

Klaus Kaltofen

Saubere HS-Bewegungen bei periodisch schwankender Antriebswinkelgeschwindigkeit

1 Motivation

Für schnelllaufende, dynamisch hoch beanspruchte Antriebe sind HS-Bewegungen (HS ... Harmonic Synthesis) der massereichen Getriebeglieder, in der Regel der Abtriebsglieder, von oftmals entscheidendem Vorteil, weil die Schwingungserregung infolge höherharmonischer Anteile in der Übertragungsfunktion (ÜF) (z.B. bedingt durch Unstetigkeiten in den höheren Ableitungen) entfällt und dadurch ein Betrieb bei höheren Drehzahlen möglich wird.

Andererseits ist man bestrebt, den Antriebsmechanismus mit seiner Eigenbewegung (diejenige Bewegung, die der periodisch arbeitende (reibunglose) Mechanismus im stationären Betriebszustand ausführen würde, wenn über die gesamte Periode hinweg überhaupt kein Antriebsmoment wirken würde) anzutreiben, weil dadurch viel Antriebsleistung eingespart werden kann. Die Geschwindigkeit dieser Eigenbewegung hat einen periodischen Verlauf. Die HS-Bewegungsgesetze sind jedoch i. d. R. für eine konstante Antriebs(winkel)geschwindigkeit ausgelegt. Deshalb gehen die o. g. Vorteile der HS-Bewegungsgesetze in der Praxis oftmals verloren.

Es wird in diesem Artikel eine praktikable Methode vorgestellt, mit der es ermöglicht wird, „saubere“ HS-Bewegungen zu erzeugen, auch wenn die Antriebswinkelgeschwindigkeit periodisch schwanken sollte. Ein Zusammenspiel zwischen Messung und Rechnung ist hierzu erforderlich.

2 Ausgangspunkt

Ausgangspunkt ist ein Antriebsmechanismus, mit dem eine Antriebs(dreh)bewegung Ωt (mit Ω ... Antriebswinkelgeschwindigkeit; t ... Zeit) in eine periodische Abtriebs-(bzw. Werkzeug-)bewegung $\psi(\Omega t)$ transformiert wird, die einem HS-Bewegungsgesetz (/1/) entspricht. Im vorliegenden Fall (Bild 1) handelt es sich um eine Rast-Umkehrbewegung, die konkrete technologisch bedingte Restriktionen zu erfüllen hat und deren Frequenzspektrum aus (den ersten) fünf Harmonischen besteht.

