

Die Handzange mit paralleler Backenführung

Nutzung von heutiger Software zur Auslegung
eines Getriebebeispiels von KURT HAIN

Prof. Dr.-Ing. R. Braune

Institut für Getriebetechnik, Leibniz Universität Hannover

Vortrag zum

Ehrenkolloquium anlässlich des 100. Geburtstages von

Herrn Dr.-Ing. E. h. Kurt Hain

an der TU Dresden, Mai 2008

Die Handzange mit paralleler Backenführung

Nutzung von heutiger Software zur Auslegung
eines Getriebebeispiels von KURT HAIN

Prof. Dr.-Ing. R. Braune

Institut für Getriebetechnik, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung

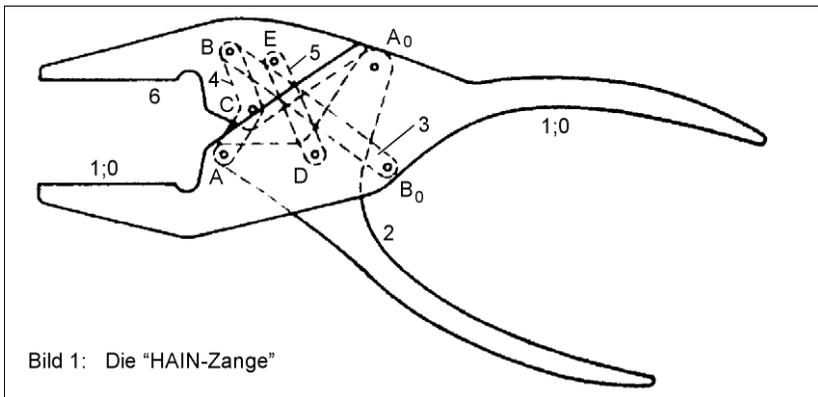
An einem Getriebebeispiel von KURT HAIN wird gezeigt, wie heutige Getriebetechnik-Software zur gezielten Maßsynthese eingesetzt werden kann. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt in der problemspezifisch angepassten Nutzung der allgemeinen Ansätze der klassischen Genaulagen-Synthese in einem schrittweisen Bearbeitungsprozess mit Hilfe eines speziell dafür entwickelten Programmsystems.

1 Die „HAIN-Zange“

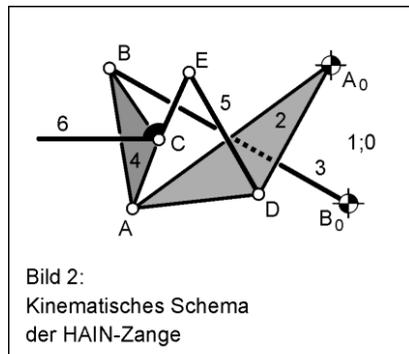
Im Jahre 1967 veröffentlichte KURT HAIN im Industrie-Anzeiger eine Arbeit über Werkstück-Spannvorrichtungen ohne Gleitführungen [1]. Den theoretischen Hintergrund dieses Beitrages bildete der von HAIN gefundene Weg zur exakten Parallelführung einer Gliedebene auf einer beliebigen Koppelkurve eines viergliedrigen Koppelgetriebes durch eine spezielle Erweiterung des Grundgetriebes auf ein sechsgliedriges Getriebe unter geschickter Anwendung des Satzes von ROBERTS über die dreifache Erzeugung von Koppelkurven. Diese getriebetechnisch sehr einfache und konstruktiv oft elegant umsetzbare Lösung des schon lange untersuchten Parallelführungsproblems wurde von HAIN bereits drei Jahre früher in der damaligen Zeitschrift „Grundlagen der Landtechnik“ in dem Artikel „Erzeugung von Parallel-Koppelbewegungen mit Anwendungen in der Landtechnik“ [2] vorgestellt und gehört seitdem wohl zum Standardrepertoire der Getriebelehre. Zur Erinnerung erläutert der folgende Abschnitt noch einmal kurz diesen Vorschlag von HAIN, unter anderem auch deshalb, weil daran einmal mehr die großartige Begabung von HAIN besonders schön deutlich wird, aus theoretischen Erkenntnissen auch praktischen Nutzen zu ziehen.

In dem Aufsatz von 1967 kombinierte HAIN das Prinzip der sechsgliedrigen Parallelführung nun mit einer Geradführung und erzeugte so eine Relativbewegung zwischen dem geführten Koppelglied und dem Gestell wie sie z.B. für Spannvorrichtungen benötigt wird und sonst nur mit Hilfe von Gleitführungen realisiert werden kann.

Als Vorschlag für eine mögliche Anwendung zeigt HAIN unter anderem die in Bild 1 wiedergegebene Handzange, deren Backen sich parallel bleibend und annähernd geradlinig relativ zueinander bewegen. Die Original-Zeichnung wurde aus dem Druckexemplar eingescannt, aber hier mit neuen Bezeichnungen versehen. Dieses hübsche Beispiel hat den Autor schon als Student fasziniert, denn welcher Bastler wünschte sich nicht eine einfache Zange, mit der er ohne schlechtes Gewissen z.B. auch eine Sechskantmutter losdrehen könnte. In der späteren Lehrtätigkeit des Autors erwies sich dieses Beispiel dann auch didaktisch als sehr ergiebig, weshalb er es in den 70er Jahren in ein von ihm mitgestaltetes Lehrbuch einbrachte [3] und bis heute gern in seiner Getriebetechnik-Vorlesung behandelt, nicht zuletzt wegen des garantierten Schmunzel-Effektes bei den Studierenden.



So ist es vielleicht besonders angebracht, mit ein paar Betrachtungen gerade zu diesem Beispiel dem großen Kinematiker KURT HAIN noch einmal respektvolle Referenz zu erweisen. Dazu soll gezeigt werden, wie mit heutigen Software-Möglichkeiten an die Auslegung eines solchen Getriebes herangegangen werden kann, und der Autor ist sich sicher, dass KURT HAIN diese Möglichkeiten begeistert genutzt hätte, wenn sie ihm schon zur Verfügung gestanden hätten.



2 Getriebetechnischer Aufbau und theoretische Grundlage

Gemäß Bild 1 von HAIN und der entsprechenden Schemazeichnung in Bild 2 bilden der Grundkörper der Zange mit oberem Griff und unterer Backe das Gestell 1;0 eines sechsgliedrigen Drehgelenkgetriebes. Ein erstes viergliedriges Teilgetriebe mit dem beweglichen Griff 2, dem Führungslenker 3 und dem Koppelglied 4 führt den Koppelpunkt C annähernd geradlinig und rechtwinklig zur unteren Spannfläche auf einem Koppelkurvenstück k_C . Die bewegliche Backe 6 ist in C drehbar gelagert und wird damit zunächst in diesem Punkt ebenfalls geradlinig geführt. Dabei wird sie zusätzlich aber immer parallel gehalten durch den im Gelenk E an der Backe angeschlossenen Lenker 5, der sich an seinem anderen Ende im Gelenk D in dem beweglichen Zangengriff 2 abstützt. Die beiden ternären Glieder 2 und 4 sind direkt gelenkig verbunden und es liegt somit eine Watt'sche Kette vor.

Für getriebetechnisch weniger Erfahrene ist es immer wieder verblüffend, wie in einem scheinbar undurchschaubaren Zusammenspiel aller Glieder über einen weiten Bewegungsbereich die einfache und klare Funktionalität der geraden Parallelführung zustande kommt. Dem Kenner erschließt sich aber schnell die funktionelle Aufteilung in einerseits „Bahnführung des Koppelpunktes C“ durch das Grundgetriebe A_0ACBB_0 und „Lagewinkelausrichtung des Gliedes 6“ durch den ergänzenden Zweischlag DEC. Daraus ergibt sich auch der Ansatz zur Maßsynthese des Getriebes für die hier betrachtete Aufgabe. Schon Lichtenheldt [4] hat gelehrt, sich zur Auslegung von komplexen Getrieben solche abgrenzbaren Teilfunktionen zu Nutze zu machen und diese in einem von ihm als „Partialsynthese“ bezeichneten Vorgehen schrittweise aufeinander aufbauend zu realisieren. Diesen für jeden Praktiker nahe liegenden Weg haben in neuerer Zeit der Autor und sein früherer Mitarbeiter P. WOHLBERG in dem Programmsystem GENESYS des Instituts für Getriebetechnik der Leibniz Universität Hannover unter dem Stichwort „Problemspezifische Bearbeitungsstrategie“ einer rechnerunterstützten Anwendung zugänglich gemacht [5,6].

