Akustische Bewertung des Anregungsverhaltens von Verzahnungsstufen

Matthias Wegerhoff[1], Roland Sottek[2]

[1] *HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: matthias.wegerhoff@head-acoustics.de*
[2] *HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: roland.sottek@head-acoustics.de*

Einleitung und Motivation

Das Geräusch eines laufenden Getriebes wird durch den Menschen in zahlreichen Anwendungen wahrgenommen. Berührpunkte findet man z.B. im Schiffs-, Bahn- und Kraftwagenverkehr. Je nach Verzahnungsauslegung und Maskierung des Geräusches, z.B. durch Verbrennungskraftmaschinen, wird das Getriebeheulen mit seiner tonalen Charakteristik als mehr oder weniger störend empfunden.
Es wird für verschiedene Anwendungen ein erheblicher Aufwand zur Auslegung der Verzahnung betrieben. Parameter wie die erzielbare Fertigungsgenauigkeit für die Zahnflanken, Einbautoleranzen, Nachgiebigkeit von Wellen und Gehäuse, sowie die Elastizität der Zähne selbst erschweren die gezielte Auslegung. So können z.B. Welligkeiten auf der Zahnflanke, als Resultat von Fertigungsungenauigkeiten, zur stärkeren Anregung durch die höheren Harmonischen des Verzahnungssteifigkeitsverlaufs führen. Oftmals wird der gemessene oder berechnete Drehwegfehler (auch Drehwegabweichung genannt) einer Verzahnung zur Bewertung des Anregungsverhaltens herangezogen. Der Drehwegfehler basiert auf der Winkeldifferenz zwischen Ritzel und Rad unter Berücksichtigung der Übersetzung [2]. Der Drehwegfehler kann auf Basis von Winkelmessungen ermittelt werden, dies ist jedoch mit nicht vernachlässigbarem Aufwand verbunden. Die Vermessung der Verzahnung ist isoliert auf Prüfständen möglich, wodurch aber die Einbausituation nur schwer berücksichtigt werden kann. Alternativ wird die Verzahnung im realen Einbauzustand vermessen, was jedoch die Applikation der Messtechnik in das jeweilige Gehäuse erfordert. Oftmals liegen Bauraumrestriktionen vor. Deutlich einfacher ist die Erfassung von Körperschall in Form von Beschleunigungen auf dem Getriebegehäuse. Die Interpretation dieses Signals ist jedoch erschwert, da das gemessene Signal das Ergebnis aus Anregung und Transferpfad darstellt.
In dieser Veröffentlichung wird ein Verfahren von Bischof [1] aufgegriffen und weiterentwickelt, um unabhängig der Erfahrung des Anwenders eine Aussage zu dem Anregungsverhalten einer Verzahnungsstufe auf Basis von Körperschallmessungen zu erzielen. Im folgenden Abschnitt werden Grundlagen dargelegt, die die Ergebnisgröße RANE einführen, um im Anschluss mittels bewährter Koeffizienten/Kriterien die Belastbarkeit des Ergebnisses transparent zu machen. Fallbeispiele aus der Praxis zeigen Potentiale und Grenzen des Verfahrens.

Grundlagen zur Verzahnungsanregung und zu linearen Systemen

Die resultierende Eingriffssteifigkeit einer Verzahnungsstufe, beispielhaft in Abbildung 1 gezeigt, ist das Resultat aus der Überlagerung der Zahnpaarsteifigkeiten, die wiederum geprägt sind durch die Elastizität der Zähne selbst. Zur Beurteilung des Steifigkeitsverlaufs können die Amplituden der zugehörigen Harmonischen betrachtet werden (siehe Abbildung 2).

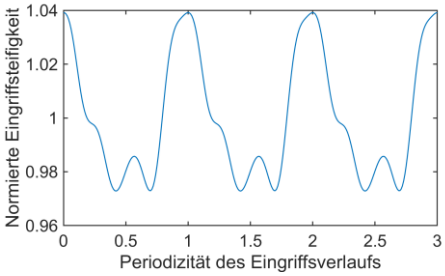

Abbildung 1: Beispiel eines normierten Eingriffssteifigkeitsverlaufs einer schrägverzahnten Stirnradstufe

In diesem Beispiel (schrägverzahnte Stirnradstufe) liegt die Amplitude der 1. Harmonischen bei 3% des Mittelwerts der Eingriffssteifigkeit. Im Falle von geradverzahnten Stirnrädern kann dieser Wert um ein Vielfaches größer ausfallen.
Bezieht man alle Amplituden auf z.B. die Amplitude der ersten Harmonischen (siehe Abbildung 3), so resultiert ein bezogenes Amplitudenspektrum, hier „**R**elative **A**mplituden der **n**ormierten **E**ingriffssteifigkeit“ (RANE) genannt.

