

Akustische Charakterisierung des Schädigungsverhaltens von AlSi10Mg-LPBF-Gitterstrukturen unter zyklischer Belastung

L.S. Kollmannsperger¹*, S.C.L Fischer¹*

¹ Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, 66123 Saarbrücken,
lea.sophie.kollmannsperger@izfp.fraunhofer.de
sarah.fischer@izfp.fraunhofer.de

Einleitung

Fortschritte in der additiven Fertigung haben zu Durchbrüchen bei der Herstellung geometrisch komplexer Strukturen geführt [1]. Eine Kategorie von geometrisch komplexen Materialien sind Metamaterialien, welche aus regelmäßigen und sich periodisch wiederholenden Einheitszellen bestehen. Hierzu zählen unter anderem strebenbasierte Gitterstrukturen [2], die sich beispielsweise für Leichtbauanwendungen eignen. Um diese Strukturen für industrielle Anwendungen nutzbar zu machen, ist es essentiell, sowohl das mechanische Verhalten bei diversen Belastungsarten (quasistatisch, dynamisch und zyklisch) zu charakterisieren, als auch Methoden zu entwickeln, um die Strukturen während ihres Gebrauchs zu überwachen. Bisher beschäftigen sich einige Studien mit der Charakterisierung der quasistatischen kompressiven Eigenschaften von Gitterstrukturen [3]. Erweitert werden diese Untersuchungen durch die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens. Beispielsweise werden in der Studie von Xiao et al. [4] Gitterstrukturen bei verschiedenen Dehnraten im Bereich von $0,015 \text{ s}^{-1}$ bis $0,05 \text{ s}^{-1}$ geprüft, wodurch ein dehnratenabhängiges mechanisches Verhalten erkannt wurde. Mit zyklischer Belastung beschäftigen sich bisher nur vereinzelte Forschungsgruppen. A. Zargarian et al. [5] konnten bei zyklischer Belastung ein dreistufiges Probenverhalten feststellen. Im ersten Bereich steigt die Belastung stark an und geht dann in den zweiten Bereich über, in dem die kumulierte Belastung annähernd konstant bleibt. Im 3. Bereich ist ein exponentieller Belastungsanstieg zu erkennen, der im Versagen der Struktur gipfelt. Obwohl eine versuchsbegleitende Schallemissionsmessung bereits zur Feststellung der Rissausbreitung in Faserverbundwerkstoffen, Beton [7], Gestein [8] oder massiven metallischen Werkstoffen [6] eingesetzt wird, existieren nur wenige Ansätze zur Übertragung auf Metamaterialien. Ein Ansatz für die Anwendung auf Gitterstrukturen wurde von Y. Ibrahim et al. [9] entwickelt und vorgestellt. Hierbei wurden Dreipunkt-Biegeversuche durchgeführt und mit einer Schallemissionsmessung begleitet. Die akustischen Signale wurden in Hinblick auf die angeregten Frequenzen analysiert. Auf der Grundlage ihrer Untersuchungen konnten sie feststellen, dass sich die akustische Prüfung zur Bestimmung von losen Pulveranhaftungen an der Probe eignet. Zusätzlich konnten sie einen damit verbundenen Einfluss auf mechanischen Eigenschaften wie der relativen Probendichte und des effektiven Moduls identifizieren. Einen weiteren Ansatz für den Einsatz der Schallemissionsmessung zeigten Drissi-Daoudi et al. [10], die die Schallemissionsmessung zur Identifizierung von Spannungsrisen, die sich im L-PBF-Prozess entwickeln, als In-situ-Prozessüberwachung einsetzten. Kollmannsperger et al. [11] konnten bereits das Schädigungsverhalten von Gitterstrukturen während

