

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## **Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

Laufzeit: 01.09.2019 - 31.08.2022

Teilprojekt 1-1.1

### **Mobile Reparaturfabrik**

im Programm WIR! (03WIR2503A)

Wandel durch Innovation in der Region innerhalb des WIR! -Bündnisses

Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg  
Platz der Deutschen Einheit 1, 03046 Cottbus  
Koordinator und zentraler Ansprechpartner  
**Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel**  
Fachgebiet Hybride Fertigung  
Tel.: +49 355 69 3108, E-Mail: [haertel@b-tu.de](mailto:haertel@b-tu.de)

# **I. Kurzbericht**

---

Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die Ergebnisse und Errungenschaften des Projekts "Mobile Reparaturfabrik", dass es sich zum Ziel gemacht hat, eine mobile Instandhaltungsplattform für die Reparatur von Bauteilen mittels additiver und digitaler Technologien aufzubauen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Schweißtechnik, Digitalen Ergänzung und dem Etablieren einer Fertigungs- und Reparaturstrategie.

Das gesamte Forschungsvorhaben kann in drei Arbeitsphasen gegliedert werden. Zunächst die Planung der Plattform und der hierfür benötigten Maschinen und anschließend die Umsetzung, welche die Integration der Partnermodule beinhaltet. Zuletzt erfolgte die Erprobung der Anlage im Feldversuch beim assoziierten Projektpartner LEAG.

Im Rahmen der Planungsphase wurde ein Containerkonzept erarbeitet. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Ziele des Gesamtvorhabens und der Anlagen der Projektpartner entstand eine geeignete Plattform, die aus zwei 20 Fuß Containern besteht. Die Aus- und Umbauten der Container wurden durch die Beschaffung der Maschinenbasis, Schweißgerät, Maschinenrundtisch, Druckluftherzeuger und eine Schweißrauchabsaugung ergänzt. Im Zuge der Einbaumaßnahmen erfolgte eine Vielzahl von Anpassungen an die Maschinenbasis und die Komponenten, um sicherzustellen, dass ein reibungsloser Instandsetzungsprozess möglich ist. Das Resultat ist eine flexible Plattform, die subtraktive Prozesse wie z. B. Fräsen und Bohren mit einem additiven Schweißprozess verbindet. Durch die Integration der Anlagen der Projektpartner ist die bestehende Plattform in der Lage, die gesamte Prozesskette einer Bauteil-instandsetzung abzubilden. Von der Identifizierung der Schadstelle über die Bahnplanung bis hin zur additiven Instandsetzung mit gleichzeitiger Prozessüberwachung. Die Entwicklung geeigneter Abläufe und die Standarisierung der resultierenden Prozesse war ein wesentlicher Meilenstein innerhalb dieses Projekts.

Während der Erprobung konnte anhand von instandgesetzten Bauteilen gezeigt werden, dass die angestrebten Ziele erreicht wurden. Die Mobile Reparaturfabrik kann somit zukünftig als Ausgangspunkt für Innovation und als Bindeglied zwischen Wirtschaft und Forschung fungieren.

