

Abschlussbericht zum Projekt Intelligent-geregelte additive Prozesskette mittels simulativ und experimentell ermittelten Bauteil-, Werkstoff- und Prozessdaten (ReAddi)

und

dem Teilvorhaben

Einbindung von optischer Diodentechnik zur kombinierten Produktionsanalyse mit akustischen Sensoren im LBM-Prozess und Entwicklung von Kommunikationsschnittstellen zur Digitalisierung von LBM Prozessen

Gefördert durch



Projekträger



Vorwort

Dieser Abschlussbericht orientiert sich an der Teilvorhabenbeschreibung des o.g. Titels. Die Zielsetzung des Projekts beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Condition Monitoring Systems entlang der Prozesskette für den additiven Fertigungsprozess des Selective Laser Meltings (SLM). Dazu wurden verschiedene Technologien, Sensoren und Schnittstellen miteinander verknüpft, um eine bestmögliche Flexibilität und Integrationsfähigkeit in industrielle Prozesse und Maschinentypen sicherzustellen. Seitens der Einbindung des Körperschalls fanden grundlegende Entwicklungen statt, die eine Eignung des Körperschall zeigen konnten, zielgerichtet Produktionsfehler wie Porenbildung oder Laserparametervariationen zu detektieren. Die Einbindung optischer Detektionsmöglichkeiten wie Fotodioden und Laserabstandssensoren bieten sowohl in-situ, wie auch ex-situ, das Potenzial weitere Prozessfehler wie Laserreflexion, Porenbildung und Nahtabweichungen schnell zu detektieren.

Das Projekt lieferte für QASS einen entscheidenden Mehrwert für die Erschließung eines neuen Marktsegments und hat einen Beitrag zur schnellen Integration von weiteren Datenquellen (Sensoren, Datenströme, Maschinendaten) geleistet, um damit das Thema Sensorfusion und, damit verbunden, das Thema maschinelles Lernen ermöglicht.

Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten beschrieben und nach Arbeitspaketen getrennt.

AP 1 Festlegung von Versuchsparametern als DoE

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde an einer Realizer 250 SLM-Maschine in Vor-Ort-Terminen der Prozess untersucht und entsprechende Schallwege zur Adaption von Sensoren identifiziert. Es wurde erfasst, welche Umweltfaktoren bei einem Druckjob eine Rolle spielen und welche Faktoren eine Messung beeinflussen. Als Einbauort für Körperschallsensoren wurde die Bodenplatte ausgewählt, auf der Bauteile durch gezieltes Aufschmelzen von Metallpulver im Pulverbett schichtweise entstehen. In anschließenden Versuchen zur Sensoradaption wurde bestimmt, inwiefern sich Parametervariationen der Realizer auf die Körperschallprozesse auswirken. Hier wurde insbesondere die Laserleistung variiert.

Bei den Sensoren kamen vorwiegend Körperschallsensoren zum Einsatz. Die Nutzung von Luftschallmikrofonen musste wegen der entstehenden Metallstäube ausgeschlossen werden. Weitere Sensoren durch Zulieferer oder Eigenentwicklungen der Projektpartner konnten bei entsprechender Eignung in das Messgerät integriert werden.

AP 2 Sensorauswahl und Positionsbestimmung der Sensoradaption für die optischen Sensoren und Signaltrennung

Seitens des Projektpartners WBK wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein Sensorarray mit Fotodiodentechnologie entwickelt. Hiermit sollen Prozessfehler, die vorwiegend durch die Laserstrahlung verursacht werden, erfasst werden. Damit handelt es sich um Reflexionen (unzureichende Aufschmelzleistung im Material), Plasmaentladung durch verdampftes Material/Explosionen und weitere. Das Array wurde durch den Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die Integration des Arrays in die Realizer 250 SLM wurde durch das WBK durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweise des Arrays im Vergleich zum Körperschall und Anforderungen an die Positionierung konnte eine Beeinflussung hinsichtlich Messwertaufnahme, Bauraumbedarf und Integrationsbeeinflussung ausgeschlossen werden. Die Signale werden in einem anderen

Frequenzbereich erfasst als die der Körperschalldetektion und werden im folgenden AP näher beschrieben.

AP 3 Integration der optischen Sensorik über eine konfigurierbare Schnittstelle in das Datenaufzeichnung- und Datenanalyse-System Optimizer 4D (Sensorfusion)

Die Einbindung wurde mittels virtuellen Ports in das Messgerät direkt durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Nutzung von regulären Schnittstellen wie TCP/IP, USB oder Bus-Schnittstellen. Durch die im Projekt veränderte Architektur des Messgeräts können Messsignale digital direkt über die virtuellen Ports Daten in das Datenbanksystem schreiben oder über ein zusätzliches DAQ-Modul z.B. RaspberryPi angeschlossen werden. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung liegt in den unterschiedlichen Anforderungen für die Datenabtastung von Sensorsignalen. Signale, die eine hochfrequente Abtastung benötigen, weil sie sehr schnelle physikalische Prozesse detektieren wie Körperschall, Wirbelstrom usw. werden weiterhin über die im Messsystem verbaute Messkarte mit 50 MHz abgetastet. Signale, die träge physikalische Änderungen detektieren wie Temperatur, Reibungsveränderungen oder ähnliches nutzen die geringere Abtastrate der virtuellen Ports.

