

Alternatives Verfahren zur Körperschallanalyse am Beispiel der Zahnradstruktur

Engel, K. ; Schmidt, A.

Mit Zunahme geräuscharmer Konstruktionen gewinnt auch im Bereich der Antriebstechnik die Anforderung "lärmarm" neben der übertragbaren mechanischen Leistung und der Gleichförmigkeit der Drehbewegung zunehmend an Bedeutung. Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Ableitung von konstruktiven Maßnahmen, sogenannte Impedanzelemente, zur Verminderung der Körperschalleitung des Zahnradkörpers, um so die Schallentstehungskette an einer bisher wenig beachteten Stelle, unter Wahrung technisch und wirtschaftlich sinnvoller Rahmenbedingungen, zu durchbrechen.

Not only torque and smooth power transmission but noise reduction is of great importance in power train design. Measures to reduce structure-borne sound transmission in gear structures are developed. We observed noise generation at a point not usually observed, considered impedance elements for breaking the noise chain, and arrived at a technically and economically practical solution for noise reduction.

1. Einleitung

Eine exakte analytische Lösung der Körperschalleitung in Bauteilen und Strukturen ist auf absehbare Zeit nicht möglich. Zur Lösung der Aufgabe wird daher die Tatsache genutzt, daß Körperschallwellen den physikalischen Gesetzen und Eigenschaften aller mechanischen Wellen unterliegen. Somit können Betrachtungen auf dem Niveau mechanischer Beanspruchungswellen mit merklichen Spannungs- und Verformungswirkungen analog auf das Verhalten der Strukturen bei Körperschallübertragung angewendet werden. Grundgedanke dieses Ansatzes bildet der kombinierte Einsatz von dynamischer Spannungsoptik und Körperschallmessungen zur Analyse des Körperschalleitungsverhaltens. Im Rahmen der Ähnlichkeitsmechanik werden an optischen Modellen Wege gesucht, wie Körperschallwellen durch gezieltes Einbringen von Diskontinuitäten in den Übertragungs-

weg gestreut, gebeugt und reflektiert werden können, um so die Weiterleitung auf die Getriebewelle und abstrahlfähige Fläche des Getriebegehäuses zu vermindern oder bezüglich der Frequenz zu verändern. Diese neuen Ansatzpunkte für die Lärminderung in Antriebssträngen werden exemplarisch an dem Element des krafterregten Zahnradkörpers im Modellversuch herausgearbeitet und durch Körperschallmessungen an realen Zahnradstrukturen verifiziert.

2. Körperschall

2.1 Analyse der Schallentstehungskette

Zahnradgetriebe überführen einen Teil der übertragenen mechanischen Leistung durch kinematische Störungen im Zahneingriff in Schwingungsenergie. Diese wird durch Körperschalleitung über die Zahnradkörper, die Wellen und die Lager auf das Getriebegehäuse und das Fundament übertragen und als Luftschall abgestrahlt. Darüber hinaus geht mit dem Zahneingriff aber auch eine direkte Abstrahlung von Luftschall in das schallharte Getriebegehäuse einher; welcher über Öffnungen im Gehäuse (Gehäusebelüftungen, Wellenabdichtungen) in die Umgebung gelangen kann. Dieser Anteil beträgt jedoch nach Untersuchungen von /1, 2/ im Mittel nur 4 Prozent der gesamten Schalleistung eines Getriebes.

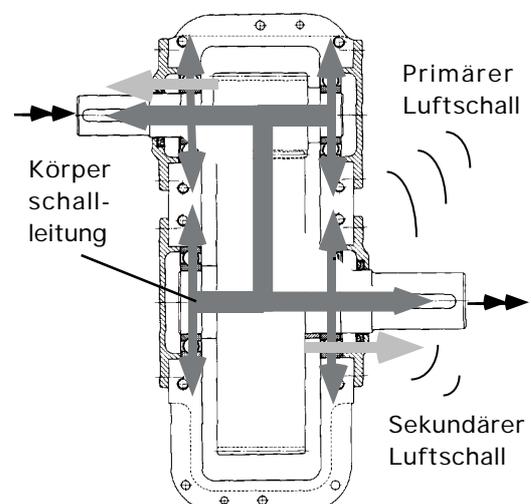


Bild 2.1.1: Schallentstehungskette

In **Bild 2.1.1** sind die Wege der inneren Schallentstehung eines Verzahnungsgetriebes zusammengefaßt. Kraft- und Arbeitsmaschinen im Antriebsstrang bewirken zusätzlich von außen einen Eintrag von Schwingungsenergie in das Getriebe, die das Schwingungs- und Abstrahlverhalten stark beeinflussen /1, 2/. Eine gezielte Geräuschoptimierung erfordert die Kenntnis der Anregungs- und Übertragungsmechanismen und der bestimmenden Einflußgrößen. Die einflußnehmenden Parameter auf die abgestrahlte Schalleistung sind schematisch in **Bild 2.1.2** zusammengefaßt.

