

mHSL 1.0 - Programmbeschreibung für den Anwender

Inhalt:

- 1 HS-Bewegungsgesetze
- 2 Vorgehensweise, Lösungsmethoden
- 2.1 Lokale Optimierung
- 2.2 Globale Optimierung
- 3 ***mHSL*** -Anwendung
- 3.1 Begriffe
- 3.2 Bedienung
- 3.2.1 Hauptfenster
- 3.2.2 Menü
- 3.2.2.1 Datei
- 3.2.2.2 Bearbeiten
- 3.2.2.3 Optionen
- 3.2.2.4 Fenster
- 3.2.2.5 Hilfe
- 3.2.3 Editor
- 3.2.4 Grafik
- 3.2.5 Report
- 3.2.6 Fehlermeldungen
- 4 Häufig gestellte Fragen (FAQ)
- Wie kann man ... ?
- 4.1 ein neues Projekt erzeugen
- 4.2 eine Bewegungsvorgabe (abs) erstellen und bearbeiten
- 4.3 eine Restriktion eingeben und verändern
- 4.4 ein Optimierungsobjekt erzeugen

1 **HS-Bewegungsgesetze**

Herkömmliche Bewegungsgesetze wie z.B. Polynome und Sinoiden haben den entscheidenden Nachteil, dass sie aus mehreren Teilen (Bewegungsabschnitte, Rasten) zusammengesetzt sind. Dadurch sind an den Bereichsgrenzen Unstetigkeiten in den Übertragungsfunktionen höheren Ordnungen 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 unzulässig hohen Abweichungen im Verlauf der durch die Technologie vorgeschriebenen Abtriebsfunktion führen. Eine harmonische Analyse dieser Lagefunktionen ergibt, dass im Fourierspektrum erhebliche höherharmonische Anteile vorhanden sind. Diese verursachen höherharmonische Resonanzzustände, wenn das Arbeitsorgan nicht mehr als starr betrachtet werden kann.

Genau dieser Nachteil wird durch HS-Bewegungsgesetze vermieden /1/. Die Bezeichnung „HS“ steht hierbei für **H**armonische **S**ynthese oder auch **H**igh **S**peed. HS-Bewegungsgesetze (synonym dazu auch HS-Lagefunktionen oder HS-Profile) sind periodische Lagefunktionen (von Mechanismen oder Servoantrieben), die nicht abschnittsweise zusammengesetzt sind und deren Frequenzspektrum aus nur wenigen Harmonischen niedriger Ordnung besteht. Sie besitzen (insbesondere bei höheren Antriebsdrehzahlen) wesentliche Vorteile gegenüber den traditionellen Profilen. Die einfachste Methode zur Erzeugung von HS-Profilen ist die, eine Fourieranalyse des ursprünglichen (durch traditionelle Herangehensweise erzeugten) Bewegungsgesetzes durchzuführen, die störenden Harmonischen „abzuschneiden“ und aus dem nunmehr beschnittenen Spektrum die Funktion zu regenerieren. Nachteile dieser Methode ist allerdings, dass möglicherweise:

- die technologischen Restriktionen nicht mehr eingehalten werden und
- die Kennwerte (z.B. Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Momentenbeiwert) der Funktion verändert werden.

Aus diesem Grunde wird hier ein anderer Weg zur Generierung von HS-Bewegungsgesetzen beschrieben:

- Es werden technologische, kinematische und dynamische Restriktionen an die zu erstellenden Bewegungsgesetze gestellt, diese in einem System von Bedingungsgleichungen formuliert, und dieses (Un-)Gleichungssystem wird unter Zuhilfenahme mathematischer Optimierungsmethoden gelöst. Ergebnisse sind die (auf die Einhaltung der geforderten Restriktionen bezogenen) optimalen Bewegungsgesetze.
- Weiterhin wird unter Einbeziehung einer weiteren Optimierungsstrategie auch das „Zusammenspiel“ von mehreren, voneinander abhängigen Bewegungsgesetzen verbessert. Der Hintergrund dieser Option ist, dass vor allem im Verarbeitungsmaschinenbau oft mehrere Arbeitsorgane simultan technologische Aufgaben zu verrichten haben. Dabei sind gemeinsame Restriktionen für die einzelnen Bewegungsgesetze häufig nicht an die konkrete Antriebskoordinate φ gebunden, sondern man kann sie (gemeinsam) auf der φ -Achse verschieben. Die optimale Auslegung solcher voneinander abhängigen Bewegungsgesetze ist deshalb ein weiterer Teil des Lösungsalgorithmus’.

/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

2 Vorgehensweise, Lösungsmethoden

Untersucht wird das dynamische Verhalten eines Minimalmodells (Bild 1) für ein Antriebssystem mit elastischem Antrieb. Ein ungleichmäßig übersetzender Mechanismus (z.B. ein Kurvengetriebe oder ein Servomotor) bewegt ein elastisches und massebehaftetes Abtriebs- oder Arbeitsorgan.

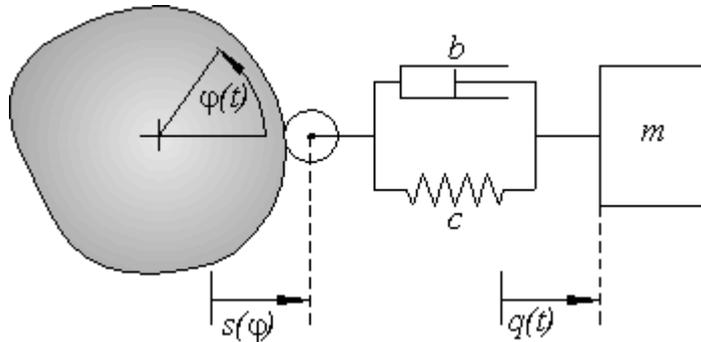


Bild 1: Minimalmodell eines Antriebssystems mit elastischem Antrieb

Die HS-Lagefunktion $s^{(p)}(\varphi)$, ($p = 0; 1; 2; 3 \dots$ Ordnung der Lagefunktion) wird beschrieben durch:

$$s^{(p)}(\varphi) = \sum_{k=0}^K k^p \cdot \left\{ a_k \cdot \cos\left(\frac{p \cdot \pi}{2} + k \cdot \varphi\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{p \cdot \pi}{2} + k \cdot \varphi\right) \right\}, \quad (1)$$

mit:

k	...	Ordnung der Harmonischen,
p	...	Ordnung der Lagefunktion,
a_k	...	Fourierkoeffizienten der Cosinus-Anteile,
b_k	...	Fourierkoeffizienten der Sinus-Anteile,
φ	...	Antriebskoordinate.