Im Fall des Fotodiodenarrays handelt es sich um ausgelöste Spannungssignale, die keiner hochfrequenten Abtastung bedürfen.

AP 4 Softwaremodule zur gemeinsamen Auswertung (Datenfusion)

Für die Datenfusion konnte QASS auf das bewährte Operatorennetzwerk zurückgreifen. Es handelt sich hierbei um eine grafische Benutzeroberfläche, die eine logische Verknüpfung zur Datenanalyse durch Verbinden einzelner Operatoren ermöglicht. Die Operatoren selbst sind Kleinprogramme mit eigener Funktionsweise. Im Forschungsprojekt war die Verwendung einer Mustererkennung geplant. Dabei sollte beim Vorliegen von referenzierbaren Daten auf einen Prozess- oder Materialfehler eine Bibliothek mit zugehörigen Prozesssignalen entstehen. Nachteilig ist jedoch die in-situ Aufnahme von solchen Signalen versagt bei Nicht-Eindeutigkeit der Signale, Veränderung der Signale bei Prozessschwankungen oder Chargenwechseln und der Veränderung von Prozessparametern. Für diese Prozesse sind maschinelle Lernmethoden geeignet, so dass ein Python-Operator zum Einsatz kam. Dieser erlaubt eine Anpassung der Datenanalyse mittels Python-Skript und kann auch durch Anwendung von Python Bibliotheken maschinelle Lernmethoden in Fertigungsprozesse übertragen. Das folgende Vorgehen kann bei der Einstellung von Prozessen angewendet werden und ist als Methode aus diesem Projekt abgeleitet:

1. Entwicklung eines Messkonzeptes mit Auswahl von Sensoren, Beschreibung des Fehlerzustandes
2. Installation des Messsystems, Daten sammeln
3. Extraktion der Daten, Überführung in Entwicklungsumgebung (z.B. JupyterLab)
4. Datenanalyse und Data Science; Anwendung maschinellen Lernens
5. Programmierung einer Datenanalyse auf den Prozess
6. Installation des Programms auf dem Messsystem

AP 5 Entwicklung einer Schnittstelle auf Basis OPC/UA zur Kommunikation mit übergeordneten Kontrollsystemen

Für die Entwicklung der erforderlichen Schnittstelle im Projekt war eine Änderung des verwendeten Betriebssystems nötig, welches die Architektur der OPC/UA Schnittstelle unterstützt. Nach einer intensiven Testphase konnte Ende 2020 OPC/UA als möglicher Standard dem Messgerät hinzugefügt werden und in die Serienfertigung übernommen werden.

AP 6 Robustheit des Systems unter industriellen Extrembedingungen

Für die Verwendung in der Umgebung mit Metallstäuben und großer Hitze bietet sich die Verwendung von klimatisierten Schränken an und ist eine der Standardlösungen der Industrie. Im Projekt wurde untersucht, inwiefern die Messgerätauslastung eine thermische Belastung der Komponenten erzeugt. Mit ausgeschalteten PC-Lüfter konnte eine stabile Temperatur um 50° Celsius während der kontinuierlichen Messung gehalten werden. Um das Eindringen von Metallstäuben dabei auszuschließen, wurden Lüfter eingebaut, die Luft von außen ansaugen und mit Filtern versehen werden. Dabei entsteht innerhalb des Messgeräts ein Überdruck, der das Eindringen von Metallstäuben verhindert.

Im Projekt wurden durch andere Partner Bauraumheizungen entwickelt und gebaut, die wiederum eine stabile Prozesskontrolle des SLM-Prozesses ermöglichen sollen. Die dabei entstehenden Temperaturen schließen die Verwendung von piezoelektrischen hochfrequent auflösenden Körperschallsensoren aus. Die ermittelten Frequenzbereiche mit hochfrequent auflösenden Sensoren, die für eine Bewertung der Prozesse innerhalb der Realizer 250 zur Verfügung standen, zeigten das Vorhandensein von Amplituden bis 100 kHz während der Messung. Damit sind wiederum Sensoren kommerziell erhältlich, die in einem Temperaturbereich bis 500° Celsius eingesetzt werden können.

Weitere Arbeiten und Ergebnisdarstellung

Während der Projektlaufzeit haben sich durch die Verlängerung der Projektlaufzeit und Veränderungen von Zielstellungen der Partner, weitere Arbeitsbereiche ergeben, die eine Zuarbeit oder Schärfung der eigenen Entwicklungsarbeit ermöglichten. Auf diese Arbeiten sei im Weiteren eingegangen.