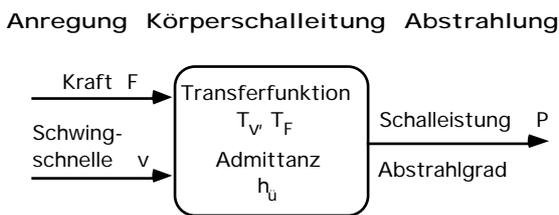


Bild 2.1.2: Einflußgrößen des Geräuschverhaltens

Die innere Geräuschregung von Verzahnungsgetrieben erfolgt vorwiegend durch Stoßeffekte, lastabhängige und herstellungsbedingte Flankenabweichungen, wechselnde Dämpfung und wechselnde Verzahnungssteifigkeiten über dem Drehwinkel. Diese kinematischen Störungen im Zahnengriff überlagern sich dem als quasistatisch anzusehenden Vorgang der Drehmomentenübertragung in Form wechselnder Anteile der Betriebskraft $F(\omega)$. Die abgestrahlte Luftschalleistung P eines Getriebes ist der abstrahlfähigen Gehäuseoberfläche A und deren Abstrahlgrad σ direkt proportional, vgl. **Gl.(2-1-1)**.

$$P(\omega) = \rho_L c_L F^2(\omega) h_u^2 \sigma(\omega) A \quad (2-1-1)$$

Aus der Kenntnis der bestimmenden Einflußgrößen auf das Getriebegeräusch lassen sich die konstruktiven Ansatzpunkte für Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Geräuschreduzierung ableiten:

- Reduzierung der Anregungskraft
- Reduzierung der Körperschalleitung
- Reduzierung der Gehäuseabstrahlung

2.2 Anregungsmechanismen der Verzahnung

Die Betrachtung der Anregungsmechanismen erfordert eine Unterscheidung zwischen der inneren

Anregung durch das Eingriffsverhalten der Verzahnung und einer äußeren Anregung durch Fremdeinwirkung. Die Anregungsmechanismen treten gemeinsam auf und überlagern sich in ihrer Wirkung. Äußere Anregungen durch ungleichförmig laufende An- und Abtriebsaggregate verursachen periodische Beanspruchungsfrequenzen in der Größenordnung der An- und Abtriebsfrequenz bzw. deren Harmonischen. Für eine repräsentative Betrachtung der Körperschallanregung soll hier insbesondere eine Betrachtung der inneren Anregungsmechanismen erfolgen /1, 2/. Nachfolgend werden die Kriterien Eintrittsstoß, Parameteranregung, Verzahnungsabweichungen sowie lastabhängige Eingriffsstörungen näher erläutert.

Der Eintrittsstoß ist eine lastabhängige Anregungsform. Im unbelasteten Zustand erfolgt der erste Zahnkontakt in der theoretischen Sollposition durch einen tangential gleitenden Zahneintritt. Unter Last entsteht eine Teilungsabweichung der Zähne im Eingriff gegenüber den am Eingriffsbeginn lastfrei einlaufenden Zähnen. Durch die gestörten kinematischen Verhältnisse bildet sich eine von der Eingriffsebene abweichende Normalebene aus, in der die Projektionen der Absolutgeschwindigkeiten der beiden Räder nicht übereinstimmen und das globale Übersetzungsverhältnis verletzt. Die Differenz der projizierten Absolutgeschwindigkeiten erzeugt einen körperschallanregenden Kraftimpuls und wird als Stoßgeschwindigkeit bezeichnet.

Hinsichtlich der parametrischen Einflußgrößen gilt es zu beachten, daß sich der Betrag der Zahneinzelformung während des Eingriffs für das treibende Ritzel vom Kopfeingriffspunkt bis zum Fuß (am Rad in umgekehrter Richtung) ändert. Dabei ist der Mittelwert der Einzelfedersteifigkeiten mit den wirksamen Massen maßgebend für die Lage der Hauptresonanz des Getriebes /2/.

Verzahnungsabweichungen haben insbesondere bei niedrigen spezifischen Belastungen einen wesentlichen Einfluß auf die Geräuschregung. Abweichungsformen wie die Teilungsabweichung, die Flankenformabweichung und die Flankenlinienabweichung, aber auch Verzahnungsabweichungen höherer Ordnung (z.B. Hülschnittabweichungen) üben eine nennenswerte Körperschallanregung aus. Aufgrund des Fertigungsprozesses durch Ab-

wälzfräsen sind die Abweichungen drehwinkelproportional, stehen aber nicht immer in einem ganz-zahligen Verhältnis zur Eingriffsteilung und können so für das Auftreten von "Geisterfrequenzen" verantwortlich sein /1, 2/.

Der Zahneingriff und die Lastverteilung werden unter hohen Belastungen maßgeblich durch die Federsteifigkeiten der Wellen, Lager und Gehäusebauteile mitbestimmt /2/. Die kinematischen Eingriffsverhältnisse ändern sich über der Eingriffsbreite und entlang der Eingriffslinie und verursachen durch zusätzliche Flankenlinien-, Flankenwinkelabweichungen und Verlagerungen des Eingriffbeginns und Eingriffendes eine verstärkte Körperschallanregung.