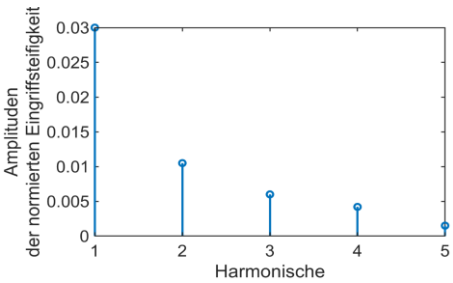

Abbildung 2: Amplitudenspektrum des normierten Eingriffssteifigkeitsverlaufs aus Abbildung 1

Mittels der Ergebnisgröße RANE ist nicht die Analyse der absoluten Steifigkeitswerte möglich, aber es ist die Bewertung der höheren Harmonischen im Verhältnis zur ersten Harmonischen zulässig. Dies bedeutet, dass alle konstruktiven und betriebsbezogenen Parameter mit relevanten Auswirkungen auf die höheren Harmonischen mittels der Ergebnisgröße RANE analysiert werden können. Im Folgenden ist gezeigt wie sich die Amplitudenverhältnisse der Eingriffssteifigkeit für das hier angeführte Beispiel in der Kraftanregung der Verzahnung über den Betriebsbereich äußern. Die Analyse erfolgt für die Grenzbetrachtung des überkritischen Betriebs, das heißt es werden keine Resonanzen des dynamischen Systems nennenswert angeregt. Unter diesen Annahmen entwickelt sich die Kraftanregung für die Verzahnungsstufe wie in Abbildung 4

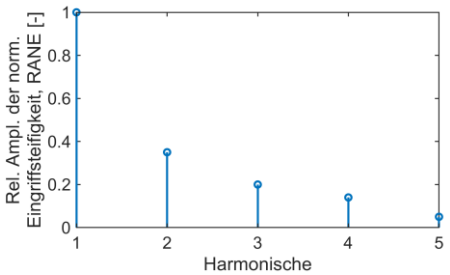

Abbildung 3: Relatives Amplitudenspektrum des normierten Eingriffssteifigkeitsverlaufs aus Abbildung 1

gezeigt. Die Verhältnisse der Kraftamplituden der einzelnen Harmonischen entsprechen den Verhältnissen der Amplituden des Eingriffssteifigkeitsverlaufs.

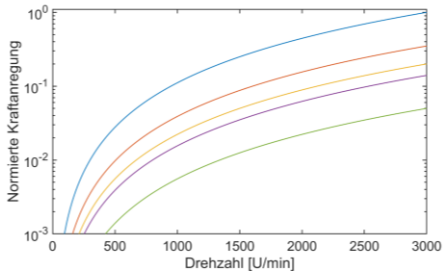

Abbildung 4: Kraftanregung einer Verzahnungsstufe (F_v) für die Grenzbetrachtung im überkritischen (resonanzfreien) Betrieb

In realen Systemen, vor allem bei Maschinen wie Getrieben, sind unzählige Resonanzen vorhanden, die bei Betrachtung des Körperschalls Verläufe aufweisen wie in Abbildung 6 gezeigt. Sofern jedoch von einem linearen System ausgegangen werden darf, ist das Übertragungsverhalten zu jedem Zeitpunkt des Systems dasselbe und die Schwingungsantwort an einem Punkt des Systems kann als Addition seiner Teilantworten (aufgrund z.B. von verschiedenen Anregungen) dargestellt werden (siehe Abbildung 5). Zudem führt eine Erhöhung einer Anregung um den Faktor x ebenso zu einer Änderung der Antwort um denselben Faktor x.

