

Charakterisierung und Anwendung von additiv gefertigten Metallkomponenten in der Gasmesstechnik

Michael Stopp¹, Oliver Maurer², Dirk Bähre², Christian Bur¹

¹*Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, 66123 Saarbrücken, Deutschland*

²*Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität des Saarlandes, 66123 Saarbrücken, Deutschland*

+49(0)681-302-3904, (m.stopp), (c.bur) @lmt.uni-saarland.de

oliver.maurer@uni-saarland.de, lft@mx.uni-saarland.de

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden Metallkomponenten additiv mittels Laser-Powder-Bed-Fusion (L-PBF) Verfahren gefertigt und auf Eignung als funktionelle Komponenten in der Gasmesstechnik untersucht. Als untersuchte Materialien wurden eine Aluminium- und eine Edelstahllegierung verwendet. Wasserstoff zur Prüfung auf Gasdichtheit und Propofol (2,6-Diisopropylphenol) zur Untersuchung von Verschleppungseffekten wurden mit einer Gasmischanlage beaufschlagt und Metalloxid Halbleitergassensoren wurden als Detektor benutzt. Die additivgefertigten Komponenten wurden mit etablierten Werkstoffen (Metalle und Kunststoffe), in der Gasführungstechnik verglichen, welche als Normbauteile verfügbar sind. Bei beiden Versuchsreihen zeigten sich die gefertigten Testkörper sowohl als gasdicht als auch als unkritisch hinsichtlich der Verschleppung von chemischen Stoffen. von der Nutzbarkeit der Technologie, um mit kurzer Vorlaufzeit, hoher Gestaltungsfreiheit und geringem Nachbearbeitungsbedarf, metallische Komponenten für speziell maßgeschneiderte Messaufgaben herzustellen.

Keywords: Gassensorik, Additive Fertigung, MOS-Sensoren, Mobile Messsysteme, Medizintechnik

Motivation und Einleitung

Neben der eigentlichen Sensorik, Elektronik und Signalverarbeitung ist in der Gasmesstechnik auch die Gasführung der Misch- und Messstrecke zum Sensor ein wichtiger Teil des Gesamtsystems, welcher das Messergebnis beeinflusst und Raum zur Optimierung aufzeigt [1].

Hier bietet die Fertigungstechnologie des Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF) eine vielversprechende Möglichkeit, Komponenten für die gasführenden Teile eines Messsystems zu generieren. Es bietet die geometrischen Freiheiten, wie sie vom klassischen 3D-Druck her bekannt sind und gleichzeitig können chemisch inerte und beständige Materialien, wie Edelstähle, verarbeitet werden.

Klassische additive Fertigungsverfahren (oft als „3D-Druck“ bezeichnet) nutzen hauptsächlich Polymere als Werkstoff, Nachteilig ist hier insb. die Offenporigkeit und die damit mangelnde Gasdichtheit. Weiterhin kritisch sind Ausgasungen von organischen Verbindungen, die damit die Gaszusammensetzung ändern und das Messergebnis verfälschen [2].

Durch die Herstellungsweise des schichtweisen aufschmelzen aus dem Pulverbett in Argon-Atmosphäre, (Abb. 1) haben die Oberflächen jedoch immer eine deutlich raue Oberfläche,

vergleichbar mit Metallguss. In innenliegenden Kanalstrukturen nur mit aufwändigen Verfahren, wie Gleitfließlappen, bearbeiten lassen. Weiterhin ist durch Laserstrahldurchmesser und Korngröße des verwendeten Metallpulvers die Auflösung der fertigen Strukturen nach unten begrenzt. Damit ergibt sich eine minimal fertigbare Geometrie und, insbesondere für die Gasmesstechnik wichtig, eine minimale Wandungsstärke gasführender Kanäle. Hier muss sichergestellt sein, dass sich keine Porenstrukturen in den Wandbereichen bilden, welche zu einer Gasundichtigkeit des Bauteils führen.

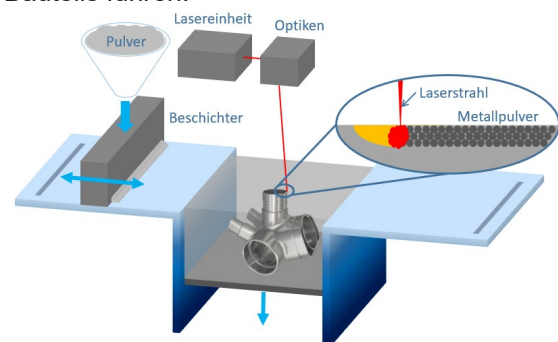


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung des L-PBF Bauprozesses, nach [3].

Ziel dieser Arbeit ist es daher, anhand von Testgeometrien, L-PBF-Bauteile auf ihre Gasdichtheit und auf mögliche Verschleppung bei stark adsorbierenden Analyten in Prüfgasgemischen hin zu untersuchen. Für schwer- und teillüchtige Substanzen besteht die Gefahr von Verschleppungseffekten durch Anhaftung an inneren Oberflächen. Durch die höhere Oberflächenrauheit - und damit größere Oberfläche - von additiv gefertigten Bauteilen wird dieser Effekt noch begünstigt. Als weitere Ziel dieser Arbeit werden daher Verschleppungseffekte mit Propofol untersucht.

