

Eine robuste Methode zur automatisierten Ordnungsanalyse bei rotierenden Maschinen

Michael Ertl¹

¹ Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, Deutschland, Email: michael.ertl@bosch.com

Einleitung

In der Entwicklung und Fertigung von rotierenden Maschinen werden robuste und schnelle Methoden zur Ordnungsanalyse gefordert, um Kenngrößen wie die Rotorunwucht, die Exzentrizität oder das Schaufeldurchlaufverhalten anhand der Amplituden von Drehzahlharmonischen zu bestimmen. Die Ordnungsanalyse setzt eine sichere Bestimmung der Maschinendrehzahl voraus, weil durch die Kenntnis der Grundfrequenz implizit alle Frequenzen der Maschinenharmonischen im Messsignal identifiziert werden können. Jedoch kann aufgrund des vorhandenen Bauraums oder der verfügbaren Messzeit in der Fertigung meist kein Drehzahlsensor zur Grundfrequenzbestimmung an der Maschine appliziert werden. Daher werden vielfach Schall- oder Vibrationsmessungen eingesetzt und durch eine automatisierte und rechnergestützte Datenauswertung der harmonischen Frequenzkomponenten im Messsignal die Grundfrequenz rotierender Maschinen bestimmt. Das auszuwertende Meßsignal weist dabei typischerweise folgende Merkmale auf:

- Die Grundschiwingung ist im Messsignal fehlend oder schwach ausgeprägt (Abb. 1).
- Die Signalenergie verteilt sich über einen weiten Frequenzbereich oder konzentriert sich in einem Frequenzbereich (Formant) weit oberhalb der Grundfrequenz.
- Es sind breitbandige und tonale Frequenzkomponenten aus Fremdgeräuschquellen überlagert.
- Das Frequenzspektrum enthält dominante Sub- und Zwischenharmonische.
- Die Maschinendrehzahl umfasst einen großen Bereich.
- Das Messsignal weist aufgrund schneller Drehzahlwechsel eine große zeitliche Variation einzelner Spektralkomponenten auf.
- Es liegen keine Schätzwerte der Grundfrequenz vor.

In den letzten Dekaden wurde eine sehr große Anzahl an numerischen Methoden im Zeit- und Frequenzbereich vorgestellt, um aus Messsignalen periodischer Bewegungen deren Grundfrequenz und Harmonische zu bestimmen. Die Anwendungsfelder reichen hierbei von der Sonar- und Radarmessung, Sprach- und Musikdatenverarbeitung in der drahtlosen Kommunikation bis hin zur Funktionsprüfung, Qualitätskontrolle oder Diagnostik von Schwingungs- und Schallmessdaten. Methoden zur Grundfrequenzbestimmung im Zeitbereich nutzen den periodischen Charakter des Messsignals, um die sich wiederholenden Signalmuster zu analysieren und aus der Periodizität die Grundfrequenz einer harmonischen Schwingung zu ermitteln. Prominente Vertreter sind Ereignisratenanalysen (Nulldurchgang, Schwellenwert, Ex-

tremwert), die Autokorrelationsfunktion (ACF) sowie die Distanzfunktion (AMDF) [2, 4]. Methoden im Frequenzbereich eignen sich vorrangig zur Bestimmung der Oberschwingungen. Beispiele sind die Methode des harmonischen Produktspektrums [6], die YIN-Methode [1]) oder die Cepstrumanalyse [7].

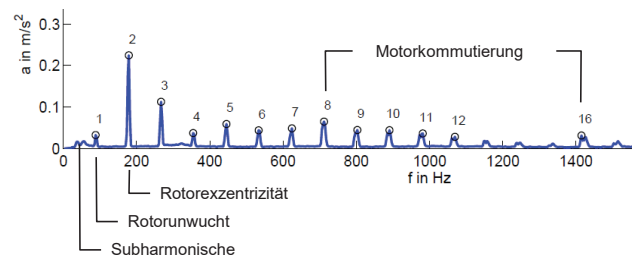


Abbildung 1: Typisches Frequenzspektrum einer Beschleunigungsmessung an einer Kleinpumpe mit nicht dominanter erster Ordnung.

Jedoch ist die Leistungsfähigkeit der untersuchten Methoden für den vorliegenden Anwendungsfall bei kleinen rotierenden Maschinen mit hohem Rauschpegel nicht befriedigend [9]. So versagen Methoden im Zeitbereich, wenn die Grundschiwingung schwach ausgeprägt ist. Autokorrelationsmethoden sind sehr sensitiv gegenüber Fremdgeräuschen [8]. Die Cepstrumanalyse und die Distanzfunktion führen zu Fehldetektionen bei Sub- oder Interharmonischen. Das Hauptproblem stellt nach wie vor die Oktavvertauschung dar, d.h. die fehlerhafte Zuordnung der Grundfrequenz zu einer Sub- oder Höherharmonischen [3].

