS & SAXS-Experimente an der P21.2, während der Fokus der FAU auf Radiographieversuchen an der P61A lag. Dies stellt eine Abweichung von den ursprünglichen Projektzielen dar und wird im Folgenden näher erörtert.

4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Die folgenden Angaben beziehen sich ausschließlich auf Zuwendungen und Ausgaben für das Teilprojekt 2. Mittel, die den Projektpartnern KTH & Hereon zur Verfügung standen und von diesen verwendet wurden, werden nicht berücksichtigt. Die bewilligten Mittel flossen in folgende Positionen:

- Personalmittel: 1 Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand: 307.876,46 €
- Sachausgaben: 17.706,32
- Reisekosten: 12.343,57 €

Aufgrund von (teilweise coronabedingten) reduzierten Reise- und Sachausgaben im Vergleich zum ursprünglichen Vorhabenplan konnte das Projekt kostenneutral um 3 Monate verlängert werden, was die Wahrnehmung weiterer Strahlzeiten für zusätzliche Experimente ermöglichte.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

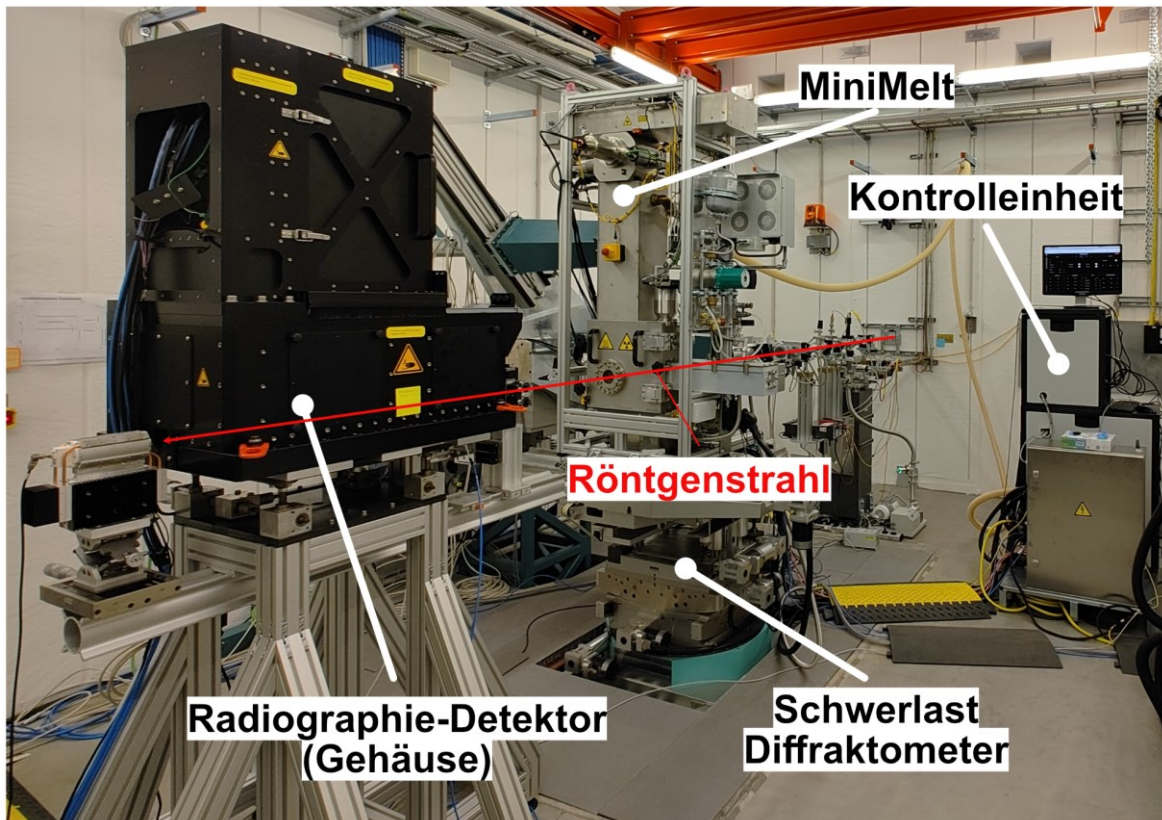


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau an der P61A mitsamt PBF-EB-Versuchsanlage (MiniMelt) und dem Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystem.

