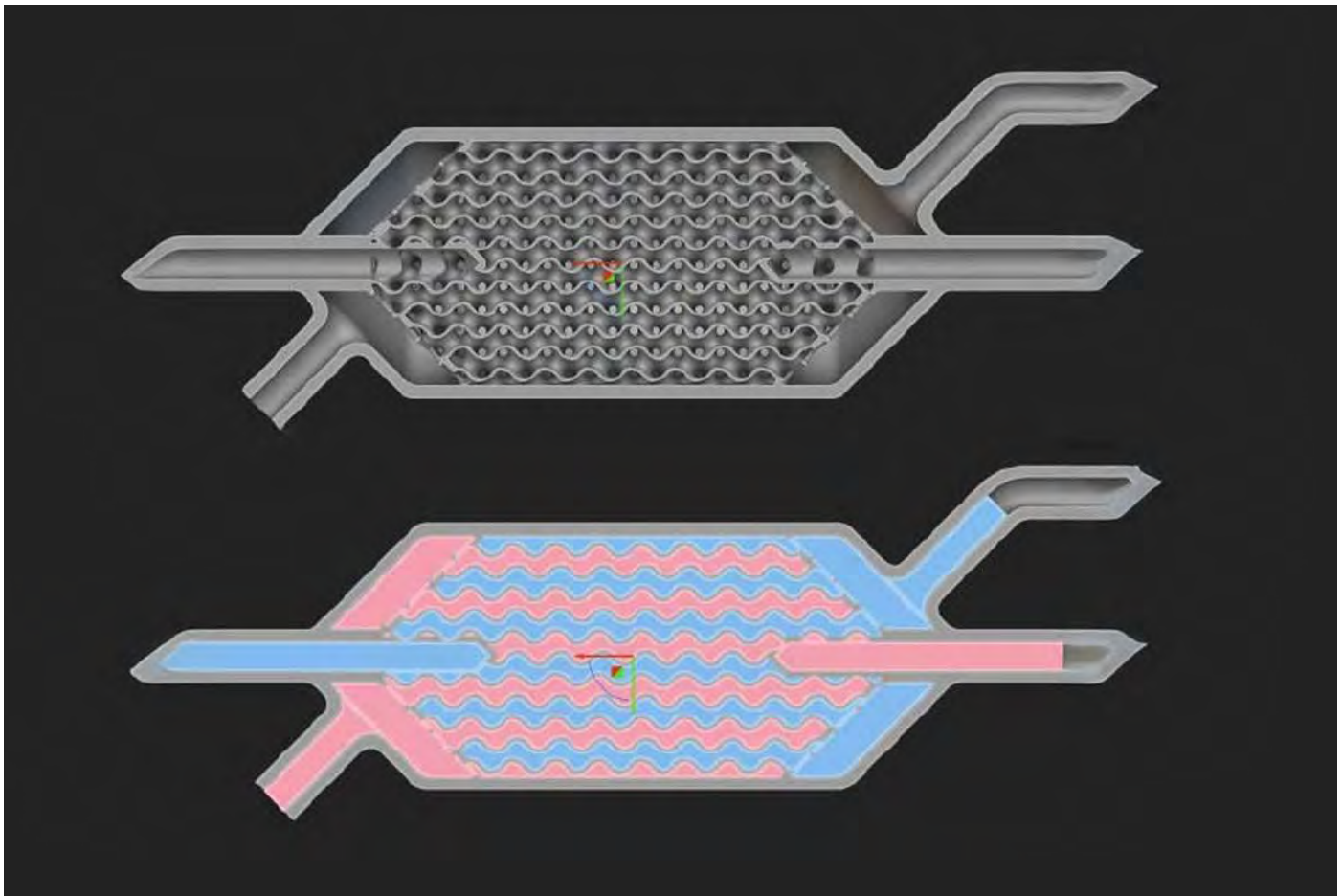




SELEKTIVE CHEMISCHE AUFLÖSUNGSSTRATEGIEN ZUR ENTFERNUNG VON PULVERRÜCKSTÄNDEN IN KOMPLEXEN, ADDITIV GEFERTIGTEN METALLKANÄLEN