Design und Fertigung der Versuchskörper

Zur Fertigung aller Testkörper und Anwendungsbauteile in diesem Projekt wurde eine L-PBF Anlage der Baureihe SLM 125 (Nikon SLM Solutions AG, Lübeck, Deutschland) verwendet, welche über ein kubisches Bauvolumen von 125 mm x 125 mm x 125 mm verfügt. Bauteile können zwar frei in diesem Volumen angeordnet werden, benötigen jedoch trotzdem zusätzliche Stützstrukturen, unter anderem zur Wärmeabfuhr, um Verformung und Rissbildung vorzubeugen [4]. Dadurch ergeben sich, trotz hoher Designfreiheit, gewisse Beschränkungen in dem Entwurf der additiv gefertigten Bauteile und ihrer Positionierung im Bauraum. Weiterhin beeinflussen das Pulver (Material und Körnung) sowie die Ausrichtung des Bauteils den Bauprozess.

Für die Teststrukturen in den Versuchsreihen wurden zwei verschiedene Materialien untersucht: eine Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) und eine Edelstahllegierung (316L; 1.4404) (beide von m4p Material Solutions GmbH, Magdeburg, Deutschland), wobei alle, nachfolgend an die Versuchsreihen gefertigten, anwendungsbezogenen Bauteile nur aus 316L gefertigt wurden.

Zum Test auf Druckfestigkeit wurde ein tonnenförmiges Probendesign entworfen (Abb. 2 links). Untersuchungen zu Verschleppungen und Memory Effekten sowie zur Diffusionsfestigkeit von dünnen Wandungen wurde mit einer Doppelkanalprobe (siehe Abb. 2 rechts und Abb. 3) durchgeführt.

Hierbei nähern sich zwei gasführende Kanäle im Bauteil auf einer definierten Strecke aneinander an und sind nur über eine definierte Wandstärke voneinander getrennt. Die Wandstärke wurde variiert (siehe Tab. 1) und soll ein Grenzwert aufzeigen, ab dem eine Gasdichtheit nicht mehr gewährleistet ist.

Diese Bauteile (Abb. 2) wurden sowohl in 316L als auch in AlSi10Mg hergestellt, minimal spanend nachbearbeitet (1/8"-Gewinde und bei Bedarf Planschliff der Dichtfläche) und gereinigt, bevor sie mit Swagelok-Anschlüssen zur

Integration in den Versuchsaufbau versehen wurden.

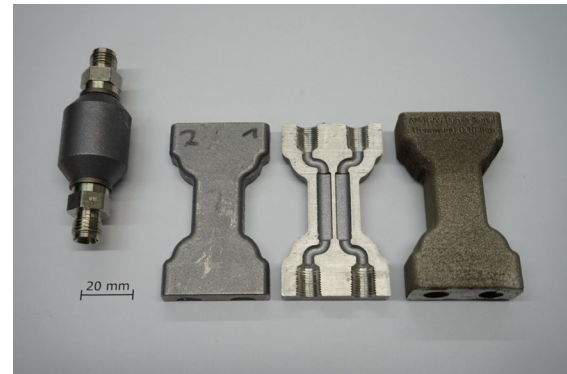


Abb. 2: Mittels L-PBF gefertigte Probengeometrien. Links: Tonnenproben, mit Swagelok-Anschlüssen. Mitte: Aufgeschnittene Doppelkanalprobe aus AlSi10Mg. Rechts: Doppelkanalprobe aus 316L.

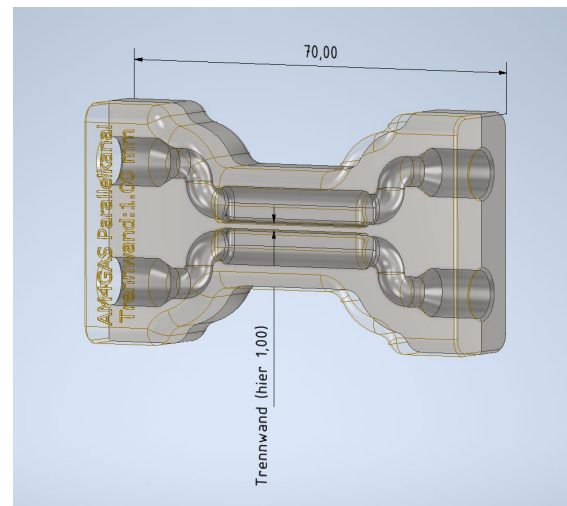


Abb. 3: CAD-Modell der Doppelkanalprobe, zur Visualisierung der Kanalgeometrie.

Tab. 1: Hergestellte Wandstärkenvariationen der Prüfkörpergeometrien.

Art der Geometrie (Material)	Wandstärke [mm]	Anzahl gefertigter Teile
Tonnenprobe (AlSi10Mg)	0,75	3
	1	3
	1,5	3
Doppelkanal (AlSi10Mg)	0,75	2
	1	2
	1,5	2
Doppelkanal (316L)	0,3	1
	0,5	1
	0,75	1

Methodik des Messaufbaus für Gasdichtheit und Verschleppung

Für die Untersuchung zur „Gasdichtheit“ und „Verschleppung“ wurden Gasmischanlagen (GMA) [5], [6] eingesetzt, die gezielt Prüfgasgemische erzeugen können.

Flüchtige Verbindungen werden üblicherweise über Prüfgasflaschen bereitgestellt, wohingegen schwerflüchtige Verbindungen wie Propofol über Permeationsröhrchen und zugehörige Permeationsofen (Dynacalibrator Model 150, VICI Metronics Inc., Twelve Trees, USA) bereitgestellt. Die relative Feuchte des Trägergasstromes wird durch die Anfeuchtung von Nullluft über Waschflaschen und das anschließende zumischen in den Hauptstrom realisiert. Der Trägergasstrom wird anschließend durch die Messstrecke mit der Doppelkanalprobe und den Sensoren und Messgeräten geleitet.

Bei den Dichtheitsversuchen wurde immer jeweils ein Kanal mit dem Prüfgas statisch beaufschlagt, während im Messkanal ein konstanter Fluss Nullluft von 500 mL/min bei 50% relativer Feuchte (r. F.) eingestellt bleibt. Das vereinfachte Schema des Messaufbaus ist in Abb. 4 oben dargestellt.