Die Synthese des ersten Teilgetriebes zur Geradföhrung des Koppelpunktes C ist für HAIN eine Standardaufgabe und mit Hinweis auf vorliegende Literatur zeigt er ohne weitere Diskussion sofort eine von ihm im Weiteren verwendete Lösung. Der Schwerpunkt seiner Betrachtungen liegt in der Synthese der Parallelföhrung. Wie schon gesagt, greift er dabei auf den Satz von ROBERTS über die dreifache Erzeugung von Koppelkurven zuröck.

Zur Erläuterung zeigt Bild 3a ein Grundgetriebe A_0ACBB_0 und dazu mit $C_0A^*CB^*B_0$ eines der beiden weiteren Getriebe, die exakt die gleiche Koppelkurve k_C erzeugen. Dessen Ermittlung erfolgt sehr einfach nach bekannten Methoden, die in jedem Lehrbuch zu finden sind. Die besondere Erkenntnis von HAIN liegt nun darin, dass – gemessen ab einer beliebigen Anfangsstellung – die beiden Kurbeln A_0A und C_0A^*

gleiche relative Drehwinkel $\Delta\varphi$ durchlaufen, wenn beide Getriebe im Punkt C verbunden bleiben. Daraus leitet HAIN ab, dass man das Getriebe $C_0A^*CB^*B_0$ so parallel verschieben kann, dass C_0 mit A_0 zusammenfällt und das verschobene Getriebe $A_0A'C'B'B_0'$ entsteht (Bild 3b). Wenn man nun die beiden Glieder A_0A und A_0A' zu einem ternären Glied vereint, beschreibt C' eine zu k_C kongruente Koppelkurve $k_{C'}$. Eine gedachte Verbindung CC' bleibt dann in der Länge konstant und in jeder Stellung exakt parallel zu ihrer Ausgangslage. Baut man in Gestalt der Gliedebene 6 tatsächlich eine in sich starre Verbindung zwischen C und C' ein, so kann nicht nur, sondern muss sogar wegen des Laufgrades das Glied B_0B' entfallen und man erhält als Ergebnis die zweigliedrige Ergänzung $A'C'C$ des Grundgetriebes für die exakte Parallelhaltung des Gliedes 6 mit gleicher Bahnkurve k_C aller Punkte auf diesem Getriebeglied.

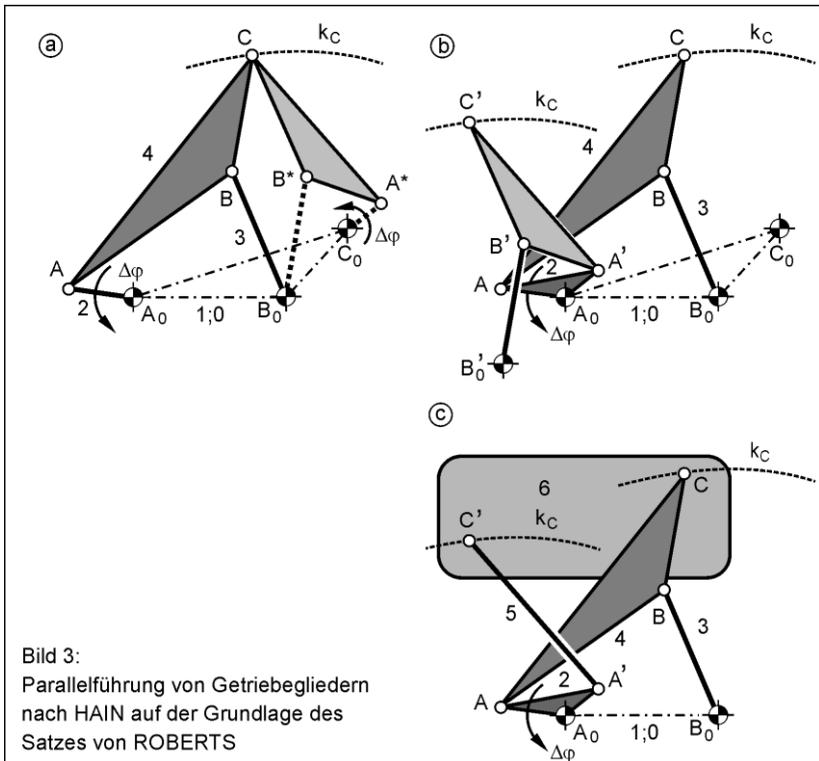
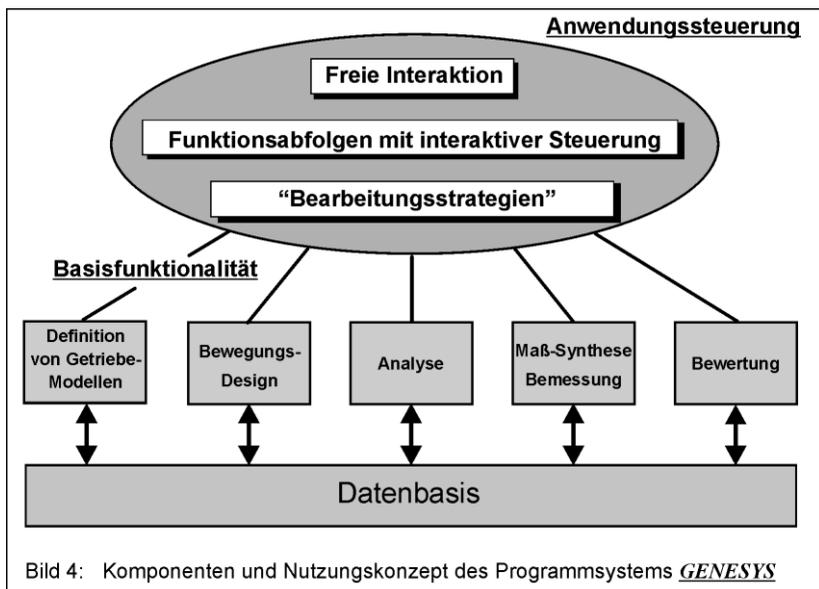


Bild 3:
Parallelführung von Getriebegliedern
nach HAIN auf der Grundlage des
Satzes von ROBERTS

Nach HAIN lassen sich so aus jedem der drei möglichen Grundgetriebe für ein und dieselbe Koppelkurve k_C jeweils zwei Ergänzungsvarianten und somit insgesamt sechs unterschiedliche Getriebe für eine exakte Parallelführung auf einer beliebigen Koppelkurve ableiten. Wenn man sich aber auf ein ganz bestimmtes Grundgetriebe für die Punktführung festlegt – hier das in der Original-HAIN-Zange nahezu symmetrisch aufgebaute Getriebe A_0ACBB_0 – und wählt einen der beiden Lenker A_0A oder B_0B als Stützglied für den parallel haltenden Lenker DE zur geführten Backe 6, dann gibt es dafür genau eine einzige exakte Lösung.

3 Die eingesetzte Software GENESYS

Für die nachfolgend beschriebenen Schritte zum Einsatz von heutiger Software für die Analyse und Synthese einer HAIN-Zange wurde durchgehend das Programmsystem GENESYS verwendet, das in einem Zeitraum von über 10 Jahren unter dem Autor am Institut für Getriebetechnik der Leibniz Universität Hannover entwickelt wurde [7]. Der Programmname steht für Getriebe-Entwurfs- und -Entwicklungs-System und umreißt damit die Zielsetzung des Programms, nämlich die Bereitstellung von umfassender und durchgängig integrierter Rechnerunterstützung für den Gesamtprozess der Auslegung ungleichmäßig übersetzender Getriebe mit kinematisch ebenem, ansonsten aber beliebigem Aufbau. Einen groben Überblick über die wichtigsten Komponenten und das Nutzungskonzept von GENESYS gibt Bild 4.



Auf besondere Leistungsmerkmale dieser Software, die für die hier betrachtete Anwendung relevant sind, wird im Folgenden jeweils an entsprechender Stelle hingewiesen. Für den ersten Schritt der Analyse der von HAIN gezeigten Abmessungsvariante wären ohne Zweifel auch andere gängige Analyse-Systeme einsetzbar gewesen, während für den Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchung, nämlich den Einsatz der Maßsynthese auf der Basis der klassischen Genaulagen-Synthese derzeit wohl kein anderes Software-Werkzeug ähnliche Leistungsfähigkeit bietet.

Das software-technisch innovative Konzept von GENESYS auf dem Gebiet der Maßsynthese besteht darin, dass die Auslegung eines komplexen Getriebes als Bearbeitungsprozess in Form einer Abfolge von problemspezifisch aufeinander abzustimmenden Bearbeitungsschritten verstanden wird. In diesem Prozess sollten natürlich immer die Möglichkeiten einer gezielten Maßsynthese weitestgehend genutzt werden, ggf. auch in mehrfacher, aufeinander aufbauender Anwendung für verschiedene Gliedergruppen. Trotzdem bilden solche Schritte der Maßsynthese immer nur einzelne Stationen in einer Abfolge von zahlreichen weiteren benötigten Bearbeitungsschritten.