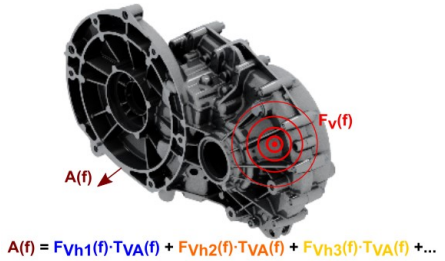

Abbildung 5: Schema eines Getriebes mit Verzahnungsanregung F_v und superpositionierter Antwort A als Addition der Harmonischen der Verzahnungsanregung im Produkt mit dem zugehörigen Transferpfad T_{VA}

Bestimmung des relativen Amplitudenspektrums der Eingriffssteifigkeit

Zuvor ausgeführte Grundlagen führen zu dem Gedanken, dass für lineare Systeme die relativen Amplituden des Spektrums der normierten Eingriffssteifigkeit (RANE) aus Körperschallmessungen bestimmbar sein müssten. Annahme ist, dass die Verzahnungsanregung immer denselben Transferpfad zu einem bestimmten Körperschallpunkt anregt. Ist dieser Transferpfad zu jedem Zeitpunkt (Betriebspunkt) derselbe, so ist das Verhältnis der Harmonischen der Schwingungsantwort über der Frequenz allein zurückzuführen auf die relativen Amplitudenverhältnisse der Verzahnungssteifigkeit. Des Weiteren bedeutet dies, dass unter idealisierten Betrachtungen, alle Harmonischen über der Frequenz im Körperschall denselben Verlauf aufweisen. Dies führt zum Linearitätsscheck nach Bischof.

Linearitätscheck nach Bischof [1]

Zur Untersuchung von Systemen auf Linearität wird in [1] vorgeschlagen die zugehörigen Ordnungen einer Verzahnungsstufe über der Frequenz zu plotten (siehe Abbildung 6), um diese dann anschließend durch den Ansatz der Flächenminimierung auf ein Niveau zu bringen (siehe Abbildung 7). Hierbei ist zu beachten, dass die Anregungen ausreichend stark ausgeprägt sind und immer nur der gemeinsame Überlappungsbereich zweier Ordnungen in die Flächenbetrachtung einbezogen werden kann. So wird die 5. Harmonische auf das Niveau der 4. Harmonischen gebracht. Die 4. Harmonische auf das Niveau der 3. usw.

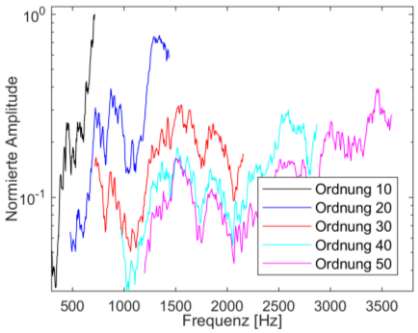

Abbildung 6: Ordnungsverläufe (Beschleunigung) einer Verzahnungsstufe über Frequenz

Anschließend wird die Überlagerung der Kurven visuell geprüft. Je nach Ausprägung der Unterschiede in den Verläufen kann von einem annähernd linearen oder nichtlinearen System gesprochen werden. Aufgrund der erfahrungsbasierten Bewertung korreliert die Qualität der Aussage zur Linearität stark mit der Qualifikation des Anwenders.

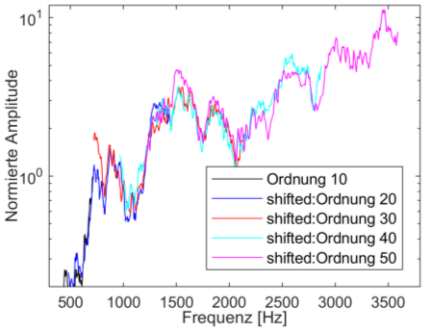

Abbildung 7: Überlagerte Ordnungsverläufe einer Verzahnungsstufe nach Flächenminimierung der Differenzflächen

Wird ein lineares System festgestellt, ist die Extraktion der Faktoren zur Niveauanpassungen der einzelnen Harmonischen zulässig. Das zugehörige Ergebnis ist in Abbildung 8 gezeigt. Es bleibt offen wie sich Abweichungen zwischen den Ordnungsverläufen, wie auch in Abbildung 7 zu erkennen, auf die Genauigkeit der ermittelten Amplituden auswirken. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt der Korrelationskoeffizient (CorrCoeff) und der normierte mittlere quadratische Fehler (NRSME) als Bewertungskriterium eingeführt.