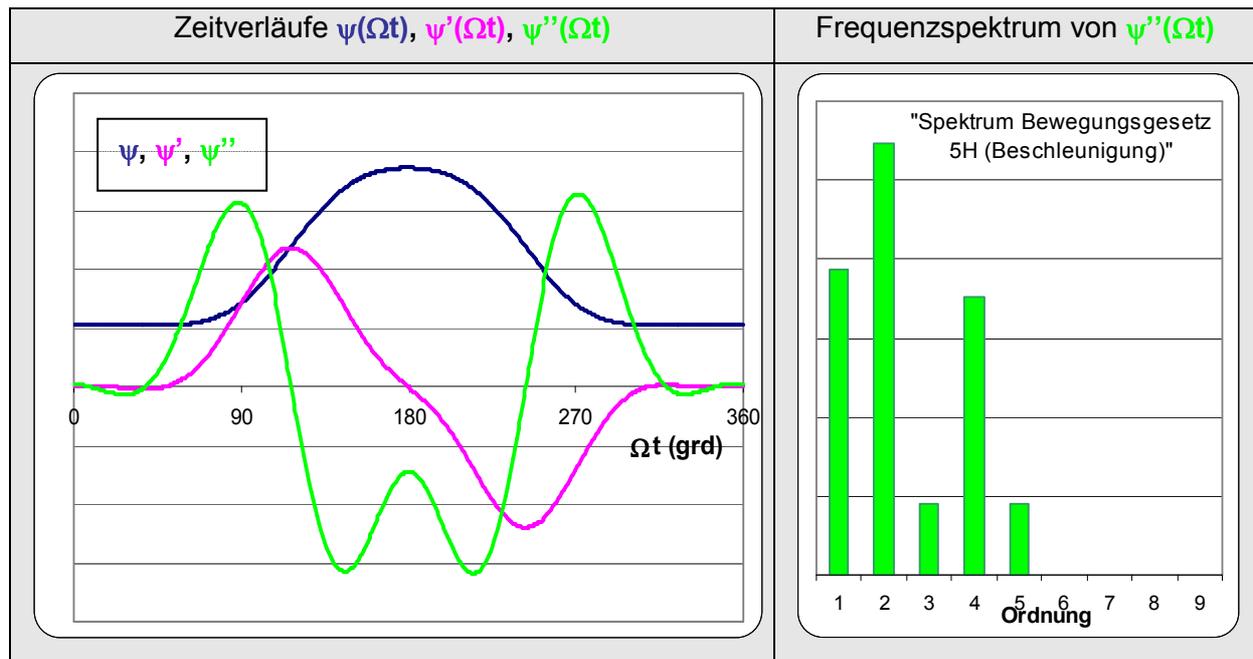


Bild 1: HS-Rast-Umkehrbewegung: Zeitverlauf und Frequenzspektrum *)

Erfolgt die Realisierung dieser Bewegung z.B. durch ein Kurven-Koppel-Getriebe, so ist folgende Vorgehensweise üblich:

1. Berechne mit der o. g. Sollfunktion als Antriebsbewegung die Soll-Drehbewegung der Kurvenrollenhebel $\rho(\varphi=\Omega t)$ (z.B. mit **winDAM 2.7** /2/)
2. Berechne aus der Rollenhebelrotation $\rho(\Omega t)$ die Konturen der beiden Kurven (beim Antriebsprinzip Kurve+Gegenkurve). Ergebnisse sind maschinenverwertbare Listen von x-y-Koordinatenpaaren der berechneten Kurvenscheibenkonturen.
3. Fertige die Kurvenscheiben und montiere den gesamten Antrieb.

*) Auf eine Skalierung der Ordinaten in sämtlichen Diagrammen in dieser Arbeit wurde aus Gründen des Daten- und Geheimnisschutzes verzichtet.

3 Vergleich Rechnung \leftrightarrow Messung

Um die postulierten Vorteile des HS-Bewegungsgesetzes zu überprüfen, wurden Beschleunigungsmessungen am Abtrieb des Getriebes ($\ddot{\psi}(t)$) bei stationärem Betrieb durchgeführt. Die Messergebnisse (Zeitverlauf und Spektrum) werden in Bild 2 (blau) dargestellt und mit der Sollfunktion (grün) verglichen.