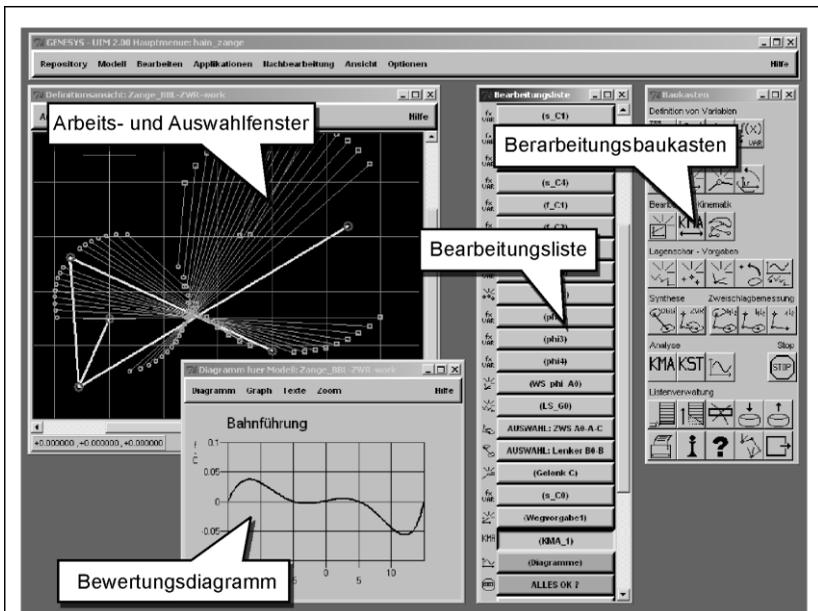


Bild 5: Funktionsmodul "Bearbeitungsstrategien" im Programmsystem GENESYS

Zur Auffindung einer guten oder gar optimalen Lösung muss ein solcher Bearbeitungsablauf dann unter Variation der jeweils freien Parameter der vorliegenden Aufgabenstellung immer vielfach wiederholt durchlaufen werden. GENESYS bietet dazu nun die Möglichkeit, aus einem so genannten „Bearbeitungsbaukasten“ jeweils benötigte „Bearbeitungsschritte“ auszuwählen und diese in einer „Bearbeitungsliste“ zu einer problemspezifischen „Bearbeitungsstrategie“ zusammenzustellen. Diese Liste kann dann durch gezieltes Vorwärts- und Rückwärtsspringen mit erheblich reduziertem Eingabeaufwand in beliebigen Zyklen wiederholt abgearbeitet werden.

Bild 5 zeigt exemplarisch eine typische Bildschirmansicht. Die helleren Schritte der Bearbeitungsliste sind momentan bereits abgearbeitet. Es wurde darin z.B. mit Hilfe einer Genaulagen-Synthese für eine 4-Lagenzuordnung ein 1-parametriges Lösungsangebot ermittelt und daraus interaktiv eine interessant erscheinende Einzellösung ausgewählt. In Arbeit ist gerade der dritte Schritt von unten, der eine vollständige kinematische Analyse der gewählten Lösung ausführt, und anschließend wird das vorbereitete Diagramm zur Bewertung der Lösungsgüte automatisch der aktuellen Variante angepasst werden. Durch Anklicken eines früheren, bereits abgearbeiteten Feldes oberen Feldes – z.B. für die Eingabe eines veränderten Vorgabewertes – werden die Ergebnisse aller danach folgenden Schritte wieder zurückgenommen und deren Abarbeitung mit dem neuen Eingabewert wiederholt.

4 Kinematische und kinetostatische Analyse

Zur Vorbereitung einer neuen Zangen-Auslegung soll zunächst einmal eine kinematische und kinetostatische Analyse der Original-Auslegung von HAIN betrachtet werden.

Die vorliegende gescannte, aber unbemaßte Zeichnung wurde dazu auf eine Gesamtlänge von 200mm skaliert, was etwa der Größe einer handelsüblichen verstellbaren Rohrzange entspricht. Danach konnten konkrete Abmessungsdaten entnommen und der gesamte Mechanismus als kinematisch ebenes Berechnungsmodell in GENESYS abgebildet werden. Obwohl das Getriebe kinematisch eben ist, gehört zu einer solchen Modellbildung auch eine räumliche Betrachtung, nämlich bezüglich der Schichtung der Getriebeglieder in ihrer konstruktiven Gestaltung zur Vermeidung von Kollisionen im beabsichtigten Bewegungsbereich.

Die Original-Zeichnung gibt dazu keinen näheren Aufschluss und es wurde deshalb vom Autor die in Bild 6 dargestellte geometrische Ausprägung der Gliedkonturen und

deren Schichtung gewählt. Dabei weist der Aufbau insgesamt neun Schichten auf, von denen allerdings nur fünf kinematisch relevant sind. Um fliegende Lagerungen zu vermeiden, wurde symmetrisch zur mittleren Schicht, in der das Glied 5 liegt, eine gespiegelte Anordnung aller anderen Getriebeglieder konzipiert.

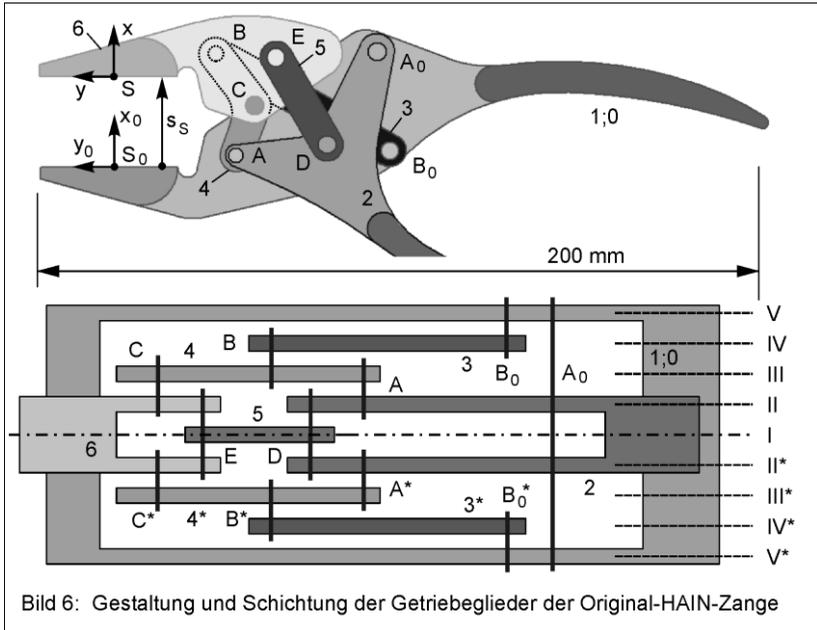
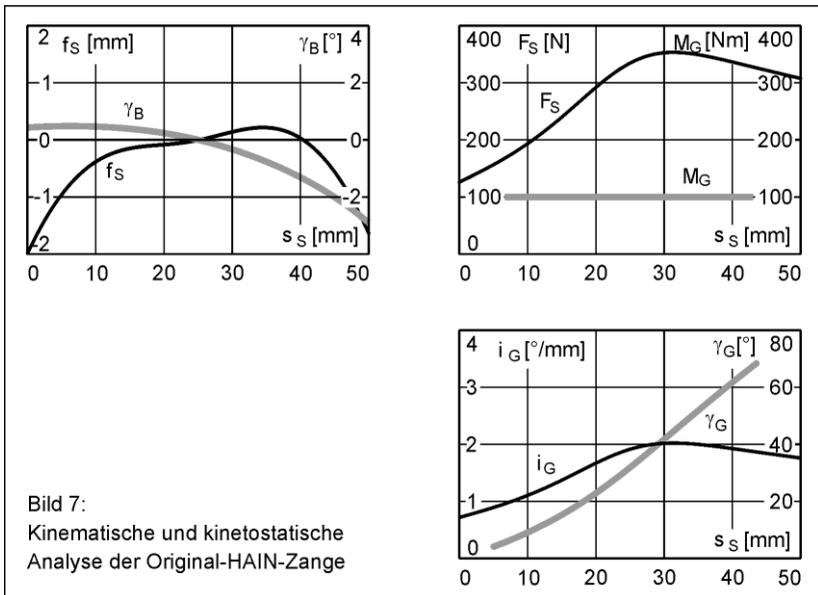


Bild 6: Gestaltung und Schichtung der Getriebeglieder der Original-HAIN-Zange

Zur kinematischen Analyse der Relativbewegung der Backen wurde etwa in der Mitte der Spannfläche der als feststehend betrachteten Backe im Punkt S_0 ein Koordinatensystem mit der x_0 -Achse rechtwinklig zur Spannfläche definiert und entsprechend ein weiteres Koordinatensystem im Punkt S der beweglichen Spannfläche. Für den „Antrieb“ der Relativbewegung der Backen liegt es dann nahe, als Öffnungsweg s_S die Koordinate x_{0S} des beweglichen Bezugspunktes S im gestellfesten Bezugssystem (x_0, y_0) vorzugeben. Dazu muss die verwendete Software natürlich eine derartige Antriebsdefinition erlauben, was nicht unbedingt selbstverständlich ist, weil bei der hier vorliegenden, in jedem Fall ja nur angenäherten Geradföhrung durchaus eine veränderliche y_0 -Komponente von S in (x_0, y_0) auftritt, die hier als Geradföhrungsfehler f_S bezeichnet wird. Als Winkelfehler γ_B zwischen den Backenflächen wird der Richtungswinkel der x -Achse auf der beweglichen Backe relativ zur x_0 -Achse auf der festen Backe ausgewertet.