2.3 Grundlagen der Körperschalleitung

Zeitveränderliche äußere Kräfte rufen in Festkörpern räumlich und zeitlich veränderliche Verformungen hervor, die sich in Form von Wellen mit charakteristischer Ausbreitungsgeschwindigkeit fortpflanzen. Die äußere Anregung bewirkt einen von der Anregungsstelle ausgehenden Energietransport, der in Form kinetischer und potentieller Energie in Erscheinung tritt. Kompression und Dilatation rufen in allen Medien Dichtewellen mit longitudinaler Bewegung (Longitudinalwellen) hervor. In Festkörpern können im Gegensatz zu Fluiden Schubspannungen übertragen werden. Hierdurch können weitere Wellenarten auftreten, deren wesentliche Formen die Transversal-, die Rayleigh-Wellen und die für Abstrahlung von Körperschall maßgebenden Biege-Wellen sind. Die Longitudinalwelle bewirkt eine Volumenänderung der Massenelemente, Kompression oder Dilatation, je nach Art der äußeren Störung. Dabei erfolgt die Teilchenauslenkung in Ausbreitungsrichtung. Die Transversalwelle dagegen bewirkt eine Schubdeformation der Masseteilchen ohne Volumenänderung. Die Auslenkung erfolgt quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle. An Reflexionstellen im Körperschalleitungsweg können Umwandlungen der einen Wellenart in eine andere auftreten.

3. Körperschallminderungsmaßnahmen

Im Zentrum der Betrachtungen steht der Zahnrad-

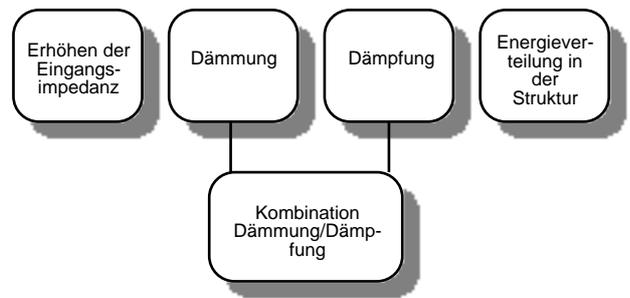


Bild 3.1: Maßnahmen zur Körperschallminderung

körper als Konstruktionselement. Neben die Anforderungen der Drehmoment- und Kraftleitung sowie der Verzahnungszentrierung tritt der Wunsch nach einer Reduzierung der Körperschalleitung. Ziel ist die akustische Entkopplung der angeregten Verzahnung von der Getriebewelle. **Bild 3.1** zeigt die heute zum Stand der Technik gehörenden konstruktiven Maßnahmen zur Verringerung der Körperschallemission.

3.1 Dämmung von Körperschall

Grundprinzip der Körperschalldämmung ist die Reflexion der Körperschallwellen an Störungsstellen im Ausbreitungsweg. An Diskontinuitäten im Körperschallweg wird die Energie der Körperschallwellen teilweise reflektiert und in der Weiterleitung verringert. Die Dämmwirkung ist abhängig von der Änderung der mechanischen Impedanz an der Störstelle und der Wiederholhäufigkeit der Störstellen im Körperschalleitungsweg. Reflexionen von Körperschallwellen treten an Unstetigkeitsstellen in der mechanischen Struktur z. B. an Querschnittsänderungen, Massenanhäufungen, Verzweigungen, elastischen Zwischenschichten und an Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien auf. Eine Zielvorstellung der Körperschalldämmung ist die Eingrenzung der Körperschallenergie auf einen beschränkten Bauteilbereich. Der reflektierte Energieanteil durchläuft mehrfach den Bauteilbereich zwischen der Anregungsstelle und der Dämmmaßnahme und wird durch vorhandene Dämpfungsmechanismen dem System entzogen. Andererseits kann durch Streuung der Körperschallwellen an inneren Diskontinuitäten eine weiträumige Verteilung der Körperschallenergie zur Senkung des lokalen Energieniveaus erfolgen. Zur mathematischen Beschreibung des schwingungsmechanischen Isolationsvermögens führt /5/ eine Admittanzkonzeption