Mit der modifizierten Spektralkammfunktion wird eine recheneffiziente Methode der Ordnungsanalyse im Frequenzbereich vorgestellt, die unter den oben genannten Voraussetzungen zuverlässig die Ordnungsbestimmung ohne einer Vorkennntnis des Drehzahlbereiches ermöglicht.

Signalaufbereitung

Für die Ordnungssuche sind lediglich die tonalen Anteile im Frequenzspektrum des Messsignals von Bedeutung. Alle breitbandigen Signalanteile, wie sie z.B. durch gedämpfte Resonanzen oder Fremdsignale wie Strömungsrauschen entstehen, verfälschen die weitere Ordnungsanalyse und sollen möglichst vollständig aus dem Frequenzspektrum entfernt werden. Die kontinuierliche Grundlinie im Messsignal $m(f)$ wird hierbei als nicht-tonaler Geräuschanteil $n(f)$ betrachtet (Abb. 2) und lediglich die tonalen Frequenzkomponenten im genäherten

tonalen Signalanteil des Frequenzspektrums,

$$s(f) = m(f) + n(f) \tag{1}$$

für die Ordnungssuche verwendet. Die tonalen Frequenzkomponenten im Frequenzspektrum können durch verschiedene Methoden wie z.B. eine globale Schwellenwertbildung (*clipping*) oder eine lokale Schwellenwertbildung innerhalb eines durchlaufenden Frequenzbandes ermittelt werden. In der folgenden Bestimmung der Spektralkammfunktion tragen so lediglich signifikante tonale Frequenzkomponenten zur Summenbildung bei.

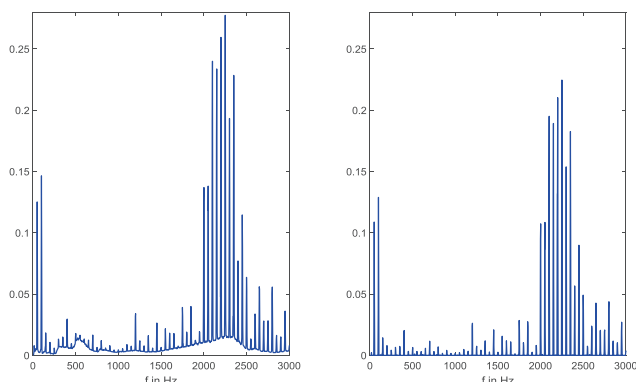


Abbildung 2: Trennung der tonalen Frequenzanteile (rechts) vom Messsignal (links) im Frequenzspektrum einer Beschleunigungsmessung durch lokale Schwellenwertbildung.

Berechnung der modifizierten Spektralkammfunktion

Bei einer Spektralkammfunktion wird im Frequenzspektrum die Stärke der Periodizität anhand der Amplituden harmonischer Signalkomponenten ermittelt. Hierbei kommt ein uniformer Spektalkamm c zum Einsatz, der aus N Kammzähnen im Frequenzbereich mit gleichem Zahnabstand f_c und der Einheitsamplitude 1 besteht.

$$c(f) = \sum_{i=1}^N \delta(f - i f_c) \tag{2}$$

Die Kammfrequenz f_c entspricht der Frequenz des ersten Kammzahnes. Ein definierter Such-Frequenzbereich f_{min} und f_{max} wird bei der gegebenen Frequenzauflösung Δf mit dem Spektalkamm c abgetastet und der Funktionswert der Spektralkammfunktion p bei f_c durch das Aufaddieren der Amplituden aller Frequenzkomponenten des Spektalkammes ermittelt.

$$p(f_c) = \sum_{i=1}^{N(f_c)} c(i f_c) \times \sum_{\Delta f=-T}^T s(i f_c + \Delta f) \tag{3}$$

Die Bandbreite $T = j \Delta f$ eines Kammzahnes entspricht hierbei ein Vielfaches j der Frequenzauflösung Δf des Signals. Die Kammzahn-Bandbreite kann den Frequenzungenauigkeiten harmonischer Signalkomponenten angepaßt werden, die sich aufgrund von Signal-Inharmonizitäten oder der Signalfensterung bei der diskreten Fouriertransformation ergeben. In Gleichung (3)

ergibt sich die Anzahl der Kammzähne

$$N(f_c) = \text{floor}(S_{max} / f_c) \tag{4}$$

aus der Obergrenze des Signalfrequenzbandes $S_{min} \leq f \leq S_{max}$. Dies entspricht einem infiniten Spektalkamm, bei dem die gesamte spektrale Information des harmonischen Signals zur Bestimmung der Grundfrequenz verwendet wird.