Die Entwicklung einer mit den Beamlines P21.2 & P61A kompatiblen PBF-EB-Versuchsanlage konnte mit einer Verspätung von 6 Monaten im Vergleich zum ursprünglichen Projektvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden. Dabei erfüllt die Anlage fast alle im Projekt ursprünglich festgelegten Kriterien und übersteigt diese sogar. So verfügt die als „MiniMelt“ bezeichnete Versuchsanlage über eine Probenumgebung, die den Bau von im Vergleich zu ähnlichen, laserbasierten Systemen, relativ großen Probenkörpern ermöglicht und die Reproduktion des gesamten PBF-EB-Prozesszyklus ermöglicht. Eine Infrarotkamera konnte nicht installiert und erprobt werden, unter anderem da dies ein deutlich komplexeres Anlagendesign erfordert hätte, um eine Metallisierung des für eine solche Kamera notwendigen Sichtschirms zu verhindern. Stattdessen wurde ein 4-Segment-Elektronendetektor installiert, welcher ähnlich wie ein Rasterelektronenmikroskop Aufnahmen während des Bauprozesses ermöglicht und auch für die Strahlkalibrierung erforderlich ist. Zudem wurde eine normale Kamera installiert, die zumindest zu Beginn eines Bauprozesses eine Live-Prozessbeobachtung ermöglicht. Zuletzt konnte die Anlage so konzipiert werden, dass sie auch außerhalb von Beamlines betrieben werden kann, was die Vorentwicklung von experimentellen Prozeduren außerhalb von beantragten Strahlzeiten ermöglicht.

Auch die Entwicklung des Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystems durch den Projektpartner konnte, ebenfalls verspätet, erfolgreich abgeschlossen werden. Hierbei stellte die Entwicklung von Kühlmethode für den für die Umwandlung von Röntgenstrahlung in sichtbares Licht notwendigen Szintillator eine außerordentliche und unerwartete Herausforderung dar, die

nun auch zum Gegenstand erweiterter Forschungsanstrengungen seitens Hereon geworden ist.

In Bezug auf die Arbeitspakete 4 & 5, welche auf die Fertigstellung der Instrumente und deren Kommissionierung folgten, mussten Änderungen im Vergleich zum ursprünglichen Vorhabenplan vorgenommen werden. So sollten in WP5 neben Untersuchungen der Phasenevolution von Stählen auch solche Untersuchungen zu Ni-Basis Legierung durchgeführt werden. Leider erwiesen sich die Strahlintensität an der P21.2, sowie die verfügbaren WAXS & SAXS-Detektoren für Echtzeituntersuchung derartiger Phasenumwandlungen bei Ni-Basis-Legierungen als unzureichend, weswegen hierzu keine Ergebnisse generiert werden konnten. Darüber hinaus machten es die steigenden Preise für Pulververdüsung mit Beginn der Coronapandemie und darüber hinaus mit Beginn des Ukrainekrieges unmöglich, mehrere experimentelle Ni-Basis-Legierungen zu entwickeln und zu verdüsen, weshalb sämtliche Experimente innerhalb des Projektes mit einer einzigen, kommerziell verfügbaren Ni-Basis-Legierung durchgeführt werden mussten.