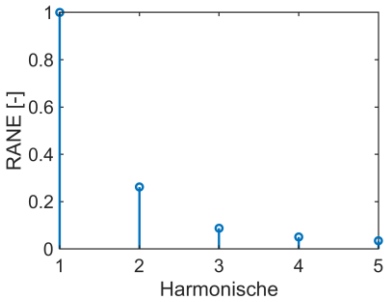

Abbildung 8: Relative Amplituden der normierten Eingriffssteifigkeit (RANE) als Ergebnis der Flächenminimierung

Korrelationskoeffizient und normierter mittlerer quadratischer Fehler als Bewertungskriterium

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson (CorrCoef) dient der Prüfung zweier Stichproben im Hinblick auf einen linearen Zusammenhang. Er kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Je nach Wert für den Korrelationskoeffizienten kann von einem schwachen (0<CorrCoef<0.5) oder auch starken linearen (0.8<CorrCoef<1) Zusammenhang gesprochen werden [4]. Letztlich ist aber der mindestens zu erfüllende Korrelationswert für die hier formulierte Problemstellung unbekannt. Aus diesem Grund werden im Rahmen einer Konvergenzstudie der normierte mittlere quadratische

Fehler (NRMSE) zwischen zwei Harmonischen und die erhaltenen RANE Ergebnisse gegenüber verschiedenen Korrelationswerten geplottet. Der Bezugswert des NRMSE ist die Differenz zwischen maximaler und minimaler Amplitude der Ordnung mit der kleineren Ordnungsnummer. Basis der Konvergenzstudie bildet eine Gesamtfahrzeugmessung mit insgesamt 26 Kanälen, darunter Beschleunigungs- und Schalldruckaufnahmen. Das Fahrzeug wurde auf einer Teststrecke bewegt und die Aufnahmen enthalten Beschleunigungsfahrten, sodass die Ordnungen einen breiten Frequenzbereich kreuzen.

Bei einem perfekten linearen Zusammenhang führt die Flächenminimierung (siehe Abschnitt zuvor) zwischen zwei Kurven zu einer perfekten Überlagerung. Ist der lineare Zusammenhang schwächer ausgeprägt verbleiben Abweichungen, wie in Abbildung 7 zu erkennen. Umso stärker der lineare Zusammenhang, desto kleiner sollte der NRMSE ausfallen. Zur Verifikation dieser Hypothese werden die 26 Kanäle aus der Gesamtfahrzeugmessung hinsichtlich des NRMSE und des CorrCoef ausgewertet. In Abbildung 9 ist der NRMSE über den CorrCoef geplottet. Mit Zunahme des CorrCoef ist eine Abnahme des Fehlers (NRMSE) zu beobachten. Wird der NRSME mit zunehmenden CorrCoef kleiner, so ist auch eine Konvergenz der ermittelten RANE-Werte für zunehmende CorrCoef zu erwarten. Abbildung 10 bestätigt die Überlegung und zeigt, dass unabhängig vom gewählten Messkanal mit einem zunehmenden CorrCoef die Streuung im RANE Wert abnimmt. Als Kompromiss aus Genauigkeit und zulässigem Auswertebereich wird für die folgenden Analysen ein mindestens zu erfüllender CorrCoef von 0.9 definiert.