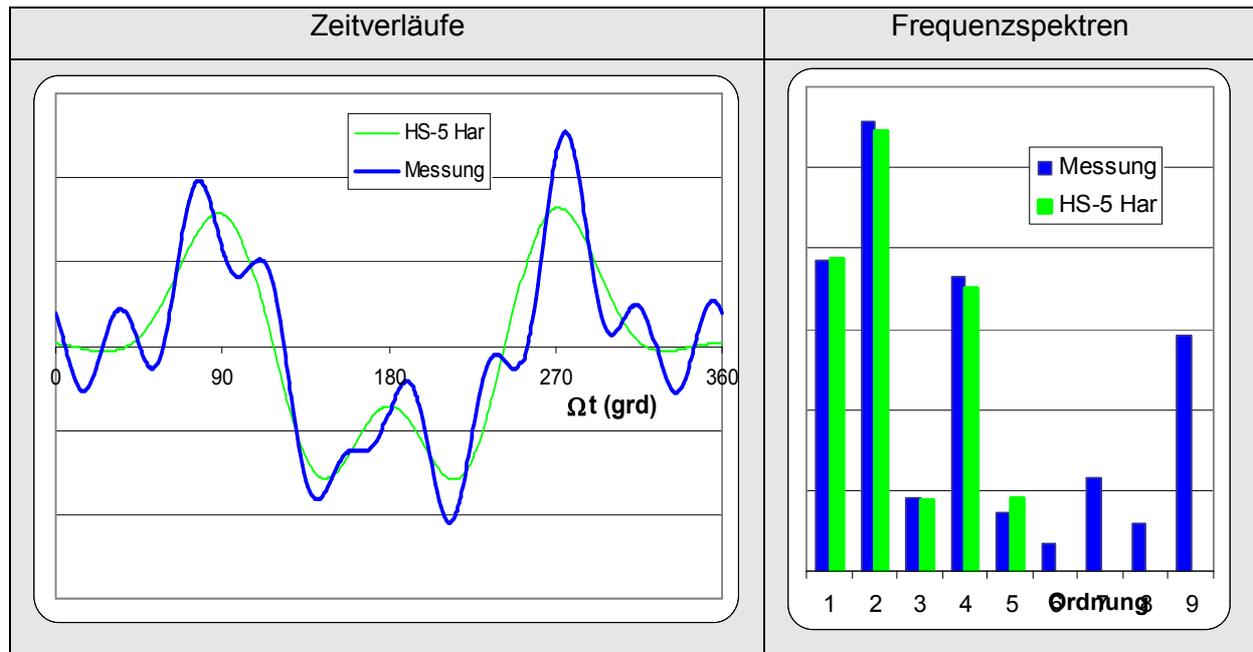


Bild 2: Gemessener und theoretischer Beschleunigungsverlauf im Vergleich

Das Messergebnis, das nur eine entfernte Ähnlichkeit mit dem theoretischen Verlauf aufweist, verwundert insbesondere dadurch, dass es höherharmonische (6. bis 9. Harmonische) Anteile enthält, die eigentlich gar nicht auftreten dürften, weil das HS-Bewegungsgesetz nur aus 5 Harmonischen besteht. Der Grund für die o. g. Anteile ist, dass die Antriebswinkelgeschwindigkeit Ω im stationären Betriebszustand nicht konstant ist, sondern periodisch pro Umlaufperiode schwankt. Der gemessene Winkelgeschwindigkeitsverlauf $\dot{\phi}(t)$ über eine Periode ist in Bild 3 (links oben) dargestellt, dessen Ordnungsanalyse befindet sich in Bild 3 rechts. Dabei wurde der konstante Anteil (Nullte Ordnung der Harmonischen) bei der Darstellung unterdrückt. Der gemessene Geschwindigkeitsverlauf wird aus den hier dominierenden Frequenzanteilen der 2. bis 5. Ordnung approximiert (Bild 3, links unten), und diese Näherung wird anstatt des Originalmessergebnisses für die folgenden Lösungsschritte weiterverwendet.