Joshua R. Boykin, Patrick McFadden und Agustin Diaz

Abstrakt: Das Problem von Pulverresten oder -verkrustungen in den inneren Kanälen beeinträchtigt die Funktionalität und Anwendbarkeit additiv gefertigter Metallbauteile. Wir präsentieren eine umfassende Lösung, die selektive chemische Auflösung zur Pulverentfernung und Verstopfungs-beseitigung kombiniert. Bei diesem chemischen Durchflussverfahren wird eine selbstlimitierende Reaktion genutzt, um nicht verschmolzenes Pulver selektiv aufzulösen, ohne das feste, verschmolzene Material zu beeinträchtigen. Dadurch wird im Gegensatz zum chemischen Fräsen ein Materialverlust in den dünnen Wänden und Kanälen verhindert. Wir demonstrieren die Wirksamkeit der Methode an Bauteilen aus verschiedenen Legierungen, darunter AlSi10Mg, Al F357, Al CP1 und IN-718, und erreichen eine vollständige Pulverentfernung sowie eine deutliche Verbesserung der inneren Oberflächenqualität, was für Hochleistungsanwendungen wie Wärmetauscher von entscheidender Bedeutung ist.

Diskussion: Die additive Fertigung (AM) auf Metallbasis ermöglicht die Herstellung von Freiformen und erlaubt es Konstrukteuren, Bauteile mit geometrischer Komplexität herzustellen, die weit über die Grenzen herkömmlicher subtraktiver oder formgebender Verfahren hinausgehen. Zu den vielversprechendsten Anwendungen dieser Technologie zählen Hochleistungs-Wärmetauscher (HXs), die stark von der Fähigkeit der

additiven Fertigung profitieren, komplexe interne Architekturen für eine effiziente Wärmeübertragung und ein leichtes Design zu schaffen (Abbildung 1). Traditionell war die Herstellung solcher Komponenten aufgrund der komplexen Kerngeometrien, die mehrere kostspielige und zeitaufwändige Montageschritte wie Zerspanung, Schweißen und Löten erfordern, um eine komplexe und komplizierte Struktur zu schaffen, die für eine effiziente Wärmeübertragung notwendig ist, eine große Herausforderung. Diese Prozesse erhöhen nicht nur die Herstellungskosten und die Lieferzeiten, sondern führen auch zu potenziellen Fehlerstellen, wie z. B. Schweißnähten und -verbindungen, die die mechanische Integrität und die thermische Leistung beeinträchtigen können. Im Gegensatz dazu ermöglicht AM die Herstellung hochkomplexer HXs in einem einzigen Fertigungsschritt, wodurch viele dieser Montagevorgänge durch die Konsolidierung von Teilen entfallen. Diese Fähigkeit verbessert nicht nur die strukturelle Zuverlässigkeit und die thermische Effizienz, sondern eröffnet auch neue Gestaltungsmöglichkeiten für kompakte, leistungsstarke Systeme in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Energie und Antrieb.

