

mHSL 1.0 – Synthese von HS-Bewegungsgesetzen

Dr.-Ing. Klaus Kaltofen, TU Chemnitz

Zusammenfassung:

Es wird ein Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten von **mHSL 1.0** gegeben. Das Programm **mHSL** ist eine an der TU Chemnitz entwickelte Software zur Synthese und Optimierung von HS-Bewegungsgesetzen. Der Anwender kann unter Vorgabe technologischer und dynamischer Restriktionen bis zu fünf HS-Lagefunktionen, die auch voneinander abhängig sein können, generieren.

Anhand von zwei Berechnungsbeispielen werden die Möglichkeiten erläutert.

1. HS-Bewegungsgesetze

In Bild 1 wird das Minimalmodell eines elastischen Antriebes dargestellt. Ein ungleichmäßig übersetzender Mechanismus (z.B. ein Kurvengetriebe) bewegt ein elastisches Abtriebs- oder Arbeitsorgan.

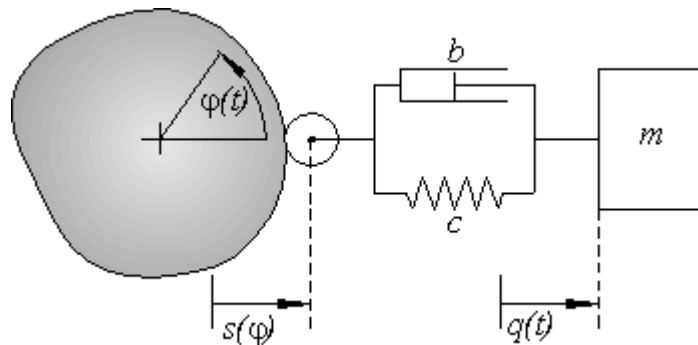


Bild 1: Minimalmodell eines elastischen Antriebes

Traditionelle Bewegungsgesetze $s(\varphi)$ (z.B. Polynome, Sinoiden) haben den Nachteil, dass sie aus mehreren Teilbewegungsgesetzen zusammengesetzt werden. Dadurch sind an den Bereichsgrenzen Unstetigkeiten in den höheren Ableitungen unvermeidbar. Diese Unstetigkeiten wiederum sind der Grund für dynamische Störungen (Anregen von Eigenschwingungen des elastischen Abtriebes), die gerade bei hohen Antriebsdrehzahlen zu starken dynamischen Belastungen und zu technologisch unzulässigen Abweichungen im Verlauf der Abtriebsfunktion $q(t)$ führen. Eine harmonische Analyse dieser Lagefunktionen ergibt, dass im Fourierspektrum große höherharmonische Anteile vorhanden sind.

Genau dieser Nachteil wird durch HS-Bewegungsgesetze vermieden. HS-Bewegungsgesetze sind periodische Lagefunktionen (von Mechanismen), die nicht abschnittsweise zusammengesetzt sind und deren Frequenzspektrum aus nur wenigen, niedrigen Harmonischen besteht. Dadurch können höhere Antriebsdrehzahlen und/oder geringere dynamische Belastungen im Antriebssystem erreicht werden.

2. Leistungsumfang von mHSL

Mit **mHSL** werden simultan bis zu fünf HS-Bewegungsgesetze (Lagefunktionen) generiert und optimiert. An diese Bewegungsgesetze können (bis zu 120) technologische Forderungen gestellt werden. Dabei wird zwischen Absolut- und Relativforderungen unterschieden. Absolutforderungen werden an ein Bewegungsgesetz gestellt, Relativforderungen an die Differenz zweier (voneinander abhängiger) Bewegungsgesetze.

Weiterhin können an die Lagefunktionen kinematische und dynamische Zusatzforderungen gestellt werden. Kinematische Zusatzforderungen sind:

- Die Beschränkung des Maximums einer Lagefunktion 0. bis 3. Ordnung,
- die Beschränkung bzw. Negierung einzelner Harmonischer in einer Lagefunktion 0. bis 3. Ordnung.

Dynamische Zusatzforderung ist in erster Linie die Forderung nach maximal möglichem Abstimmungsverhältnis η_{\max} , ($\eta = \Omega/\omega$, Ω ... Antriebswinkelgeschwindigkeit, ω ... Eigenkreisfrequenz des Minimalmodells (vgl. Bild 1), mit $\omega^2 \approx c/m$), für welches die an die Lagefunktion 0. bis 3. Ordnung (s, s', s'', s''') gestellten technologischen Forderungen auch noch für die Abtriebsfunktion (q, q', q'', q''') gültig sind.

