

## **Aufnahme und Auswertung drehsynchroner Schalle und Schwingungen**

### **Leitfaden zur Ordnungsanalyse**

**Lothar Schmidt, md-pro GmbH, Karlsruhe**

#### **1 Motivation**

In unserem Alltag sind motorische Versteller und Antriebe selbstverständlich gewordene, sie arbeiten weitgehend unbemerkt, da die Hersteller dieser Systeme für eine akustisch unauffällige Funktion sorgen. Sobald uns ein Betriebsgeräusch überrascht, werden wir uns als Anwender der Nutzung bewusst und stellen die Qualität des Produkts oder seiner Funktion in Frage. Die akustische Prüfung von Produkten dient zum Einen der Einhaltung von Geräuschstandards, ermöglicht aber auch die Erkennung von Geräuschursachen. Sie bildet die Grundlage zur konstruktiven Optimierung von Motoren, Lagern, Getrieben und Steuerungseinheiten.

Wie stellen Hersteller von solchen Komponenten die Qualität ihrer Produkte sicher? Stand der Technik sind subjektive und objektive Prüfung, zuvorderst mit dem Ziel die Auslieferung von Produkten zu vermeiden, die durch ihr Betriebsgeräusch auffällig werden. Das funktioniert in der Regel gut. Tauchen aber im Feld Reklamationen auf, wird das Kunden-Lieferanten-Verhältnis belastet. Der Lieferant muss entweder die Prüfkriterien verschärfen – was die Wirtschaftlichkeit seines Produktionsprozesses gefährdet – oder konstruktive Maßnahmen ergreifen, die die Produktqualität verbessern.

Es liegt auf der Hand, dass die Umsetzung zielgerichteter konstruktiver Maßnahmen die nachhaltigere Lösung ist. Um dies zu erreichen, müssen Verursacher der störenden Geräuschkomponenten eindeutig identifiziert werden, damit gezielt deren Eigenschaften oder/und ihr Montageprozess optimiert werden können.

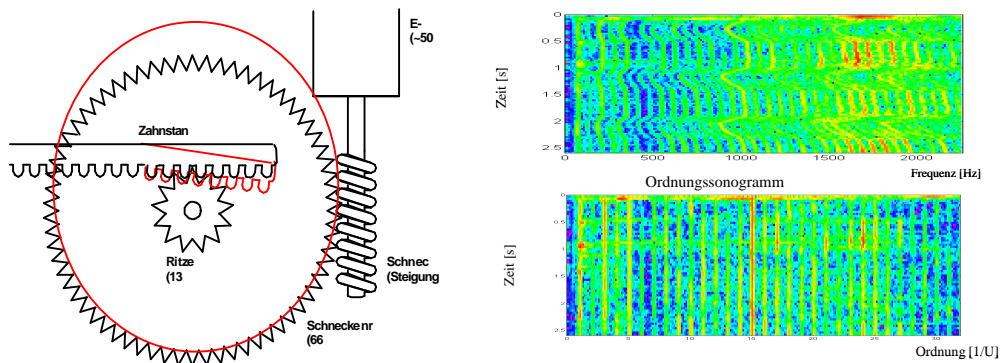
Eine leistungsfähige Methode, mechanische Abläufe in Schwingungs- und Schallsignalen zu identifizieren ist die Ordnungsanalyse, die sich stets auf den Drehwinkel einer Referenzkomponente im System bezieht. Der folgende Beitrag zeigt anhand von Beispielen die Analyse drehzahlabhängiger Geräuschanteile.

#### **2 Beispiel Schneckentrieb mit Zahnstange**

Ein typischer Kleinversteller aus dem KFZ-Alltag ist der elektrische Fensterheber, dessen wesentliche funktionalen Komponenten in Abbildung 1 skizziert sind. Der Motor dreht die Schnecke, welche das Schneckenrad antreibt. Das zum Schneckenrad konzentrische und mit ihm fest verbundene Abtriebsritzel schiebt bzw. zieht die Zahnstange, mit der die Scheibe gehoben bzw.

