

## Akustik 3D-gedruckter Zahnräder

Philipp Neubauer<sup>1</sup>, Joachim Bös<sup>1</sup>, Tobias Melz<sup>1</sup>

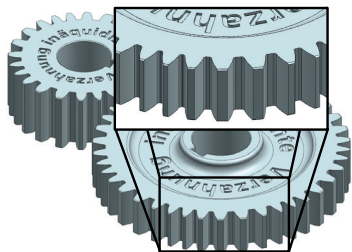
<sup>1</sup> Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Technische Universität Darmstadt, Magdalenenstr. 4, 64289 Darmstadt, E-Mail: [neubauer@sam.tu-darmstadt.de](mailto:neubauer@sam.tu-darmstadt.de)

### Einleitung

Am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM wird derzeit die inäquidistante Verzahnung entwickelt. Diese neuartige Verzahnung zeichnet sich durch eine unregelmäßige Anordnung der Zähne von Zahnrädern aus. Hierdurch wird das Geräusch, entstehend durch den Zahneingriff, verändert. Statt eines tonalen und lästigen Geräusches, wie bei konventionellen Verzahnungen („Getriebeheulen“), entsteht ein weniger lästiges Geräusch mit eher rauschartigem Charakter (siehe Beiträge zur DAGA 2016 [1] und Inter-Noise 2016 [2]). Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung der inäquidistanten Verzahnung ist jedoch die Fertigung von Prüfzahnradern zur experimentellen akustischen Überprüfung der Forschungsergebnisse. Einerseits muss eine gewisse Anzahl an individuell ausgelegten Zahnradpaaren gefertigt werden können, andererseits sollen die Fertigungskosten möglichst niedrig sein. Um diesen Anforderungen zu genügen, wird in diesem Beitrag untersucht, inwiefern sich mittels Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-gedruckte Zahnräder für die Untersuchung des Zahneingriffsgeräusches eignen. Das Druckverfahren wird allgemein vorgestellt, um anschließend auf den Herstellprozess der Zahnräder und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften im Speziellen einzugehen. An einem akustischen Getriebeprüfstand werden die mittels 3D-Druck hergestellten Zahnräder mit geometrisch identischen Referenzzahnradern (Stahl, Industriequalität) unter verschiedenen Betriebsbedingungen verglichen. Es wird dargestellt, welche Chancen und Risiken sich bei der akustischen Untersuchung 3D-gedruckter Zahnräder ergeben.

### Inäquidistante Verzahnung

Die inäquidistante Verzahnung ist eine am Fachgebiet SAM entwickelte neuartige Verzahnung, die das Zahneingriffsgeräusch von Zahnradgetrieben mindern kann. Die Verzahnung wird gezielt unregelmäßig ausgeführt, beispielsweise durch unregelmäßige Zahndicken und Zahnpositionen entlang des Umfangs. Ein Ausführungsbeispiel einer inäquidistanten Verzahnung ist in Abbildung 1 dargestellt.

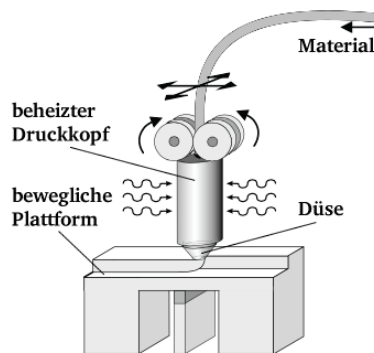


**Abbildung 1:** Beispiel einer inäquidistanten Verzahnung mit unregelmäßigen Zahnpositionen und Zahndicken

Durch diese Unregelmäßigkeiten erfolgt die Schwingungsanregung beim Betrieb von Zahnrädern mit inäquidistanter Verzahnung unregelmäßig. Es entsteht ein Geräusch, bei dem die tonalen Komponenten bei den Zahneingriffsfrequenzen deutlich verringert und gleichzeitig deren Seitenbänder angehoben werden. Der Geräuschcharakter entwickelt sich weg von einem tonalen („Getriebeheulen“) hin zu einem rauschartigeren. Darüber hinaus konnte auch ein verringerter Summenschalldruckpegel bei einer inäquidistanten Verzahnung nachgewiesen werden. Nähere Erläuterungen zur inäquidistanten Verzahnung sowie experimentelle Ergebnisse sind in den Beiträgen zur DAGA 2016 [1] und zur Inter-Noise 2016 [2] zu finden. Um weitere Forschungsergebnisse experimentell validieren zu können, muss eine Möglichkeit gefunden werden, Prüfzahnradern kosten- und zeiteffizient herzustellen.