Die technologischen Forderungen kennzeichnen die Abhängigkeiten der Lagefunktionen s, s', s'' und/oder s''' zu konkreten Winkelstellungen φ_i oder in Winkelintervallen $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$. Solche Forderungen können sein :

- Die Limitierung eines konkreten s-, s'-, s''- oder s'''- Funktionswertes an einer bestimmten Antriebswinkelstellung φ_i ,
- die beidseitige Begrenzung (obere und untere Grenze) der s-, s'-, s''-, oder s'''- Funktion in einem Intervall $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$,
- die Limitierung der Differenz der s-, s'-, s''- oder s'''- Funktionswerte zweier Bewegungsgesetze an einer bestimmten Antriebswinkelstellung φ_i ,
- die beidseitige Begrenzung der Differenz der s-, s'-, s''-, oder s'''-Lagefunktion zweier Bewegungsgesetze in einem Intervall $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$

Das Programm **mHSL** berechnet für die mit den o.g. Forderungen gekennzeichneten Bewegungsgesetze die minimalen Fourierkoeffizienten der einzelnen Harmonischen.

Oftmals sind die technologischen Forderungen nicht an die konkreten (absoluten) Winkelstellungen gebunden, sondern es kommt nur auf die relativen Winkellagen der voneinander abhängigen Forderungen an. Dann besteht in **mHSL** die Möglichkeit, der o.g. Minimierung (lokale oder innere Optimierung) eine globale (äußere) Optimierung überzuordnen. Dabei werden die zusammengehörigen, voneinander abhängigen technologischen Forderungen zu Optimierungsobjekten zusammengefasst (maximal 5 Optimierungsobjekte) und durch Verschiebung dieser Objekte auf der φ -Achse nach einer Verbesserung der HS-Bewegungsgesetze im Sinne der geforderten Kriterien gesucht.

3. Lösungsmethode

Die technologischen, kinematischen und dynamischen Forderungen stellen sowohl die Lösungseinschränkungen (Restriktionen) als auch das Ziel der lokalen Optimierung dar. In **mHSL** wird zwischen konstanten und variablen Forderungen unterschieden, Dabei wird jede variable Forderung durch eine Mindestforderung f_0 und eine Idealforderung f_1 spezifiziert. Idealforderungen sind z.B.:

- möglichst große Rastbreite,
- möglichst hohe Rastgüte,
- möglichst hohes Abstimmungsverhältnis h
- möglichst genaue Einhaltung vorgegebener Funktionswerte,
- möglichst kleine Beschleunigungsmaxima usw.

Bei der lokalen Optimierung in **mHSL** erfolgt - ausgehend von den Mindestforderungen - eine schrittweise Annäherung an die Idealforderungen in der Form

$$f = f_0 + \beta * (f_1 - f_0).$$

Somit kann diese, eigentlich multikriterielle Optimierung auf die Maximierung eines einzigen Parameters β ($0 \leq \beta \leq 1$) zurückgeführt werden. Die Suche nach dem maximal

erreichbaren Parameter β_{\max} erfolgt in 10 Schritten, wobei je nach Erfüllung bzw. Nichterfüllung der gesamten Forderungen β erhöht oder vermindert wird (vgl. /1/, S.38).

Kernstück des Programmes **mHSL** ist eine Routine zur Lösung des linearen Ungleichungssystems

$$b_u \leq \underline{A}^* y \leq b_o .$$

Hierbei sind y der Lösungsvektor, dessen Elemente die gesuchten Fourierkoeffizienten der einzelnen Bewegungsgesetze sind, b_u die untere, b_o die obere Schranke (resultierend aus den technologischen und kinematischen Forderungen) , und \underline{A} stellt die Koeffizientenmatrix dar. Diese enthält die trigonometrischen Anteile der jeweiligen Harmonischen der Lagefunktionen bzw. zusätzlich die dynamischen Vergrößerungsfaktoren bei Forderungen für $\eta > 0$. (vgl. /1/, S.12). Bei einer Variation des Parameters β werden zu jedem Optimierungsschritt die unteren und oberen Grenzen (b_u und b_o) aktualisiert und die Matrix \underline{A} neu generiert.