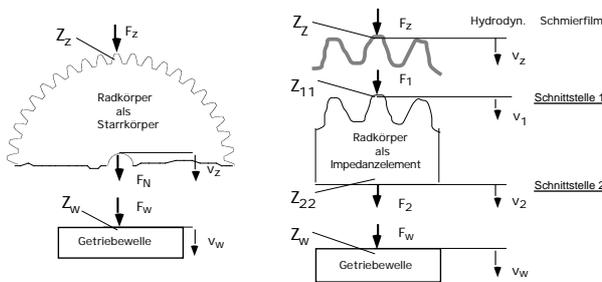


Bild 3.1.1: Impedanzmodell des Radkörpers

in die Berechnung ein, die hier auf den Zahnradkörper angewandt vorgestellt wird. Der Ansatz ermöglicht, durch Messung der Ein- und Übertragungsimpedanzen der miteinander gekoppelten Bauteile, eine experimentelle Optimierung. **Bild 3.1.1 (links)** zeigt schematisch das Zahnradkörper-Getriebewelle-System. Auf die Verzahnung wirkt die Anregungskraft F_z . Durch die Nachgiebigkeit der Verzahnung und des Zahnradkörper-Getriebewelle-Systems weicht der zeitliche Kraftverlauf am Eintritt in den Radkörper von der Anregungskraft ab. Die Indizierung der Übertragungsimpedanzen gibt den Ort der Kraft und der Schnellmessung an. Ohne Isolationselement wird das System mit der Eingangsimpedanz der Welle Z_w abgeschlossen. Berücksichtigt man die Massenbelegung des Radkörpers und die hydrodynamische Schmierung im Kontakt (**Bild 3.1.1 rechts**), so kann nur im statischen Beanspruchungsfall $F_1 = F_2$ angesetzt werden. Im Frequenzbereich kann infolge der Massenbelegung ein Kraftdefizit vorliegen. Die Schwinggeschwindigkeiten v_1 und v_2 an den Schnittstellen werden durch die gemeinsam einwirkenden Kräfte F_1 und F_2 hervorgerufen. Obiger Ansatz ermöglicht die Ableitung von Isolationsmaßnahmen unter gegebenen Randbedingungen, danach gilt für das Verhältnis aus eingeleiteter Kraft an der Getriebewelle mit bzw. ohne Isolationsmaßnahme der in **Gl. (3-1-1)** dargestellte Zusammenhang.

$$\frac{F_{W \text{ mit}}}{F_{W \text{ ohne}}} = \frac{(Z_{11} + Z_w)(Z_{11} + Z_z) - Z_{12}^2}{Z_{21}(Z_w + Z_z)} \quad (3-1-1)$$

3.2 Körperschalldämpfung

Ohne das Vorhandensein von Dämpfung verursacht eine beliebige Dämmungsmaßnahme in Bauteilen endlicher Größe einen Anstieg der Körperschallenergie vor der Maßnahme, der exakt der Dämmwirkung der Maßnahme entspricht. Für eine

zu betrachtende Stelle hinter der Dämmungsmaßnahme tritt daher keine Änderung des Körperschallniveaus ein. Nur in Kombination mit Dämpfung ist für Bauteile endlicher Größe eine Abnahme des Körperschallpegels zu erzielen. Die Körperschalldämpfung beruht auf der irreversiblen Umwandlung von Schwingungsenergie in andere nicht mehr auf das Schwingensystem einwirkende Energieformen. Dieser auch als Energiedissipation bezeichnete Vorgang bewirkt mit der Zeit abnehmende Amplituden bei freien Schwingungen und endliche Amplitudenhöhen erzwungener Schwingungen in Resonanzbereichen. Eine Erhöhung der Dämpfung kann aber auch eine Amplitudenverstärkung bewirken. Die Dämpfungswerte üblicher Getriebeausführungen erreichen ein Lehrsches Dämpfungsmaß von 5 bis 10%. **Bild 3.2.1** gibt einen Überblick über die am Zahnradkörper wirksamen Strukturdämpfungsmechanismen.

Die unterschiedlichen wirksamen Dämpfungsme-

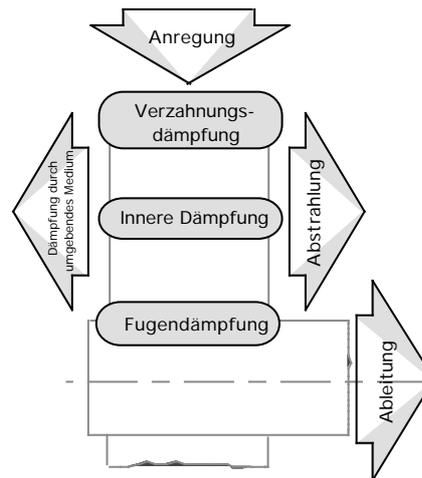


Bild 3.2.1: Dämpfungsmechanismen am Zahnradkörper

chanismen besitzen einen unterschiedlichen Einfluß auf die Ausprägung der Resonanzamplituden. In der Torsionsschwingung überwiegt der Einfluß der Torsionsdämpfung der Wellen; die Biegedämpfung der Wellen und die Lagerdämpfung sind hingegen zu vernachlässigen. Gemessene Dämpfungswerte der Torsionsschwingungen deuten auf den Einfluß der Wellen-Naben-Verbindung hin. In der Hauptresonanz überwiegt der Einfluß der Verzahnungsdämpfung. Die Ableitung von Energie aus dem betrachteten Bauteil bewirken die Verlustfaktoren der Ableitungsdämpfung in Verbindung mit der Körperschallleitung und der Strahlungsdämpfung über die Luftschallabstrahlung. Den geringsten An-