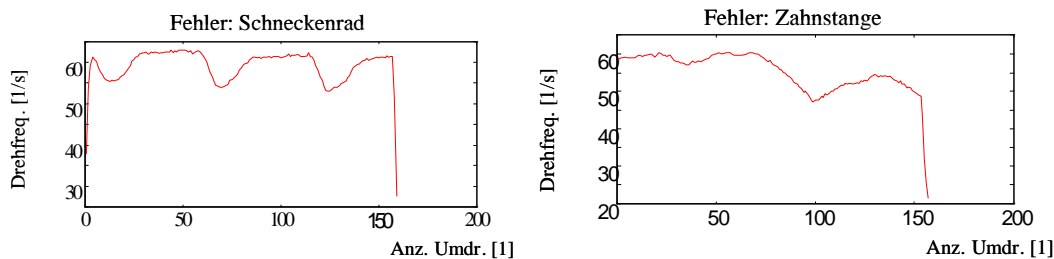
gesenkt wird. Wie im Spektrogramm erkennbar, erfolgt die Verstellung nicht mit konstanter Drehzahl, sondern es tauchen in regelmäßigen Abständen von etwa 1 Sekunde spektrale Veränderungen auf.

Hier können Methoden der Ordnungsanalyse eingesetzt werden.



**Abbildung 1:** Schnecke, Schneckenrad, Zahnstange und Fehler (links), Frequenz und Ordnungsanalyse (rechts)

Als Nebenprodukt fällt bei der Ordnungsanalyse der Drehzahlverlauf über dem Drehwinkel an. Hieraus können bereits Rückschlüsse auf fehlerhafte Komponenten gezogen werden.



**Abbildung 2:** Drehzahlverlauf bei „Unrundheit“ des Schneckenrades und „Knick“ der Zahnstange

Augenscheinlich erfolgt bei beiden Drehzahlverläufen ein Drehzahleinbruch alle 55 Motorumdrehungen – ein Hinweis auf ein Problem im Bereich des Schneckenrades, das 55 Zähne hat. Alle Komponenten die die gleiche Winkelgeschwindigkeit haben wie das Schneckenrad können Verursacher sein.

### 3 Mögliche Analyseverfahren und Ergebnisse

Als Standardanalyseverfahren hat sich die Fouriertransformation fest etabliert. Die FFT ist ein schneller Algorithmus der ein Signal hinsichtlich spektraler Energieverteilung analysiert. Ergebnis ist ein Schmalbandspektrum. Dieses gilt für den betrachteten Signalausschnitt.

Berechnet man bei einem langen Geräusch Schmalbandspektren aus jeweils kurzen Geräuschsegmenten, lässt sich ein Frequenzspektrogramm wie in Abbildung 1 (rechts oben) darstellen, in dem die spektrale Energieverteilung und deren Änderung über der Zeit ablesbar sind. Regelmäßige Drehzahleinbrüche sind deutlich zu erkennen. Im Frequenzspektrogramm steckt alle Information über das Ordnungsverhalten – es ist jedoch schwer zu interpretieren und nur mit hohem Aufwand können Ordnungskennwerte berechnet werden.

Üblicherweise werden zur sicheren Spektralschätzung mehrere Einzelspektren berechnet und gemittelt, um zufällige Signalanteile (Rauschen) zu eliminieren. Dabei werden aber nicht nur zufällige Geräuschanteile betroffen, sondern auch systematische Änderungen. Abbildung 3 zeigt ein gemitteltetes Frequenzspektrum des Signals aus Abbildung 1. Obwohl im Spektrogramm alle höheren Harmonischen erkennbar sind, lassen sich im Spektrum nur noch die ersten Harmonischen der Motordrehzahl erkennen.

Eine Frequenzanalyse mit hoher Stützstellenanzahl über eine längere Messdauer liefert ein vergleichbares Ergebnis, da hier innerhalb des analysierten Signalauschnittes Drehzahlschwankungen auftreten findet ebenfalls eine "Verwischung" im Frequenzbereich statt.