## **II. Ausführliche Beschreibung der durchgeführten Arbeiten**

---

### **1. Aufbau der Technologieplattform**

Im Rahmen der Planung wurden zunächst mehrere Containerkonzepte erarbeitet. Das Verwenden eines 40 Fuß Containers wurde schnell verworfen, da die Bearbeitungsmaschine PM800 im eingebauten Zustand nicht betriebsfähig gewesen wäre. Um eine möglichst hohe Flexibilität bei der Größe der zu bearbeitenden Bauteile zu gewährleisten, musste die PM800 zum einen außerhalb des Containers an ein Bauteil gestellt werden können (Z-Achse Horizontal) und zum anderen auch im Betrieb, bei dem die Z-Achse vertikal steht, im Container Platz finden und arbeitsfähig sein. Eine Bearbeitung innerhalb eines geschlossenen Bearbeitungsraumes, der alle Sicherheitsaspekte erfüllt (Lasersicherheit, Arbeitsschutz etc.) war eine der Anforderungen an das Containerkonzept. Die genutzte Plattform aus zwei aneinandergestellten 20 Fuß Containern erfüllt die soeben genannten Anforderungen und bietet darüber hinaus weitere Vorteile. Der Einsatz mit dem Container, der nur die Bearbeitungsmaschine PM800 beherbergt, ist aus wirtschaftlicher Sicht ein Anwendungsfall, der ebenfalls genutzt werden kann, da diese Containerhälfte autark vom Peripheriecontainer konzipiert ist. Die Transportkosten und -aufwand sinken und die Anlage benötigt nur die Hälfte der Aufstellfläche. Der verwirklichte Peripheriecontainer beherbergt neben einem Bedienerplatz zwei modular aufgebaute Kabinen, in denen die Aggregate der Projektpartner positioniert wurden. Durch ihre Ausstattung können auch in zukünftigen Forschungsprojekten Maschinen mit einer Leistungsaufnahme von max. 32 A erprobt und in Betrieb genommen werden. Druckluft und Gasanschlüsse sind ebenso vorgesehen. Die direkt mit dem Bearbeitungsraum verbundenen Kabinen haben zwei weitere Vorteile: Zum einen die Nähe zum Bearbeitungskopf und die damit sehr kurze Verkabelung und Führung von Schweißmaterial (Draht) und zum anderen sind nicht genutzte Aggregate durch ein Rolltor vor äußeren Einflüssen, die bei der Bearbeitung im Bearbeitungsraum entstehen, geschützt. Um bei der Bearbeitung von Bauteilen eine größtmögliche Flexibilität zu besitzen, wurde eine zusätzliche Dacherhöhung, die das Dach variabel um max. 1 m erhöht, vorgesehen. So ist sichergestellt, dass die Verfahrswege der Maschinenspindeln nicht beeinträchtigt sind und der gesamte

Arbeitsraum der PM800 genutzt werden kann. In der Konzeptionsphase wurden gemeinsam mit dem Containerbauer Systeme zum Verbinden der beiden Containerhälften erarbeitet. Die notwendige Positioniergenauigkeit der beiden Container zueinander konnte mit einem selbstzentrierendem Stiftsystem erreicht werden. Die Verstärkung der bestehenden Containerbasis und das Einbringen von Verankerungsplatten, die einen sicheren Transport der Aggregate ermöglichen, erfolgte im gleichen Schritt. Dies war aufgrund des Gewichts der einzelnen Aggregate notwendig. Die erforderliche Prüfung der Statik wurde durch ein externes Planungsbüro bestätigt. Im Rahmen der Ausbaumaßnahmen der beiden Container durch den Containerbauer CBG Container Bau konnte das Belüftungs- und Klimakzept ebenfalls umgesetzt werden. Ergänzt wurde dieses im späteren Verlauf durch den Einbau und die softwareseitige Implementierung der Schweißrauchabsaugung.

Die Planung und der Aufbau der Bearbeitungsmaschine PM800 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller Metrom um zu gewährleisten, dass alle Anforderungen an das angestrebte Konzept erfüllt werden. Die Kippung des Maschinengestells um 90° und der Einsatz außerhalb der Container standen dabei im Fokus. Abbildung 1 zeigt die PM800 im transportfähigen Zustand (Vertikalausrichtung).