Durch die geänderten Anforderungen bei den Verschleppungsmessungen wurde eine andere GMA verwendet, welche Propofol über einen

Permeationsofen bereitstellen kann. Hierzu wird der Permeationsofen mit Nullluft durchströmt, wodurch sich eine Sättigungskonzentration abhängig von der Permeationsrate des verwendeten Permeationsröhrchens einstellt. Diese wird über Massenflussregler mit vorberechnetem Fluss in den Hauptstrom der GMA beigemischt, sodass sich die gewünschte Konzentration von 18 ppb Propofol im Prüfgas befindet. Weiterhin ist die Anordnung der Sensoren verändert, da über Sensoren vor der Probe und Sensoren nach der Probe die Rückkehr des Sensorsignals auf den Wert vor dem Gasangebot beobachtet werden soll (Abb. 4 unten).

Überprüfung der Gasdichtheit

Zum Nachweis der Gasdichtheit wird Wasserstoff mit einer Konzentration von 4 vol-% verwendet, da es aufgrund seiner kleinen Moleküle leicht durch Materialien hindurchwandern kann. Um eine Gefährdung durch Explosionsgefahr während der Versuchsreihen auszuschließen, wurde ausschließlich Wasserstoff in Sauerstoff genutzt, dessen Konzentration von 4 vol.-% H_2 unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) liegt [7]. Dieser wurde unverdünnt auf den zu prüfenden Kanal beaufschlagt.

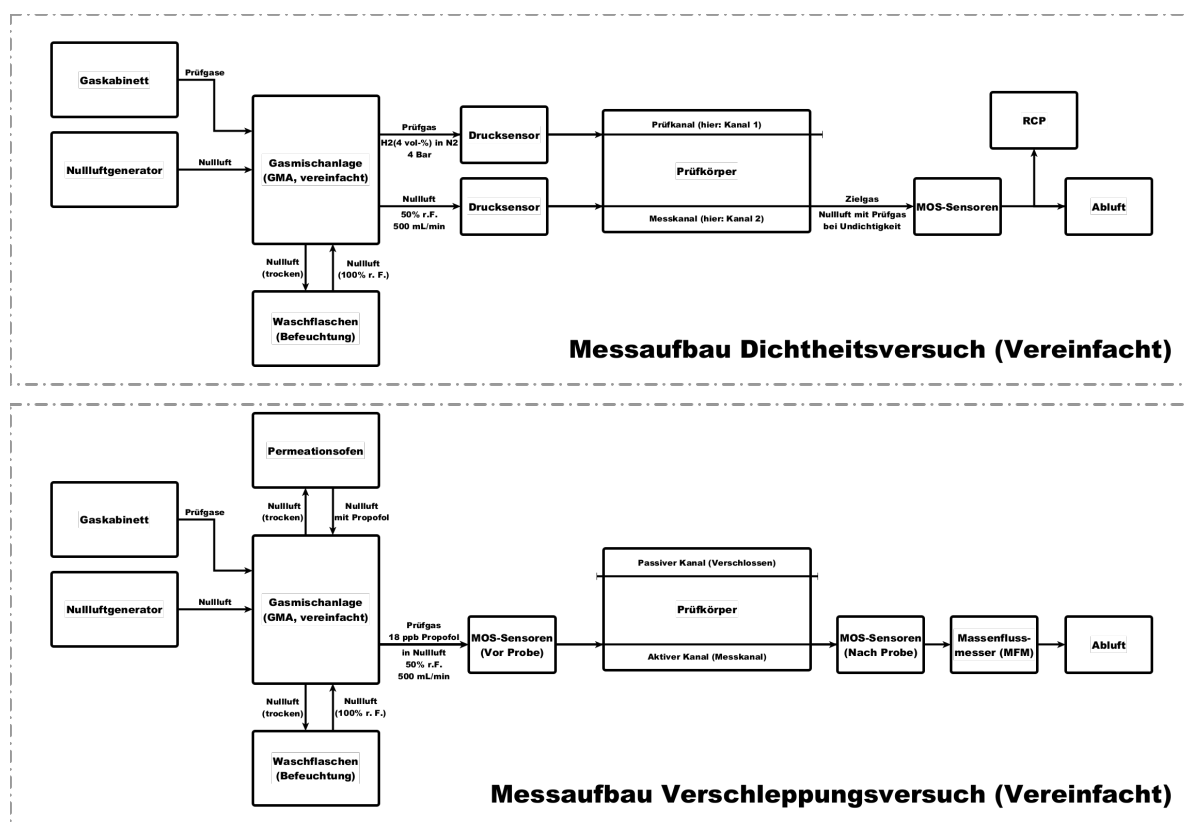


Abb. 4: Vereinfachte Schemata der Messaufbauten mit den Parallelkanalproben. Oben: Messaufbau für den Dichtheitsversuch. Unten: Messaufbau für die Verschleppungsversuche.

Zur Detektion des Wasserstoffes im Falle einer Undichtigkeit werden sowohl Metalloxidhalbleiter-Gassensoren (MOS-Sensoren) verwendet (Abb. 5) und in diesem Aufbau zusätzlich ein selektiv auf H_2/CO messendes Reducing Compound Photometer (RCP, Peak Performer 1 RCP von Peak Laboratories LLC, Mountain View, USA).