### Generative Fertigungsverfahren

Generative Fertigungsverfahren, auch 3D-Druckverfahren, werden eingesetzt, um in der frühen Phase der Entwicklung bereits die Geometrie oder sogar die Funktion eines bisher nur digital vorliegenden Modells experimentell untersuchen zu können. Eine Vielzahl von Fertigungsverfahren sind derzeit gebräuchlich. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass eine vorliegende CAD-Datei zunächst digital in dünne Schichten diskretisiert wird (*Slice-Prozess*), um später im Bauprozess den schichtweisen Aufbau zu ermöglichen [3]. In den hier vorliegenden Untersuchungen wird das Fused Deposition Modeling-Verfahren (FDM-Verfahren) verwendet, da es eine besonders schnelle und kostengünstige Fertigung von individuellen Einzelteilen ermöglicht. Beim FDM-Verfahren wird ein thermoplastischer Kunststoff erhitzt und durch eine Düse linienförmig auf eine Bauplattform aufgebracht. Der Druckkopf wird dabei anhand der im Slice-Prozess definierten Bewegungsabläufe verfahren, um das Material schichtweise aufzubringen. In Abbildung 2 ist der Prozess des FDM skizziert.



**Abbildung 2:** Prinzipskizze des Fertigungsprozesses beim Fused Deposition Modeling [3]

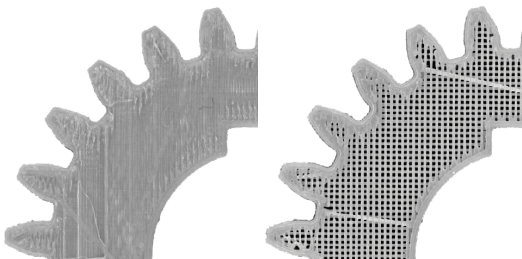
Die mechanischen Eigenschaften von mittels FDM hergestellten Bauteilen unterscheiden sich teils erheblich von denen vergleichbarer gegossener oder gefräster Bauteile. So kann beispielsweise die Zugfestigkeit bei 3D-gedruckten Bauteilen deutlich geringer ausfallen. Zudem entsteht durch das Herstellverfahren eine Anisotropie in den Bauteilen, die abhängig von der Richtung der Kunststoffextrusion beim Bauprozess ist [3]. Die Zugfestigkeit eines Bauteils normal zur Schicht kann um bis zu 30 % gegenüber jener entlang der Schicht verringert sein [4]. Idealweise wird der Bauprozess so durchgeführt, dass die spätere Hauptbelastungsrichtung entlang der Schichten ist, so auch in den hier vorgestellten Untersuchungen.

Eines der größten Probleme beim FDM ist der thermische Verzug von Bauteilen (*warping*). Eine neu aufgebrachte Schicht erstarrt und erfährt hierbei einen thermisch bedingten Schrumpfungsprozess. Eine zu einem späteren Zeitpunkt darauf aufgebrachte Schicht erfährt ebenso eine thermisch bedingte Schrumpfung, wodurch mit zunehmender Anzahl an Schichten immer stärkere Spannungen im Bauteil entstehen. Das daraus resultierende Biegemoment führt schließlich zu einer Wölbung des Bauteils, welche das Bauteil unbrauchbar macht, siehe Abbildung 3.