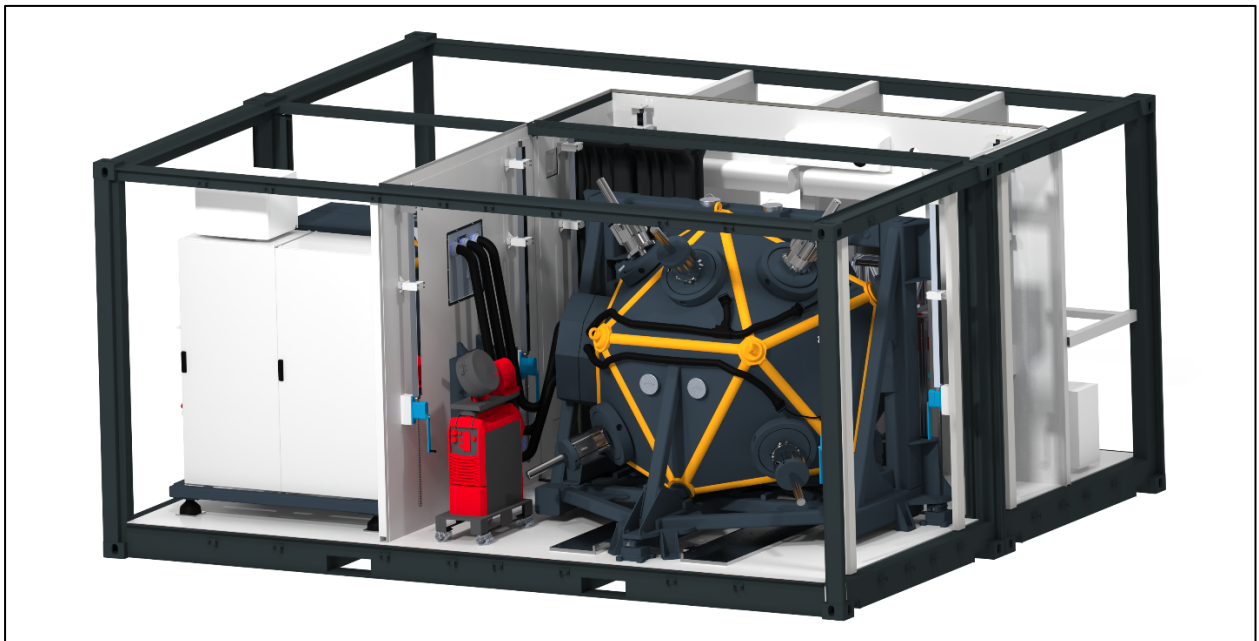


Abbildung 1: Container mit PM800 in der vertikalen Ausrichtung (ohne Türen und Dach)

Konzepte und Anleitungen für ein sicheres Kippen des Gestells sowie den Ein- und Ausbau der PM800 aus dem Container wurden ebenfalls umgesetzt. Im weiteren

Planungsverlauf wurde die Maschinenspindel um zusätzliche Halterungen (Picatinny-Schienen) ergänzt, um den Projektpartnern die Befestigung weiterer Sensorik zu ermöglichen.

In Folge eines iterativen Prozesses zwischen Metrom und den Projektpartnern wurden die erforderlichen Hardware- und Softwareschnittstellen zwischen allen miteinander verbundenen Aggregaten ermittelt und umgesetzt. Die Implementierung Prozessspezifischer M-Befehle und die Anpassungen an der Maschinensteuerung der PM800 waren notwendig, um die Schweiß- und Messprozesse durchführen zu können. Derweil erfolgte auch die Konzeption des Rundtisches. Dieser verfügt neben der Transportposition über mehrere Arbeitspositionen, die entlang einer Linearführung, die zwischen den beiden Containern verläuft, angefahren werden. Durch die Positionierung des Rundtisches während des Transports im Peripheriecontainer und den Anschlüssen der Medien im Medienmodul der PM800 im Bearbeitungscontainer musste ein Schnellkupplungssystem mit einem Wanddurchführungskonzept (Lasersicherheit) erarbeitet werden. Im weiteren Verlauf des Projekts erwies sich die geplante Lösung als zielführend und einfach zu verwenden.

Während der Planung aller Aggregate und der Plattform wurde der interne Sicherheitsingenieur beratend hinzugezogen. Entsprechende persönliche Schutzausrüstung und der Arbeitsschutz der in den Containern arbeitenden Personen konnten so bereits im frühen Stadium der Konzeption und Umsetzung berücksichtigt werden.

Während der Ausbauphase bei den Dienstleistern CBG und Metrom wurden bereits Bauteile für die Inbetriebnahme und die Erprobung der Plattform ausgewählt. Die assoziierten Partner Rolls Royce und die LEAG konnten hierfür geeignete Bauteile bereitstellen, die im weiteren Verlauf bearbeitet wurden.

## **2. Inbetriebnahme**

Aufgrund der erleichterten Zugänglichkeit zu den Steuerungsprogrammen der Firma Metrom entschied sich das Fachgebiet, den gesamten Prozess der Inbetriebnahme auf dem Gelände in Hartmannsdorf durchzuführen. Eine mehrwöchige Schulung der Mitarbeiter des Fachgebietes wurde in diesem Rahmen ebenfalls durchgeführt. Dies hatte den Vorteil, dass die Funktionsfähigkeit aller Komponenten geprüft werden konnte und Mängel sowie Änderungswünsche behoben bzw. umgesetzt wurden. Um keine zusätzlichen