Ergebnisse der Körperschallmessung an der Realizer 250

Zusammenfassend lassen sich Körperschallsignale aus SLM Prozessen an der im Projekt betrachteten Realizer 250 gut abbilden. Innerhalb der reproduzierbaren Druckjobs, als auch bei Parameteränderungen konnten übereinstimmende und reproduzierbare Signale erzeugt werden. Es zeigt sich, dass die im Projekt betrachtete Frequenzanalyse zwischen Prozesssignalen und sich darauf überlagernden Antworten aus dem Bauteil unterscheiden kann. Die Zuordnung zu spezifischen Bauteilfehlern hat innerhalb des Projektes nicht ortsauflösend stattgefunden, dagegen jedoch qualitativ an der Zunahme von Körperschallsignalen, die eine abweichende Referenzprozesssignatur besaßen.

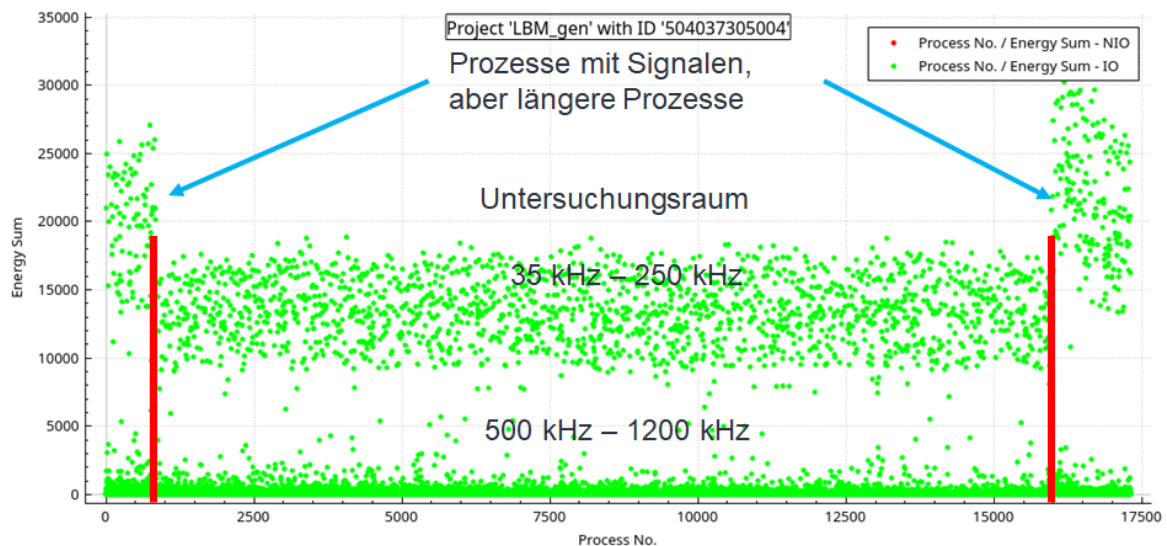


Abb. 1: Verteilung der ermittelten Intensität jeweils eines Layers für einen Druckjob von 9 Würfeln an der Realizer 250 des WBK. Das Diagramm zeigt auf der x-Achse mittig zwischen den roten Markierungen die entsprechenden Prozessdaten. Unterschieden wird hierbei zwischen zwei verschiedenen Frequenzbereichen. Der Frequenzbereich von 35 kHz – 250 kHz wird hierbei nach den Auswertungen den Prozesssignalen der Maschinensignale zugeordnet. Der Prozessbereich zwischen 500 kHz – 1.200 kHz wird den Bauteilreaktionen aufgrund des Druckprozesses zugeordnet.