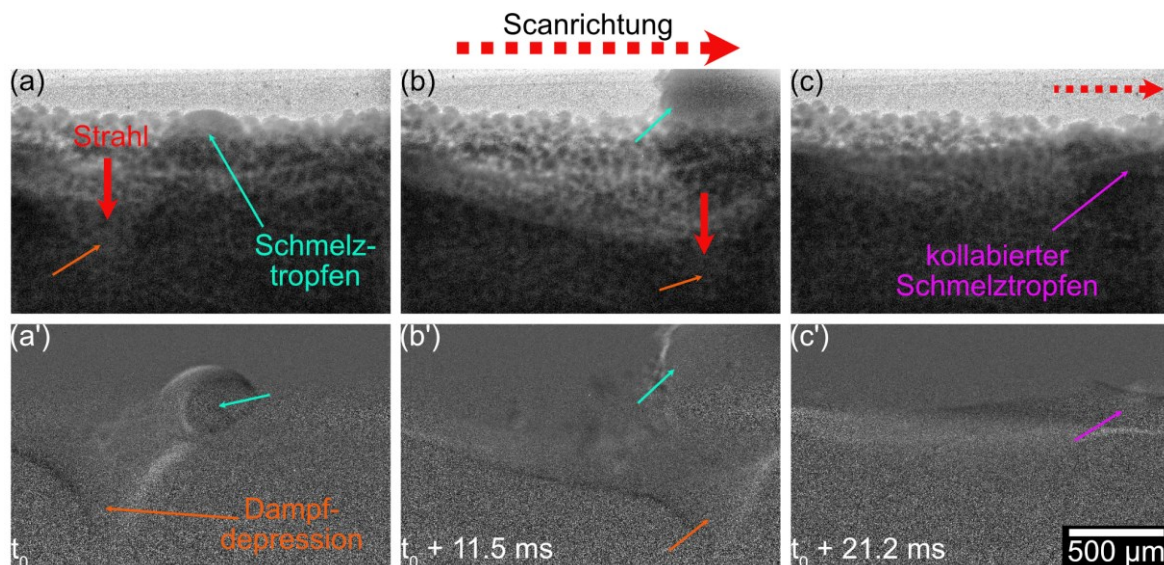


Abbildung 3: Beispiel einer mit Hilfe des Hochgeschwindigkeit-Radiographiesystems an der P61A Beamline detektierten Schmelzpoolodynamik. Pulverbett, Dampfdepression und Bildung der Schmelze sind klar erkennbar. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um eine Ni-Basis-Superlegierung.

Aus diesem Grund wurde nach den ersten Strahlzeiten an der P21.2 und der P61A entschieden, dass sich der Projektpartner KTH vollständig auf die Bearbeitung des Arbeitspaketes WP5 und somit auf Röntgenbeugungsexperimente an der P21.2 konzentrieren sollte. Im Gegenzug würde sich die FAU verstärkt auf die Bearbeitung des Arbeitspaketes WP4 und somit auf Radiographieexperimente an der P61A konzentrieren. Dies entspricht auch eher den Forschungsinteressen der beiden Projektpartner, da die Expertise der KTH deutlich stärker in der Legierungsentwicklung und die der FAU deutlich stärker in der Prozessentwicklung liegt. Dennoch wurden alle Strahlzeiten an beiden Beamlines gemeinschaftlich verwendet, um einen reibungslosen Ablauf und eine fortlaufende Verbesserung der MiniMelt und ihrer Software zu ermöglichen.

Abgesehen von den Untersuchungen zu Phasenumwandlungen in Ni-Basis-Superlegierungen konnten in der Versuchsphase des Projektes alle primären Forschungsziele gemäß des ursprünglichen Projektvorhabens erreicht werden.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit der Entwicklung der MiniMelt innerhalb des Track-AM-Projektes ist es den Projektpartnern gelungen, eine Forschungsanlage für den PBF-EB-Prozess zu realisieren, die es ermöglicht, den gesamten internen Prozesszyklus abzudecken und somit zu untersuchen. Dies erlaubt einen noch nie dagewesenen Einblick in die dynamischen Phänomene während des Elektronenstrahlschmelzens und deren Auswirkungen auf Materialien und führt damit zu einer signifikanten Vertiefung des Prozessverständnisses. Erste Ergebnisse im Bereich der Prozess- und Materialforschung konnten ebenfalls bereits innerhalb des Projektes realisiert werden. Der Nutzen der Versuchsanlage endet jedoch nicht mit dem Projekt, sondern wird langfristig über die ursprüngliche Dauer des Projektes hinaus für Forschung im Bereich des Elektronenstrahlschmelzens sowie des Elektronenstrahlschweißens zur Verfügung stehen. Andere Forschungsgruppen haben bereits ihr Interesse verkündet, Untersuchungen mit dem entwickelten System durchzuführen.