teil an der Dämpfung bildet die innere Dämpfung üblicher Zahnradwerkstoffe. Die Verzahnungsdämpfung setzt sich aus der inneren Werkstoffdämpfung der angeregten Zähne, der Dämpfung im Bereich des Zahnfußes und der Dämpfung im Bereich der elastisch verformten Zahnflanke zusammen. Die maßgebliche Größe bildet das Schmiermittel. Die Verzahnungsdämpfung beeinflusst die Hauptresonanz und vereinzelt zugehörige Vorresonanzen. Die Torsionsresonanz und die Lagerresonanzen bleiben unbeeinflusst. Die werkstoffspezifische innere Dämpfung beruht auf mikrophysikalischen Effekten im atomaren und molekularen Bereich. Die in der Zahnradtechnik üblichen Strukturwerkstoffe besitzen eine geringe innere Dämpfung. Die Fügstellendämpfung wird von Relativbewegungen der Kontaktflächen infolge unterschiedlicher elastischer Verformungen hervorgerufen. Die Relativbewegungen resultieren aus tangentialer Makroschlupf. Eine Vorausberechnung der Dämpfungseigenschaften ist durch ungenügende Modelle noch recht unsicher. Der spezifische Verschleißzustand, plastisches Fließen, Korrosion und die für eine wirtschaftliche Fertigung notwendigen Toleranzen führen zu großen Streuungen der Ergebnisse. Die Wirkung verschiedener Arten der Zusatzdämpfung ist in starkem Maße von der einwirkenden Wellenart abhängig. Die Dämpfung von Longitudinalwellen findet in der Praxis nur in Sonderfällen Anwendung. In weitaus stärkerem Maße wird die Dämpfung der Abstrahlung von Körperschall durch Biegewellen in der Literatur behandelt /3, 4/.

4. Experimentelle Untersuchungsmethodik

4.1 Dynamische Spannungsoptik

Die Spannungsoptik ist ein trägheitsloses experimentelles Verfahren der optischen Ganzfeldspannungsanalyse. Die Untersuchungen erfolgen an Modellen aus einem spannungsoptisch aktiven Material im Reflexionsverfahren. Unter Wahrung der Ähnlichkeitsgesetze können auf Realteile übertragbare Untersuchungen unter statischen und dynamischen Beanspruchungen durchgeführt werden. Bei einer überlagerten statischen und dynamischen Beanspruchung erfolgt eine Superposition beider Komponenten.

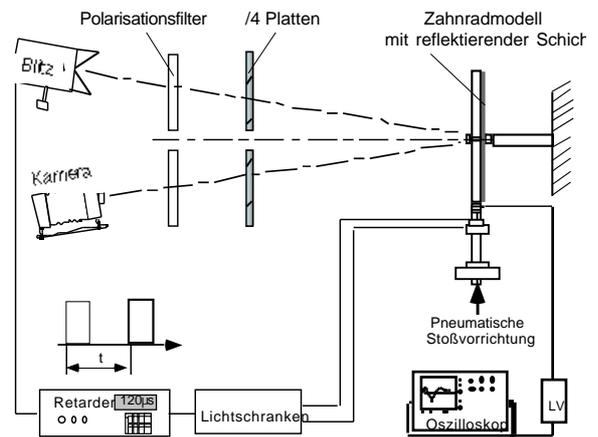


Bild 4.1.1: Stoßuntersuchungen im Reflexionsverfahren

Für die Analyse des Ausbreitungs- und Reflexionsvorganges der Körperschallwellen wurde das von Kuske entwickelte Verfahren der verzögerten Einzelblitze eingesetzt. Der verwendete Versuchsaufbau ist in **Bild 4.1.1** dargestellt. Die breitbandige Stoßanregung wird durch eine pneumatische Stoßvorrichtung aufgebracht. Eine Lichtschranke im oberen Teil des Schießrohres liefert beim Durchlauf der Kugel das Triggersignal für die stufenlose Verzögerungseinrichtung. Nach Ablauf der voreingestellten Verzögerungszeit wird ein Blitz ausgelöst. Zur Wiedergabe der Einbaubedingungen werden die Zahnradmodelle auf einer starr befestigten Achse eigenspannungsfrei aufgespannt. Unter der Voraussetzung exakt reproduzierbarer Stoßanregungen kann damit jeweils ein diskreter Zeitpunkt des dynamischen Beanspruchungsvorganges als Momentaufnahme photographisch festgehalten werden. Der zeitliche Ablauf des Vorganges kann durch Variation der Verzögerungszeit in einer Serie von Einzelbildern dokumentiert werden.

Für die Untersuchung des frequenzselektiven Verhaltens wurde eine harmonische Anregung der Modelle mittels eines elektrodynamischen Schwingungserregers vorgenommen. Das Modell wird in einem geschlossenen Regelkreis mit einer konstanten frei definierbaren Kraftamplitude bis maximal 1 kN in einem Frequenzbereich bis 4 kHz angeregt. Die frequenzselektiven Untersuchungen wurden im Druck-Schwellbereich vorgenommen. Das zu übertragende Drehmoment wurde durch eine statische Vorspannung des Modells mit überlagerter dynamischer Amplitude simuliert. Das Superpositionsprinzip gestattet eine getrennte Betrachtung von quasi-statischen und dynamischen Beanspruchungsvor-

gängen. Der Körperschalleitungsvorgang zwischen Anregungsstelle und Nabe wird durch das Auftreten einer spezifischen Phasendifferenz geprägt. Durch den Einsatz eines Stroboskops und die Wahl von Blitzfrequenzen um die Anregungsfrequenz kann der gesamte Schwingungsvorgang einer foto- bzw. videotecnischen Betrachtung zugänglich gemacht werden. Für ganzzahlige vielfache Blitzfrequenzen der Anregungsfrequenz können harmonische Oberwellen detektiert werden.