Ermüdungsversuchen durch akustisches Emissionsmonitoring anhand von Luftschalldaten überwachen. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass es vielversprechende Ansätze zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Proben gibt, die jedoch für komplexere Probengeometrien weiterentwickelt werden sollten. Auch die aufgeführten Studien zur Schallemissionsmessung stellen einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Strukturen sinnvoll zu ergänzen. In dem vorliegenden Beitrag wird das Ermüdungsverhalten von AlSi10Mg-Gitterstrukturen, die mit L-PBF hergestellt wurden, anhand eines Laststeigerungsversuchs untersucht. Die Tests wurden von Schallemissionsmessungen und Körperschallmessungen begleitet, um einen möglichst großen Messbereich abzudecken. Die aufgezeichneten akustischen Signale werden in Form von zeitabhängigen Amplitudensignalen und Frequenzspektren ausgewertet. Mit zunehmender Belastung und zunehmender Schädigung der Probe ändern sich das akustische Spektrum und die Amplitude des Zeitsignals. Durch die Korrelation der Veränderung der akustischen Signale mit den mechanischen Belastungsmerkmalen ist es möglich, Informationen über die Schädigung eines Bauteils zu erhalten.

Experimentelle Methoden

Eine SLM125 L-PBF-Maschine der SLM Solutions Group AG (Lübeck, Deutschland) wurde verwendet, um Gitterproben mit einer Größe von 10 mm x 10 mm x 11 mm herzustellen. Bei der Struktur handelt es sich um eine krz-Gitterstruktur mit einem Strebendurchmesser von 0,75 mm einer Zellengröße von 2,5 mm und 4 mal 4 mal 4 Zellen. Um eine gleichmäßige Lastverteilung während der mechanischen Belastung zu gewährleisten, sind zwei Platten an den Gittern angebracht. Zur Herstellung der Proben wurde ein AlSi10Mg-Pulver mit einer Korngrößenverteilung von 20 μm bis 63 μm (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Deutschland) verwendet. Als Prozessparameter wurden die Scanstrategie total fill, Pulverschichtdicke 30 μm , Laserleistung 250 W, Scangeschwindigkeit 2000 mm/s und ein Hatchabstand von 0,1 mm gewählt. Die Gitterproben wurden mit einer Resonanzprüfmaschine (Rumul MIKROTRON, Russenberger Prüfmaschinen AG, Schweiz) einer zyklischen Druckbelastung unterzogen. Basierend auf den in quasistatischen Druckversuchen ermittelten mechanischen Parametern (E-Modul, plastische Kollapsspannung (PCS)) der Gitterstrukturen wurde ein Laststeigerungsversuch konzipiert, bei dem die Unterspannung der ersten Belastungsstufe ca. 50% der plastischen Kollapsspannung entspricht und die mittlere Spannung alle 50.000 Lastwechsel um 10% erhöht wird. Der Laststeigerungsversuch wird mit

einem Spannungsverhältnis von $R=3$ durchgeführt (vgl. Abbildung 1).

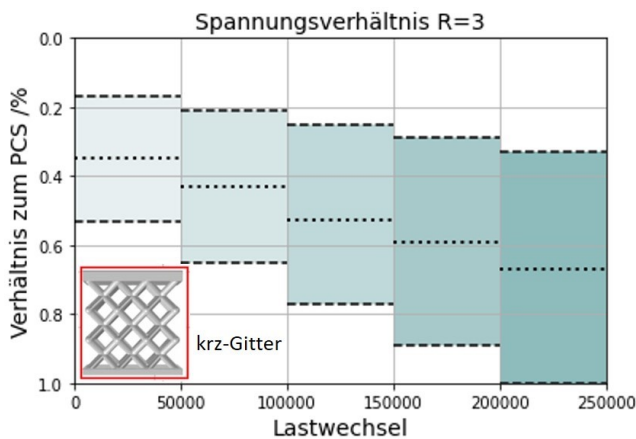


Abbildung 1: Design eines Laststeigerungsversuchs mit Spannungsverhältnis $R=3$ auf Basis des in quasistatischen Druckversuchen ermittelten PCS an krz-Gitterstrukturen.