Dabei mussten viele der Arbeiten während des Projektes unter denkbar schlechten Bedingungen durchgeführt werden (Coronapandemie, Ukrainekrieg, Bürokratiehürden), insbesondere in Hinblick auf die internationale Zusammenarbeit. Dennoch ist es den Projektpartnern gelungen, alle wichtigen Projektziele innerhalb der Projektdauer und mit den ursprünglich beantragten Mitteln zu erreichen. Die generierten Forschungsergebnisse haben bereits jetzt zu einem erweiterten Verständnis diverser Aspekte des PBF-EB-Prozesses geführt und sind bereits in die Entwicklung von neuen Prozessstrategien eingeflossen. In Hinblick auf die Resultate waren somit alle geleisteten Anstrengungen notwendig und für die Erreichung der Projektziele angemessen.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die additive Fertigung stellt einen großen Fortschritt im Bereich der Fertigungstechnologien dar, insbesondere in Hinsicht auf den Aspekt der Nachhaltigkeit. Sie ermöglicht es Komponenten zu fertigen, die mit anderen Methoden nicht realisierbar sind, Materialkosten zu sparen, indem *near net shape*-Komponenten aus Rohmaterial direkt gefertigt werden, Lieferketten und Transportkosten zu reduzieren, indem die Prozesskette einer Komponente verkürzt wird, und insgesamt Energie zu sparen, indem Materialkosten gespart, die Anzahl an Fertigungsschritten reduziert und die verbleibenden effizienter durchgeführt werden können. Das PBF-EB-Verfahren stellt hier langfristig eine Schlüsseltechnologie der additiven Fertigung dar. Sie arbeitet energiesparender und ressourcenschonender als das deutlich weiter verbreitete Laserstrahl-Pulverbettenschmelzen, erlaubt die Verarbeitung von Materialien, die mit keiner anderen Methode effektiv verarbeitet werden könnten und hat somit das Potenzial, Effizienzsteigerungen in der Produktion sowie in diversen Industrien zu realisieren. All diese Potenziale können nur mit Hilfe eines tiefgreifenden Verständnisses der dynamischen Phänomene, die während des PBF-EB-Prozesses ablaufen, abgerufen werden. Die beiden im Rahmen des Track-AM-Projektes entwickelten und eingesetzten Instrumente haben sich für die Erforschung dieser dynamischen Phänomene als unschätzbar wertvoll erwiesen und werden langfristig auch über die Projektdauer hinaus zu neuen Erkenntnissen führen, sogar über den PBF-EB-Prozess hinaus. So konnte bereits gezeigt werden, dass die MiniMelt nicht nur für die Untersuchung des

Elektronenstrahl-Pulverbettsschmelz-Prozesses genutzt werden kann, sondern auch für Untersuchungen des Elektronenstrahlschweißens verwendet sowie für allgemeinere Materialforschung eingesetzt werden kann, da mittels Schmelzversuchen das Verfestigungs-, Phasenumwandlungs- und Mikrostrukturänderungsverhalten untersucht werden kann. Das von Heron entwickelte Hochgeschwindigkeits-Radiographiesystem kann indes (und wurde teilweise bereits) von anderen Forschungsgruppen für Echtzeituntersuchungen des Laserauftragsschweißverfahrens, Laserstrahl-Pulverbettsschmelzverfahrens, des Laserschweißens und weiterer Verfahren eingesetzt werden.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Dauer des Track-AM-Projektes gelang es einer anderen Forschungsgruppe des *Department of Mechanical Engineering* der *University of Wisconsin-Madison* unter der Leitung von *Prof. Lianyi Chen* ebenfalls eine Elektronenstrahlschmelzanlage für synchrotronbasierte Echtzeituntersuchungen zu entwickeln und für erste Arbeiten einzusetzen. Aus diesen Arbeiten sind bereits zwei erste Publikationen (siehe [8] & [9]) hervorgegangen. Dabei handelt es sich im Gegensatz zur MiniMelt um eine deutlich einfachere PBF-EB-Anlage mit stark reduziertem Funktionsumfang. So ist die Anlage derzeit nicht in der Lage mehr als eine Schicht pro Prozess zu schmelzen oder das Pulverbett aufzuheizen und damit zu versintern. Die Anlage ist somit aktuell nicht in der Lage, den PBF-EB-Prozess adäquat abzubilden und eignet sich somit nur für Grundlagenuntersuchungen zum Elektronenstrahlschmelzen. Damit verbleibt auch nach Beendigung des Projektes die MiniMelt als derzeit einzige Forschungsanlage für synchrotronbasierte Methoden ihrer Art und ermöglicht Prozessuntersuchungen, die nirgendwo sonst möglich sind.