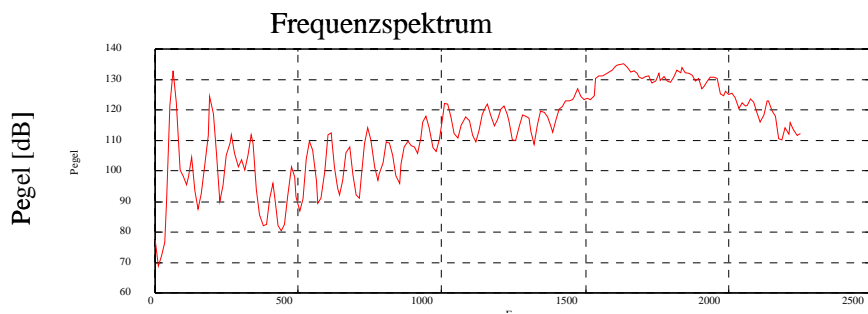


Abbildung 3: gemitteltetes Frequenzspektrum

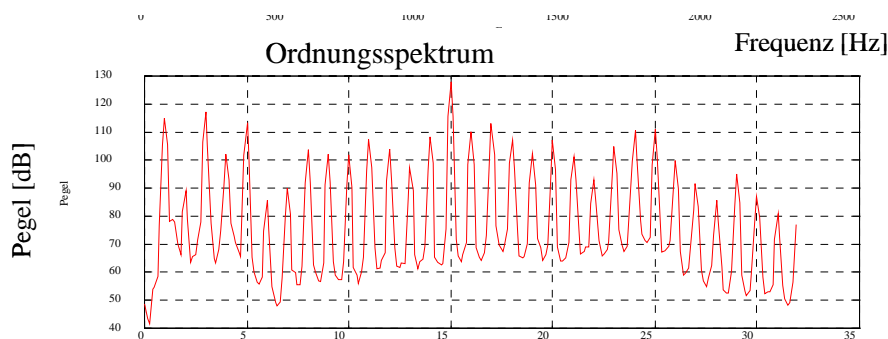


Abbildung 4: gemitteltetes Ordnungsspektrum

Bei einer drehwinkelsynchronen Betrachtung des Signals kann ein klares Ordnungsspektrum wie in Abbildung 1 (rechts unten) und Abbildung 4 (rechts) erzielt werden. Die Drehzahlschwankung führt beim Ordnungsspektrum nicht zu einer „Verwischung“. Man spricht von der Ordnungsanalyse.

## 4 Aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

### 4.1 Begriff Ordnungsanalyse

Unter einer **Ordnungsanalyse** versteht man die [Analyse](#) des Geräusches oder der [Schwingungen](#) von rotierenden Maschinen. Anders als bei der [Frequenzanalyse](#) wird hierbei der Energiegehalt des Geräusches nicht über der [Frequenz](#) sondern über der Ordnung aufgetragen.

Die Ordnung ist dabei ein vielfaches der Drehzahl.

[...]

## 4.2 Verfahren zur Ordnungsanalyse

Aus der [Fourier Transformation](#): Bei bestimmten Drehzahlen wird eine Fourier-Transformation durchgeführt. Das [Spektrum](#) wird auf Basis der aktuellen Drehzahl in ein Ordnungsspektrum umgerechnet.

Im Winkelbereich: Früher wurde das Meßsignal nicht zeitlich äquidistant abgetastet, sondern über eine spezielle Hardware winkelsynchron abgetastet. Wird ein solches winkelsynchrones signal in den Frequenzbereich transformiert entsteht ein Ordnungsspektrum. Heute wird das normal abgetastete Signal mit Hilfe der gleichzeitig aufgenommenen Drehzahlimpulse in ein Winkelsignal umgerechnet. Danach wird eine Forier-Tranformation durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Ordnungsspektrum.

[...]