Mit den Getriebeabmessungen, die sich natürlich nur mit einer gewissen Unsicherheit aus der gescannten Original-Zeichnung entnehmen lassen, ergeben sich die in Bild 7a dargestellten Verläufe für die Fehlerwerte f_s und γ_B über dem Öffnungsweg s_s zwischen 0 und 50 mm. Man erkennt, dass in den Randbereichen bei kleinen und großen Öffnungswegen relativ große Abweichungen von der Soll-Geraden auftreten. Dieser qualitative Verlauf des Geradführungsfehlers mit deutlichem Anwachsen des Betrages außerhalb einer mittleren Zone ist typisch für die vorliegende annähernd symmetrische Gestaltung des Grundgetriebes und somit sicher nicht nur auf fehlerhaft abgegriffene Abmessungen zurückzuführen. Aber auch im mittleren Bereich darf man bei der von HAIN angewandten zeichnerischen Synthese des Geradführungsgetriebes nicht unbedingt optimale Ergebnisse erwarten. Im Gegensatz zum Geradführungsfehler sollte der Winkelfehler aber theoretisch im gesamten Bewegungsbereich exakt gleich Null sein und die hier im Mittelabschnitt festgestellte maximale Abweichung von etwa 2° muss durch präzise bestimmte Abmessungen auf Null reduzierbar sein.



Neben dem kinematischen Verhalten sind gerade bei der angestrebten Spannfunktion natürlich auch die auftretenden Kräfte von Bedeutung für die Beurteilung der Funktionsgüte des Getriebes. Dazu wurde als Vergleichsbasis an dem beweglichen Griff 2 ein konstant vorgegebenes Schließmoment mit dem mehr oder weniger willkürlich gewählten Wert $M_G = 100$ Nm zugrunde gelegt. Dies entspricht einer im

Mittelbereich der Griffe wirkenden Handkraft von ca. 200 N und damit schon einem relativ hohem Wert. Mit dieser Vorgabe können dann über dem Öffnungsweg s_S die verfügbare Backenkraft F_S zwischen den Bezugspunkten S_0 und S sowie alle Gelenkkräfte berechnet werden. Bild 7b zeigt für das angenommene konstante Drehmoment am Handgriff den Verlauf der Backenkraft F_S . Man erkennt, dass diese bei geschlossenen Backen recht klein ist und beim Eintritt in den mittleren Bewegungsabschnitt zwischen 10 und 40 mm Öffnungsweite nur ca. 190 N beträgt. Erst bei etwa 30 mm Öffnungsweite wird ein Maximalwert von ca. 350 N erreicht.

Für die spätere Synthese ist es hilfreich, hier auch den Zusammenhang zwischen dem kinematischen und kinetostatischen Verhalten genau zu verstehen. Ein wohl nahe liegendes Ziel könnte z.B. sein, auch schon bei kleineren Öffnungsweiten eine größere Backenkraft und insgesamt vielleicht einen annähernd konstanten Verlauf der Backenkraft zu erreichen. Dazu kann man sich überlegen, dass unter Annahme von reibungsfreier Kraftübertragung bei der Bewegung der Zange die am Handgriff zugeführte Arbeit identisch sein muss mit der an den Backen abgeführten Arbeit. Entscheidend für die Größe und den Verlauf der Backenkraft über dem Öffnungsweg ist somit der Verlauf des Drehwinkels γ_G am beweglichen Griff bzw. genauer das „Übersetzungsverhältnis“ $i_G = d\gamma_G/ds_S$ über dem Öffnungsweg s_S . Bild 7c zeigt diese Größen für die abgegriffenen Abmessungen der HAIN-Zange. Im mittleren Bewegungsabschnitt von 10 bis 40 mm Öffnungsweite überstreicht der bewegliche Zangengriff einen Drehwinkelsektor von ca. 55°. Die Übersetzung i_G beginnt in diesem Abschnitt mit dem recht kleinen Wert von ca. $i_G = 1,1$ [°/mm] und erreicht – proportional zum Spannkraftverlauf in Bild 7b – erst später den Maximalwert von ca. 2,0 [°/mm]. Für das oben genannte Optimierungsziel sollte die absolute Größe der Übersetzung i_G jedoch insgesamt möglichst hoch und in ihrem Verlauf möglichst konstant sein.

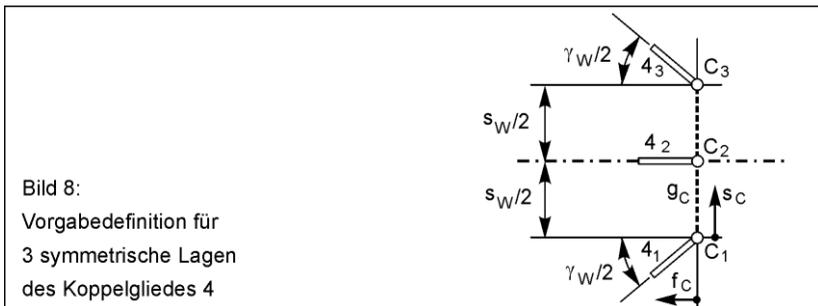
5 Synthese neuer Abmessungsvarianten

Für die nachfolgend gezeigten Syntheseansätze wurde einheitlich eine geforderte maximale Öffnungsweite von $s_W = 30$ mm zugrunde gelegt, da auch die Original-HAIN-Zange nur etwa über diesen Bereich relativ geringe Geradführungsfehler aufweist.

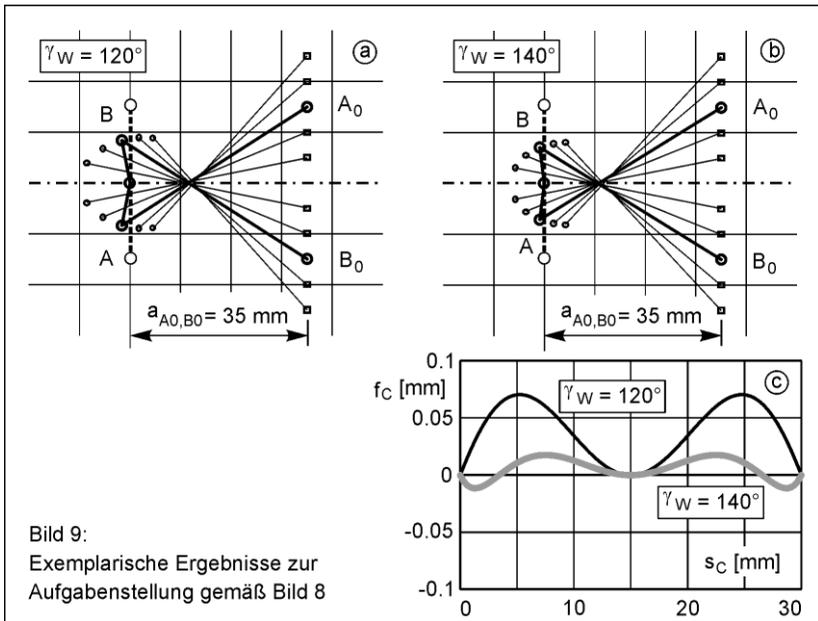
In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Auslegung des geradführenden Grundgetriebes betrachtet und mit zwei verschiedenen Ansätzen angegangen. Anschließend erfolgt die Bemessung des lageführenden Ergänzungszweischlags. Als theoretischer Hintergrund wird die vom Autor bereits in seiner Dissertation [8] entwickelte und in den Jahren seiner Lehrtätigkeit in Hannover weiter ausgestaltete Interpretation der klassischen Genaulagen-Synthese zugrunde gelegt. Eine neuere zusammenfassende Darstellung findet sich in [9].