Geht man von einer Antriebskoordinate $\varphi = \Omega t$ (mit $\Omega = const.$... Antriebswinkelgeschwindigkeit, $t \dots$ Zeit) aus, ergibt sich die dynamische Abtriebsbewegung $q^{(p)}(\varphi = \Omega t)$ am Arbeitorgan zu:

$$q^{(p)}(\Omega t) = \sum_{k=0}^K k^p \cdot \left\{ A_k \cdot \cos\left(\frac{p \cdot \pi}{2} + k \cdot \varphi\right) + B_k \cdot \sin\left(\frac{p \cdot \pi}{2} + k \cdot \varphi\right) \right\} \quad (2)$$

$$\text{mit } A_k = \frac{(1 - k^2 \eta^2 + 4\theta^2 k^2 \eta^2) \cdot a_k - (2\theta k^3 \eta^3) \cdot b_k}{(1 - k^2 \eta^2)^2 + 4\theta^2 k^2 \eta^2} \quad (3)$$

$$\text{und } B_k = \frac{(1 - k^2 \eta^2 + 4\theta^2 k^2 \eta^2) \cdot b_k + (2\theta k^3 \eta^3) \cdot a_k}{(1 - k^2 \eta^2)^2 + 4\theta^2 k^2 \eta^2} \quad (4)$$

sowie den Modellkenngrößen

$$\eta = \Omega / \omega_0 \quad \dots \text{ Abstimmungsverhältnis, mit} \quad (5)$$

$$\Omega \quad \dots \text{ (konstante) Antriebswinkelgeschwindigkeit,}$$

$$\omega_0 = \sqrt{c/m} \quad \dots \text{ Eigenkreisfrequenz (des ungedämpften Systems)} \quad (6)$$

und

$$\theta = b / (2m\omega_0) \dots \text{ Dämpfungsgrad.} \quad (7)$$

An die Lagefunktionen $s^{(p)}(\varphi)$, ($p = 0; 1; 2; 3$) und an die Abtriebsfunktionen $q^{(p)}(\varphi = \Omega t)$ können nun technologische, kinematische und dynamische Forderungen gestellt werden, die (in ihrer Gesamtheit) möglichst gut erfüllt werden sollen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die technologischen und die kinematischen Forderungen sowohl für $s^{(p)}(\varphi)$ als auch für $q^{(p)}(\Omega t)$ gelten.

Die technologischen Forderungen kennzeichnen die Restriktionen von Lage- und Abtriebsfunktionen zu konkreten Winkelstellungen φ_m oder in Winkelintervallen $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$. Solche Forderungen sind:

- die Limitierung eines konkreten s -, s' -, s'' - oder s''' - Funktionswertes an einer bestimmten Antriebswinkelstellung φ_m :

$$c_0 \leq (s^{(p)}(\varphi_m)) \leq c_2 \quad (8)$$

- die Begrenzung (obere und/oder untere Grenze) der s -, s' -, s'' -, oder s''' -Funktionen in einem Intervall $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$:

$$c_0 \leq (s^{(p)}(\varphi)) \leq c_2 \quad \text{für } \varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o \quad (9)$$

die Limitierung der Differenz der s -, s' -, s'' - oder s''' - Funktionswerte zweier Bewegungsgesetze A und B an einer bestimmten Antriebswinkelstellung φ_m ,

$$c_0 \leq (s_A^{(p)}(\varphi_m) - s_B^{(p)}(\varphi_m)) \leq c_2 \quad (10)$$

- die Begrenzung der Differenz der s -, s' -, s'' -, oder s''' - Lagefunktion zweier Bewegungsgesetze A und B in einem Intervall $\varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o$ der Antriebsfunktion $\varphi = \Omega t$:

$$c_0 \leq (s_A^{(p)}(\varphi) - s_B^{(p)}(\varphi)) \leq c_2 \quad \text{für } \varphi_u \leq \varphi \leq \varphi_o \quad (11)$$

Kinematische (spektrale) Forderungen sind:

- die Beschränkung des Maximums einer Lagefunktion p -ter Ordnung ($p=0, 1, 2, 3$):

$$\text{Max}_{0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ} (|s^{(p)}(\varphi)|) \leq c^{(p)} = \sum_{k=1}^K k^p \cdot (|a_k| + |b_k|) \quad (12)$$

- die Beschränkung bzw. Negierung einzelner Harmonischer k in einer Lagefunktion:

$$\text{Max}_{0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ} (|a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi|) \leq c_k = |a_k| + |b_k| \quad (13)$$

Dynamische Zusatzforderungen sind in erster Linie:

- Die Forderungen 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 Lagefunktionen 0. bis 3. Ordnung (s, s', s'', s''') gestellten technologischen und kinematischen Forderungen auch für die Abtriebsfunktionen (q, q', q'', q''') gültig sind.

2.1 Lokale Optimierung

Im Lösungsalgorithmus wird zwischen konstanten und variablen Forderungen unterschieden. Dabei wird jede variable Forderung durch eine Minimalforderung f_0 und eine Maximalforderung f_1 gekennzeichnet. Maximalforderungen sind z.B.:

- möglichst große Rastbreite,
- möglichst hohe Rastgüte,
- möglichst hohes Abstimmungsverhältnis η_{max}
- möglichst genaue Einhaltung vorgegebener Funktionswerte,
- möglichst kleine Beschleunigungsmaxima usw.

Bei der lokalen Optimierung erfolgt - ausgehend von den Minimalforderungen f_0 - eine schrittweise Annäherung an die Maximalforderungen f_1 in der Form

$$f = f_0 + \beta * (f_1 - f_0), \quad \text{mit} \quad \beta \in [0, 1]$$

sofern die Bedingungen es zulassen.

In Bild 2 wird die verbal beschriebene Vorgehensweise anhand einer variablen Forderung nach maximaler Rastbreite bei maximaler Rastgüte illustriert.

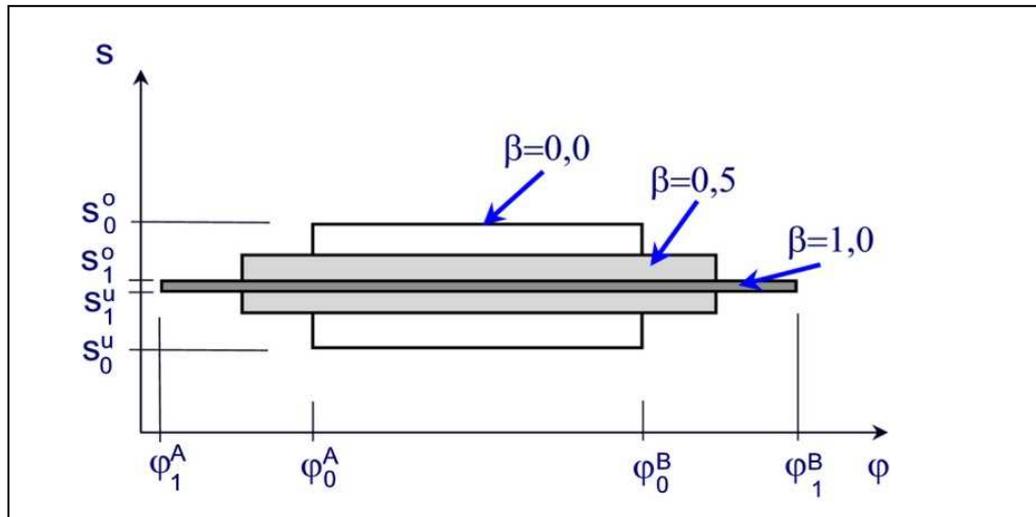


Bild 2: Illustration der Behandlung variabler Forderungen am Beispiel einer Rast im Bereich $\varphi^A \leq \varphi \leq \varphi^B$ mit dem Ziel einer hohen Rastgüte bei möglichst großer Rastlänge