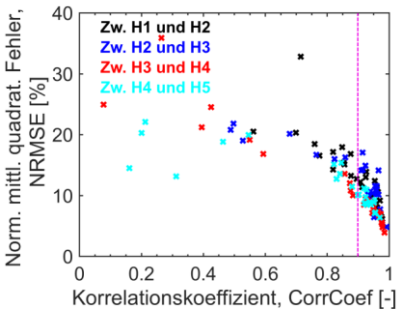

Abbildung 9: Veränderung von NRMSE über Korrelationskoeffizient

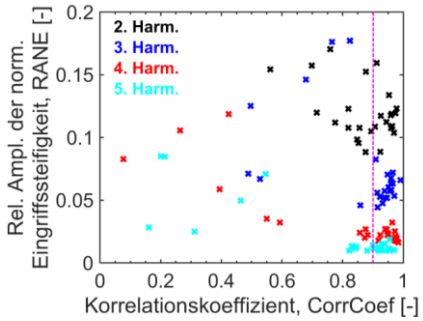

Abbildung 10: Konvergenzbetrachtung von RANE über Korrelationskoeffizient

Messungenauigkeit und Messfehler beachten

Während die Ergebnisgrößen CorrCoef und NRMSE für einen Messpunkt bzw. einen Kanal Abweichungen zwischen zwei Ordnungen detektieren, bleibt offen, inwiefern die Ergebnisgröße RANE, ermittelt für hohe CorrCoef, streut. Prinzipiell sind Streuungen bereits in Abbildung 9 und Abbildung 10 erkennbar. Um die Streuung im Rahmen der Auswertung nicht unbeachtet zu lassen wird an dieser Stelle empfohlen, mehrere Kanäle auszuwerten, um anschließend einen Mittelwert mit Standardabweichung angeben zu können (siehe Abbildung 11).

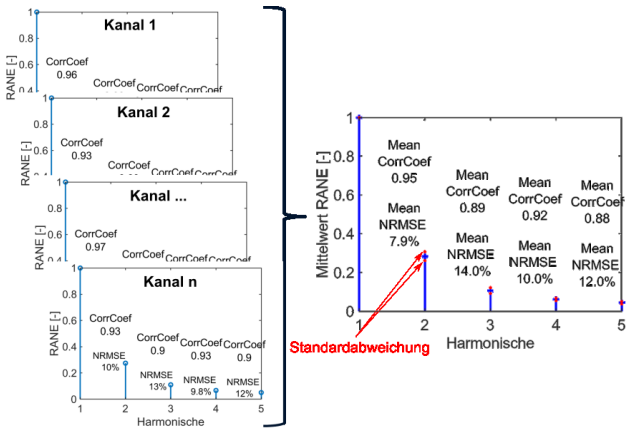

Abbildung 11: Mittelwertbildung und Anzeige der Standardabweichung für die Berechnung auf Basis mehrerer Messkanäle.

Fallbeispiel 1: Gesamtfahrzeug Transporter

Dieses Fallbeispiel diskutiert die Tauglichkeit einer Gesamtfahrzeugmessung im Hinblick auf die Auswertequalität der Ergebnisgröße RANE. Dabei wird zwischen Luftschall- und Körperschallaufnahmen unterschieden. Bewertet werden soll die Kegelradverzahnung am Hinterachsdifferential im Hinblick auf die Teil- und Volllast Situation.

Luftschall

Der Schalldruck wurde durch vier Mikrofone, möglichst nahe am Differential montiert, erfasst. In Abbildung 12 sind die zugehörigen mittleren relativen Amplituden der norm. Eingriffssteifigkeit (Mean RANE) für beide Lastsituation dargestellt. Leider war es weder für Teillast, noch bei Volllast möglich belastbare Ergebnisse zu erzielen. Dies wird bei Betrachtung der geringen Korrelationswerte deutlich. Die Luftschallaufnahmen sind durch andere Effekte (z.B. Windgeräusche, Reifenrollgeräusche) zu stark gestört.

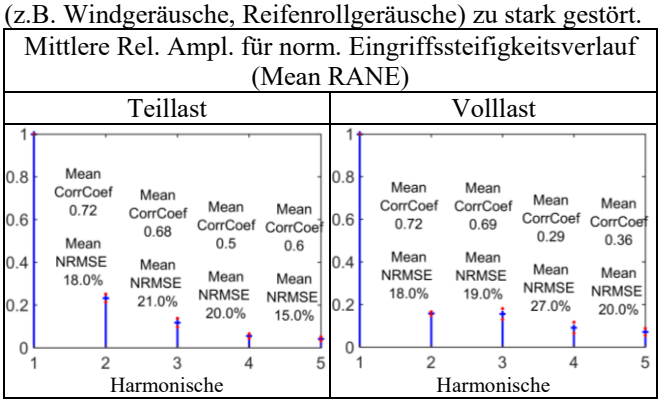

Abbildung 12: Mittlere Werte für RANE, CorrCoef und NRMSE auf Basis von gemessenem Luftschall durch mehrere Mikrofone, angeordnet am Differential

Körperschall

Für die Körperschallauswertung werden mehrere Beschleunigungssensoren mit Position auf der Achse und dem Differential herangezogen (3 Sensoren mit jeweils 2 Kanälen). Die Korrelationswerte in Abbildung 13 zeigen eine gute Auswertbarkeit an. Es finden sich hohe Übereinstimmungen zwischen den Ordnungsverläufen die im Mittel zu einem NRMSE von ca. 10% führen. Bei Betrachtung der mittleren Werte für RANE fällt auf, dass sich die Verzahnung im Teillastbereich auffälliger Verhält. Dies kann z.B. an einer geringeren Gesamtüberdeckung im Eingriffsverlauf bei niedrigeren Lasten liegen. Dadurch wird

in der Regel der Drehwegfehler, aufgrund der größeren Nachgiebigkeit der Verzahnung, größer.