Kosten für den Transport der fertigen Container zu erzeugen, entscheidet sich das Fachgebiet, diese direkt an die Firma Metrom transportieren zu lassen und dort abzunehmen. Die darauffolgende Inbetriebnahme der Plattform gliedert sich in drei Abschnitte:

1. Die Funktionsprüfung und Inbetriebnahme des Maschinengestells inklusive des Rundtisches und der damit verbundenen Umbaumaßnahmen bei der Umstellung des Arbeitsmodus (vertikal, horizontal, außerhalb der Container). Dabei wurden auch die Prozesse für den Um- und Aufbau der Anlage verfeinert und ggf. angepasst.
2. Die Inbetriebnahme der Maschinenspindel, der subtraktiven Prozesse (Fräsen) und der Messvorrichtung für das Erfassen von Bauteilen.
3. Der additive Prozess (Schweißen), zu dem auch die Schweißrauchabsaugung und Klimatisierung gehören, wurden mittels Testgeometrien erprobt. Die NC-Programmierung dieser Geometrien wurde bewusst händisch und nicht mit der Bahnplanungslösung von GEFERTEC durchgeführt, um den Inbetriebnahmeprozess nicht unnötig komplex zu gestalten.



Abbildung 2: Einbau der PM800 nach Gestellkipfung

Die Inbetriebnahmen der Aggregate der Projektpartner, welche zu jedem Zeitpunkt vom Fachgebiet begleitet wurden, werden im weiteren Verlauf separat betrachtet.



Planung und Absprachen mit den beteiligten Projektpartnern konnten einen nahezu reibungslosen Inbetriebnahmeprozess bei allen Beteiligten sicherstellen. Signal-, sowie Steuerungsergänzungen wurden vor Ort schnell implementiert und Maschinenbefehle, die z. B. durch das Verknüpfen von Befehlen und Signalen die Bedienbarkeit vereinfachten, wurden ebenso umgesetzt. Allein die Implementierung der zusätzlichen Signale und Abfragen, die durch die erhöhte Komplexität der Anlage aufgrund der drei Schweißprozesse entstand, dauerte mehr als sechs Wochen.

Die Inbetriebnahme der drei Schweißprozesse unterlag in allen drei Fällen einem vorher definierten Ablaufplan. Nach der hardwareseitigen Implementierung erfolgte die Überprüfung der Steuersignale und die Einrichtung der Software. Anschließend fand eine Prüfung der Sicherheitsfunktionen (z. B. Not-Aus) statt. Im Anschluss an die erfolgreiche Prüfung konnten erste Schweißversuche zur Kalibrierung der Aggregate durchgeführt werden. Die Aggregate von Scansonic zur Prozessüberwachung konnten anschließend in Verbindung mit dem bereits zuvor in Betrieb genommenen CMT-Schweißgerät von Fronius implementiert werden.