Alle variablen Forderungen (technologische, kinematische und dynamische) werden auf die gleiche Weise behandelt. 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 der Wert von β erhöht oder vermindert und mit diesem neuen β -Wert der Algorithmus erneut durchlaufen wird.

In Bild 3 wird der sich daraus ergebende Algorithmus dargestellt:

Es wird zunächst geprüft, ob die an das Bewegungsgesetz gestellten technologischen, kinematischen und dynamischen Minimalforderungen ($\beta=0$) erfüllt werden können. Ist das nicht der Fall, wird die Berechnung abgebrochen. Existiert für $\beta=0$ eine Lösung, werden die Maximalforderungen ($\beta=1$) eingesetzt, und es wird die Existenz einer solchen Lösung geprüft. Wenn auch die Maximalforderungen erfüllt werden können, wird die Berechnung beendet und die Ergebnisse werden gespeichert. Für alle anderen Fälle wird der in Bild 3 dargestellte Lösungsalgorithmus angewendet.

Die zentrale Aufgabe des Lösungsalgorithmus besteht nun darin, die Forderungen in einem System von Bedingungsgleichungen bzw. -ungleichungen zu formulieren und dieses zu lösen.

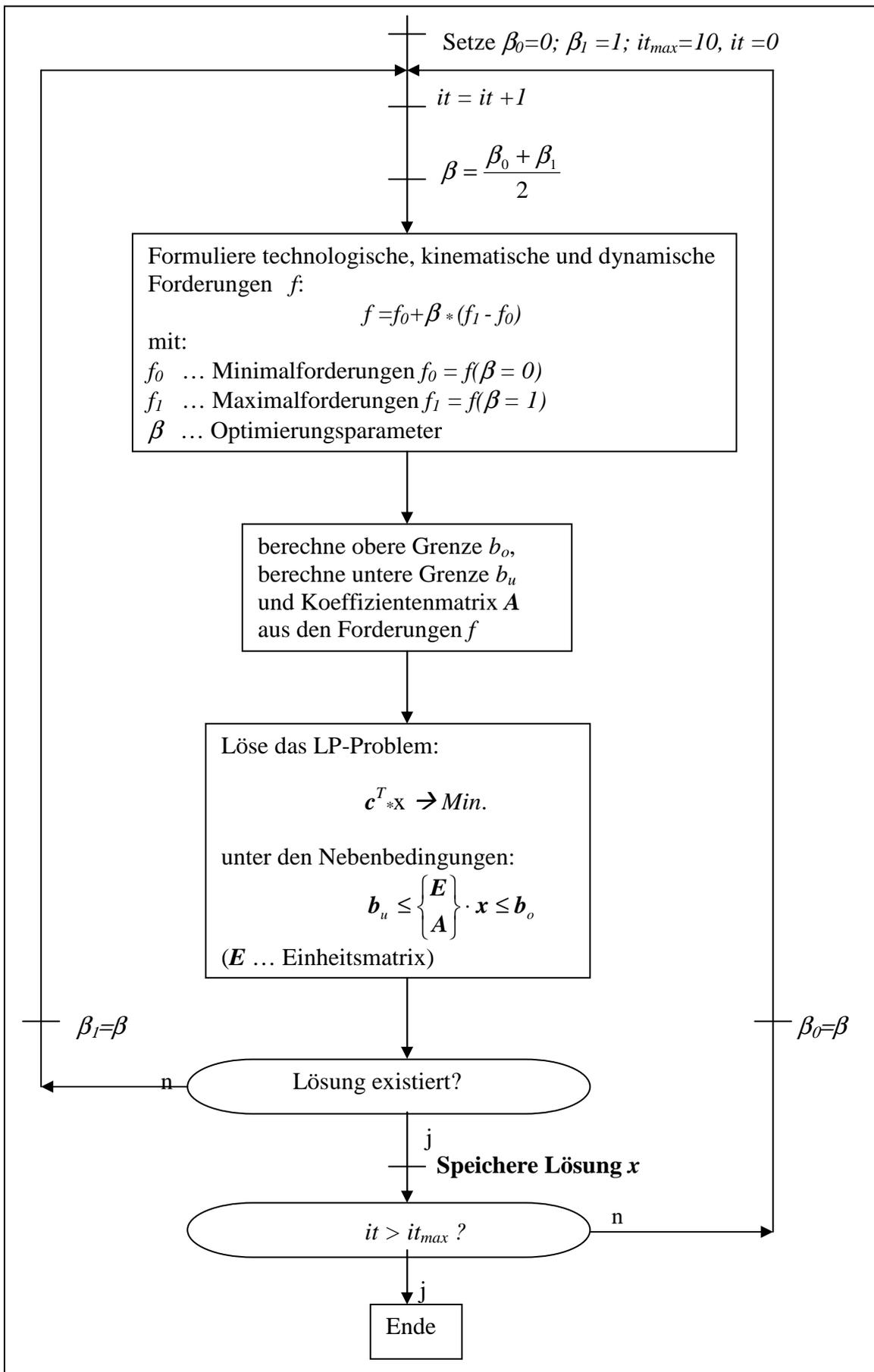


Bild 3: Lösungsalgorithmus für die „lokale“ Optimierung

Zur Lösung dieses Gleichungssystems wird die Methode der linearen Optimierung benutzt. Das zu lösende LP-Problem (LP: Linear Programming) kann folgendermaßen formuliert werden:
Suche das Minimum einer linearen Funktion

$$\mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} \rightarrow \text{Min.} \quad , \quad (14a)$$

mit: \mathbf{c} ... Wichtungsvektor, $\mathbf{c}^T = \{1; 1; 1; 1; \dots\}$
 \mathbf{x} ... Lösungsvektor (dessen Komponenten sind die gesuchten Fourierkoeffizienten a_k und b_k)

unter den Nebenbedingungen:

$$b_u \leq \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{A} \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{x} \leq b_o \quad , \quad (14b)$$

mit: b_u/b_o ... untere/obere Grenzen,
 \mathbf{E} ... Einheitsmatrix,
 \mathbf{A} ... Koeffizientenmatrix.