Die Laststeigerungsversuche wurden von einer Schallemissionsüberwachung begleitet. Zu diesem Zweck wurden die Messsignale mit einem Messmikrofon (ECM8000 Messmikrofon, Behringer, Deutschland) und der kostenfreien Audio-Editor- und Recorder-Software Audacity (Das Audacity Team, Deutschland) mit einer Abtastrate von 96 kHz aufgenommen. Aufgrund der Mikrofoncharakteristik ermöglicht die Luftschallmessung das Erfassen von Signalen im Frequenzbereich < 20 kHz. Zusätzlich wurden die Körperschallsignale mit einem AE-Sensor (VS150_MS, Vallen Systeme, Wolftratshausen, Deutschland) und einem Picoscope (PicoScope 5000 Series, Pico Technology, UK) mit einer Abtastrate von 2 MHz aufgenommen, wodurch auch Frequenzen > 20 kHz erfasst werden können. Der Sensor befand sich in einer speziell angefertigten Druckplatten (siehe Abbildung 2), um die Signale in axialer Richtung zu erfassen. Die Signale werden im Hinblick auf das Amplituden-Zeit-Signal und das Fast-Fourier-Transformations-Spektrum (FFT) analysiert. Insbesondere werden die Frequenzspitzenverschiebungen und die auftretenden Eigenmoden identifiziert und die Amplitudenänderung im Zeitsignal während der zyklischen Belastung ausgewertet.

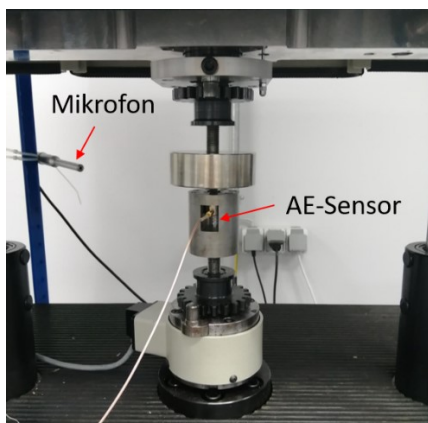


Abbildung 2: Darstellung des experimentellen Setups. Probe zwischen zwei Druckplatten in einer Resonanzprüfmaschine mit begleitender akustischer Emissionsmessung mittels Mikrofon und AE-Sensor.

Ergebnisse und Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist es, die zyklischen Eigenschaften von additiv gefertigten Gitterstrukturen zu untersuchen und ein besseres Verständnis der Versagensmechanismen zu gewinnen. Hierfür werden akustische Signale aus begleitenden Luftschall und Körperschallmessungen mit mechanischen Kenndaten in Verbindung gebracht. Die Messergebnisse werden an exemplarischen Messkurven dargestellt.

Charakterisierung des mechanischen Verhaltens

Zunächst wurde das Verhalten der Gitterproben bei zyklischer mechanischer Belastung evaluiert. Hierzu wurden die makroskopische Deformation und die Resonanzfrequenz der Resonanzprüfmaschine ausgewertet. Anhand der exemplarischen Deformationskurve (Abbildung 3) ist erkennbar, dass die Gitterprobe in der ersten Laststufe nur eine sehr geringe makroskopische Verformung erfährt. Beim Übergang von Laststufe 1 und Laststufe 2 wird die Probe um 0,14 mm komprimiert, erfährt jedoch in der 2. Laststufe selbst keine signifikante weitere Deformation. In Laststufe 3 wird die Probe mit einer Maximalkraft von 67 % des PCS zyklisch belastet, was zu einer sukzessiven Deformation bis hin zum Versagen der Probe führt.

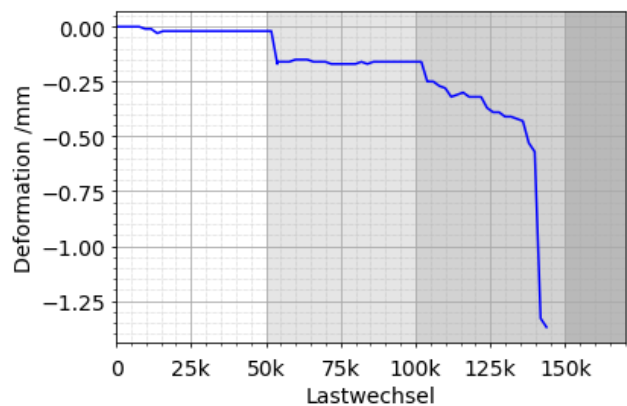


Abbildung 3: Exemplarische experimentelle Messkurve der mechanischen Deformation als Funktion der Anzahl der Lastwechsel