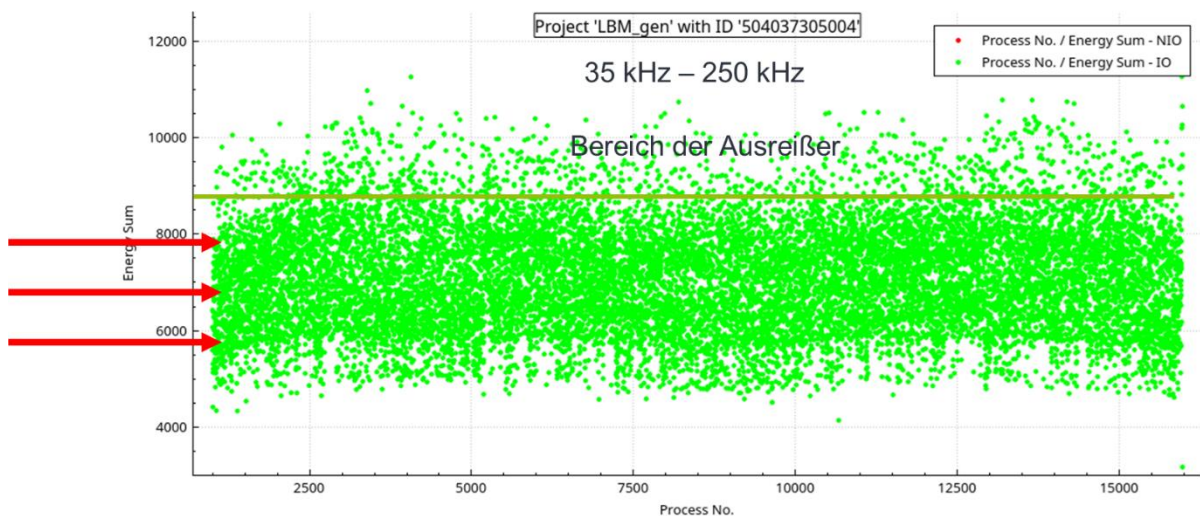


Abb. 2: Selektierter Bereich des Frequenzgangs zwischen 35 kHz bis 250 kHz. Der Frequenzgang lässt sich den jeweiligen Prozessgeräuschen, die aus der Fertigung (Aufschmelzen von Metallpulver) zuordnen. Insgesamt existiert eine homogene dichte Verteilung der jeweiligen Lagen. Es können Ausreißer dieser Verteilung mit erhöhtem Intensitätsprofil ermittelt werden. Insgesamt können bis 1.300 Ausreißer mit erhöhter Intensität ermittelt werden. Die Verteilung der Ausreißer ist zufällig über den gesamten Druckjob,

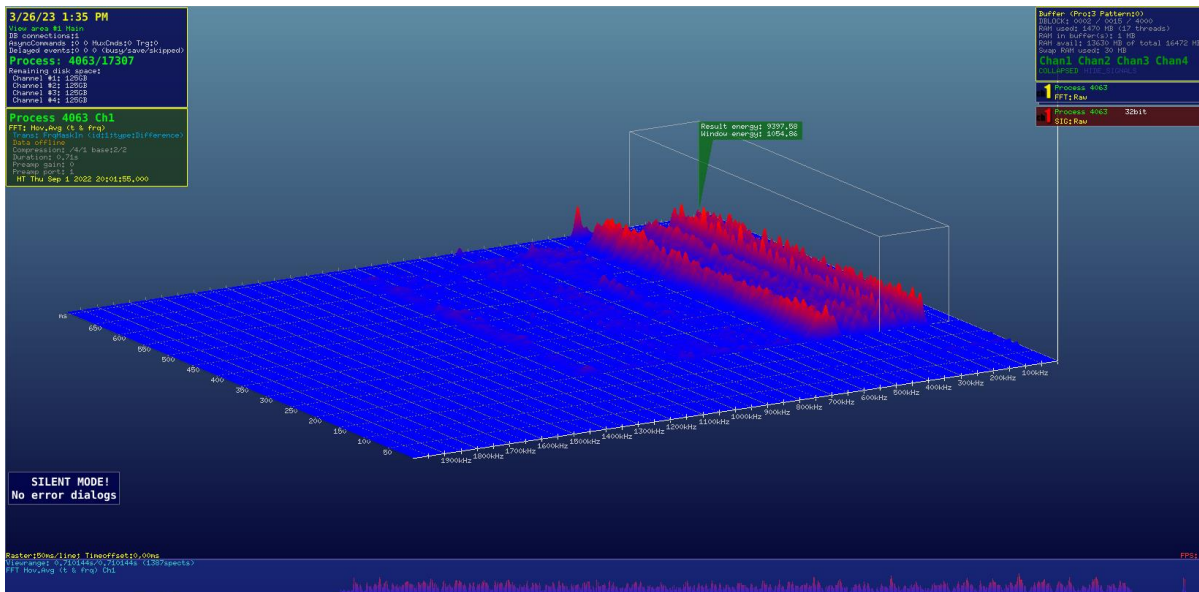


Abb. 3: Spektraldatendiagramm einer Körperschallabtafung für eine Würfellage. Die resultierende Intensität beträgt 9300 Einheiten einer Hilfsgröße, die eine Amplitudensumme der Signale innerhalb des dargestellten Rahmens durchführt. Die Lage befindet sich im oberen Drittel der Intensitätsverteilung.