5.1 Symmetrisches Geradföhrungsgetriebe

Die Originalzeichnung von HAIN zeigt ein nahezu symmetrisch aufgebautes Grundgetriebe A_0ACBB_0 für die Erzeugung der Geradföhrung und wegen der bekannt guten Geradföhrungseigenschaften von symmetrischen Getrieben ist es sicher nahe liegend, diese Eigenschaft zunächst einmal als Festvorgabe zugrunde zu legen. In einfachster Weise kann die Synthese dann so erfolgen, dass drei Lagen des Koppelgliedes 4 so vorgegeben werden, dass der zu föhrende Punkt C die Soll-Gerade g_C möglichst gut annähert. Sinnvoll im Hinblick auf einen vollständigen Fehlerausgleich wird man hier gemäß Bild 8 für drei Vorgabelagen den Punkt C_2 mittig und die Punkte C_1 bzw. C_3 an den Enden der verlangten Geradföhrung jeweils exakt auf die Soll-Gerade g_C legen. Für eine vollständige Gliedlagenvorgabe fehlen dann noch die zugeordneten Winkellagen des Gliedes 4, die natürlich symmetrisch zur Mittelstellung vorgegeben werden müssen, wenn sich symmetrische Lösungsgetriebe ergeben sollen. Als freier Variationsparameter verbleibt somit nur ein einziger Winkelwert γ_W für den Gesamtdrehwinkel des Gliedes 4 zwischen dessen beiden Randlagen. Zur Beurteilung der erreichten Geradföhrungsgüte des Punktes C wird der Verlauf der Abweichung f_C über dem Geradföhrungsweg s_C betrachtet.

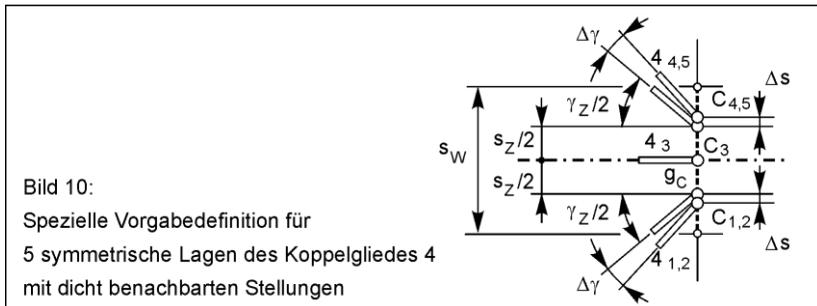


Für die so symmetrisch definierten Gliedlagen liefert die Genaulagen-Synthese dann bei freier, aber symmetrischer Vorgabe von Gestellgelenken A_0, B_0 bzw. von Koppelgelenken A, B ein symmetrisches Lösungsangebot für das jeweils zugeordnete zweite Gelenk. Exemplarisch zeigt Bild 9 zwei solche Lösungsangebote für $\gamma_W = 120^\circ$ und $\gamma_W = 140^\circ$ und eine willkürliche Vorgabe des Abstandes der Gestellgelenke von der Soll-Geraden. Die anschließende kinematische Analyse der ausgewählten Lösungen zeigt in Bild 9c, dass diese sich trotz etwa gleicher Abmessungen doch erheblich unterscheiden im Fehlerverlauf der Geradföhrung. Die Lösung in Bild 9a hat eine 4-punktige Übereinstimmung mit der Soll-Geraden und einen relativ großen maximalen Geradföhrungsfehler, während im Fall 9b eine 6-punktige Übereinstimmung mit einem sehr viel geringeren Geradföhrungsfehler auftritt.



Wenn man an solchen ersten Ergebnissen erkannt hat, dass im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung 6-punktige Übereinstimmung mit sehr geringem Geradföhrungsfehler prinzipiell möglich ist, kann man auch versuchen, diese durch entsprechende Lagevorgaben gezielt zu erzwingen. Man muss dazu dann insgesamt fünf Gliedlagen vorgeben, und zwar neben der Mittellage auf jeder Seite jeweils zwei symmetrische Lagen der Koppelglieder mit den Positionswerten für den Punkt C und zugeordneten Winkelwerten für die Glieddrehung. Für jede solche Vorgabekombination gibt es dann genau ein symmetrisches Lösungsgetriebe, dessen Lenker durch die BURMESTER-Punkte für die fünf vorgegebenen Gliedlagen bestimmt sind. In der Regel muss man aber ziemlich lange probieren, bevor man eine Kombination von Vorgabewerten findet, die zu einem brauchbaren Getriebe föhrt, und gar eine optimale Ausnutzung eines bestimmten Geradföhrungsfehlers in Form eines voll ausgeglichenen Fehlerverlaufs wird man so nur schwer finden.

Durch eine spezielle, der vorliegenden Aufgabe angepasste Vorgabebform für die Soll-Lagen kann man jedoch gezielt auf einen vollständigen Fehlerausgleich hinwirken und gleichzeitig die Anzahl der freien Variationsparameter reduzieren. Bild 10 zeigt diese spezielle Lagenvorgabe, bei der beidseitig symmetrisch sehr dicht benachbarte Gliedlagen mit dem zu föhrenden Punkt C exakt auf der Soll-Geraden platziert werden.



Der rechnerisch endliche Abstand Δs der dicht benachbarten Punktlagen kann mit einem beliebigen, sehr kleinen Wert vorgegeben werden, ohne das Ergebnis nennenswert zu beeinflussen. Es gibt damit nur noch drei freie Parameter, nämlich den Abstand s_z des inneren Punktepaars, den Drehwinkel γ_z zwischen den Lagen des inneren Gliedlagenpaares und für den Drehwinkel $\Delta\gamma$ des Gliedes zwischen den jeweils dicht benachbarten Lagen eine dritte Variable V_z , die z.B. in der Form

$$V_z [\%] = 100(\Delta\gamma/\Delta s)/(\gamma_z/s_z)$$

in Prozent ausdrückt, wie sich das Verhältnis des Drehwinkels γ zum Geradführungsweg s zwischen den dicht benachbarten Lagen zum entsprechenden Verhältnis der Werte zwischen den symmetrischen Lagenpaaren auf beiden Seiten verhält. Diese drei Vorgabegrößen lassen sich mit geeigneter Rechnerunterstützung sehr zielstrebig interaktiv so aufeinander abgestimmt werden, dass sich z.B. die in Bild 11 gezeigte Lösung mit einem vollständig ausgeglichenen Fehlerverlauf ergibt. Tatsächlich haben hier nur die beiden Parameter γ_z und V_z wesentlichen Einfluss auf die Grob-Abmessungen des Lösungsgetriebes. Durch Variation von s_z erfolgt dann zu jeder gewählten Kombination der beiden anderen Werte lediglich eine Fein-Anpassung der Abmessungen des Lösungsgetriebes so, dass der Geradführungsfehler f_c an den Rändern der Geradführung etwa gleich groß wird wie die beiden Extremwerte im mittleren Bereich und so ein ausgeglichener Fehlerverlauf mit insgesamt kleinstmöglicher Bandbreite erreicht wird.

Mit der in Bild 11 gezeigten Lösung wurde so z.B. ein maximaler Geradführungsfehler von unter 0,02 mm erreicht. So geringe Fehler werden für den Einsatz in einer Zange wohl kaum nötig und aufgrund von Fertigungstoleranzen, Gelenkspiel und elastischer Verformung unter Belastung auch nicht wirklich realisierbar sein. Aber dieses Beispiel zeigt doch einmal mehr, welch erstaunliche Ergebnisse mit einer geschickt angesetzten rechnerunterstützten Genaulagen-Synthese in interaktiver Nutzung schnell und zielstrebig erreicht werden können.