Dieses Problem der linearen Optimierung wird mit Hilfe des SIMPLEX-Algorithmus gelöst; die Vorgehensweise kann der mathematischen Literatur entnommen werden.

Der Lösungsvektor \mathbf{x} enthält die gesuchten Fourierkoeffizienten a_k und b_k der einzelnen Bewegungsgesetze; in b_u und b_o sind die unteren bzw. oberen Schranken, die aus den technologischen und kinematischen Restriktionen hervorgehen, zusammengefasst. Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} enthält die trigonometrischen Anteile der jeweiligen Harmonischen der Lagefunktionen bzw. zusätzlich die dynamischen Vergrößerungsfaktoren bei Forderungen für $\eta > 0$. Bei einer Variation des Parameters β (wenn also variable Forderungen an das/die Bewegungsgesetz(e) gestellt werden) werden zu jedem Optimierungsschritt die unteren und oberen Grenzen (b_u und b_o) aktualisiert und die Matrix \mathbf{A} neu generiert.

In Abschnitt 3.1 wird erläutert, wie ausgehend von den technologischen, kinematischen und dynamischen Forderungen die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} sowie untere und obere Grenzen b_u bzw. b_o für die konkreten Forderungen gebildet werden.

2.2 Globale Optimierung

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 die Möglichkeit, der o.g. lokalen Optimierung eine globale (äußere) Optimierung zuzuordnen.

Dabei werden die zusammengehörigen, voneinander abhängigen technologischen Forderungen zu Optimierungsobjekten zusammengefasst und es wird durch Verschiebung dieser Objekte auf der φ -Achse nach einer Verbesserung der HS-Bewegungsgesetze im Sinne der geforderten Kriterien gesucht.

Die 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 zufällig ausgewählten Suchrichtungen (Voreinstellung) weitergesucht, und es wird derjenige Versuch als neuer Anfangszustand für den nächsten Optimierungsschritt benutzt, mit dem vorher das größte β erzielt werden konnte. In Bild 4 ist der Algorithmus dazu schematisch dargestellt.