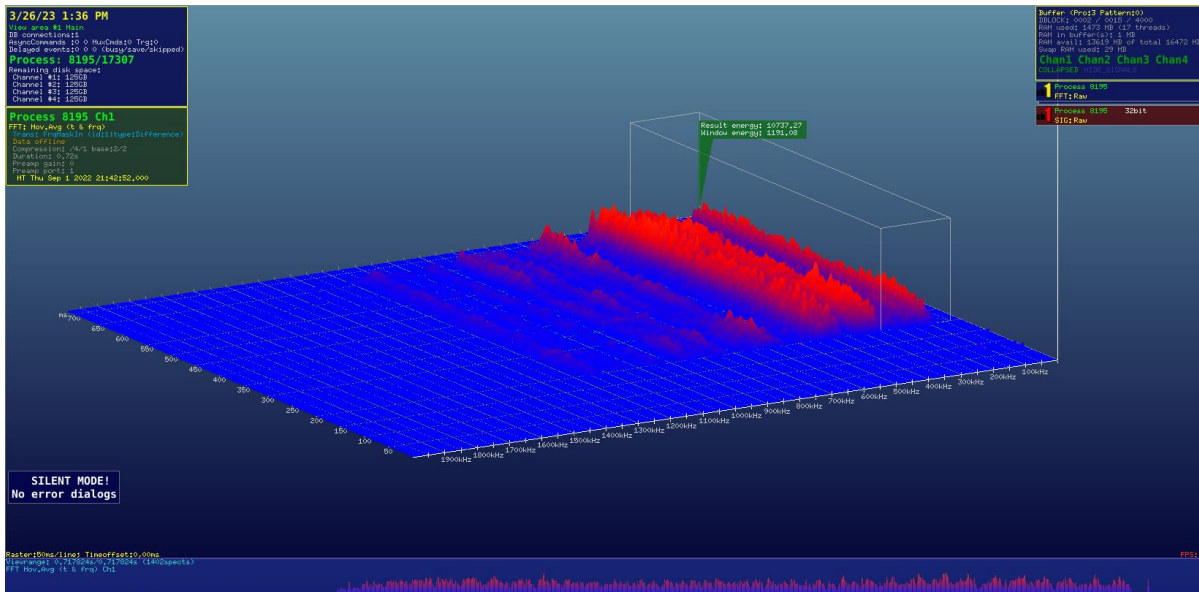


Abb. 4 Spektraldatendiagramm einer Körperschallabtafung für eine Würfellage als Beispiel eines Ausreißers. Die resultierende Intensität beträgt 10.800 Einheiten. Die erhöhte Intensität zeigt deutliche Veränderungen in den Prozesssignalen. Durch das zufällige Auftreten können wiederkehrende Ereignisse ausgeschlossen werden.

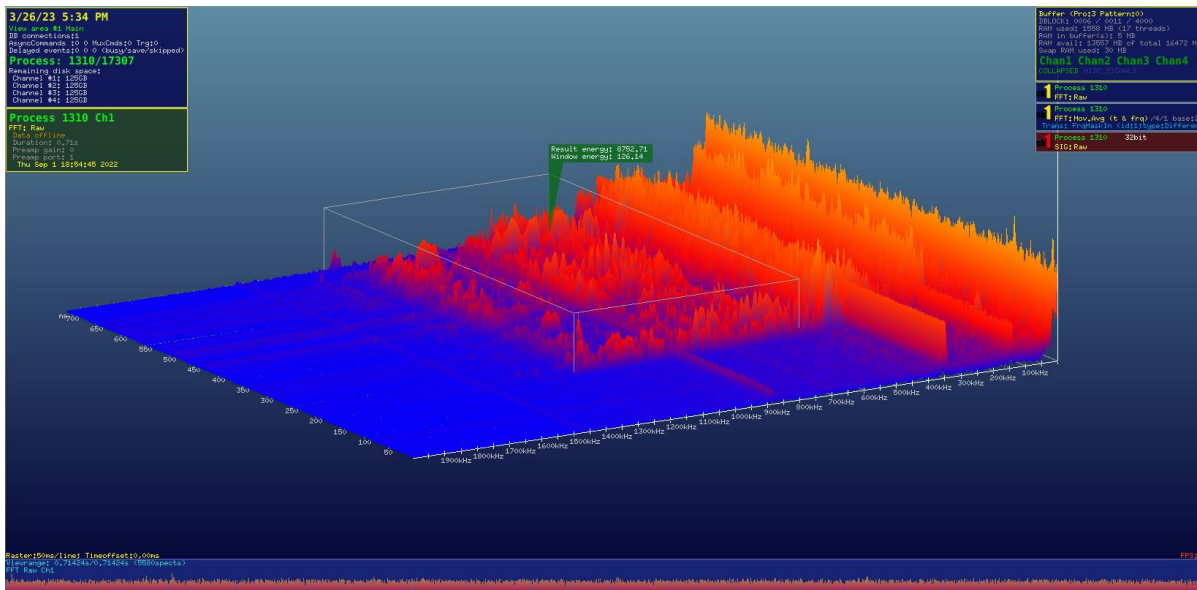


Abb. 7: Spektraldatendiagramm einer Körperschallanalyse im Frequenzband zwischen 500 kHz – 1200 kHz. Der Prozessabschnitt zeigt ein Beispiel eines Ausreißers mit erhöhter Signalintensität. Die ermittelte Intensität beträgt 8700. Aus dem Signal treten Impulse hervor, die auf kurze heftige Ereignisse zurückführen lassen. Zu beobachten sind solche Impulse bei u.a. Rissen, Verbrennungen z.B. Öl oder mechanischen Stößen.

