Inäquidistante Verzahnung zur Verringerung der Lästigkeit von Zahneingriffsgeräuschen

Philipp Neubauer, Joachim Bös, Tobias Melz

TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt
E-Mail: neubauer@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

Geräusche mit tonalem Charakter werden vom Menschen als besonders lästig empfunden. Anders als Geräusche mit rauschartigem Charakter können sie vom Gehirn nur schlecht ausgeblendet werden. Konventionelle Verzahnungen von Stirnradgetrieben erzeugen durch die streng gleichmäßige Anordnung der Zähne entlang des Umfangs überwiegend die lästigen tonalen Geräuschanteile, welche als besonders störend empfunden werden. Bei dem hier vorgestellten Ansatz der inäquidistanten Verzahnung wird der Grundsatz einer gleichmäßigen (äquidistanten) Anordnung der Zähne entlang des Umgangs aufgehoben. Durch eine flexible Anordnung der Zähne kann das durch den Zahneingriff entstehende Geräusch gezielt so verändert werden, dass der tonale Geräuschcharakter verringert wird und so die Lästigkeit des Zahneingriffsgeräusches abnimmt. Es wird dargestellt, wie eine inäquidistante Verzahnung konstruktiv umgesetzt werden kann und welche Herausforderungen sich dabei ergeben. Erste experimentelle akustische Untersuchungen an einem Verspannungsprüfstand zeigen, dass bei einer Stirnradpaarung mit inäquidistanter Verzahnung neben der Lästigkeit auch die Lautheit und sogar der Summenschalldruckpegel des Zahneingriffsgeräusches verringert werden können.

Entstehung von Zahneingriffsgeräuschen

Bei allgemeinen Verzahnungen kämmen die Zähne zweier Zahnräder ineinander, wobei die Zahnflanken aufeinander abgleiten. Dabei entstehen Geräusche. Der Hauptanregungsmechanismus bei Zahneingriffsgeräuschen ist die veränderliche Verzahnungssteifigkeit. Je nach Drehwinkel befindet sich eine veränderliche Anzahl an Zahnpaaren im Eingriff. Da jedes Zahnpaar eine drehwinkelabhängige Zahnpaarsteifigkeit aufweist, ergibt sich mit der zeitlich veränderlichen Anzahl der Zähne im Eingriff auch eine zeitlich veränderliche Gesamtsteifigkeit des Zahneingriffes [1], siehe Abbildung 1.

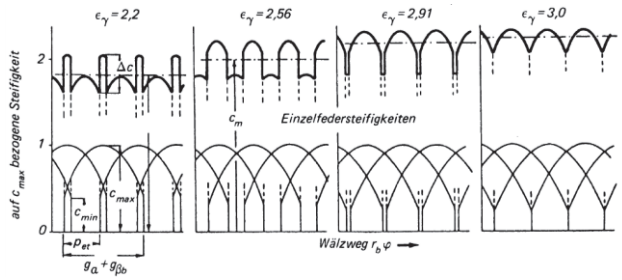

Abbildung 1: zeitlich veränderliche Verzahnungssteifigkeit beim Zahneingriff [1]

Der Mittelwert der zeitlich veränderlichen Anzahl an Zahnpaaren im Eingriff wird als Überdeckungsgrad ε_γ bezeichnet [1]. Da die momentane Überdeckung durch die regelmäßig angeordneten Zähne bei konventionellen Verzahnungen periodisch schwankt, entsteht eine periodische Schwankung des Anregungssignals. Andere Anregungsmechanismen wie Zahneingriffsstöße, Fertigungs- und Montagefehler erzeugen ebenfalls periodisch schwankende Anregungskräfte, abhängig von der streng regelmäßigen Anordnung der Zähne bei konventionellen Verzahnungen. Somit wird das Zahneingriffsgeräusch durch die Zahneingriffsfrequenz f_z, die sich aus der Drehzahl n und der Zähnezahl z ergibt (Gleichung 1), dominiert und erhält dadurch einen stark tonalen Geräuschcharakter [1].

$$f_z = n \cdot z \qquad \text{[Hz]} \qquad (1)$$

Tonale Geräusche in anderen Bereichen

In vielen Bereichen der Technik werden tonale Geräuschkomponenten bereits erfolgreich reduziert. Konventionelle Lüfter erzeugen tonale Geräuschkomponenten, indem die Lüfterschaufeln durch ihre Drehbewegung periodische Druckimpulse erzeugen, die als Luftschall abgestrahlt werden. Ein bekannter Ansatz zur Reduktion der Tonalität der von Lüftern erzeugten Geräusche basiert auf der unregelmäßigen (inäquidistanten) Verteilung von Lüfterschaufeln entlang des Umfangs [2,3].