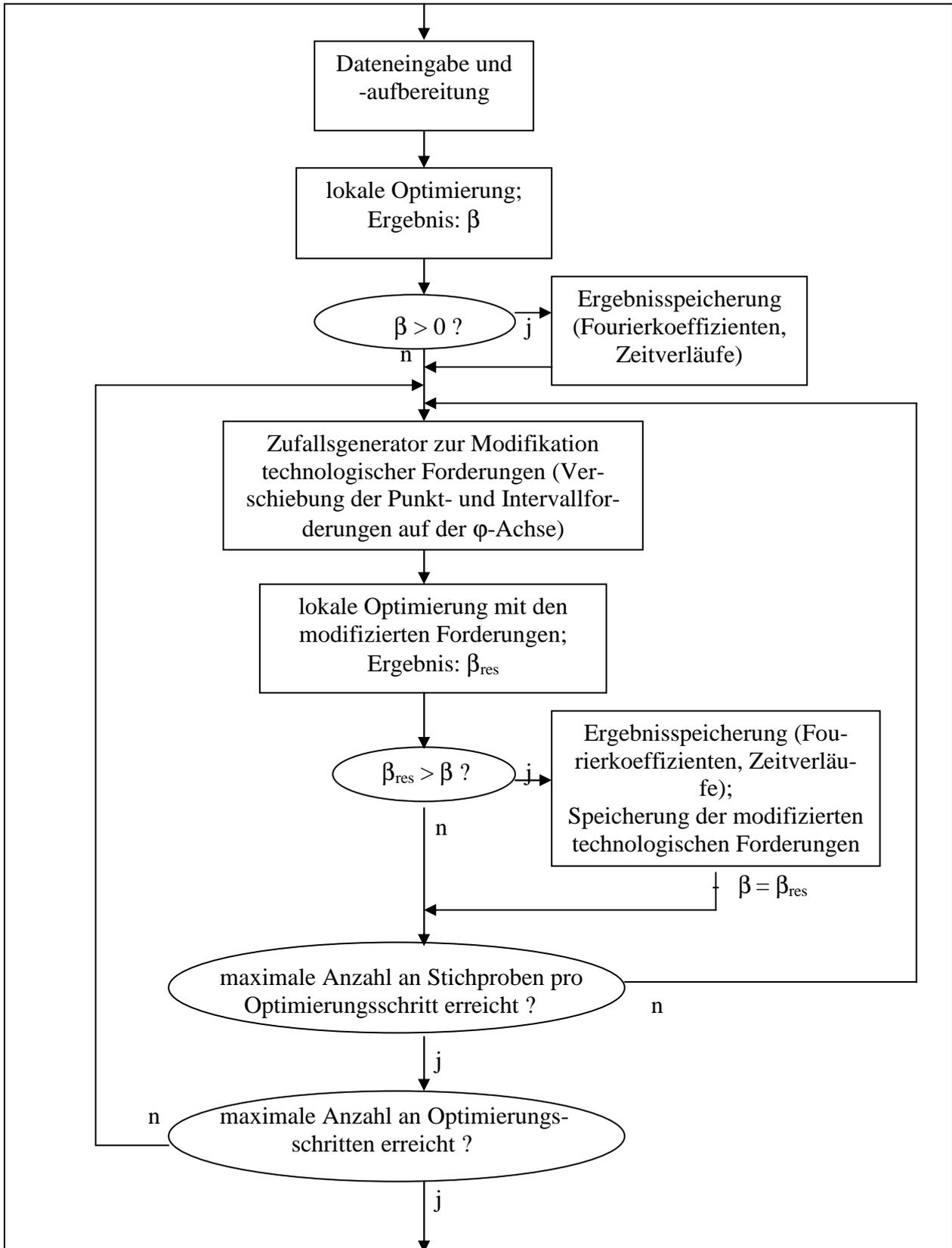


Bild 4: Algorithmus der globalen Optimierung

3 *mHSL-Anwendung*

3.1 Begriffe

Projekt	Die zu einer in sich geschlossenen Problemstellung gehörenden, durch harmonische Synthese simultan zu generierenden und zu optimierenden, möglicherweise voneinander abhängigen HS-Bewegungsgesetze
Bewegungsvorgabe (absolut)	An ein Bewegungsgesetz gerichtete dynamische Forderung nach Anzahl der enthaltenen Harmonischen und nach dem angestrebten Abstimmungsverhältnis. Der Bewegungsvorgabe sind im Allgemeinen weitere Restriktionen untergeordnet.
Bewegungsvorgabe (relativ)	Enthält die zur Beschreibung gegenseitiger Abhängigkeiten benötigten relativen Restriktionen zwischen zwei Bewegungsgesetzen
Optimierungsobjekt	Zusammengehörige, voneinander abhängige technologische Forderungen, die bei globaler Optimierung auf der Antriebswinkelachse (φ) gemeinsam verschoben werden können
Restriktion	
absolut :	An ein HS-Bewegungsgesetz (0. bis 3. Ordnung) gerichtete technologische oder kinematische Forderung, die variabel oder konstant sein kann
relativ :	Technologische oder kinematische Forderung, die sich auf die Differenz zweier Bewegungsgesetze (0. bis 3. Ordnung) innerhalb eines bestimmten Antriebswinkelbereiches bezieht
Spektrum :	Limitierungsforderungen an einzelne Harmonische oder an die Summe aller Harmonischen
Globale Optimierung	Suche nach minimalen Fourierkoeffizienten von HS-Bewegungsgesetzen für gemeinsam verschiebliche technologische Forderungen, die zu Optimierungsobjekten zusammengefasst werden. Globale Optimierung schließt die lokale Optimierung zu jedem Optimierungsschritt ein.
Lokale Optimierung	Suche nach den minimalen Fourierkoeffizienten von HS-Bewegungsgesetzen für vorgegebene (entlang der φ - Achse nicht verschiebliche) technologische sowie kinematische und dynamische Forderungen

3.2 Bedienung

Die Bedienung des Programms erfolgt im Wesentlichen über die Einträge im Menü. Darüber hinaus werden in der Tabelle der Fourierkoeffizienten im Editor, in Grafikfenstern und im Reportfenster Funktionen über Popup-Menüs angeboten, die durch Drücken der rechten Maustaste aufgerufen werden können.

3.2.1 Hauptfenster

Das Hauptfenster des Programms enthält eine Liste aller gerade geöffneten Projekte. Die Darstellung der Daten erfolgt entsprechend ihrer Hierarchie in einer Baumstruktur. Die dem Projekt zugeordneten absoluten und relativen Bewegungsvorgaben und Optimierungsobjekte erscheinen als vom Projekt ausgehende Verzweigungen, denen wiederum Restriktionen untergeordnet sind. Durch Doppelklick auf ein verzweigtes Element können die untergeordneten Einträge ein- oder ausgeblendet werden.

Die Verwaltung der Vorgaben für Relativbewegungen und der Optimierungsobjekte erfolgt durch das Programm. So werden automatisch alle möglicherweise auftretenden Relativforderungen angelegt, sobald ein Projekt mindestens zwei absolute Bewegungsvorgaben umfasst. Unter den Optimierungsobjekten werden in der Projektliste die zugehörigen Restriktionen angezeigt. Dabei handelt es sich jedoch um Verweise auf die in den absoluten oder relativen Bewegungsvorgaben enthaltenen Restriktionen. Wird eine Restriktion aus einem Optimierungsobjekt gelöscht, bleibt sie in der Bewegungsvorgabe erhalten. Wird eine Restriktion in die globale Optimierung eingeschlossen - siehe dazu Editor - erfolgt nach Rückfrage die Zuordnung zu einem Optimierungsobjekt.

3.2.2 Menü

Über das Menü des Hauptfensters sind alle wesentlichen Funktionen zur Steuerung des Programms zugänglich. Verschiedene Funktionen sind jedoch nur auf bestimmte Objekte oder unter bestimmten Voraussetzungen anwendbar. So muss z.B. in der Projektliste eine absolute Bewegungsvorgabe oder eine ihr untergeordnete Restriktion ausgewählt sein, um eine neue absolute Restriktion erzeugen zu können. Daher sind nicht immer alle Menüeinträge wählbar.

3.2.2.1 Datei

- **Projekt öffnen**

Öffnen einer Projekt-Datei (*.h4p), die mit dem Programm *mHSL* angelegt wurde.

- **Projekt sichern**

Sichern eines Projektes. Der Befehl bezieht sich auf das Projekt, das gerade in der Projektliste ausgewählt ist. Sollte ein Projekt ausgewählt sein, das neu angelegt oder importiert wurde, ist dieser Befehl nicht verfügbar. Das Projekt kann dann aber mit dem Befehl *Projekt sichern unter* gespeichert werden.

- **Projekt sichern unter**

Das gerade in der Projektliste ausgewählte Projekt wird unter einem neuen Dateinamen (*.h4p) gesichert. Die Sicherung erfolgt auch, wenn das Projekt fehlerhafte Restriktionen enthält. Wurde bereits eine Berechnung durchgeführt, werden deren Ergebnisse (Fourier-

koeffizienten, welche die einzelnen Bewegungsvorgaben erfüllen) mit gespeichert. Außerdem wird die bei der grafischen Darstellung des Projektes verwendete Farbzuordnung gespeichert.

- **Projekt schließen**

Das aktuell ausgewählte Projekt wird geschlossen. Falls Änderungen vorgenommen wurden, erfolgt eine Abfrage, ob die Daten gesichert werden sollen.

- **Import**

Das Programm unterstützt den Import von Bewegungsvorgaben in den Datei-Formaten der Vorgängerversionen HSL (DOS: *.hse), winHSL (Windows: *.hse, *.hsw) sowie HS4_DOS (DOS: *.hs4). Im *.hsw-Format gespeicherte Ergebnisse gehen dabei allerdings verloren. Eine Bewegungsvorgabe kann beim Import entweder einem bereits geöffneten Projekt zugeordnet oder in ein neu erzeugtes Projekt aufgenommen werden. Wenn bereits Projekte geöffnet sind, erfolgt eine entsprechende Abfrage.

- **Wertetabelle**

Ist in der Projektliste eine absolute Bewegungsvorgabe oder eine zugeordnete Restriktion ausgewählt und liegen für diese Bewegungsvorgabe Optimierungsergebnisse vor, kann eine Wertetabelle erzeugt werden. Die Auswahl der auszugebenden Größen erfolgt unter dem Menüpunkt *Wertetabelle* im Menü *Optionen*.

- **Drucker einrichten**

Zeigt den Windows-Dialog zur Druckereinrichtung. Damit wird die Einstellung des Druckers vor dem Druck eines Reportes oder einer Grafik ermöglicht.

- **Beenden**

Dieser Menüpunkt beendet das Programm. Befinden sich nicht gesicherte Daten im Speicher, erfolgt eine entsprechende Sicherheitsabfrage.

Zusätzlich befindet sich im Datei-Menü eine Liste der 6 zuletzt bearbeiteten Dateien. Diese Liste wird aktualisiert, wenn ein Projekt mit dem Befehl *Datei/Projekt sichern unter* gespeichert wird.