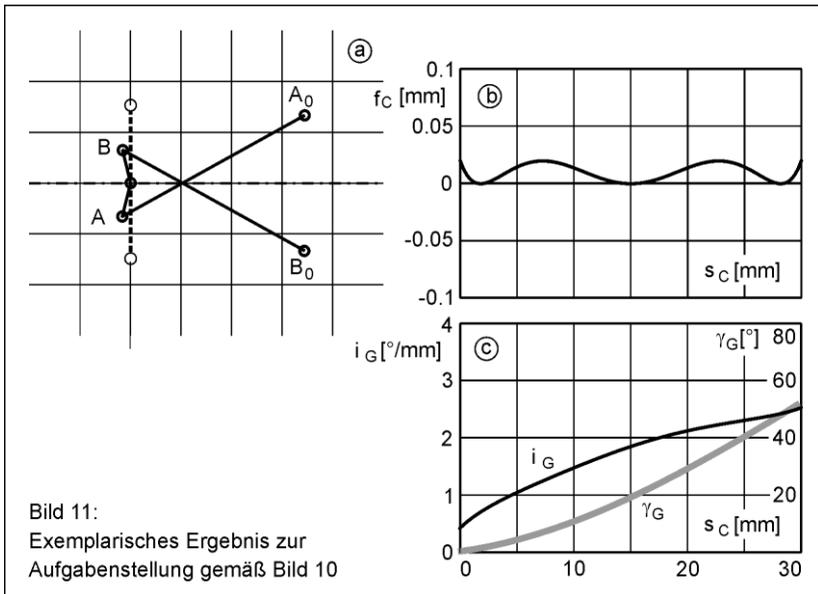


Bild 11:
Exemplarisches Ergebnis zur
Aufgabenstellung gemäß Bild 10

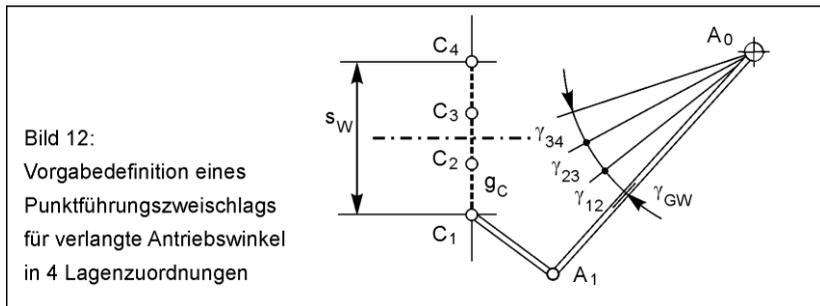
Wenn die hier erreichte Geradführungsgenauigkeit auch nicht unbedingt erforderlich ist, so ist sie doch zunächst auch kein Nachteil, aber das so gefundene Getriebe hat einen anderen schweren Mangel. Dieser zeigt sich, wenn man im Bild 11c im Vergleich mit Bild 7 den Verlauf des Öffnungswinkels γ_G am beweglichen Zangengriff und dessen Übersetzung i_G bezogen auf den Geradführungsweg s_c betrachtet. Der Übersetzungsverlauf beginnt hier noch niedriger als im 30 mm-Ausschnitt der Original-HAIN-Zange bei unter $i_G = 0,5$ [°/mm] und das heißt, dass ein darauf aufgebautes Zangengetriebe bei gleicher Handkraft an den Griffen im Bereich geringer Öffnungsweite noch deutlich kleinere Backenkräfte erzeugen würde, als die Original-HAIN-Zange.

Man kann nun versuchen diesem Mangel abzuhelfen, indem man unter Beibehaltung der Grundforderung „Symmetrie“ die dafür definierten freien Parameter variiert. Es zeigt sich dabei aber sehr schnell, dass die Veränderlichkeit der Übersetzung und damit ihr unerwünscht geringer Anfangswert ein typisches Grundmerkmal der symmetrischen Lösungsgetriebe ist und nur gemildert werden kann, wenn man – unter bewusster Inkaufnahme von Abstrichen bei der Geradführungsgenauigkeit – die Symmetrieforderung fallen lässt.

Dies führt auf einen alternativen Ansatz der Genaulagen-Synthese, der im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

5.2 Punktführungs-Zweischlag mit vorgegebenen Antriebswinkeln

Die klassische Genaulagen-Synthese betrachtet die Grundaufgabe, dass Lagen eines Getriebegliedes relativ zu einem anderen vorgegeben sind und ein drittes Verbindungsglied zwischen den beiden gegebenen Gliedern gesucht wird. Diese Grundaufgabe wird vom Autor als „Dreigliedergruppe“ (DGG) bezeichnet. Daneben lassen sich aber durchaus auch noch andere Aufgabenstellungen formulieren und ebenso analytisch exakt lösen. Eine weitere gelegentlich und so auch hier hilfreiche Grundaufgabe wird vom Autor als „Zweischlag mit Relativwinkel“ (ZWR) bezeichnet und in ihrer Anpassung an die hier vorliegende konkrete Aufgabe in Bild 12 dargestellt.

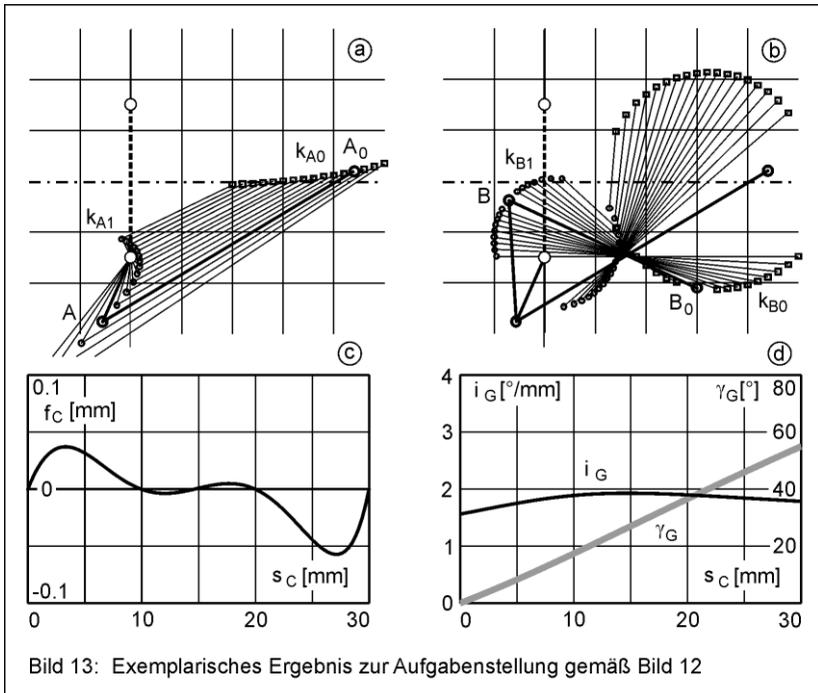


Gegeben sind zunächst Punktlagen C_i , die ein zu führender Punkt C durchlaufen soll. Gesucht ist ein dafür geeigneter Zweischlag A_0AC , der aber weitere Bedingungen erfüllen soll, nämlich die Überstreichung vorgegebener Winkelsektoren $\gamma_{i,i+1}$ durch das Glied A_0A beim Durchlaufen der Punkte C_i . Dieser Bemessungsansatz passt genau zum hier vorliegenden Problem. Der Punkt C soll die Soll-Gerade g_C durchlaufen und der bewegliche Zangengriff, der sich um A_0 dreht und das Gelenk A trägt, soll dabei bestimmte Anforderungen an seinen zugeordneten Drehwinkelverlauf γ_G erfüllen. Diese Anforderungen lassen sich wie folgt formulieren.

Wenn die Übersetzung i_G insgesamt möglichst hohe Werte erreichen soll, dann muss zunächst einmal der Durchschnittswert $i_{GW} = \gamma_{GW}/s_W$ möglichst hoch werden, bei dem hier fest vorgegebenen Wert 30 mm für s_W also der Gesamtdrehwinkel γ_{GW} am Griff. Dem sind aber durch die Greifbarkeit beider Griffe bei geöffneter Zange mit einer Hand Grenzen gesetzt. Der bei der Original-HAIN-Zange vorliegende Drehwinkel am Griff von ca. $\gamma_{GW} = 55^\circ$ für den mittleren 30-mm-Öffnungsweg dürfte wohl schon an die Grenze des Akzeptablen gehen. Deshalb wird hier für die weitere Betrachtung der gleiche Drehwinkel am Griff als Festvorgabe betrachtet.

Mit dem Gesamtweg und dem Gesamtdrehwinkel ist auch den Durchschnittswert der Übersetzung festgelegt und dann bleibt als Optimierungsmöglichkeit nur noch übrig, einen möglichst konstanten Wert der Übersetzung über den gesamten Bewegungsbereich anzustreben.

Ein typisches Lösungsspektrum für eine so formulierte Bemessungsaufgabe zeigt Bild13a.



Die Genauigkeitspunkte C_1 bis C_4 wurden dabei einfach gleichmäßig im Abstand $s_w/3$ auf der Soll-Geraden verteilt und der Gesamtdrehwinkel $\gamma_{12} + \gamma_{23} + \gamma_{34} = \gamma_{GW}$ mit $\gamma_{GW} = 55^\circ$ festgelegt. Zur freien Variation verbleibt dann nur noch die Aufteilung des Gesamtwinkels γ_{GW} auf die drei Teilwinkel, die z.B. durch die folgenden Verhältniswerte V_{12} und V_{34} definiert werden kann.

$$V_{12} [\%] = 100(\gamma_{12}/s_w/3) / (\gamma_{GW}/s_w) \quad \text{und} \quad V_{34} [\%] = 100(\gamma_{34}/s_w/3) / (\gamma_{GW}/s_w)$$

Die Variablen V_{12} und V_{34} geben dann prozentual an, wie sich die durchschnittliche Übersetzung in den beiden Randbereichen zur durchschnittlichen Gesamtübersetzung verhält. Als Optimum wären Lösungen mit $V_{12} = V_{34} = 100\%$ erwünscht und es liegt nahe, zunächst genau diese Werte vorzugeben. Es zeigt sich aber, dass bei diesen „Idealvorgaben“ Getriebe entstehen, die sehr ungünstige Abmessungen haben und für den hier betrachteten Zweck völlig unbrauchbar sind. Erst eine gewisse Absenkung der Anfangsübersetzung führt auf eventuell konstruktiv realisierbare Abmessungen. Eine typische Lösungsvariante für den gesuchten Zweischlag A_0AC mit $V_{12} = 95\%$ und $V_{34} = 100\%$ zeigt Bild 13a. Weil 4 Lagenzuordnungen vorgegeben wurden, liegen zulässige Gelenkpunkte A_0 und A des gesuchten Zweischlages A_0AC nun auf den BURMESTER-Kurven k_{A_0} und k_A , von denen in Bild 13a nur ein Ausschnitt dargestellt ist, der hier geeignete Lösungen enthält.