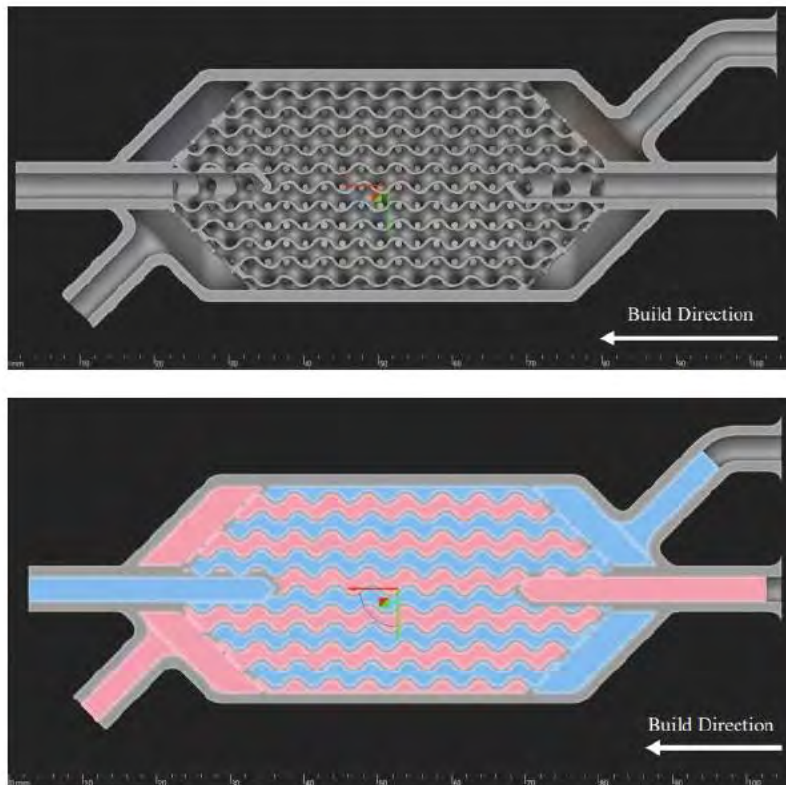


Abbildung 1: CAD-Modell eines Wärmetauschers mit einer komplexen TPMS-Struktur, das die geometrischen Eigenschaften des PBF-LB/m mit zwei Kreisläufen, einem rosa und einem blauen, veranschaulicht.

Trotz dieser Vorteile ist die Produktion von AM-Wärmetauschern nach wie vor durch mehrere prozessbedingte Einschränkungen begrenzt. Eine der größten Herausforderungen ist die Entfernung des Pulvers aus den komplexen inneren Kanälen, die bei Pulverbettfusionsverfahren (PBF) auftreten. Während der Fertigung kann sich Pulver in engen oder gewundenen Strömungskälen ansammeln, insbesondere in Mikrokanälen und Gitterbereichen, die für eine verbesserte Wärmeübertragung ausgelegt sind (Abbildung 2). Eine vollständige Pulverentfernung kann äußerst schwierig oder sogar unmöglich sein, wenn die Kanäle Durchmesser aufweisen, die unter bestimmte Schwellenwerte fallen, oder scharfe Krümmungen, Sackgassen oder ungestützte Überhänge enthalten. Pulverreste behindern nicht nur den Flüssigkeitsfluss, sondern können auch zu erheblichen Leistungseinbußen führen, darunter verringerte thermische Effizienz, erhöhte Druckverluste und potenzielle Kontamination oder Korrosion während des Betriebs. In schweren Fällen führt die Unfähigkeit, eingeschlossenes Pulver vollständig zu entfernen, dazu, dass ansonsten gut gefertigte Bauteile unbrauchbar werden. Daher müssen Designstrategien, die Optimierung der Prozessparameter und Nachbearbeitungsansätze sorgfältig aufeinander abgestimmt werden, um die Pulveransammlung zu minimieren und gleichzeitig die funktionale und strukturelle Integrität des Wärmetauschers zu gewährleisten.