**Abbildung 3:** durch thermische Schrumpfung verzogenes (*warping*) und daher unbrauchbar gewordenes Bauteil

Die Spannungen, und damit auch die Gefahr von *warping*, werden am größten, wenn die Bauteile massiv mit Material ausgefüllt werden. Um die Gefahr zu verringern, besteht die Möglichkeit, nur die Außenkonturen eines Bauteils massiv zu drucken und im Inneren eine Stützkonstruktion anzufertigen, siehe Abbildung 4. Die Verwendung von Stützkonstruktionen verringert jedoch auch die ertragbare Last der Bauteile.



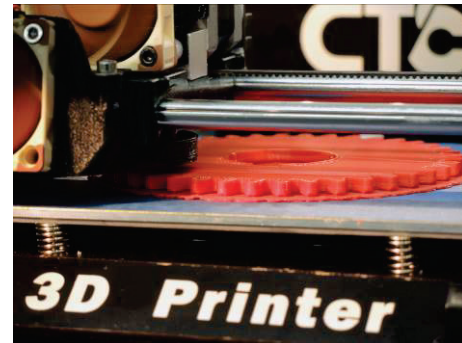
**Abbildung 4:** verschiedene Füllungsgrade (Schnitt); links: massives Zahnrad, rechts: Zahnrad mit Stützkonstruktion

Bezüglich akustischer Eigenschaften von 3D-gedruckten Bauteilen sind nur sehr wenige Untersuchungen bekannt. HAAS und KASULKE [5] haben das Schwingungsverhalten

von 3D-gedruckten Bauteilen durch Modalanalysen an Plattenstrukturen untersucht. Sie sind zu dem Schluss gekommen, dass das Schwingungsverhalten nur sehr eingeschränkt von 3D-gedruckten Platten auf konventionelle Stahlplatten übertragbar ist [5]. Untersuchungen der Akustik von 3D-gedruckten Zahnrädern sind nicht bekannt.

## Fertigung der Prüfzahnäder

Die für die hier vorgestellten Untersuchungen genutzten Zahnräder werden mittels FDM aus dem Grundwerkstoff Poly lactid (PLA) hergestellt. Ein Prüfzahnrad während des Druckvorgangs ist in Abbildung 5 zu sehen.

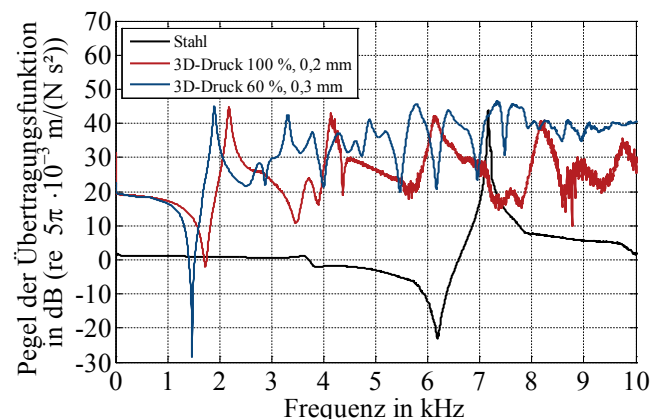


**Abbildung 5:** Prüfzahnrad während des Druckvorgangs

Insgesamt wurden acht verschiedene Kombinationen von Fertigungsparametern untersucht [6], wobei hier jedoch nur auf die Ergebnisse von zweien davon eingegangen wird. Es werden die Ergebnisse von Zahnrädern mit massiver Füllung und einer Schichtdicke von 0,2 mm sowie mit einem Füllungsgrad von 60 % und 0,3 mm Schichtdicke vorgestellt.

## Experimentelle Untersuchungen

In Analogie zu den Untersuchungen in [5] werden zuerst die strukturellen Eigenschaften der 3D-gedruckten Zahnräder mit denen der Referenzzahnräder aus Stahl verglichen. Hierzu werden die Zahnräder an einem Faden frei aufgehängt. An einer Stelle wird ein Beschleunigungssensor platziert, während an einer anderen Stelle mit einem Impulshammer eine Kraftanregung stattfindet. Die so ermittelten Übertragungsfunktionen sind in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Übertragungsfunktionen der 3D-gedruckten Zahnräder und des Referenz-Stahlzahnades [6]