## 5 Messprinzip

Die Ausgangsbasis für eine Ordnungsanalyse ist ein Signal, das drehwinkelsynchron diskretisiert ist. Auch hier gilt, was aus der "normalen" digitalen Messtechnik bekannt ist: Das Abtasttheorem von Shannon besagt, dass für die höchste darzustellende Frequenz mindestens zwei Stützstellen pro Periode erfasst werden müssen. Übertragen in den Drehwinkelbereich heißt das, dass die höchste Vielfache der Bezugsdrehfrequenz mindestens zweimal je Bezugsumdrehung erfasst werden muss. Wir benötigen also eine Teilung der "Bezugsumdrehung" in möglichst gleiche Winkelabschnitte. Die Anzahl Winkelschritte bestimmt die höchste Ordnung, die im Ordnungsspektrum nicht zu Aliasing führt. Die Anzahl betrachteter Umdrehungen bestimmt, wie fein "zwischen den Ordnungen" aufgelöst wird. (Analog zum Verhalten der Frequenzanalyse: die Abtastrate bestimmt die höchste Frequenz und die Messdauer die maximale Frequenzauflösung).

Im Folgenden werden zwei Standardverfahren kurz vorgestellt, mit denen Drehwinkelsynchrone Signale erfasst, bzw. aus zeitsynchronen Signalen generiert werden..

### 5.1 Winkelsynchrones Messen

Die Bezugskomponente wird mit einem Drehwinkelgeber versehen, der n-mal je Umdrehung einen Impuls abgibt. Die Teilung der Umdrehung ist linear. Die Impulse werden genutzt, um einen A-D-Wandler zur Messwerterfassung zu triggern. Die Schwingungsamplituden werden also definierten Winkelstellungen des Bezugs zuordenbar. Es liegt ein reines Ordnungssignal vor.

Kritisch ist, dass sich bei niedrigen Drehzahlen eine sehr geringe Abtastfrequenz ( $1/\Delta t$ ) ergibt – für hochfrequente Schwingungen und Geräusche eine Unterabtastung – was zu Aliasing führt. Dem kann durch Aliasingfilter begegnet werden, die das analoge Sensorsignal vor der Abtastung in der Bandbreite begrenzen. Da bei Erhöhung der Drehfrequenz die beanspruchte Bandbreite zunimmt, müssen die Filter idealerweise dem Drehfrequenzverlauf folgen und ihre Bandbreite kontinuierlich anpassen.

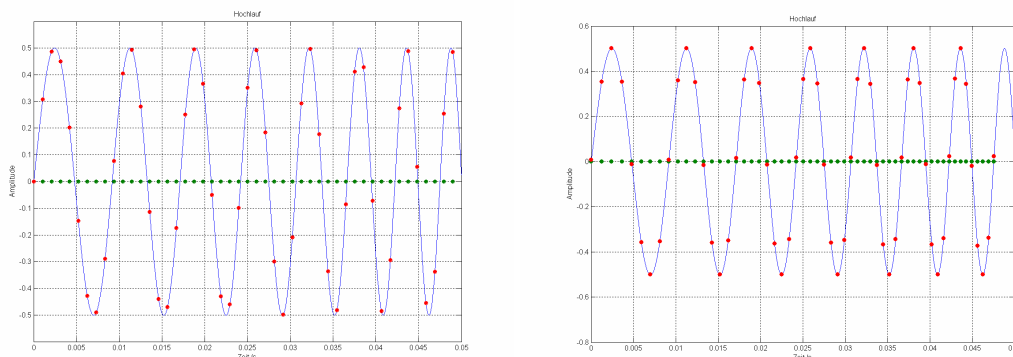
Der Lohn ist sehr gute Drehwinkelsynchronität bei geringem Rechenaufwand aber einem hohen messtechnischen Aufwands. Oft kann in der Messumgebung kein Drehwinkelgeber mit feiner Winkelteilung angebracht werden.

## 5.2 Zeitsynchrones Messen und Resampling

Da heute auch großer Rechenaufwand von modernen Rechnern in sehr kurzer Zeit bewältigt werden kann bietet sich auch ein anderes Verfahren an: zeitsynchrones Messen mit anschließender Drehwinkelsynchronisierung mittels Resampling. Die Drehwinkelinformation besteht oft aus einem oder zwei Impulsen je Bezugsumdrehung die auf einem zweiten Messkanal aufgezeichnet werden.