3.2.2.2 Bearbeiten

- **Neu**

Dieser Menüpunkt verzweigt in ein Untermenü, in dem verschiedene Objekte angeboten werden, die neu in die Projektliste aufgenommen werden können. Die Wahlmöglichkeiten in diesem Menü sind davon abhängig, welcher Objekttyp gerade in der Projektliste ausgewählt ist. So kann z.B. nur dann eine neue absolute Restriktion erstellt werden, wenn in der Projektliste eine absolute Bewegungsvorgabe bzw. eine Restriktion innerhalb einer absoluten Bewegungsvorgabe ausgewählt ist. Relative Bewegungsvorgaben und Optimierungsobjekte werden vom Programm automatisch verwaltet und können daher nicht direkt vom Nutzer erstellt werden. Weitere Erläuterungen dazu befinden sich im Abschnitt Hauptfenster weiter oben.

- **Projekt**

Erzeugt ein neues Projekt zur Aufnahme weiterer Objekte.

- **Bewegungsvorgabe (abs)**

Erzeugt innerhalb des in der Projektliste ausgewählten Projektes eine neue absolute Bewegungsvorgabe zur Aufnahme von Restriktionen.

- **Restriktion (absolut)**

Ist in der Projektliste eine absolute Bewegungsvorgabe oder eine ihr untergeordnete Restriktion ausgewählt, kann mit diesem Menüpunkt eine neue Restriktion hinzugefügt werden.

- **Restriktion (relativ)**

Ist in der Projektliste eine relative Bewegungsvorgabe oder eine ihr untergeordnete Restriktion ausgewählt, kann mit diesem Menüpunkt eine neue Restriktion hinzugefügt werden.

- **Restriktion (Spektrum)**

Ist in der Projektliste eine absolute Bewegungsvorgabe oder eine ihr untergeordnete Restriktion ausgewählt, kann mit diesem Menüpunkt eine das Spektrum betreffende Restriktion hinzugefügt werden.

- **Editieren**

Öffnet den Editor zum Bearbeiten des in der Projektliste ausgewählten Objektes. Der Editor kann auch geöffnet werden, indem das zu bearbeitende Objekt mit der rechten Maustaste angeklickt wird.

- **Löschen**

Das in der Projektliste gewählte Objekt wird gelöscht. Im Objekt enthaltene Elemente oder Objekte, die Verweise auf das zu löschende Objekt enthalten, werden automatisch mit gelöscht.

- **Berechnen**

Das Projekt, in dem sich das gewählte Projektlistenelement befindet, wird berechnet, sofern es keine in sich widersprüchlichen Restriktionen enthält. Während der Berechnung ist kein Zugriff auf das Projekt möglich. Die Meldungen des Berechnungsmoduls werden weitergegeben, siehe Fehlermeldungen.

- **alle Berechnen**

Es werden diejenigen Projekte in der Projektliste berechnet, die keine in sich widersprüchlichen Restriktionen enthalten. Während der Berechnung ist kein Zugriff auf die Projektliste möglich. Der Programmablauf wird nicht unterbrochen, wenn bei der Berechnung eines Projektes Fehler auftreten.

- **Berechnung abbrechen**

Abbruch einer mit *Berechnen* oder *alle Berechnen* gestarteten Rechnung.

3.2.2.3 Optionen

- **Projektliste**

Im zugeordneten Untermenü können die Optionen *Löschen mit Bestätigung* und *Editor immer anzeigen* aktiviert werden. Durch *Editor immer anzeigen* erreicht man, dass der Editor automatisch angezeigt wird, sobald ein Eintrag in der Projektliste ausgewählt wird.

- **Berechnungsmodul**

Die Priorität mit welcher der Berechnungsmodul vom Betriebssystem behandelt wird kann in drei Stufen gewählt werden. Bei hoher Priorität des Berechnungsmoduls kommen parallel laufende Tasks nahezu zum Erliegen, bei niedriger Priorität dauert die Optimierung länger, mit parallel laufenden Programmen kann aber weiter zügig gearbeitet werden. Hohe Priorität sollte nur ausgewählt werden, wenn die globale Optimierung benutzt wird.

- **Wertetabelle**

Das für eine absolute Bewegungsvorgabe berechnete HS-Bewegungsgesetz kann in Form einer Wertetabelle ausgegeben werden (*Datei/Wertetabelle*). Die in der Wertetabelle auszugebenden Größen sowie die dabei verwendete Schrittweite und die Stellenzahl werden in einem Dialog eingestellt, der über diesen Menüpunkt erreichbar ist.

- **Grafik**

Dieser Menüpunkt öffnet einen Dialog, in dem die Standard-Farbzuordnung für grafische Elemente definiert wird. Geänderte Einstellungen gelten für alle später geöffneten Projekte. Mit dem Button *alle ändern* können sie aber auch für bereits geöffnete Projekte übernommen werden.

- **Bitmap-Export**

Grafiken können als Bitmap oder WindowsMetaFile exportiert werden (Grafik). Die Größe der Bitmap-Grafik sowie der in der Grafik verwendete Zeichensatz werden in einem Dialog eingestellt. Weiterhin kann die Auflösung in Punkten pro Zoll (dpi) vorgegeben werden

3.2.2.4 Fenster

- **Diagramm**

Öffnet ein neues Grafik-Fenster. Ist in der Projektliste eine absolute oder relative Bewegungsvorgabe bzw. eine untergeordnete Restriktion ausgewählt, wird die Bewegungsvorgabe dargestellt, andernfalls alle Bewegungsvorgaben des Projektes, in dem sich das ausgewählte Element befindet.

- **Report**

Erstellt einen neuen Report für das aktuelle Projekt oder bringt das Fenster mit dem entsprechenden Report nach oben.

3.2.2.5 Hilfe

- **Hilfethemen**

Zeigt die Hilfe zum Programm *mHSL* an.

- **Info**

Zeigt eine Info-Box.

3.2.3 Editor

Der Editor ist ein Dialogfenster, in dem die Daten des in der Projektliste ausgewählten Elementes angezeigt werden. Die Darstellung unterscheidet sich je nach Typ des ausgewählten Elementes.

- **Projekt**

Für ein Projekt können lediglich Einstellungen vorgenommen werden, welche die Funktion der globalen Optimierung im Berechnungsmodul beeinflussen. Unter Umständen kann so bei höherer Anzahl der Optimierungsschritte, höherer Anzahl der Proben pro Optimierungsschritt und/oder verminderter Suchschrittweite zu Lasten der Rechenzeit ein besseres Ergebnis gefunden werden.

- **Bewegungsvorgabe (abs)**

Für eine absolute Bewegungsvorgabe sind die Anzahl der Harmonischen, das Abstimmungsverhältnis und der Dämpfungsgrad anzugeben. Liegen bereits Ergebnisse einer Optimierung vor, werden im Editor auch die Fourierkoeffizienten des Bewegungsgesetzes, der Abtriebsbewegung oder des Antriebsmomentes ausgegeben. Durch Anklicken der Tabelle mit der rechten Maustaste aktiviert man ein Popup-Menü, das Funktionen zum Export dieser Daten in eine Datei oder in die Zwischenablage bereithält.