Pulververdüsung

Das Messverfahren zur Körperschallmessung wurde an einer Pulververdüngungsanlage der Firma Rosswag installiert. Die Sensoren wurden am Verdüsungskammerfenster der Verdüngungsanlage installiert. Neben der Körperschallmessung wurde auch die Luftschallmessung mittels Lasermikrofon installiert. Die Wahl des Verdüsungskammerfensters wurde aufgrund der Spezifikation des Prozesses gewählt, da erwartet wurde, dass sich das Glas wie ein eine Lautsprecherkalotte verhält, um den Prozess zu charakterisieren. Eine Installation der Sensoren innerhalb der Kammer musste wegen der entstehenden Metallstäube und Temperatur verworfen werden. Dazu wurden mehrere Verdüngungsprozesse aufgezeichnet, die unter unterschiedlichen Parametereinstellungen stattgefunden haben. Hierbei sei bereits auf die Darstellung der Partner wbk, Indutherm und Rosswag verwiesen.



Abb. 8: Abbildung der Schmelzkammer und oberer Bereich der Verdüsungskammer (links). Am Prozessbetrachtungsfenster der Verdüsungskammer sind die Messsensoren appliziert. Rechts die Darstellung einer kompletten Verdüngungsanlage.

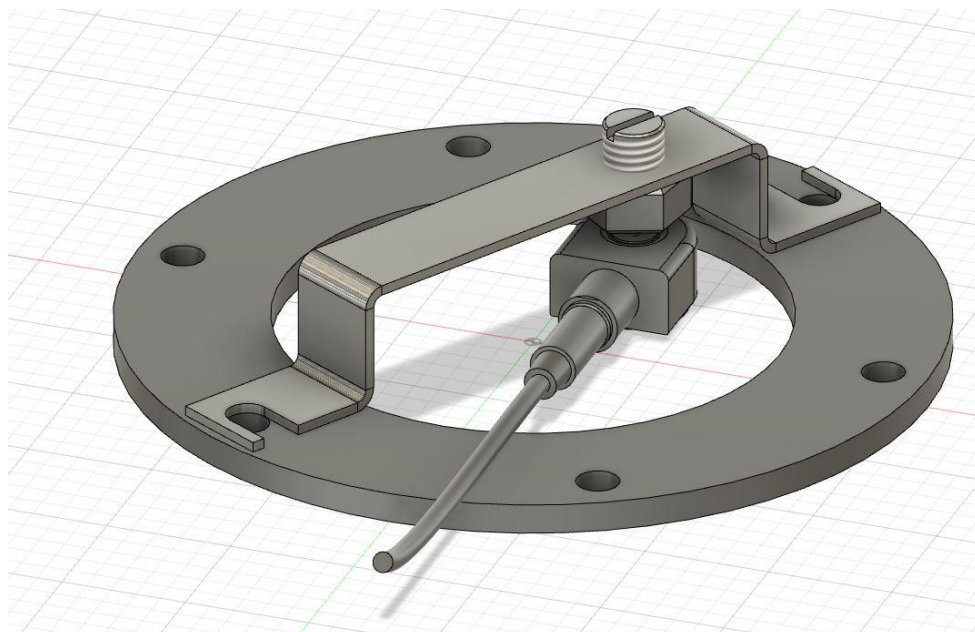


Abb. 9: Illustration eines Bügels für die Verschraubung des Prozessbetrachtungsfensters. Der Körperschallsensor wird mit Hilfe einer Madenschraube an das Glas gedrückt.