[8] L. I. Escano *et al.*, "An electron beam melting system for in-situ synchrotron X-ray monitoring," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 3, p. 100094, Dec. 2022, doi: [10.1016/j.addlet.2022.100094](https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100094).

[9] J. Yuan *et al.*, "In-situ characterization of defect formation and elimination dynamics during electron beam melting using high-speed X-ray imaging," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 11, p. 100239, Dec. 2024, doi: [10.1016/j.addlet.2024.100239](https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100239).

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Über die Dauer des Track-AM-Projektes sind bereits mehrere (bisher 7, siehe [10-16]) Publikationen von Projektpartnern in Bezug auf die Forschungsgegenstände veröffentlicht worden. Darüber hinaus wurden Forschungsergebnisse und Details aus dem Projekt auf diversen Konferenzen der wissenschaftlichen Gemeinschaft vorgestellt. Zwei weitere Publikationen zur Radiographie von Seiten der FAU sind eingereicht bzw. sind in Vorbereitung. Weiterhin sind zwei Promotionsarbeiten, eine seitens der KTH und eine seitens der FAU, in Arbeit. Letztere wird sich explizit auf Fragestellungen des Teilprojektes 2 (und somit WP4) beziehen.

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

[10] P. M. Bidola *et al.*, "A high-speed x-ray radiography setup for in-situ electron beam powder bed fusion at PETRA III," in *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XVIII*, H. Mimura, C.

Morawe, and A. M. Khounsary, Eds., San Diego, United States: SPIE, Oct. 2023, p. 2. doi:
[10.1117/12.2678913](https://doi.org/10.1117/12.2678913).

[11] J. Bäreis, N. Semjatov, J. Renner, J. Ye, F. Zongwen, and C. Körner, "Electron-optical in-situ crack monitoring during electron beam powder bed fusion of the Ni-Base superalloy CMSX-4," *Prog Addit Manuf*, Nov. 2022, doi: [10.1007/s40964-022-00357-9](https://doi.org/10.1007/s40964-022-00357-9).

[12] C. Ioannidou *et al.*, "In-situ synchrotron X-ray analysis of metal Additive Manufacturing: Current state, opportunities and challenges," *Materials & Design*, vol. 219, p. 110790, Jul. 2022, doi: [10.1016/j.matdes.2022.110790](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110790).

[13] H.-H. König *et al.*, "MiniMelt: An instrument for real-time tracking of electron beam additive manufacturing using synchrotron x-ray techniques," *Review of Scientific Instruments*, vol. 94, no. 12, p. 125103, Dec. 2023, doi: [10.1063/5.0177255](https://doi.org/10.1063/5.0177255).

[14] N. Semjatov, B. Wahlmann, and C. Körner, "Multiple interaction electron beam powder bed fusion for controlling melt pool dynamics and improving surface quality," *Additive Manufacturing*, vol. 90, p. 104316, Jun. 2024, doi: [10.1016/j.addma.2024.104316](https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104316).

[15] J. Ye, N. Semjatov, P. Bidola, G. Lindwall, and C. Körner, "Revealing the Mechanisms of Smoke during Electron Beam–Powder Bed Fusion by High-Speed Synchrotron Radiography," *JMMP*, vol. 8, no. 3, p. 103, May 2024, doi: [10.3390/jmmp8030103](https://doi.org/10.3390/jmmp8030103).

[16] H.-H. König *et al.*, "Solidification modes during additive manufacturing of steel revealed by high-speed X-ray diffraction," *Acta Materialia*, vol. 246, p. 118713, Mar. 2023, doi: [10.1016/j.actamat.2023.118713](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118713).