Erklären lässt sich dieses Verhalten anhand der Resonanzfrequenz der Resonanzprüfmaschine. Diese Resonanzfrequenz stellt die Schwingungsfrequenz des gesamten Systems, bestehend aus zwei Schwingmassen und der Probe als dritte Masse, dar. Da die Massen während des Versuchs als konstant angenommen werden können, lässt sich jede Änderung der Resonanzfrequenz einer Steifigkeitsänderung der Gitterprobe zuweisen. Daher lässt sich aus der in Abbildung 4 exemplarisch dargestellten Messkurve die Steifigkeitsänderung der Gitterprobe während des Laststeigerungsversuchs ableiten. In Laststufe 1 bleibt die Steifigkeit der Probe nahezu konstant. Beim Übergang von Laststufe 1 zu Laststufe 2 bewirkt die Kompression der Probe einen Anstieg der Steifigkeit. Innerhalb der 2. Laststufe sorgen mikrostrukturelle Veränderungen der Probe für eine Entfestigung der Probe, die schließlich dafür sorgt, dass die Probe in Laststufe 3 so stark entfestigt ist, dass sie auch eine starke makroskopische Deformation erfährt.

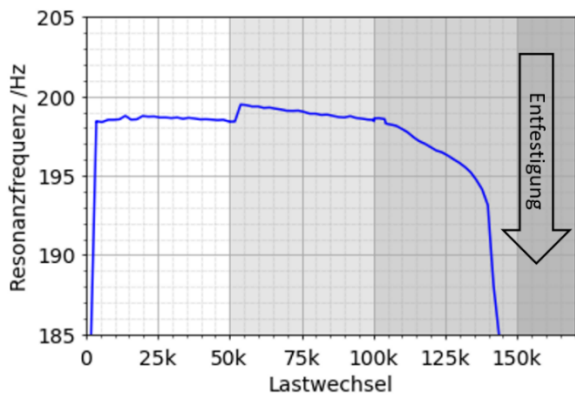


Abbildung 4: Exemplarische experimentelle Messkurve der Resonanzfrequenz der Prüfmaschine als Funktion der Anzahl der Lastwechsel.

Luftschallemissionen

Versuchsbegleitend wurden die akustischen Luftschallemissionen aufgenommen und hinsichtlich der Änderung der Schalldruckamplitude und des Frequenzspektrums ausgewertet. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Änderung der Schalldruckamplitude im Verlauf eines Laststeigerungsversuchs. Erkennbar ist, dass bei der geringen zyklischen Belastung der Probe in der ersten Belastungsstufe keine Änderung der Amplitude auftritt, was die Beobachtungen der mechanischen Messkurven widerspiegelt. Jeder stufenartige Übergang der Laststufen geht mit einer stufenartigen Erhöhung der Amplitude einher. Erfährt die Probe eine makroskopische Verformung und führt diese zu einer Entfestigung der Gitterprobe, so ist diese Veränderung der Probe auch im akustischen Signal erkennbar. Die Schalldruckamplitude steigt signifikant an. Kollmannsperger et al. [11] konnten in ihrer Studie, durch den Vergleich der Amplitudenänderung mit der numerischen linearen Schadenakkumulation, einen qualitativen Zusammenhang zwischen Amplitudenanstieg und zunehmender Schädigung feststellen. Bei Betrachtung der Messkurve zeigen sich neben den Trends in den Laststufen auch einzelne Peaks mit höherer Amplitude. Diese sind nicht auf die Probe selbst zurückzuführen, sondern weisen auf Umwelteinflüsse hin. Hierbei könnte es sich beispielsweise um sich schließende Zimmertüren handeln. Daher sollte diesen Events bzgl. der Charakterisierung der Probe keine Beachtung gegeben werden.