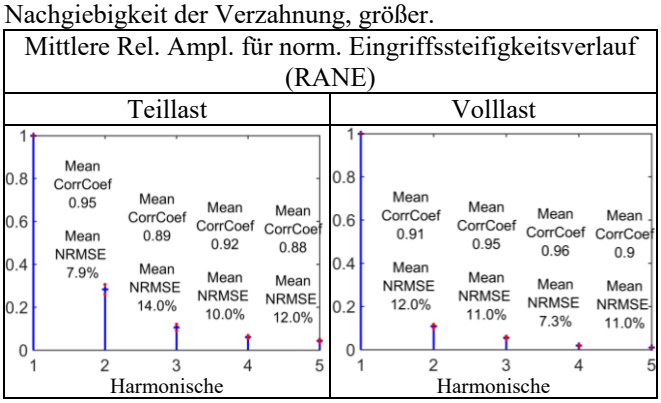

Abbildung 13: Mittlere Werte für RANE, CorrCoef und NRMSE auf Basis von gemessenem Körperschall durch drei Beschleunigungssensoren befestigt am Differential (6 Kanäle)

Fallbeispiel 2: Antriebsstrang BEV

Folgend wird eine Prüfstandsmessung eines elektrifizierten Kleinwagen-Antriebsstrangs betrachtet. Der Antriebsstrang besteht aus einer elektrischen Maschine, einem Getriebe und den Seitenwellen. Grundlage für die Untersuchung bilden Messungen auf Basis zweier triaxialer Beschleunigungsaufnehmer, platziert auf der Aktivseite der Koppelstellen zum Tragrahmen, in den sich der Antriebsstrang über Elastomerelemente abstützt. Für zwei Lastfälle werden Hochläufe bis zu einer äquivalenten Fahrgeschwindigkeit von ca. 60 km/h durchgeführt. Das betrachtete Antriebssystem ist wesentlich komplexer als die Hinterachse eines Transporters wie aus Fallbeispiel 1. In einem elektrischen Antriebssystem sind einige Nichtlinearitäten zu finden, die die Analyse erschweren können. Aus diesem Grund ist für dieses Beispiel nur eine eingeschränkte Validität der RANE Werte zu finden (Abbildung 14). Für die zweite Harmonische ist ein ausreichend hoher Korrelationskoeffizient festzustellen. Die partielle Einschränkung der Interpretierbarkeit liegt an der über einen bestimmten Frequenzbereich (Drehzahlbereich) ausgeprägten Nichtlinearität.

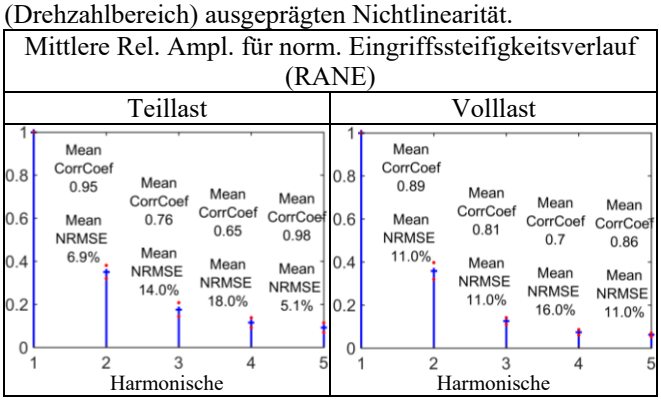

Abbildung 14: Mittlere Werte für RANE, CorrCoef und NRMSE auf Basis von gemessenem Körperschall durch zwei triax. Beschleunigungssensoren angeklebt an den Aufhängungspunkten