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unrefериerte Proceedings, Conference Notes)

- International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 2023 Erlangen: E. Sullivan *et al.*, A sample environment for in-situ X-ray studies on electron beam powder bed fusion (E-PBF) of metals and its application for alloy design (Poster)
- Alloys for Additive Manufacturing Symposium (AAMS) 2023 Madrid: H.-H König *et al.*, High-Speed X-Ray Diffraction Study of Solidification Mode in Powder Bed Fusion of Hot-Work Tool Steel (Vortrag)
- Alloys for Additive Manufacturing Symposium (AAMS) 2024 Paris: N. Semjatov *et al.*, In-situ synchrotron radiography of melt pool and powder bed dynamics in electron beam powder bed fusion (Vortrag)
- International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 2025 Erlangen: N. Semjatov *et al.*, In-situ synchrotron radiography of melt pool dynamics in electron beam powder bed fusion (Vortrag)
- International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 2025 Erlangen: P. M. Bidola *et al.*, Leveraging the Capabilities of Synchrotron White Beam Imaging for Real-Time Studies of Electron Beam Powder Bed Fusion (Poster)
- Und weitere von Projektpartnern

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Bisher wurden noch keine Projektbezogenen Abschlussarbeiten eingereicht, jedoch sollen im Rahmen des Projektes insgesamt 2 Promotionsarbeiten verfasst werden.

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Carolin Körner

Verbund: Röntgen-Angström Cluster, Projekt Track-AM, Teilprojekt 2

Thema: **Echtzeituntersuchungen des Elektronenstrahlschmelzens von Metallen, Teilprojekt 2**

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Ziel des Gesamtvorhabens mit den Projektpartnern war die Entwicklung einer miniaturisierten Elektronenstrahl-Schmelzanlage (kurz PBF-EB-Anlage) für die Durchführung von Echtzeituntersuchungen des Elektronenstrahlschmelzprozesses mittels Synchrotron-Beugung & Radiographie an ausgewählten Beamlines (P61A, P21.2) der Petra III-Einrichtung des DESY. Aus den Echtzeituntersuchungen sollte ein neues, vertieftes Verständnis der Schmelzpoolodynamiken, des Verfestigungsverhaltens, der Defektausbildung sowie der Festkörper-Phasenumwandlungen hervorgehen, welche bei der Elektronenstrahl-basierten additiven Fertigung entscheidend sind. Dieses vertiefte Verständnis soll langfristige Innovationen im Bereich der Prozess- und Materialentwicklung ermöglichen, welche zu einer breiteren und effizienteren Anwendung des PBF-EB-Verfahrens führen werden. Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Anlage soll über das Vorhaben hinaus auch in anderen Projekten für Untersuchungen zum Einsatz kommen. Zu diesem Zwecke wurde die Anlage so konzipiert und gebaut, dass sie für ein breites Forschungsspektrum, bei welchem das Schmelzen metallischer Werkstoffe die experimentelle Grundvoraussetzung darstellt, über das PBF-EB-Verfahren hinaus verwendet werden kann.

Fokus des Teilprojektes 2 nach Fertigstellung der Anlage war die Untersuchung der PBF-EB Schmelzpoolodynamiken mittels Hochgeschwindigkeits Synchrotron-Radiographie. Zu diesem Zweck wurde vom Projektpartner HZG (mittlerweile Hereon) in einem separaten Teilprojekt ein neues Radiographiesystem entwickelt und an der Beamline P61A implementiert. Insgesamt konnten fast alle im Vorhaben formulierten Ziele mit den bewilligten Mitteln erreicht werden.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die erste Hälfte des Gesamtvorhabens bestand in der Entwicklung, dem Bau, sowie der Implementierung der miniaturisierten PBF-EB-Versuchsanlage an den vorgesehenen Beamlines. Hierzu gehörten die Festlegung der Designkriterien für eine Kompatibilität mit den vorgesehenen Beamlines (insbesondere Maße und Gewicht der Anlage), die Entwicklung einer Prozess-repräsentativen Probenumgebung, die Entwicklung einer geeigneten Versuchskontrollsoftware, der eigentliche Bau der Anlage sowie die finale Kommissionierung der Anlage an den Beamlines P61A und P21.2. Durch den Start des Projektes zu Beginn der Corona Pandemie, sowie unvorhersehbarer bürokratischer Hürden, wurde die Fertigstellung dieses Projektabschnittes um etwa ein halbes Jahr verzögert. Infolgedessen stand weniger Zeit für die experimentellen Versuchsarbeiten mit der Anlage zur Verfügung, welche jedoch