Durch den additiven Beitrag dominanter harmonischer Frequenzkomponenten bei der Anwendung des Spektalkammes ist in der Spektralkammfunktion $p(f)$ ein Maximum bei der Grundfrequenz f_1 (Drehzahl der Maschine) zu erwarten. Als wahrscheinlichster Kandidat gilt

$$f_1 = \arg \max p(f) . \tag{5}$$

Vermeidung des Oktavfehlers

Ein fundamentales Problem der Drehzahlbestimmung auf der Basis von Autokorrelations- und Spektalkammfunktionen ist die falsche Zuweisung der Grundfrequenz, wenn ausgeprägte drehzahlsynchrone Sub-, Zwischen- oder Höherharmonische vorhanden sind. Dieser Oktavfehler tritt wie im vorliegenden Fall verstärkt bei schwach ausgeprägten periodischen Komponenten, bei stark veräuschten Signalen sowie überlagerten Fremdsignalen auf.

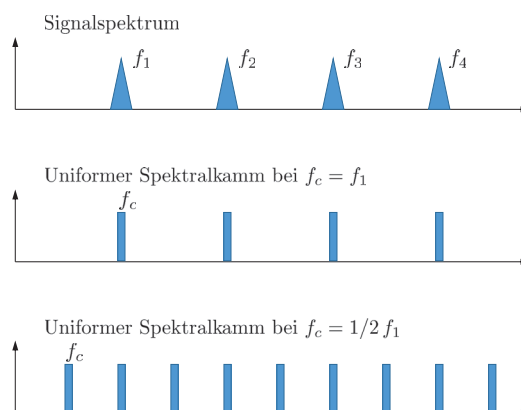


Abbildung 3: Anwendung eines uniformen Spektalkammes auf ein Signalspektrum mit vier Harmonischen ($f_1 - f_4$). Bei $f_c = 1/2 f_1$ werden wie bei $f_c = f_1$ alle harmonische Komponenten aufsummiert.

Auch die Summenbildung bei der Spektralkammfunktion führt zu dominanten Teilharmonischen in $p(f)$. Beim infiniten, uniformen Spektalkamm werden die gleichen harmonischen Komponenten, die bei der Grundfrequenz $f_c = f_1$ aufsummiert werden, auch bei den Subharmonischen $f_1/2, f_1/3, \dots$ aufsummiert (Abb. 3),

$$f_c = \frac{f_1}{s} \quad s \in N^+ | s > 1 . \tag{6}$$

Weitere Funktionsspitzen in der Spektralkammfunktion treten auch bei den Vielfachen $h = 2, 3, \dots$ dieser Subharmonischen auf (Abb. 4). Der deutliche Funktionsanstieg bei tiefen Frequenzen beruht auf der frequenzabhängigen Kammzahnanzahl N (Gl. 4), wodurch bei

kleinen Kammfrequenzen f_c mehr tonale Signalkomponenten aufaddiert werden.

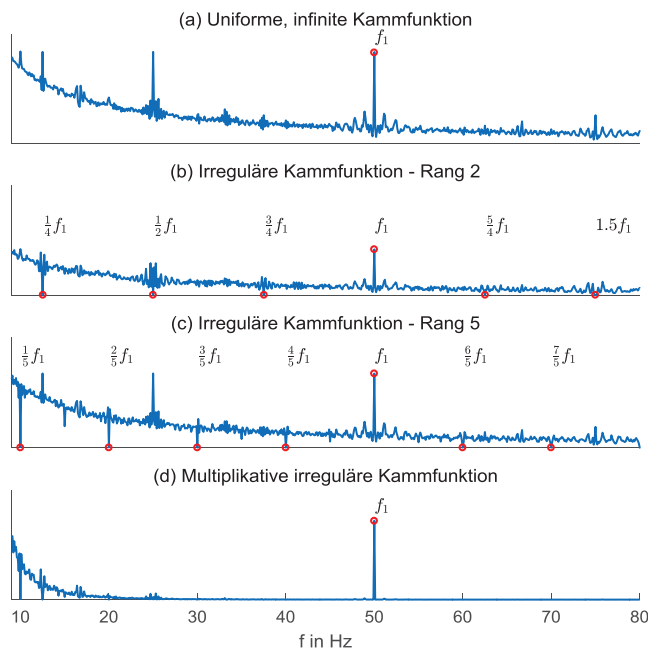


Abbildung 4: Beispiel zur Entfernung von Subharmonischen aus der uniformen, infinite Spektralkammfunktion (a) durch den Einsatz irregulärer Kammfunktionen (b, c) und deren Multiplikation (d).

