

Optimierung und Bewertung kinematischer Konzepte

Christian Munzinger^{1*}, Alexander Broos¹, Tobias Gerbracht¹,
Alexander Ochs¹, Jan Philipp Schmidt-Ewig¹

¹ wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

Zusammenfassung

Grundsätzlich sind im technischen Umfeld immer verschiedene kinematische Konzepte denkbar, um eine vorgegebene Bewegungsaufgabe durchzuführen. Um das Potenzial einer Maschinenkinematik beurteilen zu können, ist es erforderlich, diese zunächst an die Aufgabe anzupassen. In diesem Aufsatz wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem Lösungskonzepte durch die Kopplung einer Software zur Parameteroptimierung an ein kinematisches Simulationsmodell optimiert werden. Mit dieser Vorgehensweise wird eine Roboterstruktur zur Positionierung von Strangpressprofilen an die Bewegungsaufgabe angepasst. Es wird aufgezeigt, dass sich durch die Optimierung das Gesamtverhalten deutlich verbessern lässt.

Keywords: Optimierung, Kinematik, Robotik

* Kontakt: Dr.-Ing. Christian Munzinger, wbk Institut für Produktionstechnik, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, E-Mail: Munzinger@wbk.uka.de

1 Problemstellung

In der Produktionstechnik werden Maschinenkinematiken zur Handhabung und Bearbeitung von Werkstücken eingesetzt. Die Wahl des Mechanismus hängt dabei stark von der durchzuführenden Bewegungsaufgabe und den dazugehörigen Anforderungen (z. B. Genauigkeit oder Steifigkeit) ab [01], [02]. Aus diesem Grund existiert in der Praxis eine Vielzahl von Konzepten, die sich durch die Art ihrer Gelenke (**R**otatorisch oder **T**ranslatorisch) und deren Reihenfolge in der kinematischen Ketten unterscheiden (Abbildung 1-1). Jede Gelenkkombination stellt ein mögliches Lösungskonzept dar.

<p>TTT</p>  <p>Portalroboter (Reis)</p>	<p>RRT</p>  <p>Schwenk-Schub-Arm (Fanuc)</p>	<p>RTR</p>  <p>Horizontal-Knickarm (Reis)</p>
<p>RRR</p>  <p>Knickarmroboter (KUKA)</p>	<p>TRR</p>  <p>Bendmaster (TRUMPF)</p>	<p>RRT</p>  <p>SCARA (Motoman)</p>

Abbildung 1-1: Verschiedene kinematische Ketten

Neben der Wahl und Reihenfolge der Gelenke hat auch deren räumliche Anordnung einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Kinematik [03]. Da die Abstände und Winkel zwischen den Antriebsachsen theoretisch beliebig variiert werden können, existiert eine sehr große Lösungsvielfalt. Gerade bei komplexen Bahnvorgaben ist die intuitive Auswahl eines gut geeigneten kinematischen Konzepts und der entsprechenden geometrischen Parameter sehr schwierig.

Die kinematische Simulation ist ein Hilfsmittel, um das Bewegungsverhalten eines Mechanismus in der Konzeptphase zu analysieren und zu bewerten [04]. Allerdings kann durch eine ungünstige Wahl der Geometrieparameter, eine prinzipiell gut geeignete kinematische Kette schlecht bewertet werden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Geometrie einer Lösung zunächst an die Bewegungsaufgabe anzupassen, bevor diese anderen Konzepten gegenübergestellt und beurteilt wird. In diesem Aufsatz wird eine Möglichkeit aufgezeigt, optimale Geometrieparameter für eine vorgegebene Bewegungsbahn zu identifizieren.