durch einen deutlich straffer als ursprünglich vorgesehenen Versuchsplan wieder aufgeholt werden konnte. Insgesamt konnten experimentelle Untersuchungen des PBF-EB-Verfahrens während 6 separater Strahlzeiten durchgeführt werden. Vier davon fanden im Jahr 2023 statt und zwei im Jahr 2024. Vier der insgesamt sechs Strahlzeiten dienten der Untersuchung von Schmelzpooldynamiken mittels des neu entwickelten Radiographiesystems an der P61A Beamline, welches, ebenfalls ein halbes Jahr verspätet, erst im April 2023 fertiggestellt werden konnte. Auch nach der Fertigstellung der Versuchsanlage wurden bis zum Ende des Projektes kontinuierlich Verbesserungen an dieser, sowie am allgemeinen Versuchsablauf vorgenommen. Ein Teil der gewonnenen Erkenntnisse konnte bereits während der Projektlaufzeit veröffentlicht werden, während ein weiterer Teil noch in den kommenden Monaten und Jahren folgen wird.

3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Primärziel dieses Vorhabens war der weltweit erstmalige Bau einer mit Synchrotroneinrichtungen kompatiblen PBF-EB Versuchsanlage, sowie die Verwendung dieser Anlage für Untersuchungen verschiedener, sowohl materialwissenschaftlicher, als auch prozessphysikalischer Fragestellungen rund um das Elektronenstrahl-Pulverbettenschmelzverfahren und das Elektronenstrahlschmelzen. Zudem konnte mit der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit diesen Experimenten die Leistungsfähigkeit dieser neu geschaffenen Versuchskonstellation demonstriert und breites wissenschaftliches Interesse geweckt werden. Durch die bisher durchgeführten Experimente konnten zahlreiche, bisher unbeantwortbare Fragestellungen untersucht und teilweise bereits beantwortet werden. So verschaffte die Durchführung von Hochgeschwindigkeits-Radiographie-Experimenten während des PBF-EB-Verfahrens einen noch nie dagewesenen Einblick in die Schmelzpooldynamiken und führte somit zu einem gesteigerten physikalischen Prozessverständnis. Darauf basierend konnten bereits neue Prozessstrategien entwickelt sowie die Wirksamkeit älterer Strategien im Detail untersucht werden. Materialwissenschaftliche Studien konnten ebenfalls durchgeführt werden, aus welchen unter anderem ein besseres Verständnis des Einflusses der Eigenheiten des PBF-EB Verfahrens auf Phasenumwandlungen und Mikrostrukturausbildung herausgearbeitet werden konnten. Erreicht konnten diese Ziele nur durch eine enge Zusammenarbeit verschiedener Partner aus Forschung und Industrie. Während Wissenschaftler der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, sowie der Königlichen Technischen Hochschule Stockholm für Projektleitung, sowie Expertise im Bereich PBF-EB, sowie Synchrotronbeugung verantwortlich waren, trugen Wissenschaftler von Hereon (Geesthacht) mit der Entwicklung des Radiographiesystems und ihrer Expertise in diesem Bereich bei. Die PBF-EB-Versuchsanlage wiederum wurde in Zusammenarbeit mit der schwedischen Firma Freemelt AB entwickelt und von dieser gebaut.

Bisher sind bereits einige Publikationen aus der gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeit hervorgegangen, wobei weitere noch folgen werden. Dazu gehören eine Publikation, die die Versuchsanlage sowie ihre Funktionen und Fähigkeiten beschreibt (*König et al. 2023*), eine Publikation zu dem entwickelten Radiographiesystem (*Bidola et al. 2023*), eine Publikation zu dem „Smoke“-Phänomen, welches mittels Radiographie untersucht wurde und eine Besonderheit des PBF-EB Verfahrens darstellt (*Ye et al. 2024*), sowie weitere Publikationen, die sich mit Teilaspekten der durchgeführten Forschung beschäftigen (z.B. *Ioannidou et al. 2022*, *Bäreis et al. 2022*, *Semjatov et al. 2024*). Darüber hinaus wurden weitere Publikationen zu der Untersuchung von Schmelzpooldynamiken bereits eingereicht oder werden zur Einreichung vorbereitet. Es wird davon ausgegangen, dass die Versuchsanlage, sowie das Radiographiesystem auch künftig in neuen Projekten zum Einsatz kommen und neue Erkenntnisse hervorbringen werden.