Das Referenz-Stahlzahnrad unterscheidet sich einerseits in seinem Werkstoff, andererseits auch in seinem Fertigungsverfahren von den 3D-gedruckten Zahnradern. Es ist zu erkennen, dass das Stahlzahnrad (schwarz) eine erste Resonanz bei etwa 7,2 kHz aufweist, während die ersten Resonanzen der 3D-gedruckten Zahnradern (rot und blau) bereits bei etwa 1,9 kHz und 2,2 kHz auftreten. Die Resonanzfrequenz für das massive Zahnrad (rot) liegt etwas höher als jene des teilweise gefüllten Zahnrades (blau), was die höhere Steifigkeit des massiven Zahnrades zeigt. Im Bereich von Frequenzen bis 10 kHz treten bei den 3D-gedruckten Zahnradern etliche weitere Resonanzen auf. Weiterhin ist an der Breite der Peaks zu erkennen, dass die Dämpfung der 3D-gedruckten Zahnradern erheblich höher ist als jene des Stahlzahnrades. Insgesamt unterscheidet sich das Strukturverhalten der 3D-gedruckten Zahnradern deutlich von dem des Stahlzahnrades. Die direkte Vergleichbarkeit ist daher nicht gegeben.

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden an einem mechanischen Verspannungsprüfstand (siehe Abbildung 7) bei Drehzahlen von 0 bis 1500 U/min und einem Moment von 4 Nm durchgeführt. Das Messmikrofon wurde in 1 m Abstand seitlich zum Prüfstand positioniert.

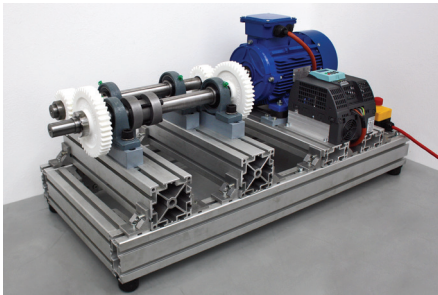


Abbildung 7: zur Untersuchung des Zahneingriffsgeräusches verwendeter mechanischer Verspannungsprüfstand

Um die Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse bei 3D-gedruckten Zahnradern sicherzustellen, wurden die Sätze der Zahnradern mit einem Füllungsgrad von 60 % und mit einer Schichtdicke von 0,3 mm insgesamt sechsfach hergestellt und unter gleichen Bedingungen untersucht. Die Messergebnisse sind in Form eines Ordnungsspektrums in Abbildung 8 dargestellt.

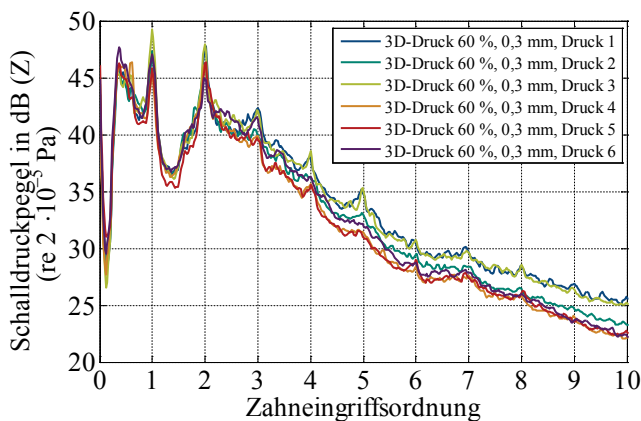


Abbildung 8: Untersuchung der Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse im Ordnungsspektrum bei mehrfachem Druck gleicher Zahnradensätze [6]

Die Kurven stimmen für alle der hergestellten Zahnradensätze sehr gut überein. Die Abweichungen bei beispielsweise der 1. Zahneingriffsordnung betragen maximal 3 dB, was jedoch auch auf Unsicherheiten bei der Höhe des aufgetragenen Moments liegen kann. Im Bereich höherer Ordnungen wird der Unterschied der Kurven deutlicher, die Übereinstimmung ist jedoch auch hier noch als gut zu bezeichnen. Insgesamt ist die Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse der 3D-gedruckten Zahnradern sehr gut.