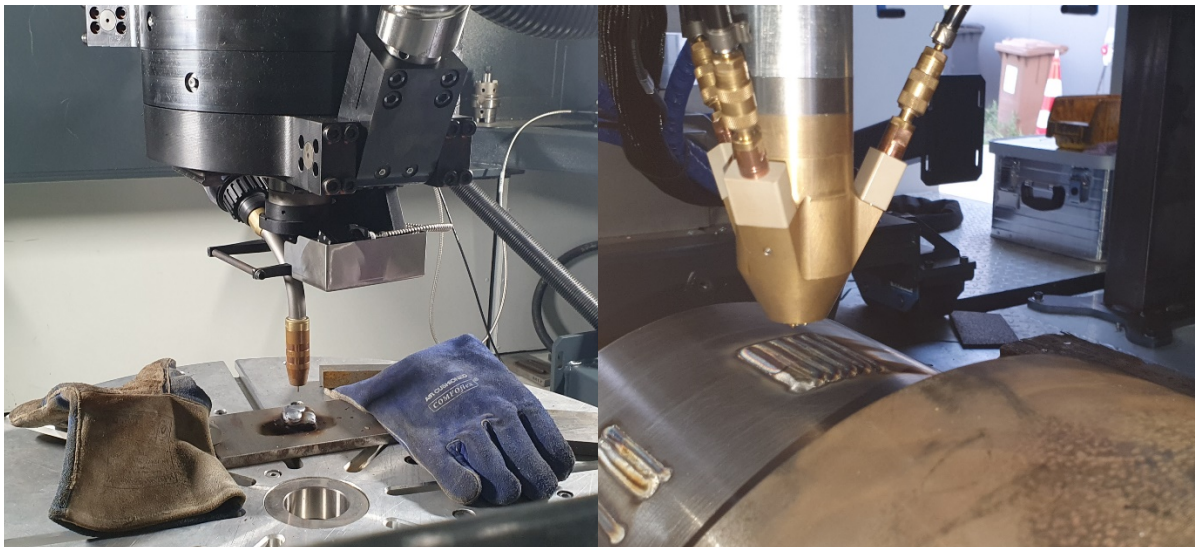


Abbildung 3: Schweißversuche im Rahmen der Inbetriebnahme (CMT, 3-Draht-WIG)

Die Bahnplanungslösung der Gefertec GmbH benötigte mehrere Iterationsschritte, bis diese erfolgreich eingesetzt werden konnte. Durch die komplexe Kinematik der PM800 und der vielen Freiheitsgrade der Maschinenspindeln erforderte die Inbetriebnahme eine Vielzahl von Tests.

Im Zuge der Inbetriebnahme der einzelnen Komponenten erfolgte die Identifikation weiterer Bedarfe bezüglich der Ausstattung der MORE. Die Auswahl der

Verbrauchsmaterialien wie z. B. Bohrer, Fräser und Schweißzubehör wurden in Hinblick auf die Erprobung unter Realbedingungen realisiert. Darüber hinaus erfolgte die Beschaffung von Instrumenten zum mobilen Einmessen von Werkzeugen. Durch die getätigten Beschaffungen konnte ein erfolgreicher mobiler Einsatz, der einen Realeinsatz simulierte, beim Projektpartner LEAG realisiert werden.

Des Weiteren hat das Fachgebiet eine Induktionsanlage zur thermischen Behandlung von Schweißnähten beschafft und gemeinsam mit dem Hersteller in Betrieb genommen. Während der im weiteren Verlauf durchgeführten Parametertests für diverse Schweißwerkstoffe, konnte die Anlage erfolgreich zum Vorwärmen der genutzten Substratplatten eingesetzt werden.

### **3. Erprobung der Plattform**

Im Anschluss an die Inbetriebnahme erfolgte die Erprobung der Plattform unter Realbedingungen bei der LEAG am Standort Spremberg. Dieser Einsatz, bei dem bis zu vier Mitarbeiter des Fachgebietes gleichzeitig vor Ort waren, erstreckte sich über einen Zeitraum von sieben Wochen. In diesem Zeitraum wurden vorrangig das LMD-, CMT-Schweißen und die Bahnplanung erprobt. Ergänzend fanden auch weitere Versuche der Projektpartner Access e.V. und Scansonic statt.

Durch eine zuvor erstellte Dokumentation zu den Aufbau- und Inbetriebnahmeabläufen konnte die Mobile Reparaturfabrik bei der LEAG innerhalb von 3 Stunden aufgebaut und in einen betriebsbereiten Zustand versetzt werden. Hierzu zählen z. B. Aufgaben wie das nivellieren des Aufstellgrundes, das Zusammenstellen der Container, sowie das Verbinden aller Kabel und Schläuche, die zwischen den beiden Containerhälften verlaufen. Die ersten drei Wochen des Einsatzes befand sich die PM800 im Vertikalbetrieb. Es sollte gezeigt werden, wie gut das Schweißen und Fräsen an Flächen, die Senkrecht zum Boden stehen, funktioniert. Durch die veränderte Schmelzgeometrie aufgrund der Positionierung, wurden Daten für Anpassungen an die Bahnplanung erfasst und umgesetzt. Neben einfachen Schweißbahnen konnten auch Probegeometrien wie z. B. Wände, Quader und Flächen additiv gefertigt werden. Zunächst erfolgte die Programmierung der Bahnführung händisch und anschließend durch die Bahnplanungsanwendung von Gefertec. Der erfolgreiche Einsatz der Plattform im Vertikalmodus zeigte, dass auch Bauteile, die wesentlich größer sind als die verwendeten Probekörper, bearbeitet werden können. Das



Heranstellen der PM800 an das zu bearbeitende Bauteil wäre der hierfür notwendige Schritt. Aus logistischen Gründen standen Bauteile, bei denen es wirtschaftlicher wäre die Mobile Reparaturfabrik zum Bauteil zu transportieren, statt das Bauteil zum Bearbeitungsort, nicht zur Verfügung.