Fallbeispiel 3: Stirnradstufe BEV Simulation

Fallbeispiel 3 bezieht sich auf Simulationsergebnisse erzeugt durch ein Mehrkörpersimulationsprogramm. Die Betrachtung in Fallbeispiel 3 hat nicht zum Ziel einen Benchmark für das Programm durchzuführen, sondern einen Prozess aufzuzeigen, durch den ggf. getroffene Vereinfachungen zur Abbildung einer Verzahnungsstufe in ihrer Wirkung bewertet werden können. In Abbildung 15 ist die Modellierung der Getriebeeingangsstufe des BEVs Antriebsstrang aus Fallbeispiel 2 dargestellt. Während der Modellansatz für die Verzahnung komplex und aufwendig ist, beruhend auf FE-Berechnungen, ist das restliche Modell einfach gehalten. Die Elastizitäten der Wellen, Lagerung und des Gehäuses sind vernachlässigt worden.

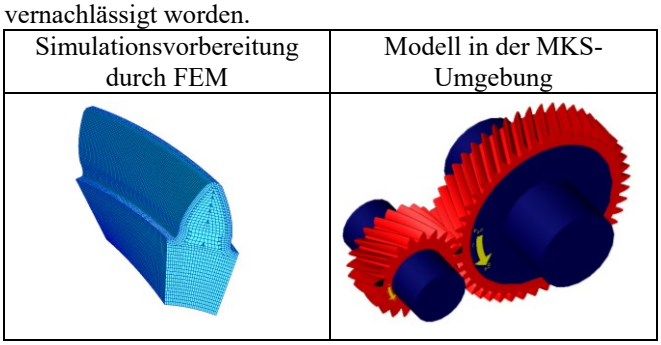

Abbildung 15: Simulation einer Verzahnungsstufe mittels Adams' Advanced 3D Contact Gear [3]

Das MKS-Modell wird im Zeitbereich gelöst und liefert den Drehwegfehler. Mit der Kenntnis des Drehwegfehlers ist es möglich auf die RANE Werte zu schließen. In Abbildung 16 ist der Vergleich der RANE Werte für den maximalen Lastfall gezeigt. Wie in Fallbeispiel 2 erläutert ist nur der Vergleich für die zweite Harmonische zulässig. Je nach Anforderung an die Ergebnisqualität können ausgehend von dieser Analyse nun Modellvereinfachungen oder Erweiterungen angedacht werden.

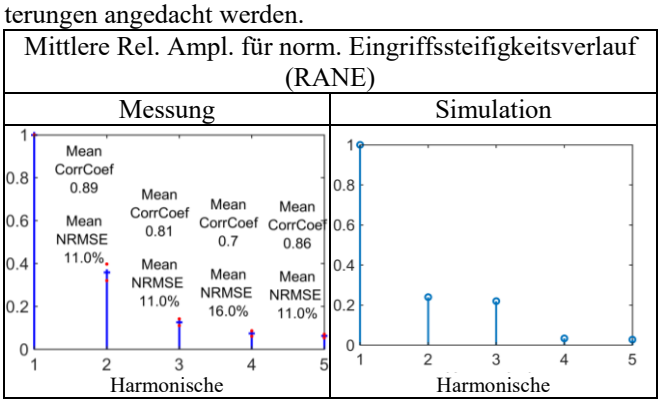

Abbildung 16: Vergleich von den relativen Amplituden des Eingriffssteifigkeitsverlaufs zwischen Messung und Simulation

Zusammenfassung

Zur Erfassung der relativen Amplituden der Eingriffssteifigkeit auf Basis von Körperschallmessungen ist das Verfahren nach Bischof [1] aufgegriffen und um Bewertungskriterien erweitert worden. Auf Basis der Bewertungskriterien zeigt das Verfahren an, ob eine Auswertung der RANE Werte zulässig ist. Hierdurch wird der Auswerteprozess robust und kann für End-of-Line Anwendungen, Zustandsüberwachung oder als Verifikation genutzt werden.

Literatur

[1] Bischof, T.: Linearity Check for Gearbox based on Noise Measurement. ICSV22, Florenz, 2015

[2] Küçükay, F.: Dynamik der Zahnradgetriebe. Modelle, Verfahren, Verhalten. Springer Verlag, 1987

[3] MSC Software, ADAMS 2017.2, Handbook, 2017

[4] Fahrmeir, L.; Künstler R.; u. a.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 8. Auflage, Springer Verlag, 2016