Der direkte Vergleich zwischen den Referenz-Stahlzahnradern und den 3D-gedruckten Zahnradern ist in Abbildung 9 zu sehen.

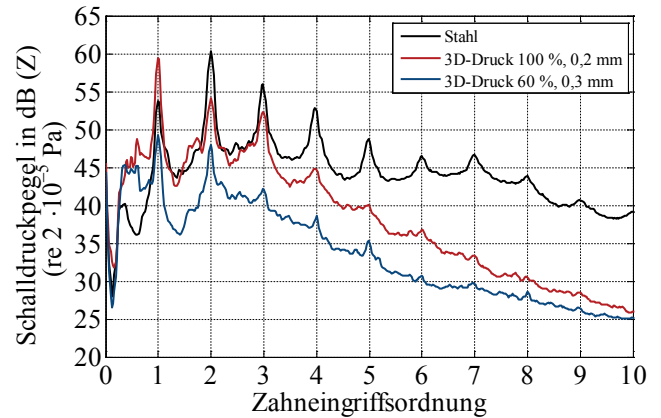
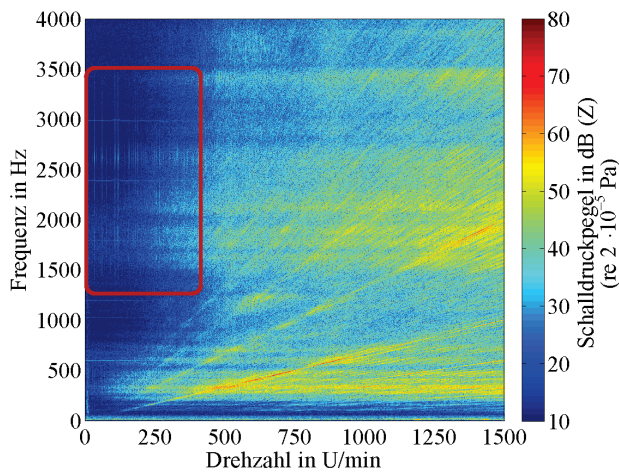


Abbildung 9: Vergleich der Referenz-Stahlzahnradern und der 3D-gedruckten Zahnradern im Ordnungsspektrum [6]

Es ist eine qualitative Ähnlichkeit zwischen den Kurven erkennbar. Bei den Referenz-Stahlzahnradern (schwarz) treten die Zahneingriffsordnungen jedoch bis in den hohen Ordnungsbereich deutlich hervor, während die Ordnungen bei den 3D-gedruckten Zahnradern (rot und blau) lediglich bis etwa zur sechsten Ordnung erkennbar sind. Im Bereich um die erste Ordnung und darunter sind die Schalldruckpegel der 3D-gedruckten Zahnradern höher als jene der Stahlzahnradern. Dies lässt sich mit den tieferen Resonanzfrequenzen der 3D-gedruckten Zahnradern erklären. Zu höheren Ordnungen hin fallen die 3D-gedruckten Zahnradern im Schalldruckpegel stark ab, was vermutlich auf die höhere Dämpfung zurückzuführen ist. Der Schalldruckpegel der massiven 3D-gedruckten Zahnradern (rot) ist deutlich höher als jener bei einem Füllungsgrad von 60 % (blau). Vermutlich ist dies auf die höhere Steifigkeit der massiven Zahnradern zurückzuführen. Insgesamt ergibt sich eine qualitative, jedoch nicht quantitative, gute Übereinstimmung zwischen dem Geräusch der Stahlzahnradern und dem der 3D-gedruckten Zahnradern.

In Abbildung 10 ist ein Campbell-Diagramm des Luftschalldrucks einer Messung von 3D-gedruckten Zahnradern mit 60 % Füllungsgrad zu sehen.