Die Transformation in den Drehwinkelbereich wird anschaulich bei einem Sinussweep. In Abbildung 5 ist im linken Diagramm ein solcher Sweep mit 100 Hz zu Beginn und 200 Hz am Ende des Signals bei einer Abtastrate von 1 kHz. Auf der Zeitachse sind die Zeitpunkte der Amplitudendiskretisierung durch Punkte markiert. In der ersten Signalperiode liegen 9 Samples, in der letzten nur 4.

Im rechten Diagramm von Abbildung 5 ist das gleiche Signal mit "Nachabtastung" abgebildet. Durch einen Algorithmus wurden zunächst die den Nulldurchgänge des Zeitdiskret getasteten Signals nächstgelegenen Samples bestimmt. Der Abstand dieser Samples entspricht bei höher Abtastrate in guter Näherung einer halben "Umdrehung" – das entspricht zwei Impulsen je Umdrehung. Anschließend wird für jedes Intervall eine neue Teilung (der Zeitachse) erzeugt. Für diese neue Teilung liegen in der Regel keine real gemessenen Amplitudenwerte vor, so dass diese interpoliert werden. Je feiner die zeitliche Auflösung des zeitsynchronen Amplitudenverlaufs ist, desto weniger muss interpoliert werden – das drehwinkelsynchrone Signal wird genauer. In Abbildung 5 rechts liegen für jede Signalperiode unabhängig von der aktuellen Fdrehfrequenz exakt 8 Samples vor.



**Abbildung 5: Zeitäquidistante Abtastung mit variabler Anzahl Samples je Periode und Drehwinkelsynchrone Abtastung mit 8 Samples je Periode.**

Da die Drehwinkelgeschwindigkeit bei konstanter Drehwinkelbeschleunigung zwischen zwei Drehwinkellimpulsen nicht konstant ist, entstehen Phasenfehler, die bei zunehmender Drehwinkelbeschleunigung zunehmen. Zu erkennen ist das im rechten Diagramm an den durch Punkten repräsentierten Drehwinkelsamples, die bei zunehmender Drehfrequenz unterschiedliche Phasenzustände treffen. Je höher die Signalabtastrate und je geringer die Drehwinkelbeschleunigung, desto geringer sind beim verwendeten Transformationsverfahren die Fehler bei der Zuordnung von interpolierten Abtastwerten zu interpolierten Drehwinkeln. Bei hoher Drehwinkelbeschleunigung entsteht eine Verwischung, die Auflösung höherer Ordnungen nimmt ab. Progressives Resampling, also nichtlineare Teilung innerhalb einer Umdrehung unter Berücksichtigung der Drehwinkelbeschleunigung, kann bei linearen Drehwinkelbeschleunigungen die Verwischung vermeiden.

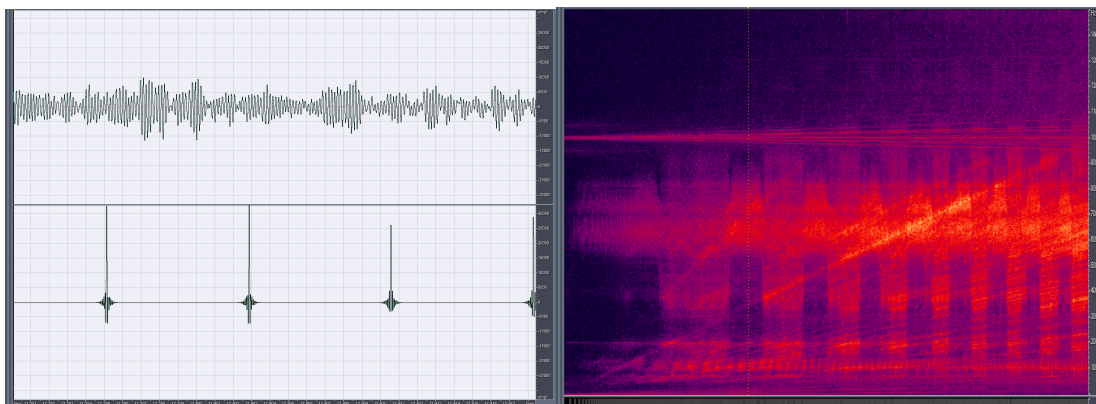
Auch bei dieser Methode kann Aliasing entstehen, wenn die Abtastrate im Drehwinkelbereich niedriger liegt, als im Zeitbereich. Man behilft sich entweder wie bei der drehwinkelsynchronen Signalerfassung mit Mitlaufiltern, oder rein rechnerisch, indem man im Drehwinkelbereich mehr Samples interpoliert, als bei der Diskretisierung im Zeitbereich entstanden sind.