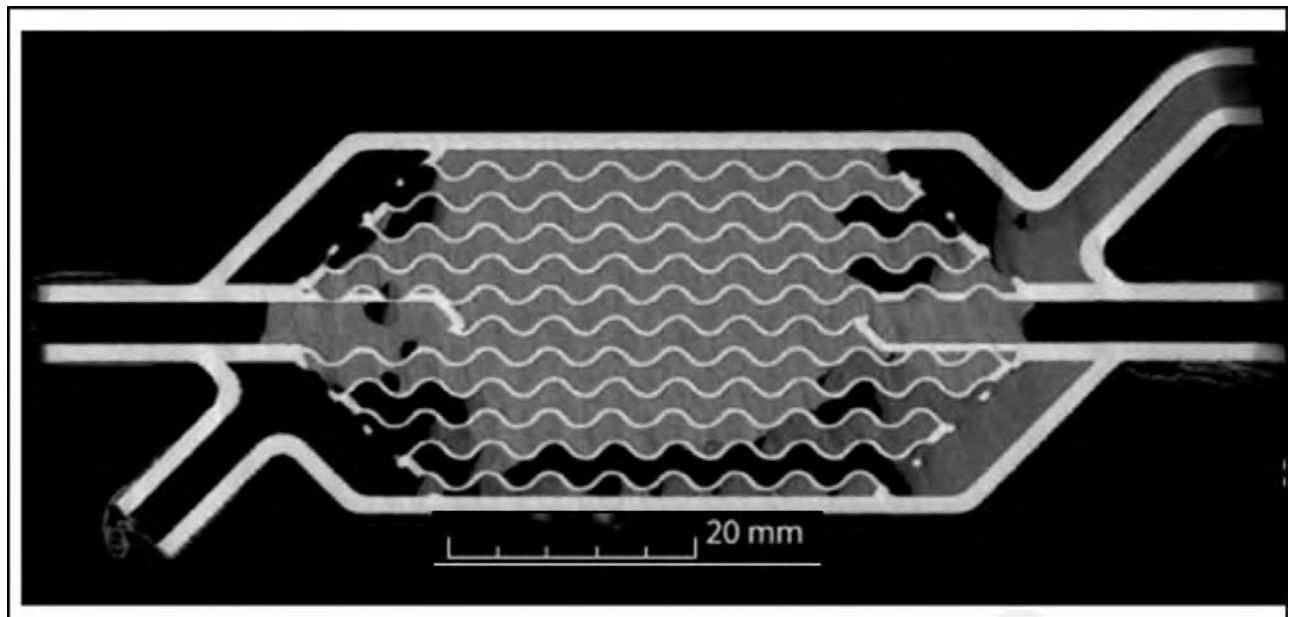


Abbildung 2: Röntgen-CT-Scan-Querschnitt des PBF-LB/Al F357 HX, der eingeschlossenes Pulver zeigt.

Um diese Herausforderungen bei der Pulverentfernung zu bewältigen, hat REM Surface Engineering einen innovativen Nachbearbeitungsansatz auf Basis selektiver chemischer Auflösung entwickelt. Dieses Verfahren nutzt proprietäre chemische Formulierungen, die so konzipiert sind, dass sie nicht verschmolzene oder lose gesinterte Pulverrückstände in komplexen inneren Kanälen selektiv auflösen, während das konsolidierte, vollständig verschmolzene Material unberührt bleibt. Der grundlegende Mechanismus, der diesem Ansatz zugrunde liegt, baut auf der langjährigen Expertise von REM im Bereich selbstlimitierender Oberflächenreaktionen auf. Dieses Prinzip ermöglicht einen präzisen und gleichmäßigen Materialabtrag, ohne die Maßgenauigkeit oder die Oberflächenintegrität zu beeinträchtigen. Durch sorgfältige Steuerung der Reaktionskinetik und der Lösungsschemie unterscheidet das Verfahren effektiv zwischen den reaktionsfreudigeren Oberflächenoxiden des eingeschlossenen Pulvers und dem stabilen Massensubstrat und erzielt so eine gezielte Auflösung in Bereichen, die mit mechanischen oder fluidischen Reinigungsmethoden nicht zugänglich sind. Diese Fähigkeit bietet eine transformative Lösung für additiv gefertigte Wärmetauscher und andere komplexe Komponenten mit innenliegenden Kanälen. Sie verbessert die Pulverfreigabe erheblich, gewährleistet konsistente Strömungseigenschaften und ermöglicht den zuverlässigen Einsatz von AM-Konstruktionen, die zuvor aufgrund der Gefahr innerer Verstopfungen nicht praktikabel waren.