- **Bewegungsvorgabe (rel) und Optimierungsobjekt**

Die relativen Bewegungsvorgaben und die Optimierungsobjekte dienen nur als Klassenbezeichnung in der Projektliste und enthalten selbst keine Daten. Im Editor erfolgt daher keine Anzeige, wenn ein derartiges Objekt in der Projektliste ausgewählt ist.

- **Restriktion**

Alle Daten die eine Restriktion definieren, können im Editor eingestellt werden. Sind die Angaben in sich widersprüchlich, erscheint in der Überschrift des Editors und in der Eintragung in der Projektliste ein Ausrufezeichen.

Wird die Option *Verschiebung zulassen* aktiviert, muss unmittelbar die Zuordnung zu einem Optimierungsobjekt erfolgen. Dazu erscheint eine Abfrage falls schon Optimierungsobjekte existieren.

3.2.4 Grafik

In einem Grafikfenster können mehrere Diagramme dargestellt werden, in denen die Verläufe von Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ruck und Antriebsmomentenverlauf über dem Antriebswinkel aufgetragen sind. Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck werden jeweils auch für die tatsächliche Abtriebsbewegung, die sich entsprechend dem angegebenen Abstimmungsverhältnis und dem Dämpfungsgrad ergibt, dargestellt.

Die Auswahl der darzustellenden Diagramme und Verläufe sowie die Einstellung der verwendeten Farben und einer nutzerdefinierten Skalierung erfolgt in einem Dialog, der über ein Popup-Menü aufgerufen wird (*Grafik-Optionen*), das sich nach Anklicken der Grafik mit der rechten Maustaste öffnet. In diesem Menü kann auch die Auswahl der darzustellenden Diagramme erfolgen. Das Popup-Menü bietet außerdem Funktionen zum Grafik-Export im Bitmap- und WindowsMetaFile-Format in eine Datei oder die Zwischenablage und zum Drucken der Grafik. Das Ausgabeformat (Hoch/Quer) beim Drucken richtet sich nach dem aktuellen Format des Grafikfensters.

Das Grafikfenster bietet außerdem eine Zoom-Funktion. Der Zoombereich wird bei gedrückter linker Maustaste durch Ziehen der Maus festgelegt. Im Popup-Menü kann die automatische Skalierung wieder hergestellt werden.

Alle grafischen Darstellungen eines Bewegungsgesetzes werden automatisch aktualisiert. Die gerade in der Projektliste ausgewählte Restriktion wird in allen Grafiken hervorgehoben. Ist in der Projektliste eine absolute oder relative Bewegungsvorgabe, ein Optimierungsobjekt oder ein Projekt gewählt, werden alle untergeordneten Restriktionen hervorgehoben.

3.2.5 Report

Ein Report liefert einen Überblick über alle Forderungen und Ergebnisse eines Projektes. Als Ergebnis wird dabei neben den Fourierkoeffizienten die Einhaltung jeder Restriktion angegeben. Durch Anklicken des Reports mit der rechten Maustaste öffnet man ein Popup-Menü, das Funktionen zum Sichern der Datei im RichTextFormat, zur Übergabe von markiertem Text in die Zwischenablage und zum Drucken des Reports bietet.

3.2.6 Fehlermeldungen

Wenn der Berechnungsmodul kein Ergebnis liefern kann, erhält man in der Regel eine aussagekräftige Fehlermeldung:

- Minimalforderungen sind nicht erfüllbar.

Lockern Sie die Minimalforderungen und/oder erhöhen Sie die zulässige Anzahl Harmonischer.

- Die Eingabedatei ist fehlerhaft.

Nicht alle logischen Fehler werden vom Ein/Ausgabeteil erkannt. Im Berechnungsmodul erfolgt eine nochmalige Prüfung auf Plausibilität der Forderungen. Wird eine inkorrekte Forderung erkannt, so wird diese in eine '*.lst'-Datei des aktuellen Verzeichnisses geschrieben. Eine weitere mögliche Ursache ist ein Fehler beim Lesen der Eingabedatei.

- Das System ist zu groß.

Die Größe des Gleichungssystems richtet sich nach der Anzahl der Forderungen und nach der Anzahl Harmonischer. Dabei ist zu beachten, dass Forderungen für Intervalle in Einzelforderungen aufgelöst werden. Die Dichte dieser Einzelforderungen muss für eine Bewegungsvorgabe mit vielen Harmonischen entsprechend groß sein. Es ist daher zu prüfen, ob Intervalle verkürzt werden können oder das Bewegungsgesetz für weniger Harmonische oder ohne dynamische Forderungen zu berechnen ist.

- Abbruch der Berechnung wegen Resonanz

Tritt im dämpfungsfreien Fall Resonanz auf, kann kein Bewegungsgesetz generiert werden. Ändern Sie das Abstimmungsverhältnis und/oder die Dämpfung.

- Der Berechnungsmodul konnte nicht gestartet werden.

Der Berechnungsmodul `hs4_win.exe` und die Libraries `ftn90.dll` und `salflibc.dll` werden im gleichen Verzeichnis wie der Ein/Ausgabemodul `mHSL.exe` erwartet.

- Es läuft bereits eine Berechnung. Bitte warten Sie auf deren Abschluss.

Um Komplikationen bei mehrfachem Aufruf des Berechnungsmoduls zu vermeiden, wird diese Möglichkeit ausgeschlossen.

- Der Berechnungsmodul liefert keine Rückmeldung.
- Die Berechnung liefert keine Ergebnisse.
- Unbekannter Fehler: *Fehlernummer*.
- Fehler bei der Berechnung der Fourierkoeffizienten der resultierenden Bewegung!

Diese Fehlermeldungen lassen auf Unregelmäßigkeiten in der Berechnung ohne eine bekannte Ursache schließen. Die Berechnung sollte mit gelockerten Restriktionen, höherer Anzahl Harmonischer und/oder niedrigerem Abstimmungsverhältnis wiederholt werden.

In seltenen Fällen kann es vorkommen, dass der Berechnungsmodul abstürzt und keine Fehlermeldung liefert. Versuchen Sie dann, freien Speicher zu gewinnen, indem Sie möglichst viele Programme schließen. Auch Bildschirmschoner können den Berechnungsmodul zum Absturz bringen. Standard-Bildschirmschoner werden daher deaktiviert während eine Optimierung läuft.

4 Häufig gestellte Fragen (FAQ)

Wie kann man ... ?