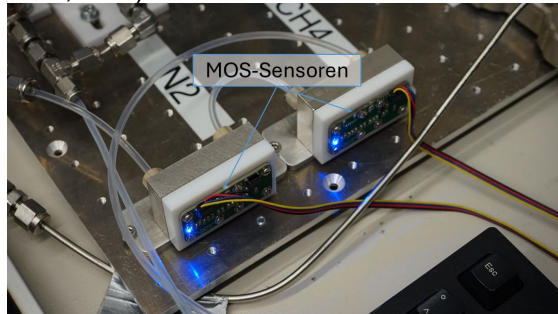


Abb. 5: MOS-Gassensor Boards, nach dem Messkanal der Probe, in der Messstrecke eingebunden.

Somit kann eine Sensorausschlag im Leitwert der MOS-Gassensoren (z.B. durch Feuchteschwankungen) bei gleichzeitigem Ausbleiben eines gestiegenen Messwertes am RCP als Undichtigkeit der Kanaltrennwand ausgeschlossen werden. In diesem Versuchsaufbau wurden zwei Multi-Sensor-Boards mit fünf MOS-Gassensoren (ein Board temperaturkonstant, ein Board temperaturzyklisch) und einem Temperatur- und Feuchtesensor verwendet (siehe Tab. 2).

Tab. 2: In der Gasdichtheitsprüfung und Verschleppungsversuch verwendete Sensoren

Sensorname (Hersteller)	Sensortyp
BME680 (Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Deutschland)	Temperatur, Feuchte, Druck, MOS-Gassensor (nur Gassensor genutzt)
ENS160 (ScioSense B.V., Eindhoven, Niederlande)	MOS-Gassensor (4 Schichten)
SGP40 (Sensirion AG, Stäfa, Schweiz)	MOS-Gassensor (4 Schichten)
ZMOD4410 (Renesas Electronics Corporation, Japan)	MOS-Gassensor
ZMOD4510 (Renesas Electronics Corporation, Japan)	MOS-Gassensor
SHT35 (Sensirion AG, Stäfa, Schweiz)	Temperatur und Feuchte

Die zu erwartende Menge an H_2 im Messkanal bei einer Undichtigkeit wurde hier durch eine vereinfachte Finite-Elemente-Simulation mit Hilfe der Software COMSOL Multiphysics 5.4 abgeschätzt (siehe Abb. 6) und würde bei ei-

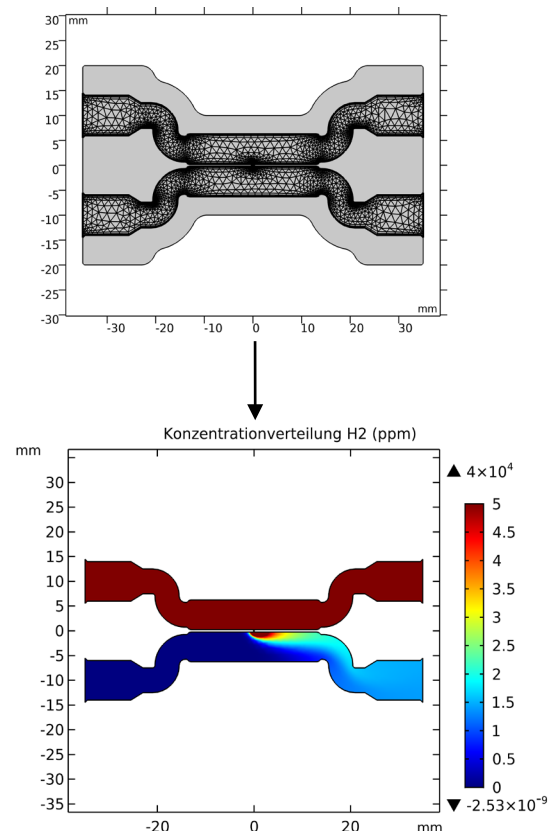


Abb. 6: Vereinfachtes Finite-Elemente Modell des Doppelkanals (oben) und Ergebnis der Simulation zur erwarteten Konzentration (unten).

ner Undichtigkeit mit einer modellierten Risslänge von 100 μm am Ende des Messkanales bei 1435 ppb liegen. Sowohl die MOS-Gassensoren als auch das RCP können deutlich geringere Konzentrationen nachweisen [8]. Jeweils ein Kanal der Probe wird dabei mit einem Blindstopfen verschlossen und an die Leitung mit dem Wasserstoffprüfgas angeschlossen. Dies wird in einem definierten Zeitraum (Prüfphase) von vier Stunden über ein Ventil mit 4 Bar Überdruck Wasserstoffprüfgas mit 4 vol.-% H_2 in N_2 beaufschlagt (vgl. Abb. 7 Kanal „1“). Der Druck wurde mit Drucksensoren kontinuierlich geprüft (Abb. 7). Im zweiten Kanal (vgl. Abb. 7 Kanal „2“) wird ein kontinuierlicher Fluss von 500 mL/min Nullluft mit 50% relativer Feuchte bei Raumtemperatur (20°C) eingestellt und nach der Probe sowohl an den MOS-Sensoren vorbeigeleitet als auch an einer Zweigstelle vom RCP abgesaugt und von diesem zyklisch gemessen.

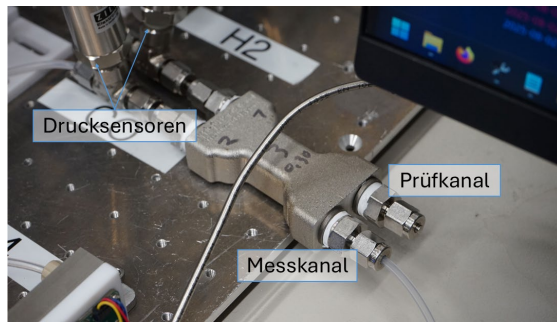


Abb. 7: Prüfung der Doppelkanalprobe mit Prüfkanal (Kanal 1) und Messkanal (Kanal 2) sowie Drucksensoren.