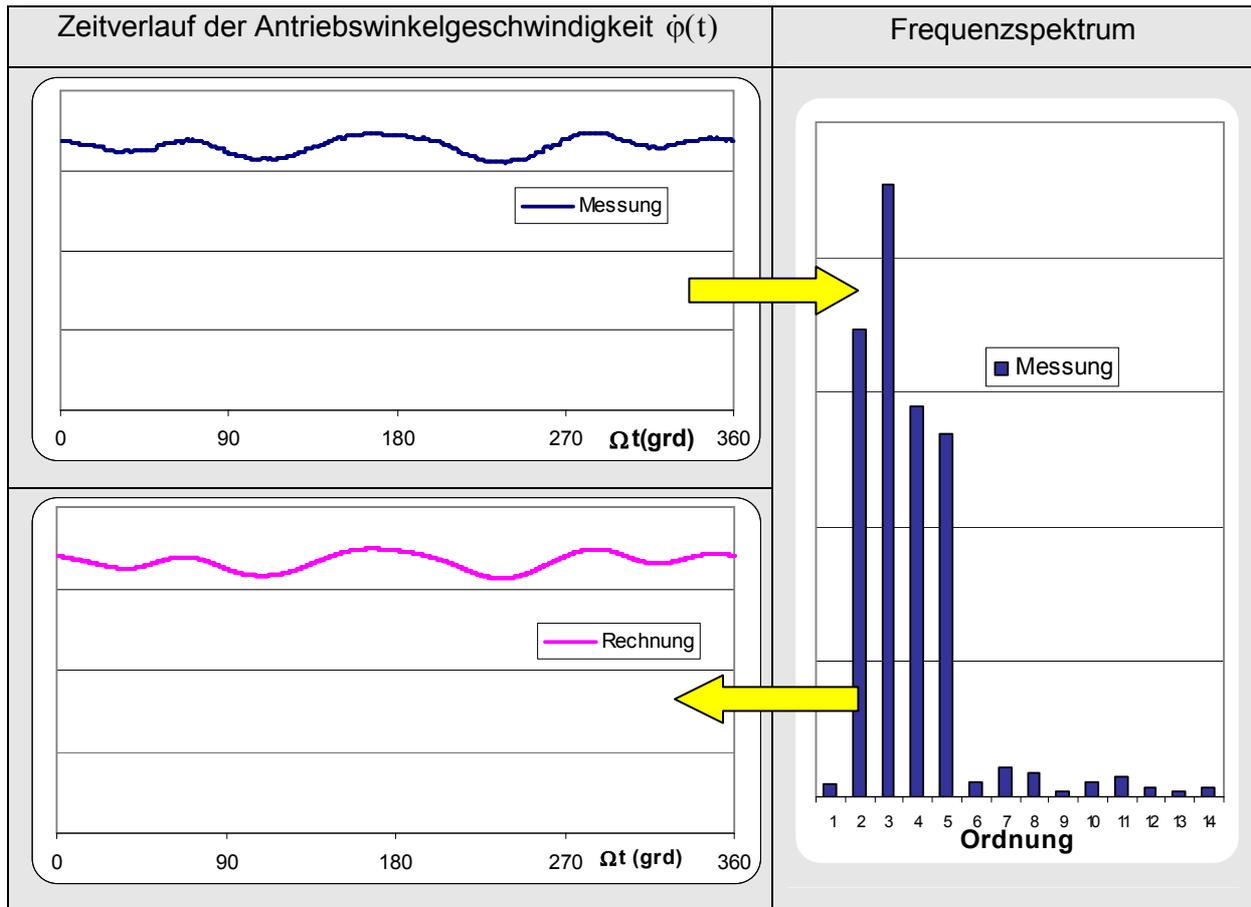


Bild 3: Gemessener Antriebswinkelgeschwindigkeitsverlauf und Ergebnis der Fourieranalyse

Aus den vorliegenden Ergebnissen wird nun deutlich, weshalb im gemessenen $\ddot{\psi}(t)$ -Verlauf Höherharmonische (6. bis 9. Harmonische) auftreten:

Es gilt für das Übertragungsverhalten des Antriebsmechanismus':

$$\psi = \psi(\varphi(t)) \quad (1)$$

mit ψ ... Abtriebsbewegung (Weg oder Winkel)

φ ... Antriebsbewegung (Weg oder Winkel)

t ... Zeit

bzw. für die Geschwindigkeit:

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \psi' \cdot \dot{\varphi} \quad (2)$$

und die Beschleunigung:

$$\ddot{\psi} = \frac{d\dot{\psi}}{dt} = \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \psi'' \cdot \dot{\varphi}^2 + \psi' \cdot \ddot{\varphi} \quad (3)$$

Folglich sind die beiden Anteile aus Gl. (3) ($\psi'' \cdot \dot{\varphi}^2$ und $\psi' \cdot \ddot{\varphi}$) bei nicht konstanter Antriebswinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}(t)$ Produkte zweier Fourierreihen (siehe z.B. /3/) mit der

höchsten enthaltenen Ordnung (n+m), wenn die höchsten Ordnungen der einzelnen Faktoren n bzw. m sind.

Somit ist das Auftreten der höherharmonischen Anteile im Messergebnis plausibel und die Größe der konkreten Amplitude wird vor allem dadurch bestimmt, wie nahe die jeweilige Erregerharmonische an einer Eigenfrequenz (die Schwingformanteile in Bewegungsrichtung enthält) des Antriebs liegt.

4 Lösungsweg

Die Methode zur Erlangung sauberer HS-Bewegungsgesetze bei periodisch schwankenden, aber stabilen Antriebswinkelgeschwindigkeitsverläufen ist in diesem Falle (Messung der Antriebswinkelgeschwindigkeit) einfach und schneller zu bewerkstelligen als die in /4/ vorgeschlagene, rein rechnerische Methode

Grundlage dafür sind die aus der Messung hervorgegangenen Fourierkoeffizienten des Antriebswinkelgeschwindigkeitsverlaufes a_j und b_j , ($j=2 \dots 5$). Unter deren Zuhilfenahme kann direkt auf den Verlauf des Antriebswinkels $\varphi(t)$ geschlossen werden:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{T} t + \sum_{j=2}^5 \left[\frac{-b_j}{j} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot j \cdot t\right) + \frac{a_j}{j} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot j \cdot t\right) \right] \quad (4)$$

mit a_j, b_j ... Fourierkoeffizienten der Antriebswinkelgeschwindigkeit,
 j ... Nummer der Fourierordnung,
 T ... Dauer eines Umlaufes (Periodendauer),
 t ... Zeit ($0 \leq t \leq T$)

Anschließend werden die neuen Kurvenkonturen $r(\varphi)$ unter Benutzung der bereits berechneten (Abschnitt 2) Soll-Rollenhebelrotation $\rho(t)$ und des neuen Antriebsdrehwinkelverlaufes $\varphi(t)$ aus Gl. 4 als Bezugsbasis berechnet. Ergebnis ist wiederum eine maschinenverwertbare Liste von x-y-Koordinatenpaaren zur Fertigung der Kurvenscheiben.