2 Vorgehensweise zur Bewertung und Optimierung kinematischer Konzepte

Die Geometrie einer Maschine wird in der Regel während der Konzeptphase, also zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses, festgelegt. Diese Phase hat das Ziel, eine möglichst vollständige Lösungsvielfalt zu analysieren und zu bewerten. Die wichtigsten Kriterien einer Maschinenkinematik sind:

- Steifigkeit
- Verhältnis zwischen Bauraum und Arbeitsraum
- Genauigkeit
- Dynamik (erreichbare Geschwindigkeiten und Beschleunigungen)
- Kosten

Die quantitative Ermittlung dieser Eigenschaften ist während der Konzeptphase jedoch auch mit aufwändigen Simulationsverfahren, wie der hybriden Mehrkörpersimulation oder der Finite-Elemente-Methode (FEM), nur eingeschränkt möglich. Dies liegt darin begründet, dass viele Einflussgrößen während der Konzeptphase noch nicht bekannt sind und eine detaillierte Ausgestaltung der Kinematik erforderlich ist, um eine fundierte Vorhersage treffen zu können. Weiterhin ist die Festlegung vieler Details nicht das Ziel der Konzeptphase. Beispielsweise hängt die Steifigkeit einer Kinematik im entscheidenden Maße von der Querschnittsgeometrie der Verbindungsglieder zwischen den Gelenken ab. Diese wird jedoch in der Regel erst in der Entwurfsphase festgelegt, da eine Ausgestaltung der Struktur für sämtliche Konzepte zu aufwändig ist. Im Folgenden wird näher erläutert, wie das Verhalten eines Konzepts analysiert und bereits zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses bewertet werden kann.

2.1 Berechnung und Bewertung

Die kinematische Simulation ist ein Werkzeug, welches häufig in der frühen Entwicklungsphase verwendet wird. Sie bietet die Möglichkeit, das Bewegungsverhalten (z. B. die Achswege und -geschwindigkeiten) eines Mechanismus mit vergleichsweise geringem Aufwand anhand der in der Konzeptphase bekannten Einflussfaktoren zu ermitteln. Die berechenbaren Werte hängen direkt mit den oben aufgelisteten Bewertungskriterien zusammen. So kann beispielsweise die Steifigkeit und die Genauigkeit einer Struktur deutlich erhöht werden, wenn die Gesamtlänge der kinematischen Kette reduziert wird. Werden die erforderlichen Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen reduziert, so lassen sich kostengünstige Antriebe einsetzen. In [03] wird ein Überblick über diese Zusammenhänge gegeben, der in Abbildung 2-1 zusammengefasst ist. Die geometrischen Parameter der Kinematikstruktur müssen dementsprechend so angepasst werden, dass eine Minimierung der Achsgeschwindigkeiten, der Achsbeschleunigungen, der Verfahrswege sowie der Länge der mechanischen Verbindungsglieder erzielt wird. Dies ist eine Voraussetzung, um bei einer späteren Ausgestaltung ein gutes Maschinenverhalten erzielen zu können.

	Länge der kin. Kette	Verfahrwege	Achs-beschl.	Achsgeschw.
Steifigkeit	↓	↓	-	-
Arbeitsraum / Bauraum	↓	↓	-	-
Genauigkeit	↓	↓	↓ (dyn.)	↓
Dynamik	-	-	↓	↓
Kosten	↓	↓	↓	↓

Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen Bewertungskriterien und berechenbaren Größen

Zur Berechnung dieser Größen wird im Rahmen der vorgestellten Arbeiten ein kommerzielles Simulationsprogramm (CATIA V5/ DMU Kinematics) verwendet. Damit die Geometrie des Konzepts an die vorgegebene Aufgabe angepasst werden kann, müssen im Simulationsmodell möglichst alle geometrischen Parameter abgebildet werden, die einen Einfluss auf das kinematische Verhalten haben. Die Denavit-Hartenberg-Konvention kann als Richtlinie für die Modellierung kinematischer Ketten verwendet werden [01, 02]. Die relevanten geometrischen Parameter einer Gelenkverbindung sind demnach die Denavit-Hartenberg-Parameter (α , Θ , d , a).