Eine Messreihe dauert dabei insgesamt zwölf Stunden und gliedert sich in drei Teilabschnitte:

1. Einlaufen und Stabilisierung der Sensoren auf dem Messkanal bei 500 mL/min, keine Gasbeaufschlagung auf dem Prüfkanal für sechs Stunden.
2. Bedrücken des Prüfkanals mit 4 Bar Überdruck Wasserstoffprüfgas bei gleichbleibendem Fluss auf Prüfkanal für vier Stunden.
3. Prüfkanal drucklos schalten und Auslaufphase des Messvorganges bei unverändertem Fluss auf Messkanal für zwei Stunden.

Ein Ausschlag der MOS-Sensoren während Phase 2, bei gleichzeitigem Anstieg des H₂-Messwertes am RCP, definiert dabei eine Undichtigkeit des jeweils getesteten Prüfkörpers. Zwecks Validierung und zum Ausschluss systematischer Fehler wurden die Kanäle in einer zweiten Messreihe vertauscht. Dadurch wurde jeder Prüfkörper effektiv zweimal auf Undichtigkeit geprüft.

Die Abb. 8 zeigt exemplarisch eine Messung des Edelstahl Prüfkörpers mit 0,3 mm Wandstärke zwischen den beiden Kammern (dünnste Wandstärke). Die ersten vier Diagramme zeigen das logarithmierte Sensorsignal (Leitwert) der vier gassensitiven Schichten des SGP40 MOS-Sensors bei konstanter Temperatur von 400°C. Im untersten Diagramm ist der Messwert des RCP dargestellt. Der rote Bereich markiert die Phase der Wasserstoffbeaufschlagung mit 4 Bar Überdruck im zu prüfenden Kanal. In Blau ist das Sensorsignal von Kanal 1 und in Rot von Kanal 2 als Messkanal gezeigt. Somit wurde beim blauen Grafen Kanal 2 und beim roten Grafen Kanal 1 mit dem Prüfgas beaufschlagt.

Weder eine der Sensorschichten noch das RCP zeigten einen signifikanten Anstieg während des Zeitraums der Wasserstoffbeaufschlagung. Dies belegt die Gasdichtheit des additiv gefertigten Bauteils. Vergleichbare Er-

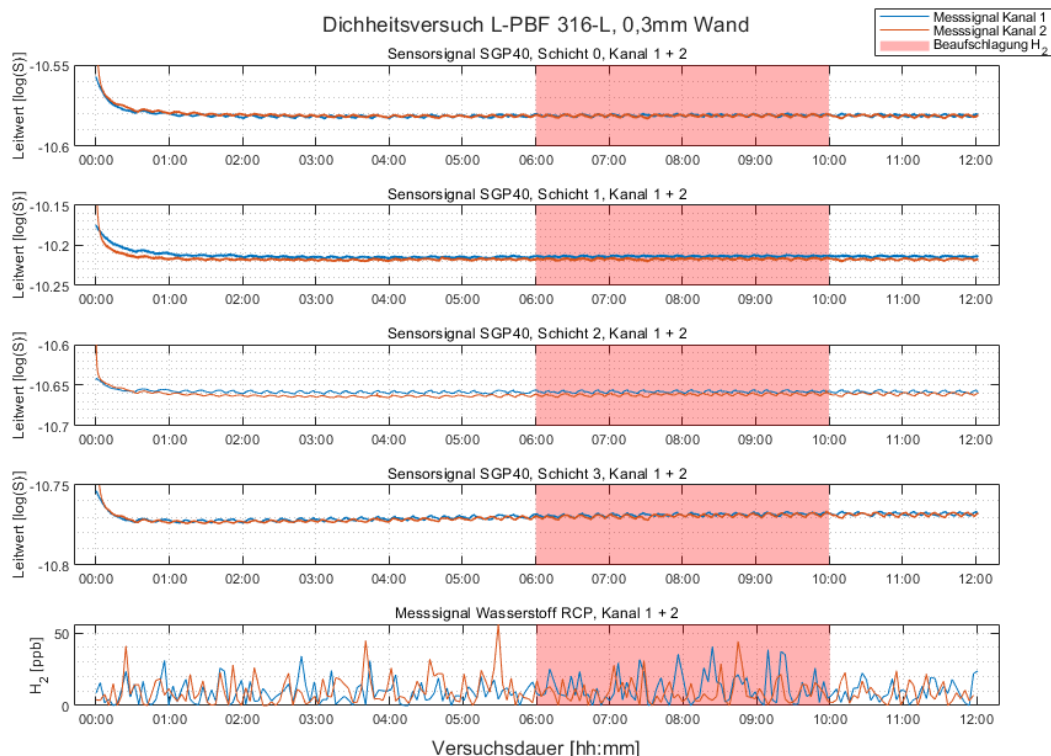


Abb. 8: Dichtheitsversuch mit Wasserstoffbedruckung einer Doppelkanalprobe. Gezeigt sind exemplarisch die vier gassensitiven Schichten des SGP40 Sensors für den Prüfkörper aus 316 Edelstahl mit einer Wandstärke von 0,3 mm. Zusätzlich ist unten die Überwachungsmessung des RCP dargestellt. In Blau ist Kanal 1 und in Rot Kanal 2 dargestellt.

gebnisse wurden mit allen getesteten Wandstärken erzielt sowie mit der Aluminiumlegierung als auch in Edelstahl. Alle Prüfkammern wurden, durch den Kanaltausch, mehrfach gemessen.

Dieses Ergebnis lässt bereits eine Verwendung für in L-PBF gefertigte Bauteile mit integrierten Gasführungen mit minimalen Wandstärken bis 0,3 mm zu.