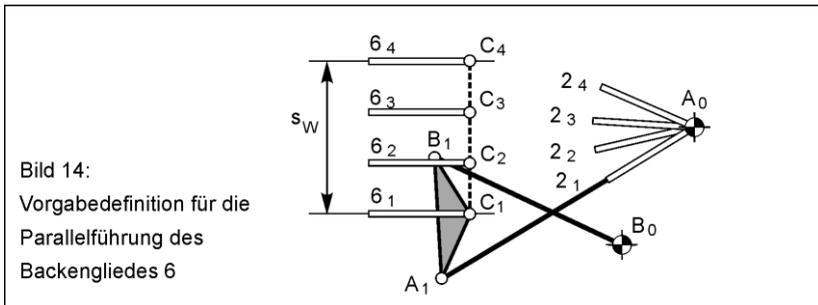
Daraus wird eine Lösung ausgewählt und dazu kann dann in einem darauf aufbauenden zweiten Bemessungsschritt ein passender Führungslenker B_0B ermittelt werden. Dafür werden aus dem Bewegungsablauf des Gliedes 4, der durch den aus dem Lösungsangebot gewählten Zweischlag A_0AC und die gewünschte Geradföhrung bestimmt wird, z.B. wiederum vier Gliedlagen ausgewählt. Am einfachsten können das gleich diejenigen Gliedlagen sein, die das Glied 4 bei den im ersten Schritt vorgegeben Punktlagen einnimmt. Ein besonderes Leistungsmerkmal von Software für solche mehrstufigen Bemessungsprozesse besteht z.B. darin, gezielt die Bereitstellung von Gliedlagenscharen aus einem früheren Schritt und deren Nutzung in einem späteren zu unterstützen. Als Ergebnis erhält man dann unter Nutzung des Bemessungsmoduls DGG ein zum Vorgabezweischlag passendes Lösungsspektrum für den Lenker B_0B – z.B. gemäß Bild 13b – hier wiederum in Form von BURMESTER-Kurven, weil 4 Lagenzuordnungen verwendet wurden.

Das Analyseergebnis für das so entwickelte Grundgetriebe zeigt Bild 13c. Die Soll-Gerade wird mit einer sicherlich noch akzeptablen Bandbreite des Lagefehlers von unter 0,1 mm durchlaufen und der kritische Anfangswert der Griffübersetzung liegt mit ca. $i_G = 1,6$ [°/mm] erkennbar über dem entsprechenden Wert $i_G = 1,1$ [°/mm] bei der Original-HAIN-Zange. Das heißt, dass für das fertige Getriebe bei dem zugrunde gelegten Handmoment am Griff eine Verbesserung der minimalen Backenkraft auf ca. 270 N im Vergleich zu 190 N bei der Original-HAIN-Zange zu erwarten ist. Allerdings wird die Untersuchung möglicher konstruktiver Gliedschichtung beim fertigen Lösungsgetriebe zeigen, dass dieser bescheidene Gewinn in der Backenkraft mit einer erheblichen Komplizierung in der konstruktiven Gestaltung erkauft wird.

5.3 Lageführung der beweglichen Backe

Als abschließender Schritt ist nun der Zweischlag DEC für die Parallelführung des in C angelenkten beweglichen Backengliedes 6 zu realisieren. Wie vorne erläutert, hat sich HAIN dazu sehr elegant den Satz von ROBERTS zunutze gemacht. Das gleiche Ergebnis lässt sich aber auch ohne diesen speziellen Ansatz wiederum mit einer lediglich problemspezifisch angepassten Anwendung der allgemeinen Genaulagen-Synthese erreichen.

Gemäß Bild 14 liegt bisher das Grundgetriebe A_0ACBB_0 mit der nun in C angelenkten Zangenbacke 6 vor. Während der Punkt C auf der Soll-Geraden bewegt wird – oder genauer gesagt auf der annähernd geradlinigen Bahnkurve, die ihm das Grundgetriebe aufzwingt – soll das Backenglied ganz bestimmte Winkellagen einnehmen, im speziellen Fall hier die Parallellage in allen Stellungen. Jeder dieser Lagen dieses Backengliedes entspricht aber auch eine ganz bestimmte Gliedlage des Lenkers A_0A . Es liegt also auch hier die Grundaufgabe des Bemessungsmoduls DGG vor, bei der zu gegebenen Lagen von zwei Gliedern ein drittes, verbindendes Glied gesucht ist, hier der Lenker DE.



Als Eingabe für diesen Bemessungsschritt können nun beliebige zugeordnete Lagen der Glieder 6 und 2 aus dem Gesamt-Bewegungsablauf herausgegriffen werden. Für 4 wiederum gleichmäßig über dem Backenweg verteilte Gliedlagenzuordnungen ergibt sich z.B. der in Bild 15a gezeigte Ausschnitt des Lösungsspektrums. Ein daraus ausgewählter Lenker DE garantiert in den vier Vorgabestellungen die exakte Parallellage, dazwischen tritt aber natürlich ein gewisser Verlauf des Winkelfehlers auf, der in Bild 15c dargestellt ist und eine Bandbreite von nur ca. $0,1^\circ$ aufweist. Damit wird also keine theoretisch exakte, aber doch eine sehr gut angenäherte Parallellage für den gesamten Bewegungsbereich erreicht, und man hat noch gewisse, konstruktiv eventuell willkommene Freiheit in der Auswahl der Lösung.

Bild 15b zeigt dagegen eine einzelne, ganz bestimmte Lösung für den Lenker DE. Diese ergibt sich in Form der BURMESTER-Punkte, wenn man fünf Lagenzuordnungen aus dem gesamten Bewegungsablauf herausgreift. Man sollte nun meinen, dass damit dann eben in diesen fünf Stellungen die genaue Parallelhaltung vorliegt, dazwischen aber wiederum Winkelfehler auftreten. De facto zeigt sich aber, dass diese Lösung eine exakte Parallelhaltung über die Gesamtbewegung realisiert. Zur Untersuchung dieses Phänomens kann man auch fünf beliebige andere Lagenzuordnungen aus dem Bewegungsablauf herausgreifen, und man wird wieder die gleiche Lösung für den Führunglenker erhalten. Diese Lösung ist genau die gleiche, die HAIN mit dem Satz von ROBERTS ermittelt hat. Die Erklärung dafür lässt sich folgendermaßen formulieren. Wenn es – wie HAIN gezeigt hat – zwischen zwei ausgewählten Gliedern genau einen Lenker gibt, der die gewünschte Parallelität in jeder Stellung bewirkt, und die Genaulagen-Synthese für fünf ausgewählte Stellungen genau eine Lösung liefert, dann muss diese auch die von HAIN gefundene Lösung sein, denn wäre sie es nicht, dann müsste die HAIN-Lösung eine weitere Lösung für die 5-Lagen-Auswahl sein, die aber gemäß dem Ergebnis der Genaulagen-Synthese nicht existiert.