4.2 Piezosensorische Messungen

Neben der dynamischen Spannungsoptik werden im Rahmen der Körperschallanalyse auch punktuell messende Verfahren eingesetzt. Dabei werden insbesondere lokal, zeitliche Änderungen einer Zustandsgröße auf einer Struktur erfaßt. Neben dem zeitlichen Verlauf des Krafteinleitungssignals an der Zahnflanke werden die Lagerreaktionen der Zahnradmodelle auf der Welle mittels piezoelektrischen Kraft- und Momentenaufnehmern in einer feststehenden Meßachse erfaßt.

4.3 Modellvarianten

Die Untersuchungen gliedern sich in die Bereiche der Eingangsimpedanz, der Körperschalldämpfung und -dämpfung. In spezifischen Modellvarianten wurde eine gestaltungsgerechte Anpassung der Körperschallminderungsmaßnahmen an den Anwendungsfall Zahnradkörper vorgenommen, um grundsätzliche Aussagen über das Körperschallverhalten abzuleiten. **Bild 4.3.1** zeigt einige charakteristische Geometrien aus den verschiedenen betrachteten Gruppen. Zur Verbesserung der Körperschalldämpfung wurden mehrere unterschiedliche Zielrichtungen verfolgt:

- Durch Streuung und Beugung der Wellenfronten an kreislochförmigen Diskontinuitäten kann die Körperschallenergie auf einen größeren Bereich verteilt werden, wodurch ein Absinken des spezifischen Energieniveaus zu erwarten ist.
- Das Streuungs- und Reflexionsvermögen der Festkörperwellen an konvexen Diskontinuitäten wurde an Kreisnut-, Labyrinth- und Zusatzmassen-Varianten untersucht. Parameter bildeten unterschiedliche Radien und Querschnittsge-

staltungen der Störstellen.

- Das Interferenzverhalten sich verjüngender Bauteilbereiche mit konkaver oder kreissegmentförmiger Formgebung. Durch die Überlagerung gleichartiger Wellenfronten entstehen in sich verjüngenden Strukturen spannungsfreie Zonen.

Die innere Dämpfung der Werkstoffe verringert mit zunehmender Entfernung von der Quelle die Körperschallamplituden. Durch mehrfache Reflexion an Diskontinuitäten im Ausbreitungsweg wird die effektiv von den Körperschallwellen zurückgelegte Entfernung vergrößert, so daß alle Modell-Varianten zur Untersuchung der Körperschalldämpfung gleichzeitig den Effekt der Körperschalldämpfung ausnutzen. In den Untersuchungen zur Körperschalldämpfung wurden gezielte Aussagen zum Einsatz hochdämpfender Zusatzwerkstoffe und zur Hierarchie der zu bedämpfenden Bereiche des Radkörpers erarbeitet. Durch Einsatz versteifender Zusatzringe auf dem Radkörper sollte das Verbesserungspotential von trägen Massen zur Verminderung der Körperschalleinleitung und Beruhigung der Struktur untersucht werden.

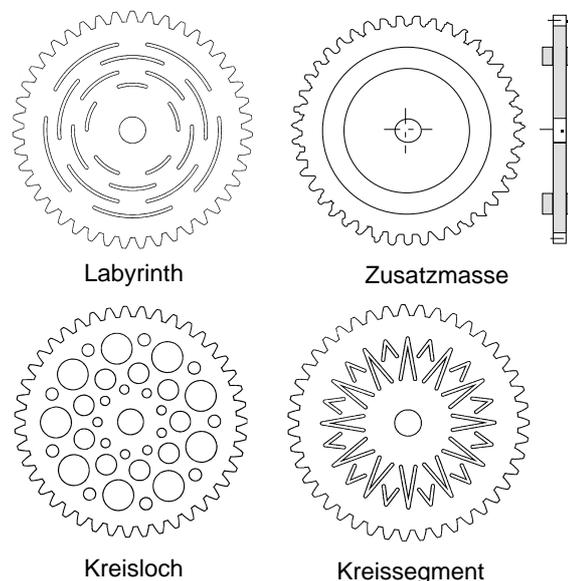


Bild 4.3.1: Beispiele der Modellvarianten

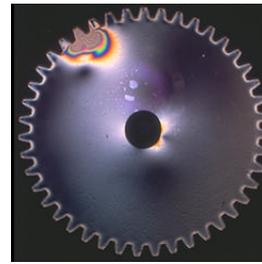
5. Ergebnisse der Modellversuche

Zur Beurteilung des Körperschallübertragungsverhaltens werden im Rahmen der punktuellen piezosensorischen Untersuchungen neben der Impedanz die Kenngrößen Durchgangsdämpfung, Einfügungsdämpfung und die Transferfunktion herange-