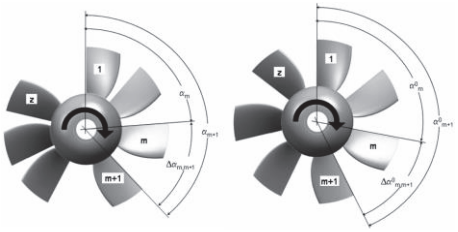

Abbildung 2: Lüfter mit inäquidistanter (links) und äquidistanter Schaufelaufteilung (rechts) [4]

Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich bei PC-Lüftern, Pkw-Lüftern und bei vielen anderen Lüfter-Anwendungen eingesetzt. Auch bei Pkw-Reifen wird dieses Prinzip fast ausnahmslos eingesetzt. Alle großen Hersteller variieren die Länge und die Position der Profilelemente ihrer Reifen entlang des Umfangs, um das durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt entstehende Geräusch möglichst wenig tonal zu designen. Die Idee einer Übertragung auf Zahnräder konnte lediglich in einer Patentschrift aus dem Jahre 1987 wiedergefunden werden [5], Forschungsergebnisse oder praktische Umsetzungen hierzu sind jedoch nicht bekannt.

Die inäquidistante Verzahnung

Bei Zahnradgetrieben greifen die Zähne, aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Zähne entlang des Umfangs, periodisch ineinander ein. Durch diesen periodischen Vorgang entstehen die tonalen Zahneingriffsgeräusche, die unter dem Namen Getriebeheulen (engl.: *gear whine*) bekannt sind. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Zähnen wird bei Zahnrädern Teilung genannt [1]. Allgemein wird bei konventionellen Verzahnungen eine möglichst gleichmäßige (*äquidistante)* Teilung angestrebt. Demnach gilt eine Abweichung von der ideal gleichmäßigen Teilung als Teilungsfehler mit negativen akustischen Eigenschaften. Was in der Literatur noch nicht betrachtet wurde, ist, dass eine gezielte und bewusste Variation der Teilung wiederum akustische Vorteile bietet. Eine Variation der Teilung entspricht einer Verschiebung einzelner Zähne entlang des Umfangs, wodurch konstruktionsbedingt eine Variation der Dicke einzelner Zähne entsteht – die *inäquidistante Verzahnung*.

Da es noch keine Erfahrungswerte zur optimalen akustischen Auslegung einer inäquidistanten Verzahnung gibt, wird ein aus der Literatur bekannter Ansatz für die Auslegung von Lüftern übernommen [6]. Entsprechend der inäquidistanten Verteilung von sechs Lüfterschaufeln in der Literatur wird auf dem Zahnrad eine Abfolge von sechs Zähnen analog zu den dort angegebenen Werten modifiziert, siehe Abbildung 3.

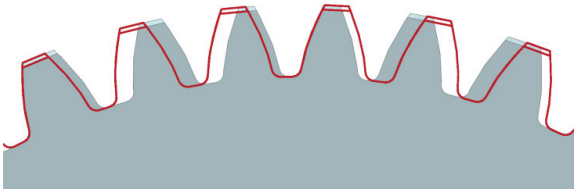

Abbildung 3: inäquidistante Verzahnung (grau) mit überlagerter äquidistanter Verzahnung (rot)

Bei der Paarung konventioneller (*äquidistanter*) Zahnräder kann jeder Zahn in jede Zahnlücke des gegenüberliegenden Zahnrades eingreifen. Bei der *inäquidistanten Verzahnung* hingegen müssen Änderungen der Verzahnung an einem Zahnrad entsprechend invers am anderen Zahnrad der Paarung durchgeführt werden. Ein Vergleich zwischen einer konventionellen äquidistanten und einer inäquidistanten Zahnradpaarung ist in Abbildung 4 dargestellt.