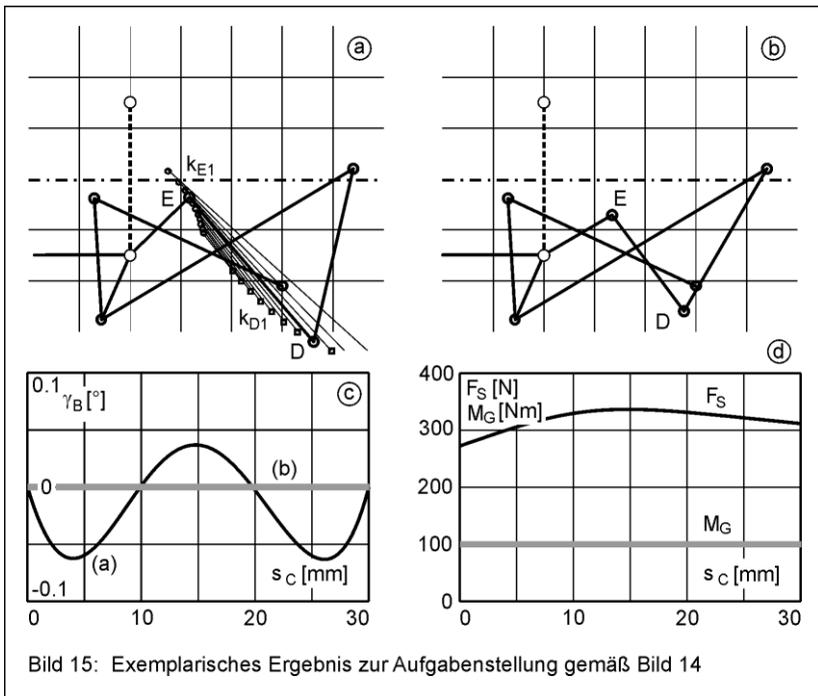


Bild 15: Exemplarisches Ergebnis zur Aufgabenstellung gemäß Bild 14

In diesem Befund sieht der Autor ein weiteres Beispiel neben vielen schon vorliegenden für die von ihm vertretene These, dass ein großer Anteil der in der Getriebelehre bekannten grafischen Lösungen für vielfache spezielle Aufgabenstellungen durch einen einzigen Ansatz ersetzt werden kann, nämlich durch die allgemeine Genaulagen-Synthese, deren Vorgaben dann lediglich jeweils problemspezifisch angepasst formuliert werden müssen.

5.4 Konstruktive Gestaltung und Schichtung

Bereits bei der Synthese des neuen Grundgetriebes, das nicht nur eine deutlich verbesserte Geradführung, sondern auch eine gewisse Verbesserung bezüglich der Backenkraft bei kleiner Öffnungsweite aufweisen sollte, zeigte sich, dass das wohl nur mit einem komplizierteren Schichtungsafbau möglich sein würde. Bild 16 zeigt dazu eine mögliche Formgebung für die gemäß Bild 15 b gewählten Abmessungen und dazu eine denkbare Schichtung.

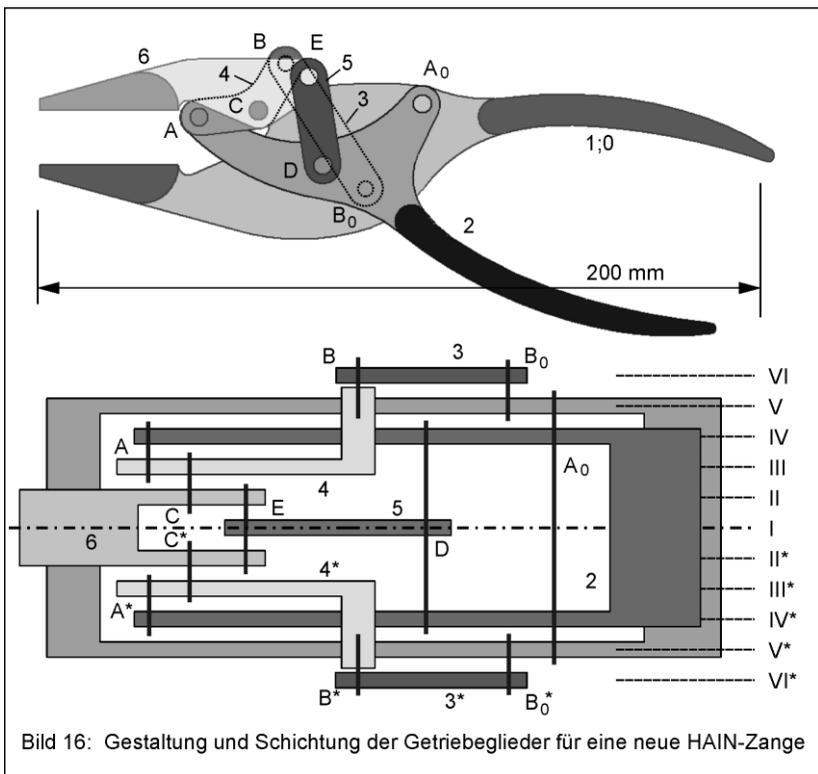


Bild 16: Gestaltung und Schichtung der Getriebegehler für eine neue HAIN-Zange

Das Problem besteht darin, dass beim Öffnen der Zange der Bereich des beweglichen Griffes zwischen dessen Gelenkpunkten D und A nun den Gelenkpunkt C auf der beweglichen Backe überstreicht. Das heißt aber, dass die beiden Glieder Griff 2 und Backe 6 nicht mehr wie bisher kollisionsfrei in den gleichen Schichten (II und II* gemäß Bild 6) platziert werden können. Dadurch werden eine weitere kinematisch relevante und wegen des symmetrischen Aufbaus auch noch eine weitere gespiegelte Schicht erforderlich und obendrein ist es nicht mehr möglich, alle Glieder die gelenkig verbunden sind, in unmittelbar benachbarte Schichten zu legen. Die beiden Lenker 2 (A_0A) und 3 (B_0B) des Grundgetriebes liegen nun auf verschiedenen Seiten des Gestellgliedes 1;0 und das ternäre Koppelglied 4 muss in gekröpfter Bauweise zwei Schichtungsebenen überbrücken.

6 Schlusswort

Dem Autor ist nicht bekannt, ob die Original-HAIN-Zange oder eine andere Ausführung mit gleicher kinematischer Struktur jemals wirklich gebaut und praktisch eingesetzt wurde. Wenn überhaupt, ist das sicher nur mit Abmessungsvarianten möglich, die – wie die Original-HAIN-Auslegung – mit höchstens 9 Schichten und ohne Gliedkröpfung gebaut werden können. Insofern muss der Autor eingestehen, hier trotz seiner heutigen rechentechnischen Möglichkeiten zumindest bezüglich der Kraftübertragung keine Verbesserung erreicht zu haben, die praktisch sinnvoll realisierbar wäre.

Er wüsste jedoch zu gerne, ob auch HAIN seinerzeit schon dieses Problem der geringen Backenkraft bei kleiner Öffnungsweite erkannte und deshalb – erstens – ganz bewusst ein unsymmetrisches Grundgetriebe gewählt hat, und diesem dann Abmessungen gab, die – zweitens – möglichst günstige Kraftübertragung realisieren, aber gerade noch keine zusätzlichen Schichten und Gliedkröpfungen benötigen.

Aber ob nun gezielte Optimierung den Original-HAIN-Abmessungen zugrunde liegt, oder vielleicht „nur“ ein bisschen Glück und eine geschickte Hand, so hat doch – so oder so – die intensive Beschäftigung mit diesem kleinen Beispiel aus dem riesigen Oeuvre des großen Altmeisters der Getriebelehre die ohnehin schon höchste Bewunderung des Autors für dessen besondere Fähigkeit, Theorie und praktische Nutzenanwendung zu verbinden, um ein Weiteres bestärkt.

Literatur

- [1] Hain, K.: *Werkstück-Spannvorrichtungen ohne Gleitführungen*. Ind.-Anz. 89. Jg. Nr. 14 (1967) S. 252 -255. Essen: Verlag Girardet 1967.
- [2] Hain, K.: *Erzeugung von Parallel-Koppelbewegungen mit Anwendungen in der Landtechnik*. Grundlagen der Landtechnik 20 (1964) S. 58 – 68. Düsseldorf: VDI-Verlag 1964.
- [3] Dittrich, G. und Braune, R.: *Getriebetechnik in Beispielen*. München: Oldenbourg-Verlag 1978.
- [4] Lichtenheldt, W.: *Die Methode der Partialsynthese*. Wiss. Z. TH Dresden 5 (1955/56) Heft 1, S. 79-82.
- [5] Wohlenberg, P.: *Auslegung von Koppelgetrieben mit wiederholtem Durchlauf interaktiv erstellter Bearbeitungsstrategien*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 377. Düsseldorf: VDI Verlag 2001.
- [6] Braune, R.: *Das Konzept „Bearbeitungsstrategie“*. Wiss. Z. TU Dresden 50 (2001) Heft 3, S. 44-52.
- [7] www.dmg-lib.org: *Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek*. Links: Stöbern>Software>Universalsoftware
- [8] Braune, R.: *Ein Beitrag zur Maßsynthese ebener viergliedriger Kurbelgetriebe*. Dissertation RWTH Aachen, 1980.
- [9] Braune, R.: *Die klassische Genaulagen-Synthese von Getrieben mit Dreh- und Schubgelenken – Heutiger Entwicklungsstand und praktische Anwendung*. Beitrag zum Getriebetechnik-Kolloquium Siegen 2007, Universität Siegen, Institut für Konstruktion, 2007.