Den restlichen Zeitraum des Einsatzes befand sich die Plattform im Horizontalbetrieb. Während dieses Betriebsmodus wurde eine Reihe von Schweißwerkstoffen aus Aluminium (AlSi5) und Stahl (SG2, 316L) erprobt. Bei der Einstellung des CMT-Schweißgerätes griff das Fachgebiet auf zuvor erfolgreich genutzte Parameter aus ihrer Parameterbibliothek zurück. Nach einigen kleinen Anpassungen war die Qualität der mobil hergestellten Nähte und Geometrien identisch zu denen, die auf einer stationären Anlage mit einem baugleichen Schweißgerät hergestellt wurden. Zur Validierung der subtraktiven Bearbeitung wurde zusätzlich ein additiv gefertigter Würfel auf das Endmaß 30x30x30 mm gefräst. Die Toleranzen der Flächen zueinander lagen bei max.  $\pm 0,038$  mm und waren für den ersten mobilen Einsatz zufriedenstellend.

Den größten Meilenstein innerhalb des Projekts stellt eines der additiv instandgesetzten Bauteile mittels LMD-Prozesses dar. Das im Vorfeld ausgewählte Bauteil wurde vorab gescannt und anschließend in das Bahnplanungsprogramm geladen. Anschließend fand die CAD-seitige Instandsetzung statt. Hierfür wurde eine Deckgeometrie über die Fehlstelle gelegt. Innerhalb dieser Geometrie programmierte die Software die notwendigen Schweißbahnen (entlang der bestehenden Bauteilgeometrie). Nach dem Aufspannen des Bauteils und Einmessen von Referenzpunkten führte die Anlage den generierten Code aus. Gleichzeitig konnte mit der Prozessüberwachung von Scansonic überwacht werden, ob während des Schweißprozesses Fehlstellen in der hergestellten Geometrie aufgetreten sind. Abbildung 4 zeigt das auf dem Rundtisch aufgespannte Bauteil wenige Schweißlagen vor der Fertigstellung. Um ein optimales Schweißergebnis zu erlangen, wurde bei der Generierung des NC-Codes darauf geachtet, dass die Anlage die Kippung und Drehung der Maschinenspindel ebenfalls nutzt. Dies war aufgrund der Rundung und Krümmung des ausgewählten Bauteils notwendig. Die LEAG hatte in der Vergangenheit eine Vielzahl von solchen Bauteilen mittels LMD-Prozesses instandgesetzt. Ein anschließender Vergleich der Bauteile zeigte nahezu keine Unterschiede zu den stationär hergestellten Bauteilen.



Abbildung 4: Mittels LMD instandgesetztes Turbinenbauteil

Es konnte somit gezeigt werden, dass die angestrebte Prozesskette, von der digitalen Aufnahme des Bauteiles, über die Bahnplanung bis hin zur eigentlichen Instandsetzung mit Prozessüberwachung, wie gewünscht funktioniert. Während der gesamten Erprobung fand ein enger Austausch zwischen den Projektpartnern statt. Störende Wechselwirkungen konnten eliminiert werden und die Abläufe und Prozesse wurden im Verlauf der Erprobung weiter optimiert.

#### 4. Öffentlichkeitsarbeit

Ziel des Vorhabens war es auch, neue Vertriebslösungen und Geschäftsmodelle sowie praxisorientierte Fortbildungskonzepte zu ermöglichen und zu einem überregional sichtbaren Innovationsnetzwerk aufzusteigen. Die Bündnistreffen der WI+R Bündnisses wurden genutzt, um bereits im Bündnis aktive Akteure auf das Projekt aufmerksam zu machen und für gemeinsame Folgeprojekte zu begeistern. Darüber hinaus stellte das Fachgebiet vom 15. Bis 18. November bei der Formnext 2022 in der Messe Frankfurt eine Hälfte der Mobilen Reparaturfabrik aus. Als Mitaussteller auf dem Firmenstand der Metrom wurde das Konzept und die beteiligten Projektpartner einer Vielzahl von Fachbesuchern vorgestellt. Für diese Veranstaltung entstand das auf Abbildung 5 zu sehende Poster, welches das Konzept der Plattform erklärt und die Fähigkeiten der Mobilen Reparaturfabrik aufzeigt.