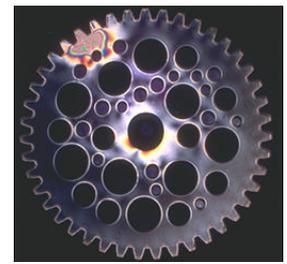
zogen. Das Durchgangsdämmmaß L_D ist definiert als die leistungsbezogene Differenz der Schnelle bzw. Wechselkräfte an der Stelle 1 vor und an der Stelle 2 hinter dem Isolierelement in der Struktur. Das Durchgangsdämmmaß bietet einen relativen Vergleich von Varianten unter gleichen Randbedingungen und konstanter Anregung. Aus dem Einfügungsdämmmaß L_E ist direkt das Verbesserungspotential einer Schallminderungsmaßnahme abzulesen. Das Einfügedämmmaß wird durch die leistungsbezogene Differenz der Schnellen bzw. Wechselkräfte ohne und mit eingefügten Isolationselementen an einer zu entkoppelnden Stelle 2 im Körperschallleitungsweg gebildet. Unter Zugrundelegung der Analogiebetrachtung von Körperschall- und Spannungswellen erfolgt bei den spannungsoptischen Untersuchungen eine vollständige Auswertung des Spannungsfeldes zur Bewertung des Körperschallübertragungsverhaltens.

5.1 Spannungsoptische Untersuchungen

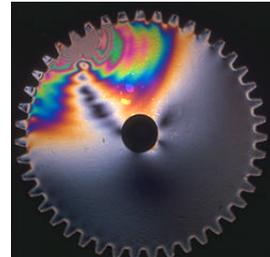
Der Einfluß der inneren Diskontinuitäten auf die Körperschallleitung wird anhand der analytisch berechneten Wellenausbreitung und Auswertung der Isochromatenaufnahmen für verschiedene Modellvarianten unter instationärer Stoßanregung, **Bild 5.1.1**, sowie frequenzselektiver harmonischer Anregung, **Bild 5.1.2**, ermittelt. Bild 5.1.1 zeigt beispielhaft die Isochromatenverläufe für zwei verschiedene Modellvarianten anhand ausgewählter Zeitpunkte nach dem Stoßvorgang. Die hohe Ableitungsdämpfung durch die Getriebewelle verursacht ein rasches Abnehmen der Ausbreitungs- und Reflexionserscheinungen der Spannungswellen im Modellinneren. Die Isochromatenaufnahmen der gestörten Strukturen belegen eine wesentliche Verringerung der radialen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Spannungswellen gegenüber dem Grundmodell. Zur Beurteilung der Energieverteilung in der Struktur und der Dämmungseigenschaften der Varianten bei Stoßanregung wurde für diskrete Zeitpunkte eine vollständige Auswertung der Spannungsverteilung vorgenommen. **Bild 5.1.3** zeigt eine Darstellung der nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) berechneten Vergleichsspannung. Das Quadrat der Vergleichsspannung beschreibt die Verteilung der potentiellen Energie



Grundmodell T = 0,25



Kreisloch T = 0,25

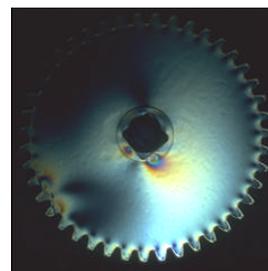


Grundmodell T = 0,75

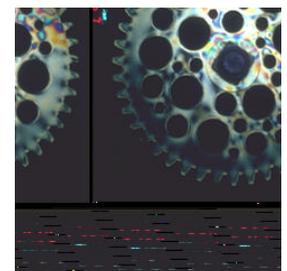


Kreisloch T = 0,75

Bild 5.1.1: Isochromaten des Grundmodells zu diskreten Zeitpunkten

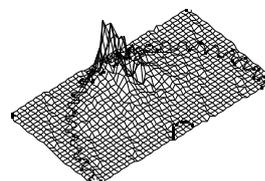


Grundmodell

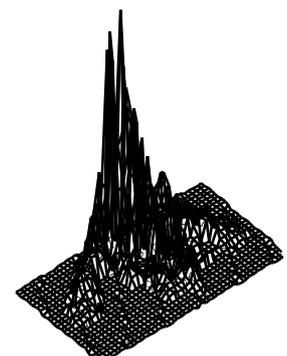


Kreisloch

Bild 5.1.2: Isochromaten am Anregungsort bei 250 Hz



Grundmodell T = 0,75



Kreisloch T = 0,75

Bild 5.1.3: Vollständige Auswertung des Isochromatenfeldes nach der GEH

des Schwingungsvorganges. An den Varianten kann eine Umverteilung des Energieniveaus nachgewiesen werden. An den Störstellen im Körperschallleitungsweg werden die Spannungswellen in den äußeren Zahnradkörper zurückreflektiert, gestreut und gebeugt. Vor den Störstellen ist, durch die

Überlagerung der sich primär ausbreitenden Körperschallwellen mit den reflektierten Wellenfronten, ein Anstieg der Gestaltänderungsenergie zu verzeichnen, der das Reflexionsverhalten der Störstellen charakterisiert. Sowohl die absolute Höhe der Spannungen als auch der Gradient wird durch die Dämmmaßnahmen beeinflusst.