Untersuchungen von Verschleppungseffekten

Zur Untersuchung der Verschleppung wurde ebenfalls die Doppelkanalkammer genutzt, wobei nur einer der beiden Kanäle betrachtet wird. Allerdings wurde ein MOS-Gassensorarray, mit Sensorbestückung nach Tab. 2, sowohl vor und ein weiteres Array nach der Doppelkanalprobe im Gasstrom vorgesehen. Diese Anordnung (Abb. 10) ermöglicht die Untersuchung von Verschleppungseffekten durch Adsorption und Desorption von teils flüchtigen Substanzen an inneren Wandungen. Der unbenutzte Kanal wird dennoch mit Blindstopfen verschlossen, um eine Anlagerung von Stoffen aus der Laborumgebung während der Mess- und Lagerzeit auszuschließen.

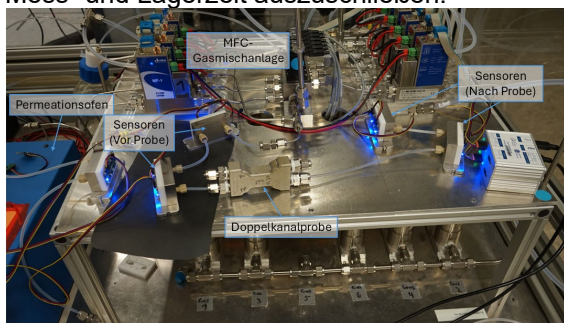


Abb. 9: Messaufbau an GMA mit Permeationssofen, zur Überprüfung der Verschleppung.

Der Messablauf dauert insgesamt 24 Stunden und gliedert sich in folgende Phasen:

1. Einlaufen der Sensoren und Herstellen einer Grundlinie der MOS-Sensoren bei 500 mL/min mit 50% relativer Feuchte bei Raumtemperatur (20°C) für acht Stunden.
2. Aufschalten des Prüfstoffes (18 ppb 2,6-Diisopropylphenol) für acht Stunden.
3. Beenden des Gasangebotes mit Propofol und Spülen des Kanales für weitere acht Stunden mit Nullluft zum Ermitteln der Verschleppung (Sensorrücklauf auf die Grundlinie).

Anschließend wurde die Messung mit dem zweiten Kanal derselben Probe wiederholt, wodurch auch hier jede Probe zweimal vermessen wurde. Zur Bewertung der Anhaftung von Propofol an inneren Wandungen und da-

mit von Verschleppungseffekten, wurde die Abklingzeit nach Propofol-Aufgabe ausgewertet (siehe Abb. 11 für Edelstahl und Abb. 12 für Aluminium). Hier sind in Blau (vor Probe) und Rot (nach Probe) die Sensorsignale von Kanal 1 dargestellt und in Gelb (vor Probe) und Lila (nach Probe) das Sensorsignale von Kanal 2. Der Zeitraum des Gasangebotes mit 18 ppb Propofol ist in Hellgelb farbig hinterlegt.

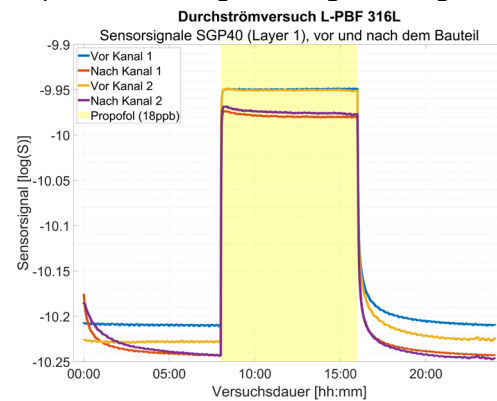


Abb. 10: Verschleppungsversuch an L-PBF Doppelkanal aus 316L. Es wurden jeweils dieselben Sensoren bei Kanal 1 und 2 verwendet. Zeitraum der Propofolangebots ist in Gelb hinterlegt.

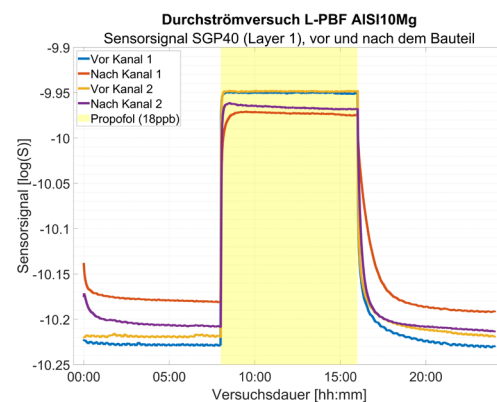


Abb. 11: Verschleppungsversuch an L-PBF Doppelkanal aus AISi10Mg. Darstellung analog zu Abb. 11.

Hierbei zeigt sich im direkten Vergleich zwischen den beiden Materialien, mit einem SGP40 mit entfernter Schutzmembran, dass die Doppelkanalproben aus 316L (Abb. 11) ein schnelleres Rücklaufen auf die Grundlinie besitzen als die Proben aus AISi10Mg (Abb. 12). Insbesondere an Kanal 1 (rote Kurve) in Abb. 12 ist ein längeres Rücklaufen auf die Grundlinie zu beobachten.

Dieses Verhalten ist bei den Doppelkanalproben aus AISi10Mg ausgeprägter, wodurch sich das Material 316L besser für eine Anwendung mit Medienberührung eignet.

Vergleich der Verschleppung bei L-PBF Teilen mit konventionellen Leitungen

Neben dem Vergleich von additiv gefertigten Bauteilen mit einer Aluminiumlegierung und aus Edelstahl, wird im Folgenden der Edelstahlprüfkörper mit Rohrstücken und Schläuchen, die standardmäßig zur Gasführung eingesetzt werden (vgl. Tab. 3), verglichen.