Die übergeordnete globale Optimierung arbeitet nach einer stochastischen Suchmethode. Vom Anfangszustand ausgehend werden die Optimierungsobjekte (zusammengehörige Winkelintervalle oder Winkelstellungen) zufällig auf der φ -Achse verschoben. Danach wird die lokale Optimierung aktiviert und das maximal mögliche β für diesen Zustand ermittelt . Anschließend wird in 8 zufällige Suchrichtungen (Voreinstellung) weitergesucht, und es wird derjenige Versuch als neuer Anfangszustand für den nächsten Optimierungsschritt benutzt, mit dem das größte β erzielt werden konnte . Die Anzahl der Optimierungsschritte ist mit 20 ebenfalls voreingestellt. Die Voreinstellung für die Suchschrittweite beträgt 1/4 der Breite der verschieblichen Winkelintervalle.

/1/ Lüder, R.: "Zur Synthese periodischer Bewegungsgesetze von Mechanismen unter Berücksichtigung von Elastizität und Spiel", VDI-Fortschrittberichte, R.11, Nr.225, VDI-Verlag Düsseldorf 1995

3. Beispiele

3.1 Webmaschine

technologische Restriktionen, Optimierungsziel: möglichst kleines Beschleunigungsmaximum bei möglichst großem Abstimmungsverhältnis