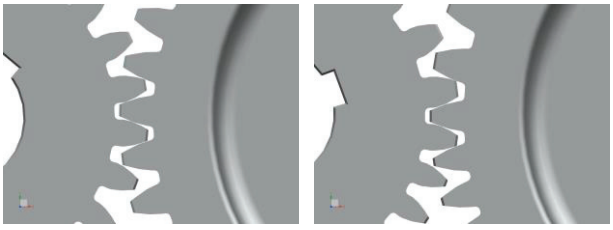

Abbildung 4: äquidistante (links) und inäquidistante Zahnradpaarung (rechts)

Es ist zu erkennen, dass jeder Zahn, der in seiner Dicke angepasst wird, auf dem gegenüberliegenden Zahnrad in eine angepasste Lücke treffen muss. Ein dicker ausgeführter Zahn des einen Zahnrades muss in eine entsprechend breiter ausgeführte Lücke im anderen Zahnrad eingreifen. Es passt somit nicht jeder Zahn des einen in jede Lücke des anderen Zahnrades. Um dennoch eine große Anzahl an Übersetzungsverhältnissen zu erzeugen, müssen sich die zuvor beschriebenen Muster entlang des Umfangs wiederholen. Bei der Paarung und der Montage muss dann lediglich darauf geachtet werden, dass die Muster richtig zueinander positioniert werden.

Prototypenbau und Prüfstandsaufbau

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Zahnradpaare konstruiert. Beide Zahnradpaare sind, abgesehen von der Verzahnung, geometrisch identisch. Bei einem Zahnradpaar wurde eine äquidistante und beim anderen eine inäquidistante Verzahnung angebracht. In Abbildung 5 sind die CAD-Modelle beider Zahnradpaarungen dargestellt.

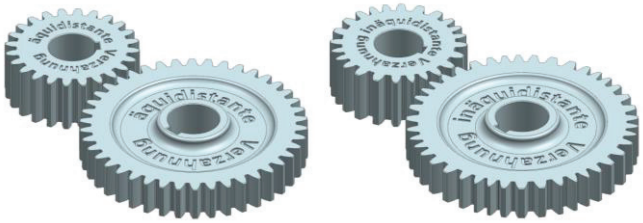

Abbildung 5: konstruiertes äquidistantes (links) und inäquidistantes (rechts) Zahnradpaar

Mittels selektiven Lasersinterns konnten Prototypen beider konstruierten Zahnradpaare hergestellt werden. Der Grundwerkstoff der Prototypen ist Polyamid. Die Herstellung der Prototypen lässt einen Direktvergleich zwischen einer äquidistanten und einer inäquidistanten Verzahnung zu. Durch die nahezu identische Konstruktion und das gleiche Herstellungsverfahren ist dieser Vergleich unabhängig von geometrischen Größen, dem Werkstoff und den Toleranzen des Herstellungsverfahrens.

Am Fachgebiet SzM wurde ein akustischer Verspannungsprüfstand aufgebaut, der zwei gleiche (je zwei äquidistante oder zwei inäquidistante) Zahnradpaare gegeneinander verspannt, sodass ein definiertes Drehmoment auf die Zahnräder wirkt, siehe Abbildung 6.

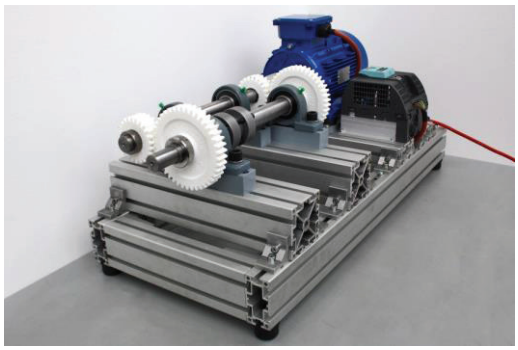

Abbildung 6: Zahnrad-Verspannungsprüfstand am Fachgebiet SzM zur akustischen Untersuchung der inäquidistanten Verzahnung

Angetrieben wird der Prüfstand durch einen Elektromotor mit Steuerelektronik. Die verschiedenen Verzahnungen können somit wiederholgenau an definierten Betriebspunkten akustisch miteinander verglichen werden.

Experimentelle akustische Untersuchungen

In den Experimenten werden die äquidistante und die inäquidistante Verzahnung unter gleichen Bedingungen nacheinander miteinander verglichen. Der Luftschall wird über ein Mikrofon erfasst. Bei der Auswertung der Messdaten werden die physikalische Größe des Summenschalldruckpegels (SPL, in dB(Z)) wie auch die psychoakustische Lautheit (in Sone) herangezogen. In Abbildung 7 sind die Messergebnisse der Untersuchung über einen Drehzahlbereich von 0 bis 1500 U/min dargestellt.