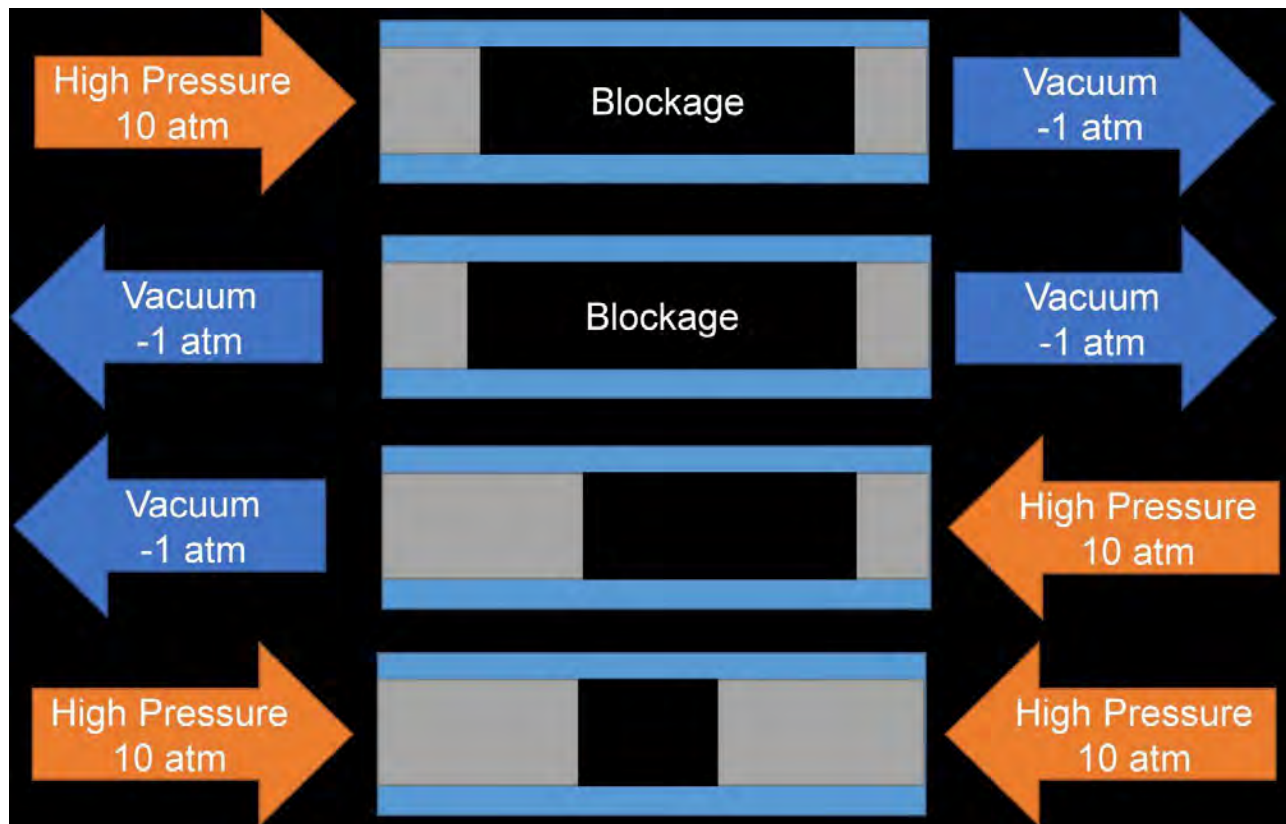


Abbildung 3: Der Prozessablauf muss abgewechselt werden, um das gesamte Pulver in den inneren Hohlräumen zu erreichen.

Das REM-Pulver-Entstopfungssystem wurde entwickelt, um die selektiven chemischen Formulierungen effektiv tief in die inneren Hohlräume additiv gefertigter Komponenten einzubringen. Das System funktioniert, indem die Chemikalien unter Druck in das innere Netzwerk des Bauteils geleitet werden, während gleichzeitig am gegenüberliegenden Ende ein Vakuum erzeugt wird. Dadurch entsteht ein dynamischer Strömungsweg, der die Lösung durch ansonsten stagnierende oder verstopfte Bereiche treibt. Bei diesem Verfahren wird eine kontrollierte Abfolge von abwechselnden Druck- und Vakuumzyklen eingesetzt, wodurch das Eindringen der Flüssigkeit verbessert und das eingeschlossene Pulver allmählich aufgelöst und entfernt wird (Abbildung 3). Neben dem mechanischen Einwirken auf die Flüssigkeit spielt die Kapillarkraft eine entscheidende ergänzende Rolle: Sobald die chemische Lösung mit den Pulveragglomeraten oder verkrusteten Bereichen in Kontakt kommt, ziehen Kapillarkräfte die Flüssigkeit schnell in die feinen Zwischenräume des Pulverkuchens. Dieser beschleunigte Benetzungsmechanismus ermöglicht es der reaktiven Chemie, effizient mit der Pulveroberfläche in Kontakt zu treten und so eine gleichmäßige Auflösung auch in komplexen, gewundenen Kanälen zu gewährleisten. Die Kombination aus chemischer Selektivität, kontrollierter Strömungsdynamik und kapillarbetriebenen Transport ermöglicht es dem REM-Verfahren, eine gründliche Pulverentfernung in Geometrien zu erreichen, die mit herkömmlichen Reinigungs- oder mechanischen Entfernungstechniken nicht zugänglich sind.