Subharmonische können in der Spektralkammfunktion wirksam durch die Verwendung eines irregulären Kamms reduziert werden. Ein irregulärer Kamm mit dem Rang r entsteht aus einem uniformen Kamm, wenn jeder r -te Kammzahn entfernt wird (Abb. 5).

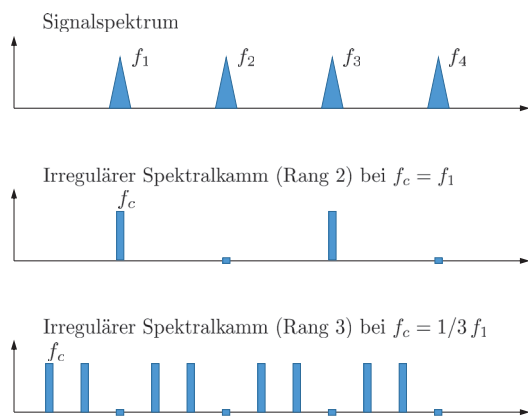


Abbildung 5: Anwendung eines irregulären Spektralkamms auf ein Signalspektrum mit vier Harmonischen ($f_1 - f_4$). Durch die fehlenden Kammzähne wird bei $f_c = 1/3 f_1$ die Aufsummierung harmonischer Komponenten wirksam verringert.

Hierdurch werden in der Spektralkammfunktion alle Teilharmonische bei den Frequenzen

$$f_c = \frac{1}{r} \frac{h}{s} f_1 \quad r, h, s \in \mathbb{N}^+ \cap r > 1 \quad (7)$$

minimiert [5]. Als Beispiel werden in Abb. 4 durch den

irregulären Spektralkamm vom Rang 2 die Subharmonischen bei $1/4 f_1, 1/2 f_1, 3/4 f_1$ sowie bei $3/2 f_1$ nahezu vollständig unterdrückt. Die ganzzahligen Harmonischen von f_1 hingegen werden durch den irregulären Spektralkamm in ihrer Amplitude proportional zu der fehlenden Zahnanzahl reduziert.

Aus Gleichung (7) folgt, dass zur Beseitigung der Subharmonischen nur die begrenzte Anzahl an irregulären Spektralkämmen erforderlich ist, deren Rang prim ist. Alle weiteren Spektralkämme sind redundant, d.h. sie reduzieren die Amplituden der gleichen sub-harmonischen Frequenzkomponenten. In der Anwendung irregulärer Spektralkämme zeigt sich, dass vier irreguläre Spektralkämme vom Rang 2, 3, 5 und 7 ausreichend sind, um zur Vermeidung des Oktavfehlers alle dominanten Subharmonischen zu reduzieren.

Die finale irreguläre Spektralkammfunktion ergibt sich aus der multiplikativen Kombination der vier irregulären Spektralkammfunktionen. Die Multiplikation erzeugt hierbei ein vielfach deutlicher ausgeprägtes Maximum der Spektralkammfunktion bei der Grundfrequenz $f_c = f_1$.

Höherharmonische können in der Spektralkammfunktion wirksam durch die Verwendung eines alternierenden Spektralkamms reduziert werden. Ein alternierender Kamm mit dem Rang r entsteht, wenn zwischen den Kammzähnen eines uniformen Kamms $r - 1$ zusätzliche, jedoch negative Zwischenkammzähne mit gleichem Abstand eingefügt werden (Abb. 6).

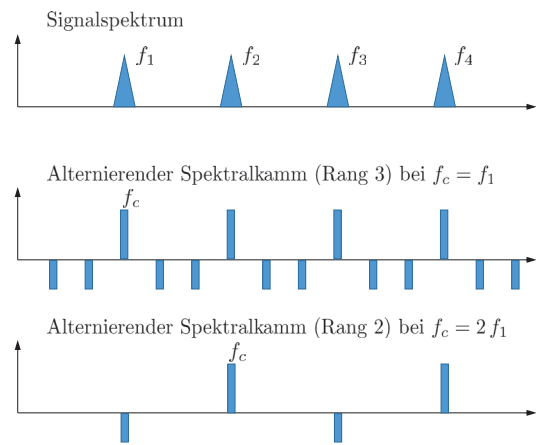


Abbildung 6: Anwendung eines alternierenden Spektralkamms auf ein Signalspektrum mit vier Harmonischen ($f_1 - f_4$). Durch die negative Addition von Spektralkomponenten wird in der Spektralkammfunktion bei $f_c = 2 f_1$ die Amplitude minimiert.