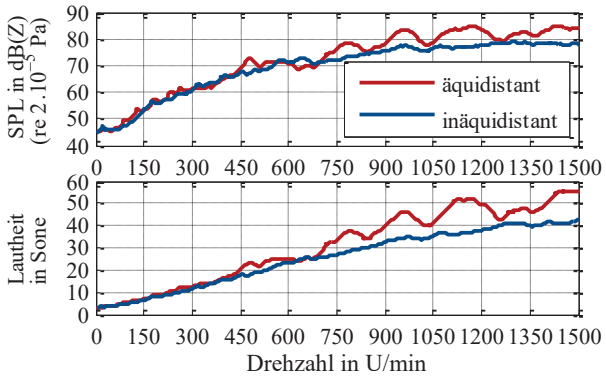

Abbildung 7: Messergebnisse einer direkten Vergleichsmessung zwischen einer äquidistanten und einer inäquidistanten Verzahnung bei 51 Nm Drehmoment

Es ist zu erkennen, dass die inäquidistante Verzahnung (blau) für die Lautheit (unten) über nahezu den gesamten Drehzahlbereich hinweg teils erheblich geringere Werte aufweist. Das Geräusch wird somit vom Menschen als weniger laut wahrgenommen und daher als weniger lästig empfunden. Auch für den Summenschalldruckpegel ist die Tendenz, dass die inäquidistante Verzahnung leiser ist, zu erkennen. Somit erzeugt die inäquidistante Verzahnung ebenfalls physikalisch einen geringeren Schalldruck. In Abbildung 8 ist das Campbell-Diagramm des Hochlaufs der äquidistanten Verzahnung dargestellt.

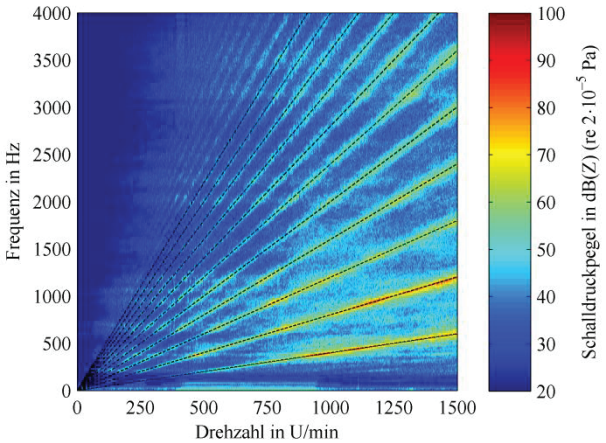

Abbildung 8: Campbell-Diagramm der experimentellen Untersuchungen der äquidistanten Verzahnung

Die dominanten Ordnungen der Zahneingriffsfrequenz, markiert durch schwarz gestrichelte Linien, sind bei der äquidistanten Verzahnung klar zu erkennen. Weiterhin wird die starke Anregung von Strukturresonanzen deutlich (Schnittpunkte zwischen den Ordnungen des Zahneingriffes und den horizontalen Strukturresonanzen). Die Anregung der Strukturresonanzen lässt sich ebenfalls in Abbildung 7 anhand des welligen Verlaufes der Kurven der äquidistanten Verzahnung (rot) erkennen. In Abbildung 9 ist das Campbell-Diagramm des Hochlaufes der inäquidistanten Verzahnung dargestellt.

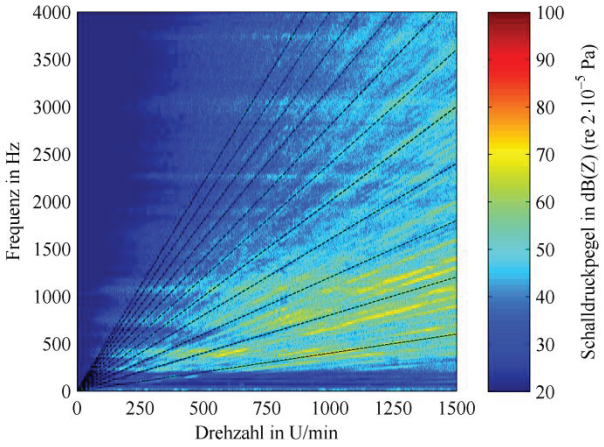

Abbildung 9: Campbell-Diagramm der experimentellen Untersuchungen der inäquidistanten Verzahnung

Es ist klar zu erkennen, dass sich die Charakteristik des Anregungsgeräuschs stark verändert hat. Die Zahneingriffsordnungen treten nicht mehr dominant hervor, sondern gehen in einem Gemisch von Seitenbändern unter. Die Tonalität des Geräusches sinkt somit erheblich. Auch werden insgesamt weniger hochfrequente Geräuschanteile erzeugt, sodass der Geräuschcharakter in einen eher tieffrequenten Bereich verschoben wird. Es wird erwartet, dass auch dies zur Reduktion der Lästigkeit des Zahneingriffsgeräusches beiträgt. Weiterhin wird deutlich, dass die Strukturresonanzen des Prüfstandes weniger stark angeregt werden, was auch durch den glatteren Kurvenverlauf in Abbildung 7 deutlich wird.