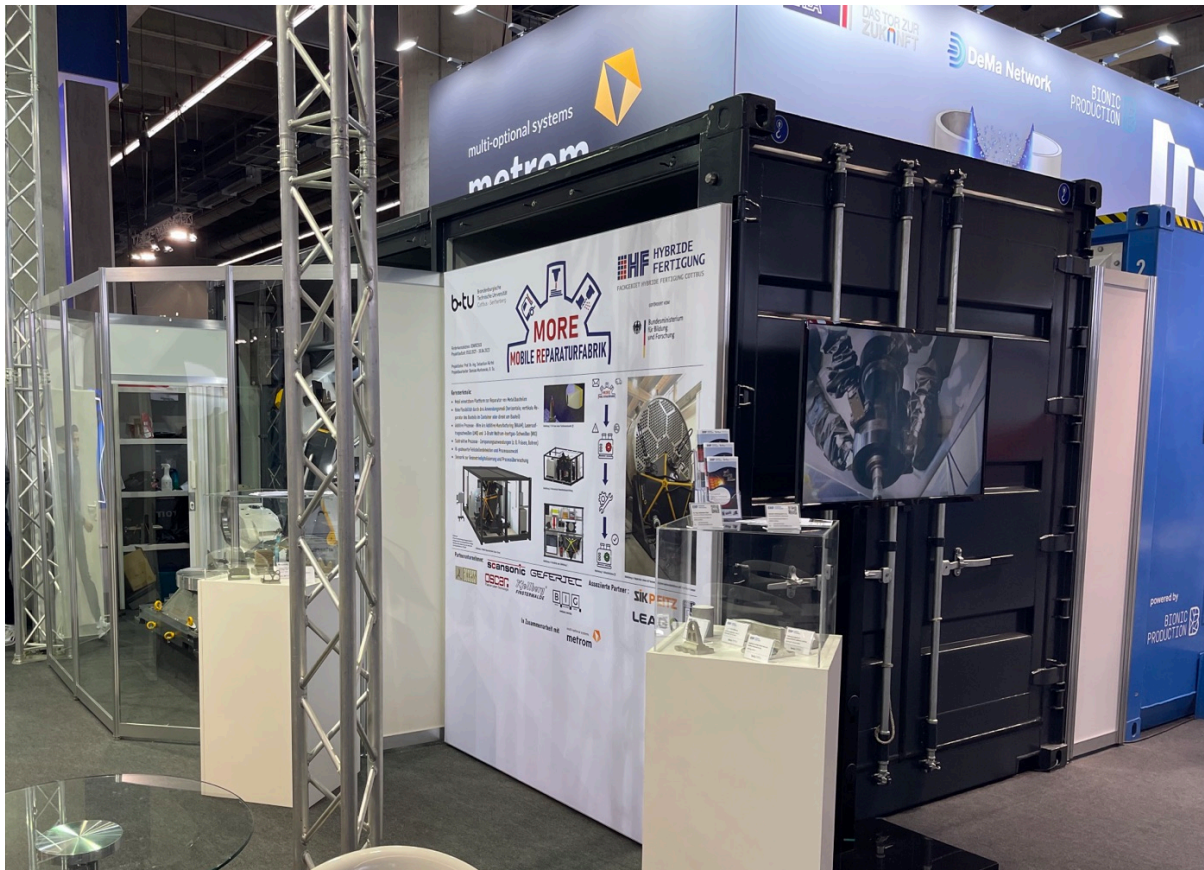


Abbildung 5: Die Mobile Reparaturfabrik auf der Formnext 2022

Beim Treffen der Transferintermediäre am 17.01.2024 wurde die Plattform ebenfalls vorgestellt. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Vielseitigkeit der Plattform und ihrem modularen Aufbau, der es ermöglicht, innovative Technologien einfach und unkompliziert einzubinden und zu erproben.

Seit dem 01.12.2023 wird mit der Mobilen Reparaturfabrik ein weiteres Forschungsvorhaben realisiert. Hierbei geht es um das in-situ hämmern von AMC-Werkstoffen, welches durch digitale Systeme zur Prozessüberwachung ergänzt wird. Das Ziel dieses Vorhabens ist unter anderem die Verbesserung der Werkstoffeigenschaften der additiv hergestellten Bauteile.