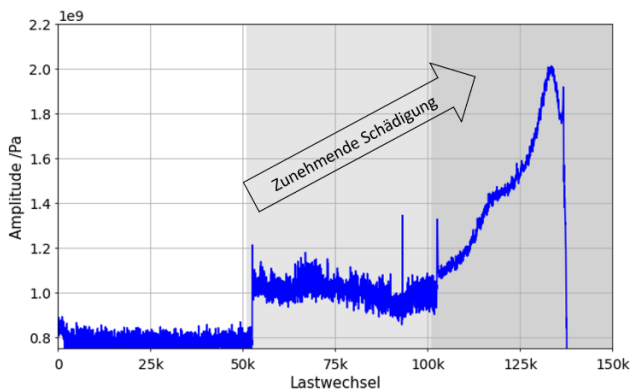


Abbildung 5: Messkurve der akustischen Luftschallamplitude als Funktion der Anzahl der Lastwechsel.

Neben der Schalldruckamplitude wurde das Frequenzspektrum des gemessenen akustischen Signals analysiert. Die Maschinenresonanzfrequenz ist als dominierende Frequenz als höchster Peak im Frequenzspektrum eindeutig identifizierbar (siehe Abbildung 6).

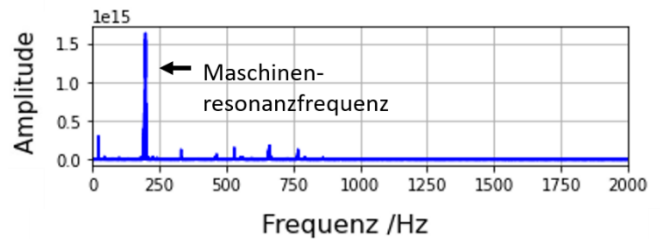


Abbildung 6. Analyse des Frequenzspektrums. a) Identifizierung der Maschinenresonanzfrequenz als Hauptfrequenz im Frequenzspektrum.

Körperschallemissionen

Neben den Luftschallemissionen wurden Körperschalldaten aufgenommen und hinsichtlich der Amplitude und den auftretenden Frequenzen analysiert. In Abbildung 7 ist die Amplitude des Zeitsignals nach dem Einschwingen der Maschine mit der entsprechenden mechanischen Prüffrequenz des 3-Massenschwingers gezeigt. Der Wert der Anfangsamplitude wurde als Mittelwert der Einhüllenden zwischen 5000 und 10000 Lastwechseln bestimmt. Je höher die Anfangsamplitude ist, desto höher ist die Prüffrequenz des Systems. Neben diesen Beobachtungen zeigt sich auch anhand dieses Messsignals ein Anstieg der Amplitude mit zunehmender Belastung.

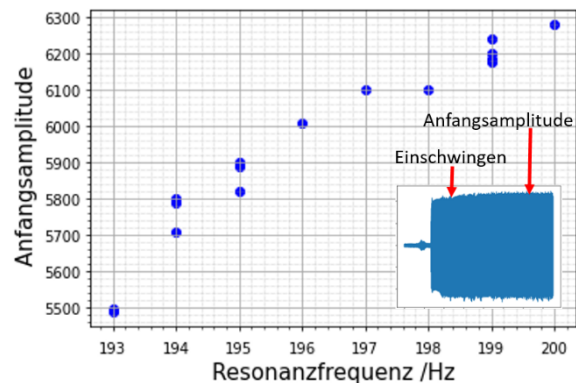


Abbildung 7: Analyse der Anfangsamplitude des Körperschallemissionssignals als Funktion der mechanischen Prüffrequenz des Resonanzprüfers zu Beginn des Laststeigerungsversuchs.

Im nächsten Schritt sollten die Frequenzspektren des Körperschallsignals genau unter die Lupe genommen werden. In Abbildung 8 sind exemplarisch die Frequenzspektren einer Gitterprobe bei 10000 Lastwechsel und bei 120000 Lastwechseln im Frequenzbereich von 185 Hz bis 200 Hz dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich die Peakposition und die Peakhöhe des in diesem Bereich dominierenden Peaks mit

zunehmender Anzahl an Lastwechseln verändern. Aus diesem Grund sollten diese Parameter explizit ausgewertet werden.