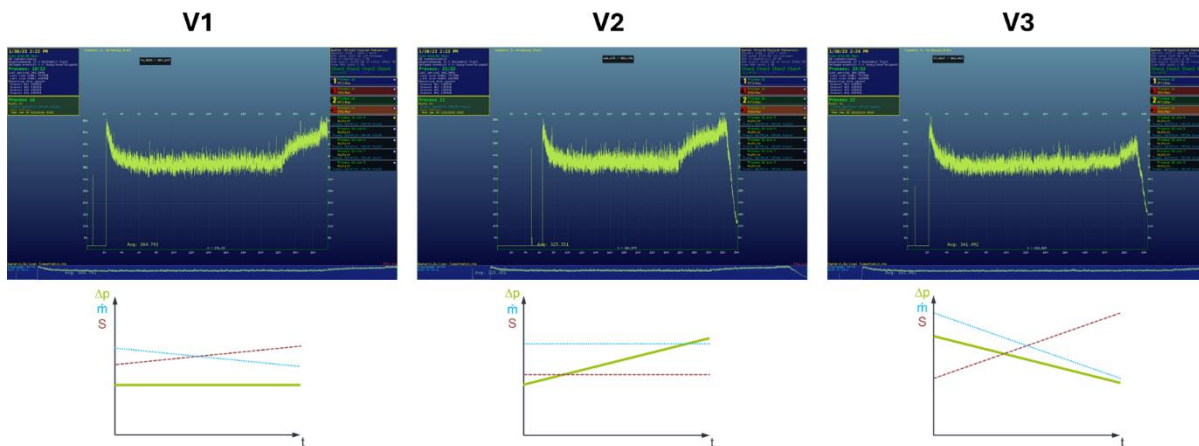


Abb. 10: In den dargestellten Versuchen (V1 – V3) wurden Schmelzmassenstrom und Druckverteilung variiert. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Körperschallanalyse als Condition Monitoring für den Verdüsungprozess eignet.

Nutzung von Laserabstandsscannern als Prozessmikroskop

Im Projekt kam vielfach die Frage nach einer Charakterisierung der Oberfläche und Vermessung der Bauteile hinsichtlich Maßabweichung von im SLM-Verfahren erzeugten Bauteilen auf. Hierbei eignen sich vorwiegend optische Systeme, deren Angebotspreise > 100.000 Euro liegen. Eine preiswerte Alternative hat QASS dazu in der Verwendung von Laserabstandssensoren gefunden. Ein Punkt- oder Linienlaser tastet dazu die Oberfläche eines Bauteils punktwise ab und bestimmt den Abstand der punktwisen Abtastung pro Einzelpunkt. Werden die Werte invertiert, kann eine bildliche Darstellung dieser Abstände erfolgen und als Prozessmikroskop genutzt werden. Dabei lassen sich Abstandsaufösungen pro Laserpunkt von bis zu 5 μm realisieren.



Abb. 11: Gezeigt werden hier drei WIG geschweißte Nähte zweier überlappender Bleche. Die Intensität wurde inmitten der Schweißung gesteigert, so dass Durchbrand (z.B. Loch in der mittleren Schweißnaht) bzw. zu Schweißraupenerhöhungen entstand. Die Schweißnähte wurden exemplarisch mit dem vorgestellten Laserabtastungsverfahren vermessen.

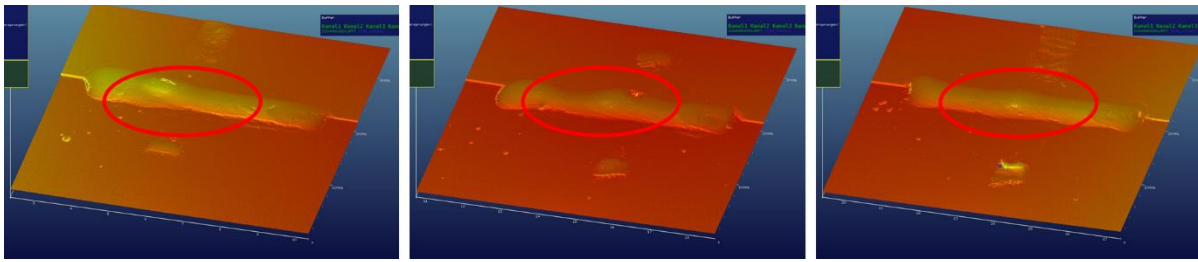


Abb. 12: Prozessbilder der obigen Schweißnähte dargestellt im Spektraldatendiagramm. Die Abstandswerte der Lasermessung werden invertiert dargestellt. Damit entsteht eine Abbildung der Schweißnähte. Die hiermit ermittelten Bilddaten können mit Methoden des maschinellen Lernens automatisiert ausgewertet werden.

Übertragung zur Charakterisierung auf einen Laseraufschweißprozess

Die im Projekt ermittelten Teil-Ergebnisse konnten im Rahmen einer Anfrage durch Dritte aus der Wirtschaft bestätigt werden. Die Integration der Messtechnik fand in einer Entwicklungsumgebung einer pulverbasierten Laseraufschweißanlage statt. Hierbei handelt es sich um ein verwandtes Verfahren zum SLM-Prozess, wobei das Pulver per Düse direkt in den Strahlengang des Lasers gebracht wird. Innerhalb des Versuchs wurden diverse Parameter verändert, um die Eignung der Messtechnik für eine qualitative Prozessüberwachung zu bestimmen. Der Sensor befindet sich ähnlich wie beim SLM-Verfahren an der Substratplatte. Es konnten neben parametereinstellungsbedingten Signalen auch Delaminationen, Risse oder Abplatzungen detektiert werden.