Der Lohn ist gute Drehwinkelsynchronität bei geringem messtechnischen Aufwand aber relativ hohem Rechenaufwand und Speicherbedarf.

## 6 Beispiel Planetengetriebe

In Fahrzeuglenksystemen werden Planetengetriebe zur aktiven Lenkunterstützung und Lenkaus-schlagregelung eingesetzt. Diese Systeme können im Betrieb Geräusche verursachen, die wir bei einer Lenkverstellung nicht erwarten. Um die wesentlichen Komponenten der Systeme zu identifizieren wurde während einer Drehzahlrampe Schwingensignal und Drehwinkelinformation zeitsynchron aufgezeichnet.

Im Frequenzspektrogramm (Abbildung 6) wird deutlich, dass sich die spektrale Zusammensetzung des Betriebsgeräusches über der Zeit ändert. Die Änderung erfolgt aber nicht in regelmäßigen Zeitabschnitten, sondern wird mit zunehmender Drehfrequenz schneller. Es ist schwierig, die "Häufigkeit" der Änderung durch eine Zahl auszudrücken, bzw. die mechanische Ursache zu identifizieren.



**Abbildung 6: Schwingensignal und Drehwinkelimpuls eines Antriebs mit Planetengetriebe über etwa 2 Motor-Umdrehungen (Drehwinkelimpuls alle  $180^\circ$ ) und Spektrogramm über eine Drehzahlrampe des Motors von 0 Hz – 50 Hz innerhalb 20 Sekunden**

Die Drehwinkelsynchronität wurde mittels Resampling hergestellt. Je Motorumdrehung wurden 1024 Samples interpoliert. Daraus ergibt sich die höchste auflösbare Ordnung als 512. Ordnung. Bei niedrigster Drehfrequenz (0 Hz) ergibt sich eine Nachabtastung mit  $0 \cdot 1024$  Samples/Sekunde, etwa 0 kHz. Bei höchster Drehfrequenz (50 Hz) ergibt sich eine interpolierte Nachabtastung mit  $50 \cdot 1024$  Samples/Sekunde also etwa 50 kHz. Das Schwingensignal wurde mit 32 kHz abgetastet. Bis zu einer Drehfrequenz von  $32000/1024$  Hz, also etwa 30 Hz muss mit Aliasing gerechnet werden, wenn nicht zusätzlich gefiltert wird. Diese Drehfrequenz wird nach etwa 100 Motorumdrehungen erreicht. In Abbildung 7 wird Aliasing bei niedrigen Ordnungen im Bereich 0 bis ca. 100 Umdrehungen sichtbar.

Dem Ordnungsspektrogramm in Abbildung 7 kann sind vertikale Strukturen erkennbar, die darauf Hindeuten dass eine starke Geräuschveränderung etwa alle 90 Motorumdrehungen erfolgt. Gleichzeitig erkennt man Strukturen mit einer Periodizität von 10 Motorumdrehungen.