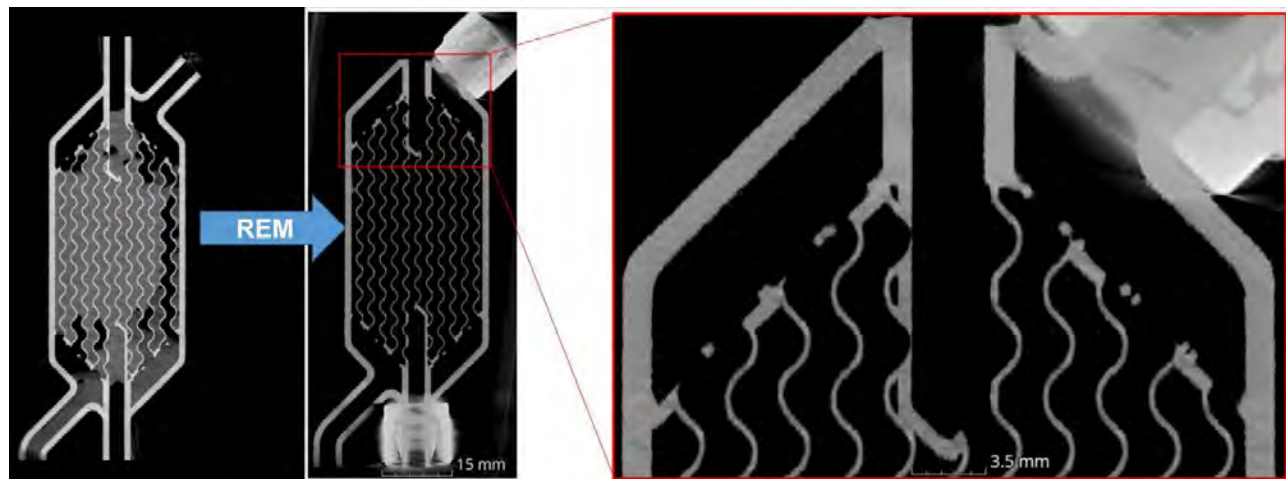


Abbildung 4: PBF-LB/Al F3257 TPMS HX vor und nach dem REM-Entpulverungsprozess, der die vollständige Pulverentfernung und die Erhaltung der Wandstärke zeigt.

Die Wirksamkeit des selektiven chemischen Auflösungsprozesses wurde an einem PBF-LB/Al F357-Wärmetauscher mit dreifach periodischer Minimalfläche (TPMS) demonstriert, einer Geometrie, die für ihre äußerst komplexen inneren Kanäle bekannt ist. Das REM-Entstopfungssystem hat erfolgreich alle Rückstände und eingeschlossene Pulver aus dem inneren Netzwerk entfernt und so offene und durchgehende Strömungswege in der gesamten Komponente wiederhergestellt. Dies umfasste die Beseitigung von tiefsitzenden Pulververstopfungen sowie die Entfernung von lose anhaftenden oder teilweise gesinterten Pulverpartikeln, die an den Kanaloberflächen haften geblieben waren. Nachbearbeitungsbewertungen bestätigten die vollständige Entfernung von Pulverrückständen und eine saubere Innenoberfläche, was darauf hindeutet, dass die Chemie effektiv auf ungeschmolzenes Material abzielte, ohne Metall aus dem konsolidierten Substrat zu entfernen (Abbildung 4). Die vor und nach der Behandlung durchgeführten Maßprüfungen und Wandsdickenmessungen ergaben keine statistisch signifikanten Abweichungen, was die zerstörungsfreie und selbstlimitierende Natur des Verfahrens bestätigt. Darüber hinaus zeigte das Verfahren eine robuste Leistung über alle TPMS-Architekturen mit Porengrößen von nur 2 mm hinweg und erzielte eine vollständige Pulverentleerung und klare Strömungskontinuität, was seine Skalierbarkeit und Wirksamkeit selbst für die anspruchsvollsten AM-Wärmetauscherkonstruktionen unterstreicht.