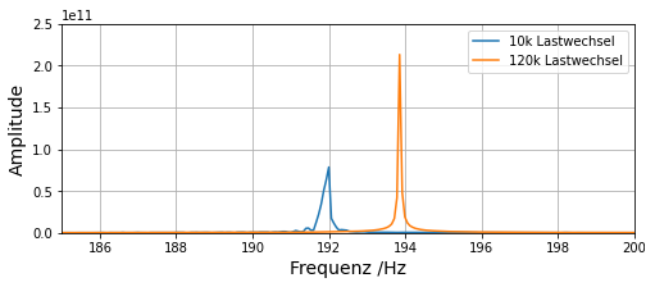


Abbildung 8: Betrachtung der Frequenzspektrien des Körperschallsignals anhand einer exemplarisch ausgewählten Gitterprobe bei 10000 Lastwechseln (blau) und bei 120000 Lastwechseln (orange).

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden krz- Gitterproben in einem Laststeigerungsversuch mit einem Spannungsverhältnis von $R=3$ zyklisch belastet und die akustischen Emissionsdaten von Luftschall und Körperschall aufgenommen und analysiert. Es konnte ein Zusammenhang zwischen den akustischen Messwerten und den mechanischen Kenndaten identifiziert werden. Beide Emissionsdaten zeigen einen Anstieg der Schalldruckamplitude, der auf eine zunehmende integrale Schädigung der Probe hindeutet. Die Spektren spiegeln das Schwingungsverhalten der Probe wider. Die Arbeit zeigt, dass die akustische Emissionsmessung ein großes Potential zur Bauteilüberwachung von Gitterstrukturen bietet, wodurch das Überführen der Gitterstrukturen in die industrielle Anwendung ermöglicht wird. Es sollte aufgrund der unterschiedlichen Messbereiche der akustischen Emissionen, darauf geachtet werden, welche Informationen erfasst werden können. In zukünftigen Arbeiten sollte der Auswertung der Spektren eine größere Bedeutung zugewiesen werden.

Danksagung:

Diese Arbeit wurde durch ein Fraunhofer-internes Programm unter der Förderkennziffer Attract 025 -601314 finanziert, das an S.C.L. Fischer vergeben wurde. Die Autoren bedanken sich bei Oliver Maurer vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik an der Universität des Saarlandes für die Fertigung der Gitterproben.

Literatur

- [1] Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., and Brandt, M., "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges," *Materials & Design*, V. 183, 2019, p. 108137.
- [2] Pan, Chen, Yafeng Han, and Jiping Lu. "Design and optimization of lattice structures: A review." *Applied Sciences* 10.18 (2020): 6374.
- [3] Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., and Hague, R., "A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting," *Materials Science and Engineering: A*, V. 670, 2016, pp. 264–274.
- [4] Xiao, L., Song, W., Wang, C., Tang, H., Fan, Q., Liu, N., and Wang, J., "Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading," *International Journal of Impact Engineering*, V. 100, 2017, pp. 75–89.
- [5] Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadhodapour, J., Ziaei-Rad, S., and Zamani, D., "On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, V. 100, 2019, pp. 225–232.
- [6] D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, and T.E. Matikas, "Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates," *Mechanics Research Communications*, V. 38, No. 2, 2011, pp. 106–110.
- [7] Noorsuhada, M. N., "An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique," *Construction and Building Materials*, V. 112, 2016, pp. 424–439.
- [8] Xiling Liu, Zhou Liu, Xibing Li, Fengqiang Gong, and Kun Du, "Experimental study on the effect of strain rate on rock acoustic emission characteristics," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 133, 2020, p. 104420.
- [9] Ibrahim, Y., Li, Z., Davies, C. M., Maharaj, C., Dear, J. P., and Hooper, P. A., "Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures," *Additive Manufacturing*, V. 24, 2018, pp. 566–576.
- [10] Drissi-Daoudi, R., Masinelli, G., Formanoir, C. de, Wasmer, K., Jhabvala, J., and Logé, R. E., "Acoustic emission for the prediction of processing regimes in Laser Powder Bed Fusion, and the generation of processing maps," *Additive Manufacturing*, V. 67, 2023, p. 103484.
- [11] Kollmannsperger, L.S., Maurer, O., Kose, R. et al. Acoustic emission of lattice structures under cycling loading relates process parameters with fatigue properties. *Commun Eng* 3, 56 (2024).