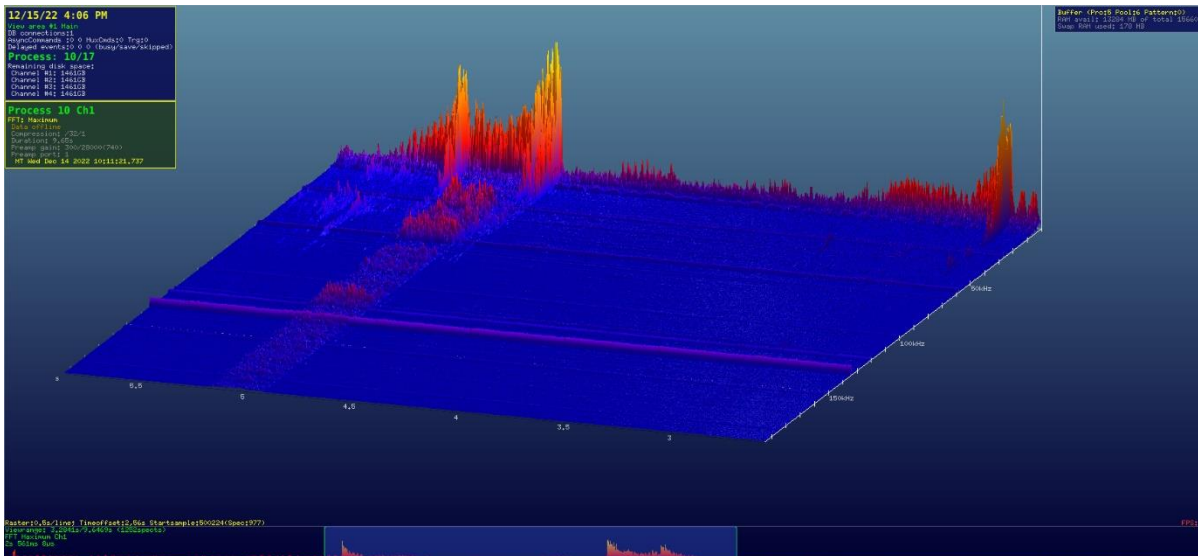


Abb.13: Spektraldatendiagramm einer Körperschallmessung für den Auftrag einer Lage. Die Laserleistung beträgt 1,0 kW.

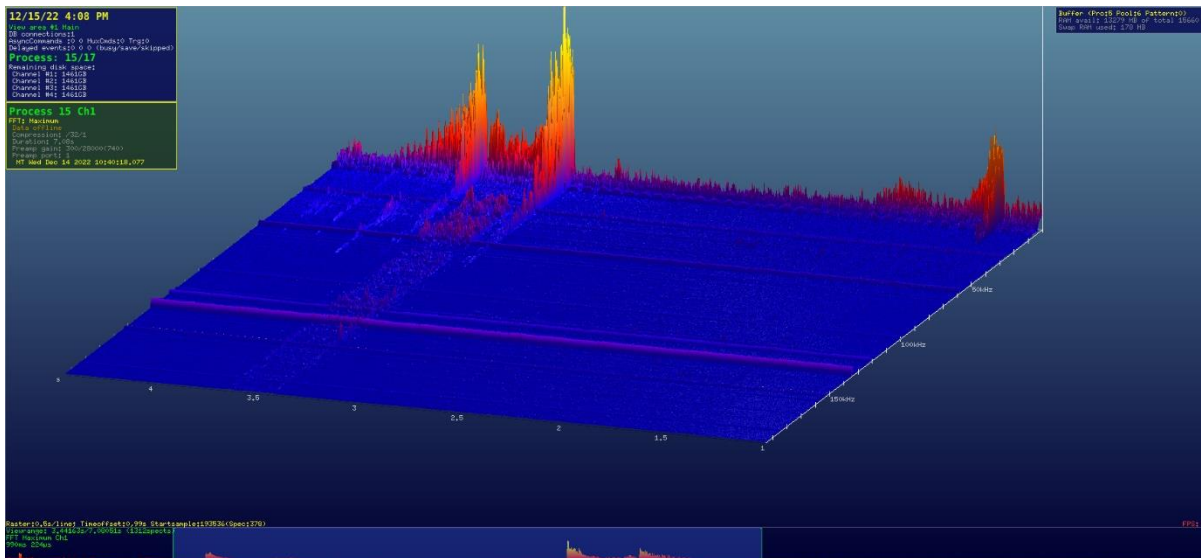


Abb.14: Spektraldatendiagramm einer Körperschallmessung für den Auftrag einer Lage. Die Laserleistung beträgt 0,5 kW. Im Gegensatz zur Abbildung ist die Schallintensität wesentlich vermindert.

Danksagung

QASS bedankt sich beim Zuwendungsgeber Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung und beim Projektträger VDI für die ausgezeichnete Beratung und sehr gute Zusammenarbeit im Projekt.

Das Projekt hat im Wesentlichen dazu beigetragen, für QASS eine Transformation in den Bereichen Sensorfusion, Condition Monitoring für bestimmte Schweißprozesse und moderner Maschinenschnittstellenkommunikation zu erreichen.