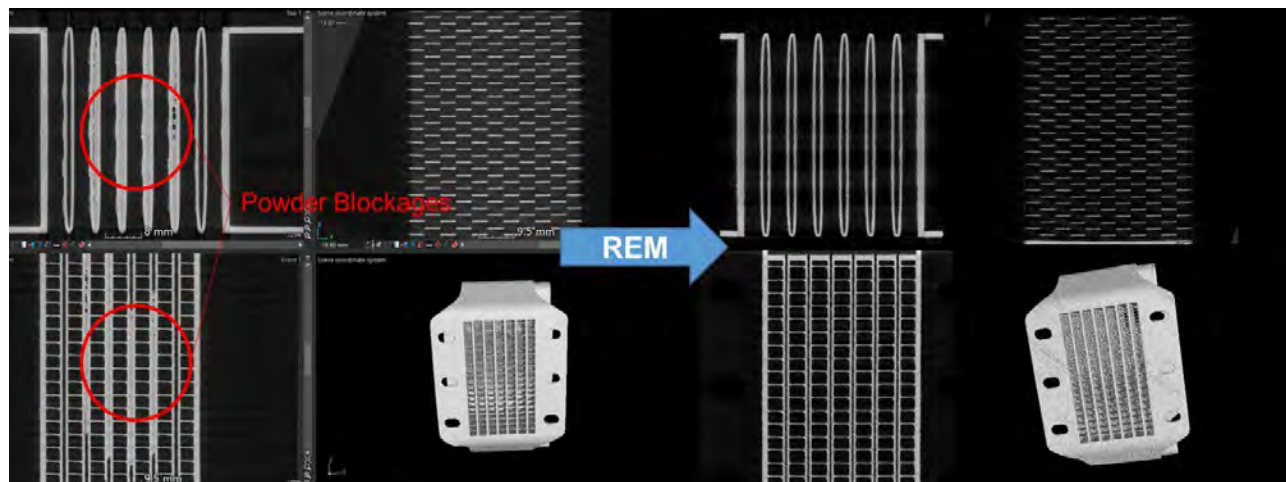


Abbildung 5: PBF-LB/AlSi10Mg HX vor und nach dem REM-Entpulverungsprozess, der die vollständige Pulverentfernung und den Erhalt der Wandstärke zeigt.

Eine zweite Fallstudie wurde an einem PBF-LB/AlSi10Mg-Wärmetauscher durchgeführt, der im Vergleich zum TPMS-Design über eine traditionellere Mehrkanal-Kernarchitektur mit höherer Kanaldichte und reduzierten Durchmessern der einzelnen Kanäle verfügt (Abbildung 5). Diese Konfiguration stellte eine größere Herausforderung hinsichtlich der Pulverentfernung dar, da in den zentralen Bereichen des Kerns, die mit

herkömmlichen Reinigungsmethoden nur sehr eingeschränkt zugänglich waren, erhebliche Verstopfungen zu beobachten waren. Frühere Versuche mit mechanischen Vibrationen, Ultraschallbewegung und Spülverfahren erwiesen sich als unwirksam, um das eingeschlossene Pulver zu entfernen, was die Grenzen der Standard-Nachbearbeitungsmethoden für dichte, intern komplexe AM-Teile verdeutlichte. Anschließend wurde die Komponente etwa 30 Minuten lang mit dem Entstopfungssystem von REM behandelt, wobei abwechselnd Druck und Vakuum angewendet wurden, um die selektive chemische Lösung durch die inneren Kanäle zu leiten. Die Nachbearbeitung der Röntgen-CT-Scans bestätigte die vollständige Entfernung des Pulvers, selbst in den engsten Bereichen, ohne Anzeichen einer Wandbeschädigung oder struktureller Beeinträchtigung. Darüber hinaus zeigte die Maßprüfung eine hervorragende geometrische Genauigkeit, was erneut bestätigt, dass das selektive chemische Auflösungsverfahren eine gründliche Innenreinigung ermöglicht und gleichzeitig die Konstruktionsabsicht und die mechanische Integrität des Teils vollständig bewahrt.