Tab. 3: In den Verschleppungsversuchen verwendete Materialien.

Werkstoff	Ausführung
Edelstahl (316L)	1/4"-Rohr
	L-PBF
Aluminium (unlegiert)	6 mm Rohr
Aluminium (AISI10Mg)	L-PBF
Perfluorakloxy-Polymer (PFA)	1/4"-Rohr
Polyurethan (Lebensmittel-echt) (PUR-L)	6 mm Schlauch

Die Länge der Rohr- und Schlauchstücke wurde abhängig von dem Innendurchmesser so angepasst, dass die nominelle (d.h. ohne Beachtung der Rauheit) Oberfläche, der der additiv gefertigten Prüfkörper entspricht. Zusätzlich wurde eine Messung ohne Bauteil (nur Swagelok-Verbinder) durchgeführt.

Das Bauteil aus 316L zeigt hier im Vergleich (Abb. 13) einen Verlauf, welcher mit dem von etablierten Materialien wie PFA (lila Kurve) [9] oder gezogenen Edelstahlrohren (gelbe Kurve) vergleichbar sind. Dem gegenüber ist für Schlauch aus PUR-L (grüne Kurve) selbst innerhalb der Abklingzeit nicht mehr auf den Wert vor dem Gasangebot abgefallen.

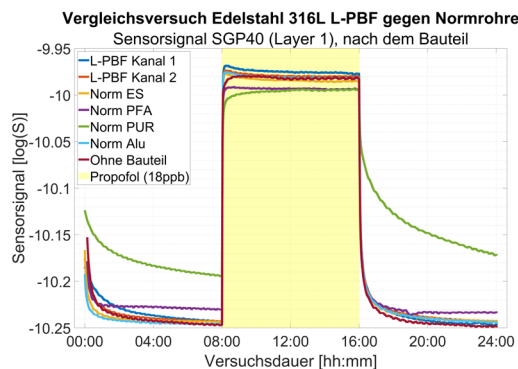


Abb. 12: Vergleich des Verschleppungsversuch von 316L mit Vergleichsmaterialien und ohne Messstrecke (dunkelrote Kurve).

Beispielhafte L-PBF Bauteile mit Anwendungsbezug

Neben den Prüfkörpern wurden auch anwendungsspezifische Körper durch additive Fertigung realisiert.

Eine erste Anwendung ist eine Sensoraufnahme (Abb. 14) für die Sonde eines Sauerstoffsensors sowie der Gasanschluss für ein Kapnometer. Die Aufnahme ist Teil eines modifizierten Oxygenators einer Herz-Lungen-Maschine, die in einem ex-vivo Schweinelungenmodell [10] eingesetzt wird (Abb. 15).

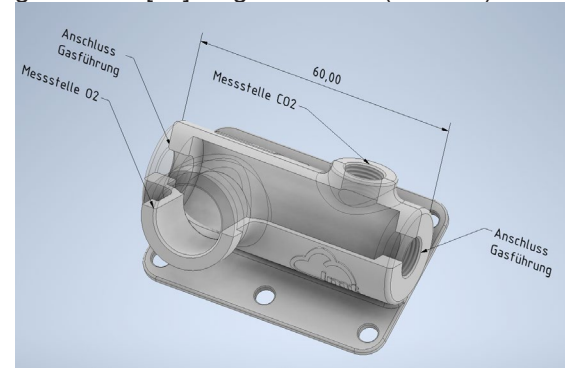


Abb. 13: CAD-Modell des Sensoradapters für die Oxygenatorsteuerung, mit halbtransparentem Dreiviertelschnitt und Anschlussbezeichnung.

Bei diesem wird an zwei Stellen im Gasfluss O₂ und CO₂-Gehalt der Luft gemessen.

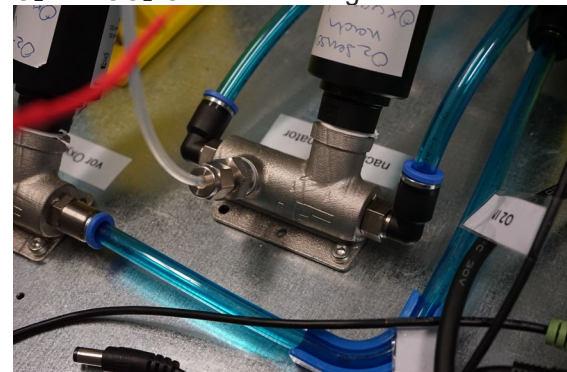


Abb. 14: Messstelle im Oxygenator mit gefertigtem Sensoranschluss aus 316L.

In einem zweiten Beispiel wurde integrierte fluidische Verbindungen innerhalb eines miniaturisierten Ventilblocks (Abb. 16) für ein mobiles Gasmesssystem realisiert.

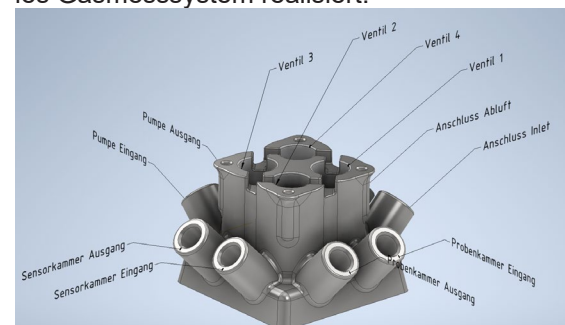


Abb. 15: CAD-Modell des Ventilblockes mit Anschlussbezeichnungen.