Vorteile und Herausforderungen der inäquidistanten Verzahnung

Primärer Vorteil der inäquidistanten Verzahnung ist die Verringerung der wahrgenommenen Lästigkeit und der Auffälligkeit des durch den Zahneingriff entstehenden Geräusches. Hierdurch kann der akustische Komfort für den Menschen erheblich verbessert werden. Durch den neuen Freiheitsgrad der inäquidistanten Verteilung der Zähne kann das Zahneingriffsgeräusch, wenn auch mit Einschränkungen, designt werden. Durch die harmonische und tonale Anregung bei konventionellen Verzahnungen werden bei bestimmten Drehzahlen die Resonanzen von angrenzenden Strukturen stark angeregt. Da bei der inäquidistanten Verzahnung die Anregung eher breitbandig ist, werden einzelne Frequenzen und somit einzelne Strukturresonanzen weniger stark angeregt. Eine Verringerung von Resonanzerscheinun-

gen ist die Folge. Dies reduziert wiederum die emittierten Geräusche.

Als Herausforderungen sind die Einschränkung bei der Wahl der Übersetzungsverhältnisse und die anspruchsvollere Fertigung zu nennen. Konventionelle Zahnräder erlauben beliebige Kombinationen von Übersetzungsverhältnissen (z. B. 43 zu 21 Zähnen). Das Prinzip der Musterwiederholung der Zahngeometrie erlaubt Übersetzungsverhältnisse nur im Rahmen der sich wiederholenden Muster. So können bei der inäquidistanten Verzahnung nur Vielfache des Musters als Übersetzung dienen (bei einem 6er-Muster z. B. 7·6=42 zu 4·6=24 Zähnen). Die Übersetzungsverhältnisse sind folglich eingeschränkt, aber trotzdem noch (im Rahmen der Musterwiederholung) in weiten Bereichen frei wählbar. Die Fertigung der inäquidistanten Verzahnung kann anspruchsvoller und kostenintensiver als die der konventionellen Verzahnung sein. Prinzipiell sind die gleichen Herstellungsverfahren möglich, jedoch müssen die bei den Zahnradherstellern bereits vorhandenen Werkzeuge angepasst werden. Bei einer Herstellung der Zahnräder durch Gießen oder Sintern hingegen ergibt sich keinerlei Einschränkung gegenüber der konventionellen Verzahnung.

Zusammenfassung und Ausblick

Bei allgemeinen Zahnradpaarungen kann durch eine inäquidistante Anordnung der Zähne entlang des Umfangs eine Verringerung der Lästigkeit des emittierten Geräusches erreicht werden. Es wurden theoretische Vorüberlegungen, CAD-Konstruktionen, Prototypenbauten und Experimente durchgeführt. Alle diese Schritte zeigen, dass die prinzipielle Idee der inäquidistanten Verzahnung funktioniert und das Geräusch tatsächlich weniger lästig ist als bei konventionellen äquidistanten Verzahnungen.

Die weitere Forschung an der inäquidistanten Verzahnung soll die ersten vielversprechenden Schritte weiter verfolgen. So sollen die erstellten Muster für die Verteilung der Zähne entlang des Umfangs weiter optimiert werden, sodass die Lästigkeit des Zahneingriffsgeräusches weiter reduziert werden kann. Weiterhin soll die inäquidistante Verzahnung auf verschiedenste Verzahnungstypen (Planetengetriebe, Schrägverzahnungen, …) übertragen werden. Die Potenziale der Idee sollen voll ausgeschöpft werden, sodass diese auf praktische Anwendungsfälle übertragen und dort validiert werden können.

Literatur

[1] Haberhauer, H. und Bodenstein, F.: Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014

[2] Carolus, T.: Ventilatoren: Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2013

[3] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009

[4] Cattanei, A., Ghio, R. und Bongiovì, A.: Reduction of the tonal noise annoyance of axial flow fans by means of optimal blade spacing. Applied Acoustics 68 (2007) 1323–1345

[5] Lange, B.: Verzahnte Maschinenelemente zur Übertragung von Drehbewegungen. Patentschrift DE3533743A1, Bundesdruckerei, Berlin, 1987

[6] Mellin, R. C. und Sovran, G.: Controlling the Tonal Characteristics of the Aerodynamic Noise Generated by Fan Rotors. Journal of Basic Engineering 92 (1) 143–154, 1970