Die jetzt generierten Kurvenscheiben unterscheiden sich jedoch von der Ausgangsvariante dahingehend, dass sie - auf den mit Gl. (4) ermittelten Antriebswinkelverlauf abgestimmt - keine höheren Harmonischen implizieren als diejenigen, die auch im HS-Bewegungsgesetz enthalten sind (vgl. hierzu Bild 4). Die harmonischen Anteile von Bewegungsgesetz (grün) und Messergebnis (blau) unterscheiden sich lediglich um die kinetoelastischen Anteile, die zu einer „Aufweitung“ der Beschleunigungsverläufe führen.

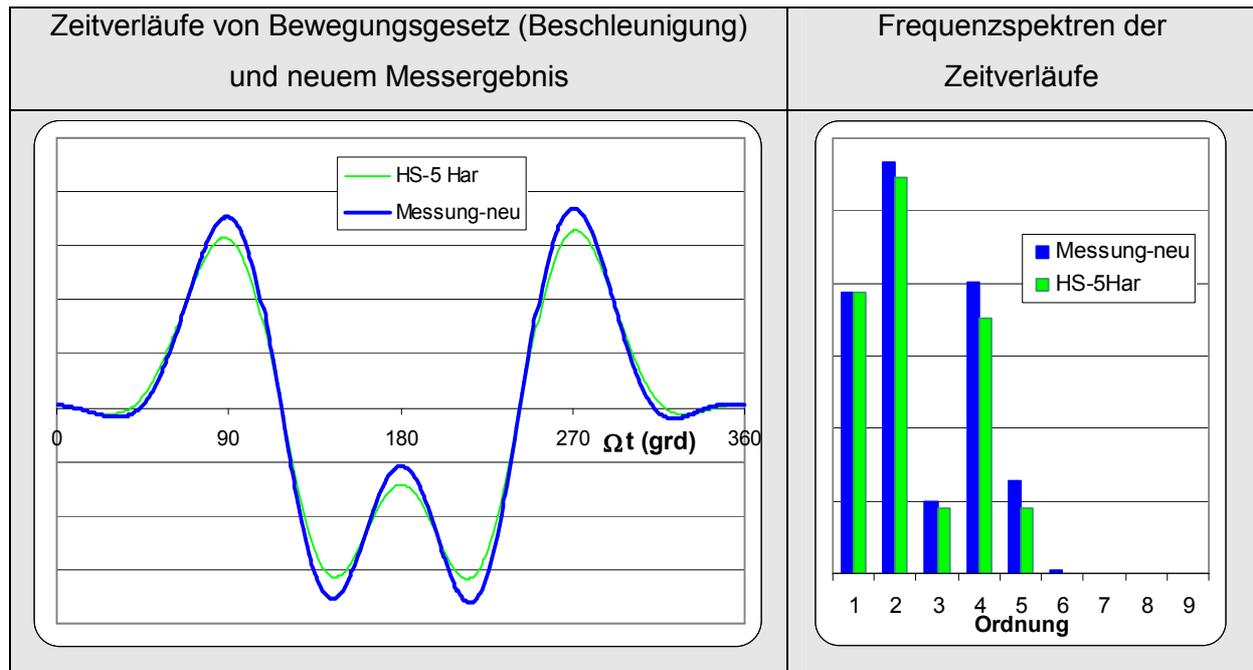


Bild 4: Vergleich von gemessener, neuer Abtriebsbewegung (Beschleunigung) und ursprünglichem HS-Bewegungsgesetz (grün)

5 Fazit

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Generierung von HS-Bewegungen bei periodisch verlaufenden Antriebsgeschwindigkeiten unter Zuhilfenahme von Messergebnissen vorgestellt. Die Erzeugung sauberer (von keinen höherharmonischen Anteilen gestörter) HS-Bewegungsgesetze bei periodischem Antriebsdrehgeschwindigkeitsverlauf wird zukünftig an Bedeutung gewinnen, weil die Entwicklung energieeffizienter Antriebe zwingend auf schwankende Antriebsgeschwindigkeiten führt.

Quellen

- /1/ http://www.kaltofen-engineering.de/data/_uploaded/file/pdf/mHSL-Doku.pdf
- /2/ http://www.kaltofen-engineering.de/data/_uploaded/file/pdf/winDAM-Doc.pdf
- /3/ <http://gruber.userweb.mwn.de/12.itf/12.itf.lec09.pdf>
- /4/ http://www.kaltofen-engineering.de/data/_uploaded/file/pdf/HS-Bewegungen_trotz.pdf