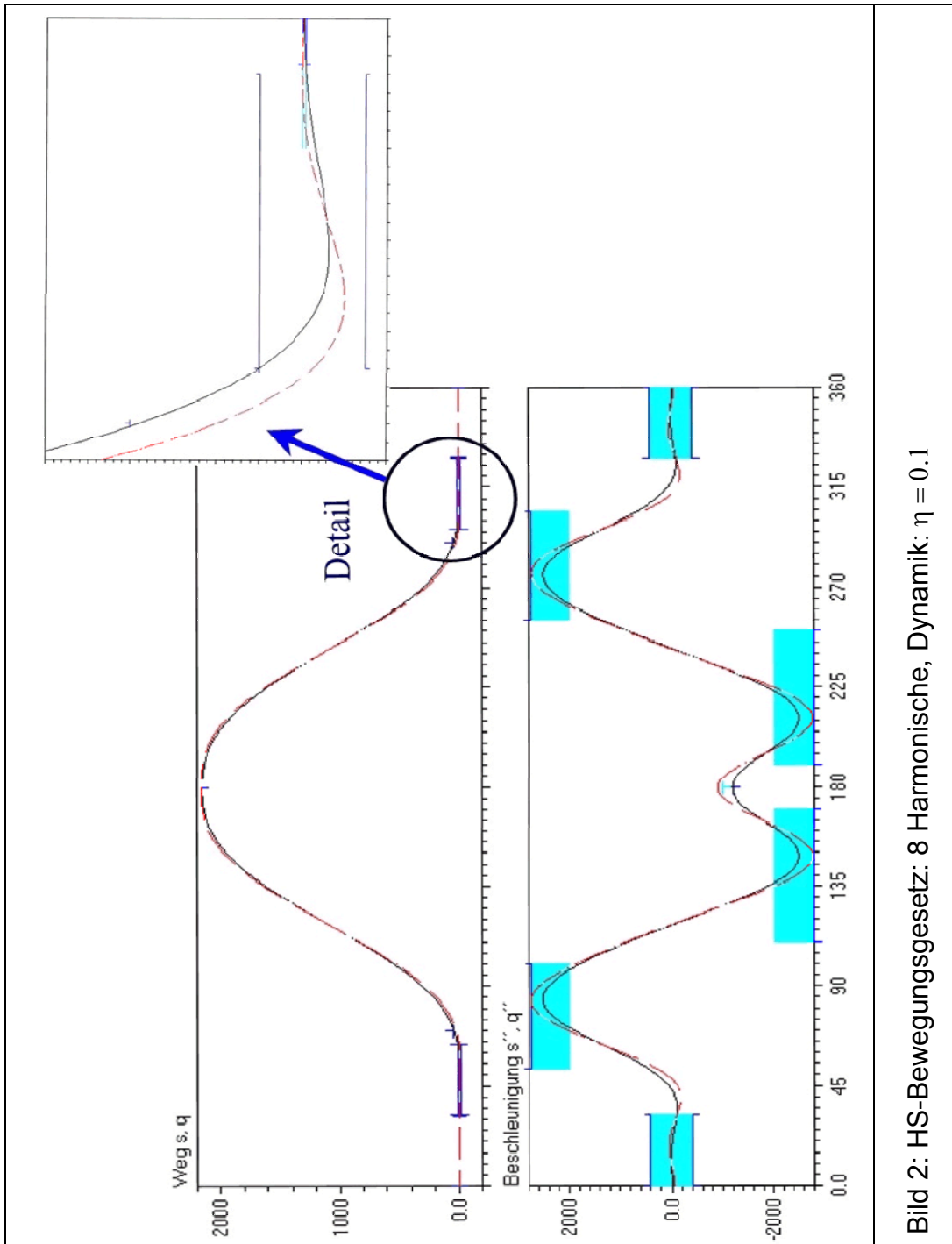


Bild 2: HS-Bewegungsgesetz: 8 Harmonische, Dynamik: $\eta = 0.1$

3.2 Verpackungsmaschine

Zwei abhängige Bewegungsgesetze, Absolut- und Relativforderungen, Anwendung der äußeren Optimierung

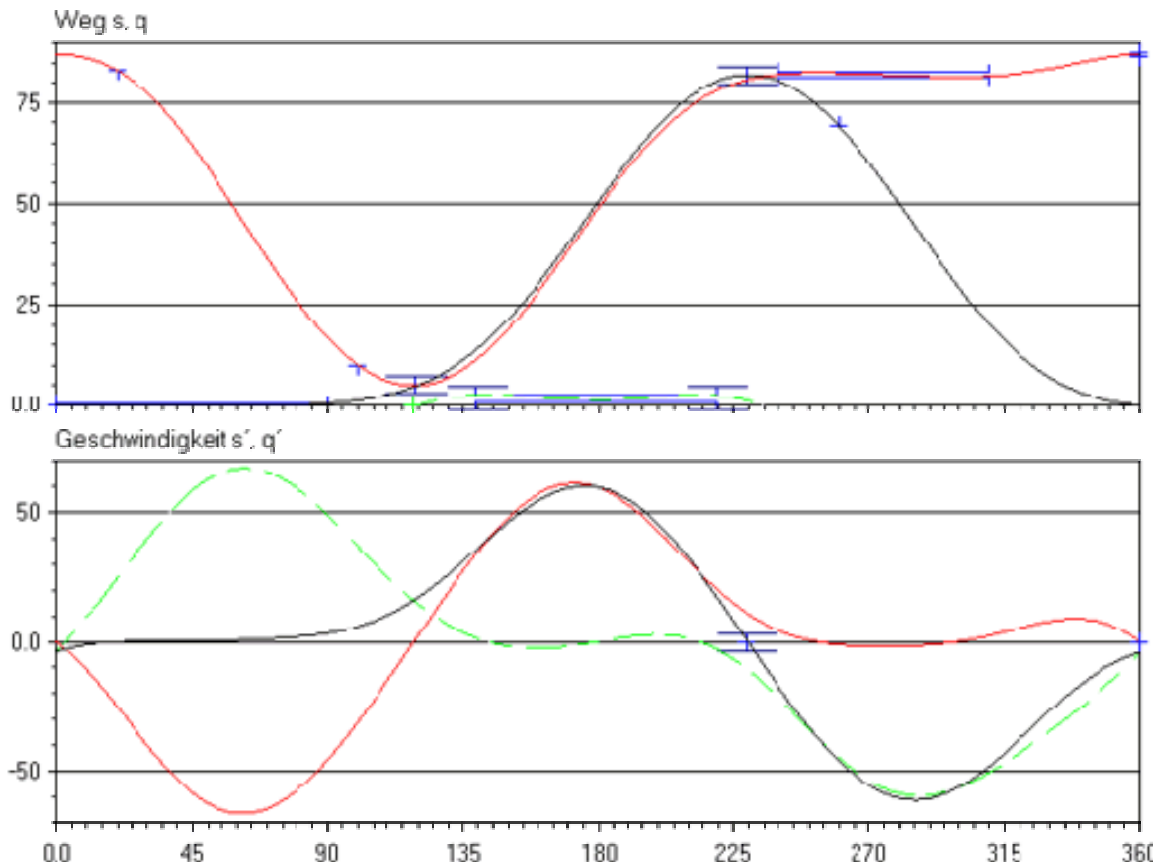


Bild 3: HS-Bewegungsgesetze mit Restriktionen und Optimierungsbereichen