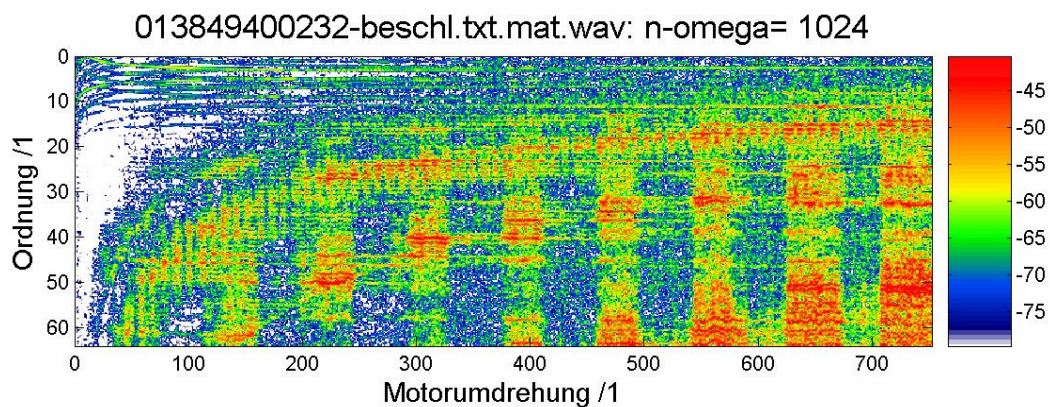


Abbildung 7: Ordnungsspektrogramm des Antriebs aus Abbildung 6.

Die Ergebnisse der Ordnungsanalyse lassen präzise Fragen nach auffälligen Effekten zu:

- Frage 1: Was wiederholt sich 8-mal je Motorumdrehung?
- Frage 2: Was wiederholt sich alle 10 Motorumdrehungen?
- Frage 3: Was wiederholt sich alle 90 Motorumdrehungen?

Durch Kenntnis der Getriebeverhältnisse können nun die verursachenden Komponenten identifiziert werden.

- Antwort 1: 8-mal je Motorumdrehung kommutiert der Antriebsmotor
- Antwort 2: in 10 Motorumdrehungen, drehen sich die Planeten einmal um sich selbst
- Antwort 3: in 90 Motorumdrehungen dreht sich das Schneckenrad einmal um sich selbst

Schneckenrad und Planeten des Planetengetriebes müssen besonders beleuchtet werden. Hier kann beispielsweise eine Exzentrizität vorliegen, oder ein Verzahnungsfehler auf halbem Umfang. Sind die kritischen Komponenten bekannt, kann schnell identifiziert werden, ob ein Fertigungs- oder ein Montageproblem vorliegt. Mit dieser Information können nun zielgerichtet Maßnahmen eingeleitet werden, die entweder die Qualität der Komponenten verbessern, oder den Montageprozess stabiler machen.

## 7 Zusammenfassung

Die Ordnungsanalyse ermöglicht die eindeutige Zuordnung von Schwingungen und Geräuschen zu mechanischen Komponenten von Antriebssystemen, unabhängig davon, ob es sich um einen Verbrennungsmotor mit Schaltgetriebe handelt, oder um "einfache" Kleinversteller mit fester Über- bzw. Untersetzung.

In der Fertigung kann durch Serienüberwachung direkt ermittelt werden, welche Komponente einer Antriebseinheit "nicht rund läuft", zu Schabgeräuschen führt, oder Rauigkeit verursacht. Das Produkt kann gezielt an diesen Komponenten optimiert werden indem Fertigungs- oder Montageprozesse umgestellt werden.

## 8 Literatur

[Wikipedia]: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ordnungsanalyse>, Stand: 31.10.2004

[Schmidt, L.]: Ordnungsanalyse ohne externen Takt, Diplomarbeit FH Heidelberg 1994

[Wirth, R]: Maschinendiagnose an Industriegetrieben. Teil II: Signalidentifikation in der Praxis. Antriebstechnik 37(1998), Nr. 11, S.77-81

[N.N.]: Messen beim An –und Abstellen von Maschinen. Brüel & Kjær Publikation: German BA 7112-11, 1988

[Kolerus, J]: Zustandsüberwachung von Maschinen. Kontakt & Studium Maschinenbau, Band 187, Expert Verlag, 1995