5.2 Körperschallmessungen

Zur vergleichenden akustischen Bewertung der Varianten wurden die Transferfunktionen, Durchgangs- und Einfügungsdämmungen unter Kraftanregung ermittelt. Die Messung der Lagerreaktionen wurde komponentenweise in einem radial und tangential am Eingriffspunkt E orientierten Koordinatensystem durchgeführt und hieraus die Resultierende bestimmt. Die Charakteristiken der einzelnen Varianten sind ausführlich in /6/ dargestellt. **Bild 5.2.1** zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung der Transferfunktionen und Einfügungsdämmungen der resultierenden Kräfte für einige ausgewählte Varianten. Die Verifikation der Modellversuche erfolgte an realen Zahnradstrukturen. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Messungen auf dem institutseigenen Schwingungsprüfstand bestätigten weitgehend die in den spannungsoptischen und sensorischen Modellversuchen ermittelten Er-

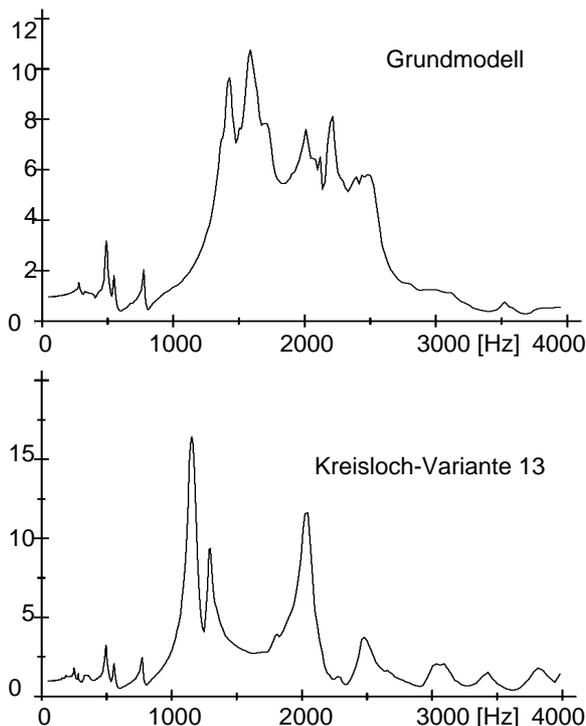


Bild 5.2.1: Gegenüberstellung der Transferfunktionen von Grundmodell und einer Störstellengeometrie

gebnisse.

6. Zusammenfassung

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mechanische Impedanz des Radkörpers nicht losgelöst von den an den Koppelstellen zum kämmenden Rad oder der Getriebewelle auftretenden Randbedingungen gesehen werden kann. Die Übertragungsimpedanz des Radkörpers wird wesentlich von der Auslegung der Getriebewelle, der Lagerung und den kraftleitenden Gehäuseteilen mitbestimmt. Die Eingangsimpedanz kann hingegen positiv durch Massenanhäufungen im äußeren Radkörper beeinflusst werden. Die Untersuchungen zur Körperschalldämmung belegen auch bei kompakten Bauteilen die Möglichkeit einer Energieverteilung durch Diskontinuitäten im Ausbreitungsweg der Körperschallwellen. Die an diesen Diskontinuitäten ausgelösten Reflexionen beeinflussen stark die Amplitudenverteilung und den Gradienten der Körperschallwellen. Die Kombination von Körperschalldämmungsmaßnahmen mit ergänzenden Maßnahmen der Körperschalldämpfung bewirkt nur in Resonanzen der Struktur eine Reduzierung der Amplitudenüberhöhungen. In den Untersuchungen zeigen Dämpfungsmaßnahmen am äußeren Radkörper gegenüber anderen Strukturbereichen eine erhöhte Wirksamkeit.

7. Literatur

/1/ Opitz, H.; Timmers, J.; u.a.: Möglichkeiten zur Verbesserung des Geräuschverhaltens von Zahnradgetrieben. Forschungsber. des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1867, 1967

/2/ VDI Richtlinie 3720 Blatt 9.1: Lärmarm Konstruieren-Leistungsgetriebe. VDI Verlag, 1990

/3/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall, Springer-Verlag, Berlin 1996

/4/ Heckl, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der Technischen Akustik. 2. Auflage, Berlin 1994

/5/ Meltzer, G.: Schwingungsisolierung im akustischen Frequenzbereich. Wiss. Zeitschrift der TH Karl-Marx-Stadt, Jahrg. XIV, Heft 2, 1972

/6/ Engel, K.: Analyse der Körperschalleitung mit sensorischen, optischen und numerischen Verfahren am Beispiel von Zahnradkörpern, Diss. TU Clausthal 1996 (unveröffentlicht)