Hierdurch werden in der Spektralkammfunktion alle Höherharmonischen bei den Frequenzen

$$f_c = r \frac{h}{s} f_1 \quad r, h, s \in \mathbb{N}^+ \cap r > 1 \quad (8)$$

minimiert (Abb. 7). Durch die Aufsummierung negativer Kammwerte können in der Spektralkammfunktion negative Werte entstehen. Diese müssen durch eine geeignete Schwellenwertbildung entfernt werden, um den alter-

nierenden Spektalkamm bei der multiplikativen Kombination zur Bildung der finalen alternierenden Spektalkammfunktion verwenden zu können.

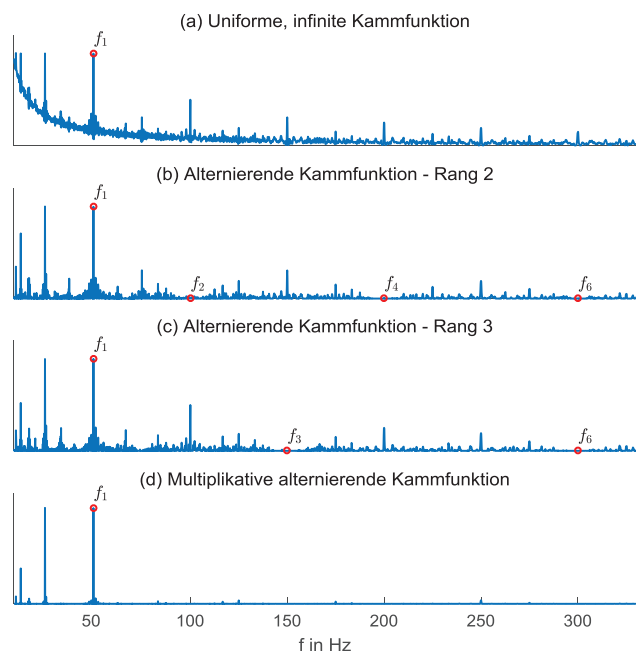


Abbildung 7: Beispiel zur Entfernung von Höherharmonischen aus der uniformen, unendlichen Spektalkammfunktion (a) durch den Einsatz alternierender Kammfunktionen (b, c) und deren Multiplikation (d).

Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode der frequenzbasierten Ordnungsanalyse auf der Grundlage von modifizierten Spektalkammfunktionen eignet sich durch die robuste Entfernung von Sub- und Höherharmonischen in der Spektalkammfunktion für die präzise automatisierte Bestimmung der Drehzahl und Ordnungen von rotierenden Maschinen.

Literatur

- [1] DE CHEVEIGNÉ, A. ; KAWAHARA, H. : YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 111 (2002), S. 1917–1930
- [2] GERHARD, D. : Pitch Extraction and Fundamental Frequency: History and Current Techniques / Department of Computer Science, University of Regina, Canada. 2003 (TR-CS 2003-06). – Forschungsbericht
- [3] HEINZ, T. : *Ein physiologisch gehörgerechtes Verfahren zur automatisierten Melodietranskription*, TU Illmenau, Diss., 2006
- [4] LI HUI ; BEI-QIAN DAI ; LU WEI: A Pitch Detection Algorithm Based on AMDF and ACF. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2006

- [5] LIENARD, J.-S. ; BARRAS, C. ; SIGNOL, F. : Using sets of combs to control pitch estimation errors. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* 4 (2008)
- [6] NOLL, A. M.: Pitch Determination of Human Speech by the Harmonic Product Spectrum, the Harmonic Sum Spectrum and a Maximum Likelihood Estimate. In: *Proceedings of the Symposium on Computer Processing in Communications* Bd. XIX. Brooklyn, New York : Polytechnic Press, 1970, S. 779–797
- [7] NOLL, A. M.: Cepstrum Pitch Determination. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 41 (1967), Nr. 2, S. 293–309
- [8] QUAST, H. ; SCHREINER, O. ; SCHROEDER, M. R.: Robust pitch tracking in the car environment. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)* Bd. 1, 2002, S. 353–356
- [9] SUKHOSTAT, L. ; IMAMVERDIYEV, Y. : A Comparative Analysis of Pitch Detection Methods Under the Influence of Different Noise Conditions. In: *Journal of Voice* 29 (2015), Nr. 4, S. 410 – 417