Hier wird die Verschaltung von vier 3/2-Wege-Kartuschen-Ventilen (Typ Bürkert 6164) untereinander komplett durch integrierte Kanäle mit durchschnittlich 1,4 mm Kanaldurchmesser abgebildet. Hierdurch wurde das Totvolumen der Ventilvorrichtung minimiert, was zu kürzeren Gaswechselzeiten führt.

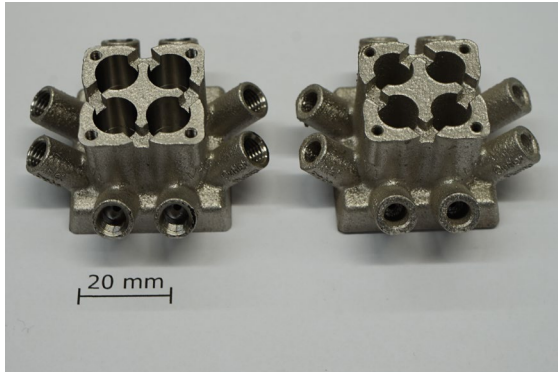


Abb. 16: L-PBF Bauteil „Ventilblock“, für vier 3/2-Wege-Kartuschenventile. Links: spanend nachbearbeitet. Rechts: L-PBF Rohteil.

Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch per L-PBF Verfahren additiv hergestellte Bauteile sich prinzipiell für den Einsatz in der Gasmesstechnik eignen. Hierbei ist von den beiden untersuchten Materialien, AlSi10Mg und 316L, das Letztere durch seine weniger stark ausgeprägten Verschleppungseffekte besser für medienberührende Bauteile mit Prüfgasen, geeignet. Die Aluminiumlegierung ermöglicht allerdings ebenfalls gasdichte Bauteile und bietet sich durch ihre deutlich bessere Wärmeleitfähigkeit für temperierte Bauteile und unkritische Gase an.

Das Fertigungsverfahren selbst ermöglicht die Herstellung von metallischen Bauteilen mit kurzer Vorlaufzeit bei gleichzeitig hoher Designfreiheit und geringem Nachbearbeitungsbedarf. Gezeigt wurde das für die Sensoraufnahme zur Anwendung in der medizinischen Forschung. Weiterhin ermöglicht das Fertigungsverfahren hochintegrierte Bauteile mit Fluidik-Komponenten, da Gaskanäle hergestellt werden können, welche mit klassischen, spanenden Fertigungsverfahren nicht realisierbar sind.

In zukünftigen Anwendungen werden L-PBF Komponenten eine weitere Verringerung des Totvolumens bei gleichzeitig verbesserter Integration weiterer Funktionen, wie integrierten Ventilen, ermöglichen.

Förderhinweis

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Landesforschungsförderungspro-

gramm – LFFP Open Call „Drittmitel.Transformation.Saarland“ unter dem Vorhaben „Untersuchung des Potentials von Additiver Fertigung (3D-Druck) von Metallen für die Gasmesstechnik“ vom Ministerium der Finanzen und für Wissenschaft des Saarlandes gefördert.

Literaturnachweis

- [1] O. Brieger, C. Bur, A. Schütze, und T. Sauerwald, „Setup for characterization of MOS gas sensors as GC detector“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Bd. 444, S. 138396, Dez. 2025, doi: 10.1016/j.snb.2025.138396.
- [2] B. J. Lotesoriere u. a., „Experimental setup to study poisoning effects of different materials on chemical sensors used in E-nose systems“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Bd. 14, Nr. 2, S. 237–247, Okt. 2025, doi: 10.5194/jsss-14-237-2025.
- [3] O. Maurer, „Sono-L-PBF: Entwicklung und Qualifikation von schallunterstütztem Laser Powder-Bed Fusion von AlSi10Mg“, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2024. doi: 10.22028/D291-43539.
- [4] O. Maurer, M. Stopp, C. Bur, und D. Bähre, „Influence of the supported part surface area on part properties in Laser Powder-Bed Fusion of 316L for gas measurement accessory“, *Applications in Engineering Science*, Bd. 25, S. 100309, März 2026, doi: 10.1016/j.apples.2026.100309.
- [5] M. Leidinger, C. Schultealbert, J. Neu, A. Schütze, und T. Sauerwald, „Characterization and calibration of gas sensor systems at ppb level—a versatile test gas generation system“, *Meas. Sci. Technol.*, Bd. 29, Nr. 1, S. 015901, Jan. 2018, doi: 10.1088/1361-6501/aa91da.
- [6] D. Arendes, J. Amann, C. Tessier, O. Brieger, A. Schütze, und C. Bur, „Qualification and optimisation of a gas mixing apparatus for complex trace gas mixtures“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 90, Nr. 12, S. 822–834, Dez. 2023, doi: 10.1515/teme-2023-0075.
- [7] „Wasserstoff“, GESTIS-Stoffdatenbank. [Online, letzter Zugriff am 14.04.2026]. Verfügbar unter: <https://gestis.dguv.de/data?name=007010>
- [8] T. Baur, J. Amann, C. Schultealbert, und A. Schütze, „Field Study of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Temperature Cycled Operation for Selective VOC Monitoring in Indoor Air“, *Atmosphere*, Bd. 12, Nr. 5, S. 647, Mai 2021, doi: 10.3390/atmos12050647.
- [9] F. Maurer u. a., „Adherence of volatile propofol to various types of plastic tubing“, *J. Breath Res.*, Bd. 11, Nr. 1, S. 016009, Jan. 2017, doi: 10.1088/1752-7163/aa567e.
- [10] S. Radermacher u. a., „A versatile ex-vivo model platform for detection of exhaled drugs using isolated perfused porcine lungs“, *J. Breath Res.*, Bd. 20, Nr. 2, S. 026004, Juni 2026, doi: 10.1088/1752-7163/ae4bfe.