**Abbildung 10:** Campbell-Diagramm des Luftschalldrucks einer Messung von 3D-gedruckten Zahnrädern mit 60 % Füllungsgrad [6]

Bei niedrigen Drehzahlen fallen breitbandige impulsartige Anregungen auf (rote Markierung). Diese Anregungen sind auf ein knackendes Geräusch zurückzuführen, das beim Zahneingriff entsteht. Das Geräuschphänomen entsteht nur bei Zahnrädern, die nicht massiv ausgefüllt sind. Als mögliche Ursachen werden Relativbewegungen der Stützkonstruktion oder eine Ausbeulen der Flankenoberflächen vermutet. Aufgrund dieses Geräuschphänomens werden 3D-gedruckte Zahnräder, die nicht massiv aufgebaut sind, als ungeeignet für akustische Untersuchungen erachtet.

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurden Untersuchungen vorgestellt, die die Eignung 3D-gedruckter Zahnräder in Bezug auf akustische Untersuchungen des Zahneingriffsgeräusches bewerten. Hierzu wurden Referenzzahnräder aus Stahl in Industriequalität zugekauft, von denen 3D-gedruckte Duplikate angefertigt wurden. Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde zwischen massiven und zu 60 % ausgefüllten Zahnrädern sowie zwischen Schichtdicken von 0,2 mm und 0,3 mm unterschieden. Die Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse von 3D-gedruckten Zahnrädern ist als sehr gut zu bewerten. Das Strukturverhalten der 3D-gedruckten Zahnräder unterscheidet sich deutlich von jenem der Stahlzahnräder, sodass ein quantitativer Vergleich nicht sinnvoll erscheint. Im Ordnungsspektrum konnte gezeigt werden, dass ein qualitativer Vergleich zwischen Stahlzahnrädern und 3D-gedruckten Zahnrädern möglich ist. Bei den Untersuchungen wurde ein knackendes Geräuschphänomen bei nicht massiv gefertigten 3D-gedruckten Zahnrädern identifiziert, was die so hergestellten Zahnräder für akustische Untersuchungen unbrauchbar macht. Insgesamt sind 3D-gedruckte Zahnräder in massiver Ausführung geeignet, um qualitative Aussagen über das Geräusch beim Zahneingriff zu treffen und vergleichende Untersuchungen durchzuführen, sofern sich der Fertigungsprozess nicht ändert.

Im Anschluss an diese Untersuchung wird der am Fachgebiet SAM verwendete Fertigungsprozess beim 3D-Druck mittels FDM weiter verbessert, um 3D-gedruckte Zahnräder

in massiver Ausführung herstellen zu können, ohne dass Probleme mit thermischem Verzug (warping) auftreten. Wird dies erreicht, können 3D-gedruckte Zahnräder am Fachgebiet SAM für vergleichende Untersuchungen an der inäquidistanten Verzahnung verwendet werden, um deren Zahneingriffsgeräusch experimentell zu ermitteln und so Berechnungsergebnissen zu validieren.

## Danksagung

Viele der hier gezeigten Ergebnisse wurden im Rahmen der am Fachgebiet SAM durchgeführten Master-Thesis von Herrn Vincent Haberstroh erarbeitet. Die Autoren bedanken sich für die hervorragende Arbeit.

## Literatur

- [1] Neubauer, P., Bös, J. und Melz, T.: Inäquidistante Verzahnung zur Verringerung der Lästigkeit von Zahneingriffsgeräuschen. In: DAGA 2016 – 42. Jahrestagung für Akustik, 2016, S. 754–757
- [2] Neubauer, P., Bös, J. und Melz, T.: Inequidistant gearing used to reduce gear noise. In: 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering INTER-NOISE 2016, S. 3975–3983
- [3] Gebhardt, A.: 3D-Drucken – Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [4] 3D Matter: What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints? 2015, Online unter: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>, Zugriff am 14.03.2017
- [5] Haas, R. und Kasulke, B.: Schwingungsverhalten von 3D gedruckten Bauteilen übertragen. In: DAGA 2016 – 42. Jahrestagung für Akustik, 2016, S. 161–164
- [6] Haberstroh, V.: Akustische Untersuchung von 3D-gedruckten Zahnrädern. Master-Thesis, TU Darmstadt, 2017