4.1 ein neues Projekt erzeugen

- Im Hauptfenster unter *Bearbeiten* über den Menüpunkt *Neu* das *Projekt* anklicken
- Mit Klick auf die rechte Maustaste ins Projektfenster gelangen und dort optional *Projektbeschreibung* und *erweiterte Einstellungen* eingeben
- Projektfenster verlassen
- Im Hauptfenster unter *Bearbeiten* und *Neu* auf *Bewegungsvorgabe (abs)* klicken und mit rechter Maustaste die erste *Restriktion (abs)* eingeben oder die *Bewegungsvorgabe (abs)* bearbeiten
- gegebenenfalls weitere Restriktionen, Bewegungsvorgaben und Optimierungsobjekte definieren
- Im Hauptfenster unter *Datei* mit neuem Namen das *Projekt sichern unter...*

4.2 eine Bewegungsvorgabe (abs) erstellen und bearbeiten

- Nach Auswahl des aktuellen Projektes im Hauptfenster auf *Bearbeiten*, dort über *Neu* den Menüpunkt *Bewegungsvorgabe (abs)* anklicken
- Im Hauptfenster die betreffende *Bewegungsvorgabe (abs)* auswählen und mit rechter Maustaste anklicken. Daraufhin öffnet sich das Fenster *Bewegungsvorgabe (abs)*
- Im Fenster *Bewegungsvorgabe* die Anzahl der *Harmonischen* des Bewegungsgesetzes und optional die verbale *Beschreibung* des Bewegungsgesetzes sowie die Parameter des elastischen Abtriebes, d.h. Abstimmungsverhältnis η_{\max} und Dämpfungsgrad θ eintragen
- Wenn das Bewegungsgesetz nach maximal möglichem Abstimmungsverhältnis optimiert werden soll, so ist η_{\max} als *variabel* zu deklarieren und neben der Mindestanforderung für η_{\max} noch die Maximalforderung zu ergänzen.
- Es ist zwar kritischer (Resonanz erster bzw. höherer Ordnung) und überkritischer Betrieb erlaubt, es muss aber dann zumindest im dämpfungsfreien Fall mit einer Fehlermeldung "*Abbruch wegen Resonanz*" gerechnet werden.
- Man kann mit der Wahl des Abstimmungsverhältnisses η_{\max} erreichen, dass konkrete Harmonische minimiert werden. Wählt man z.B. $\eta_{\max} = 0.25$, so weist das daraufhin ermittelte Bewegungsgesetz eine minimale vierte Harmonische auf, da diese durch die auftretende Resonanz (4. Ordnung) sehr verstärkt wird.
- Nach erfolgreicher Berechnung erscheinen im Fenster *Bewegungsvorgabe* die ermittelten Fourierkoeffizienten des Bewegungsgesetzes $s(\varphi)$, der Abtriebsfunktion $q(t)$ oder des (normierten) Antriebsmomentes ($s' * s''$). Diese können mit Klick auf die rechte Maustaste weiterverarbeitet werden.

4.3 eine Restriktion eingeben und verändern

- Im Hauptfenster die betreffende *Bewegungsvorgabe (abs)* auswählen und über *Bearbeiten* und *Neu* den Menüpunkt *Restriktion(absolut)* anklicken. Diese erscheint im Hauptfenster unter dem entsprechenden Bewegungsgesetz.
- Restriktion mit rechter Maustaste anklicken. Daraufhin öffnet sich das Fenster *Restriktion (absolut)*
- In diesem Fenster zunächst die *Ordnung* der Lagefunktion auswählen, für welche die Restriktion gilt. Anschließend den *Antriebswinkelbereich* kennzeichnen (*Punkt* oder *Bereich*). Besteht für den *Antriebswinkelbereich* ein Optimierungsziel, (z.B. eine möglichst lange

Rastphase) so ist er als *variabel* zu deklarieren, und es sind die Maximalforderungen für die *untere* und für die *obere Schranke* einzugeben.

- Danach die Einschränkungen für die *Abtriebsfunktion* im vorher definierten Winkelbereich eingeben. Wenn für das *Abtriebsfunktionsintervall* ein Optimierungsziel besteht (z.B. möglichst hohe Rastgüte), so sind *untere* und/oder *obere Schranke* als *variabel* zu deklarieren und zusätzlich die Idealforderungen einzugeben.
- Eine Restriktion (relativ) kann eingegeben werden, wenn das aktuelle Projekt zumindest zwei Bewegungsvorgaben (absolut) enthält. Dann ist im Hauptfenster die betreffende Bewegungsvorgabe (relativ) auszuwählen. über die Menüpunkte *Bearbeiten* und *Neu* ist *Restriktion (relativ)* anzuklicken.
- Die Spezifizierung der Restriktion (relativ) erfolgt genauso wie bei Restriktion (absolut), es ist nur zu beachten, dass die eingegebenen Parameter für die **Differenz** der *Abtriebsfunktionen* der beiden ausgewählten Bewegungsgesetze gültig sind.
- Um eine Restriktion (Spektrum) einzugeben, muss man im Hauptfenster die aktuelle *Bewegungsvorgabe(abs)* ausgewählt haben. Über die Menüpunkte *Bearbeiten* und *Neu* ist *Restriktion (Spektrum)* anzuklicken. Danach öffnet sich durch Betätigen der rechten Maustaste das Fenster *Restriktion(Spektrum)*.
- In diesem Fenster ist die Art der Restriktion zu spezifizieren. Soll die Summe der Maximalwerte aller Harmonischen beschränkt werden, so ist unter *Ableitung* zusätzlich die Ordnung der Lagefunktion auszuwählen. Betrifft die Restriktion jedoch die Amplitude einer einzelnen Harmonischen, muss die *Ordnung* der Harmonischen spezifiziert werden. Soll mit der *Restriktion (Spektrum)* ein Optimierungsziel verfolgt werden, so ist wiederum die Schranke *c* als *variabel* zu deklarieren und eine Idealforderung (linkes Eingabefenster) hinzuzufügen.

4.4 ein Optimierungsobjekt erzeugen

- Ausgangspunkt ist ein offenes Fenster *Restriktion (absolut)* oder *Restriktion (relativ)*. Dort ist *Verschiebung zulassen* auszuwählen.
- Ist das Optimierungsobjekt ein Punkt auf der φ -Achse, sind untere und obere Grenze des verschieblichen Objektes einzutragen.
- Gilt die aktuelle Restriktion für einen *Antriebswinkelbereich*, so sind zusätzlich untere und obere Grenze der oberen *Bereichsgrenze* φ_0 einzugeben.
- wird im aktuellen Projekt ein weiteres Mal in einem *Restriktionsfenster* *Verschiebung zulassen* verlangt, so öffnet sich das Fenster *Optimierungsobjekt*, und es ist die Nummer des Optimierungsobjektes auszuwählen, dem die aktuelle Restriktion zuzuordnen ist.