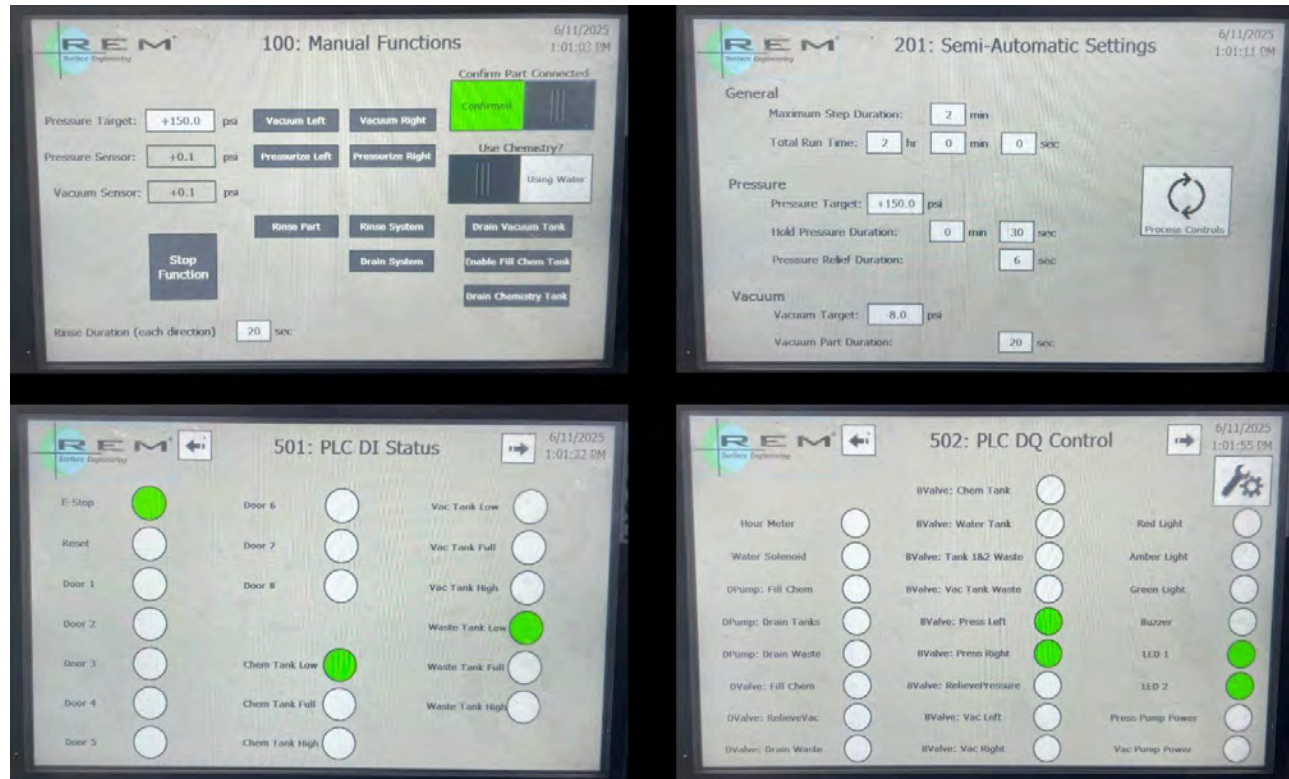


Abbildung 6: Das automatische Entstopfungssystem von REM mit automatischem Bedienfeld.

Schlussfolgerung: Diese Fallstudien belegen die Robustheit, Vielseitigkeit und zerstörungsfreie Natur des selektiven chemischen Auflösungsprozesses von REM bei verschiedenen Legierungen, Geometrien und Kanalarchitekturen. Die Fähigkeit, eingeschlossenes Pulver sowohl aus komplexen TPMS-Kernen als auch aus dicht gepackten Mehrkanal-Konfigurationen vollständig zu entfernen, unterstreicht die Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Methode an reale AM-Herausforderungen. Durch die Kombination chemisch selektiver Auflösung mit einem kontrollierten Druck-Vakuum-Fördersystem bietet der Ansatz von REM eine wiederholbare, produktionsreife Lösung, die eine vollständige Innenreinigung gewährleistet, ohne die strukturelle Genauigkeit zu beeinträchtigen. Diese Fähigkeit ermöglicht nicht nur die Realisierung von additiv gefertigten Hochleistungswärmetauschern der nächsten Generation, sondern erstreckt sich auch auf eine Vielzahl von AM-Komponenten mit komplexen inneren Strömungswegen, wie Verteiler, Brennkammern und Kühlkanäle. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Integration des automatisierten Entstopfungssystems von REM (Abbildung 6) in den AM-Workflow einen entscheidenden Fortschritt in Richtung Fertigungsreife darstellt und die volle Gestaltungsfreiheit und das Leistungspotenzial der additiven Fertigung mit Metallen für die Luft- und Raumfahrt, die Verteidigungsindustrie und Hochleistungs-Energiesysteme erschließt.