Um ein parametrisches Modell aufzubauen, werden zunächst die einzelnen Verbindungsglieder erstellt. Dafür wird in einem sogenannten „Skelettmodell“ die Lage der Gelenkachsen (Z_n und Z_{n-1}) definiert. Durch eine Parametrisierung gemäß der Denavit-Hartenberg-Konvention können die Achsen in Abhängigkeit von den Parameterwerten zueinander verschoben werden. Zur besseren Visualisierung und zur Kollisionserkennung werden anschließend Volumenkörper zwischen den Gelenkachsen eingefügt. Abbildung 2-2 zeigt die Modellierung eines solchen Verbindungsgliedes.

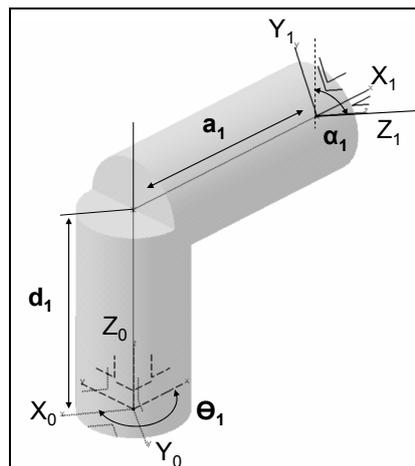


Abbildung 2-2: Parametrisches Verbindungsglied

Durch die Definition von Gelenkverbindungen zwischen den einzelnen Gliedern, können diese zu einer kinematischen Kette zusammengesetzt werden (Abbildung 2-3).

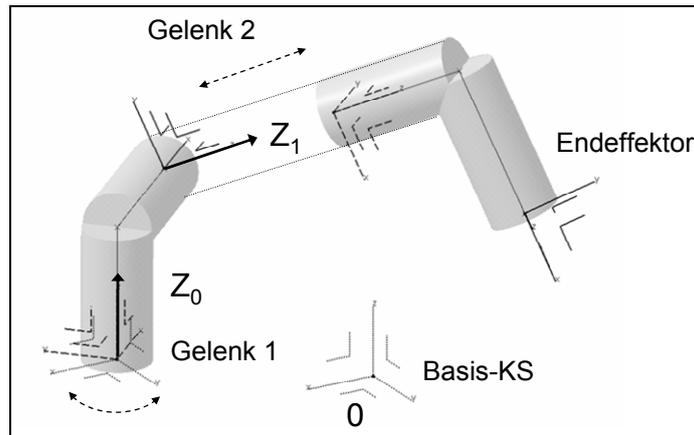


Abbildung 2-3: Modell einer kinematischen Kette

Die Berechnung des Bewegungsverhaltens einer Kinematik erfolgt, indem dem Endeffektor die Bahnkoordinaten (x, y, z, A, B, C) zeitdiskret vorgegeben werden. Zu jedem Zeitschritt wird das inverse kinematische Problem gelöst (Formel 2-1), wodurch der jeweilige Vektor mit den Gelenkkoordinaten \mathbf{u}_n berechnet wird. Die Zahl der Einträge m hängt von der Anzahl der Freiheitsgrade der Kinematik ab.

$$\mathbf{u}_n = (u_{1,n} \ u_{2,n} \ \dots \ u_{m,n})^T = \mathbf{F}(x_n, y_n, z_n, a_n, b_n, c_n) \quad \text{Formel 2-1}$$

Mit Hilfe einer Simulationssoftware kann das inverse kinematische Problem numerisch gelöst werden, ohne dass die Aufstellung einer mathematischen Gleichung notwendig ist. Weiterhin werden zu jedem Zeitpunkt die Positionen der Verbindungsglieder aktualisiert und auf Kollision überprüft. Abbildung 2-4 zeigt eine Kinematik zu unterschiedlichen Zeitschritten.

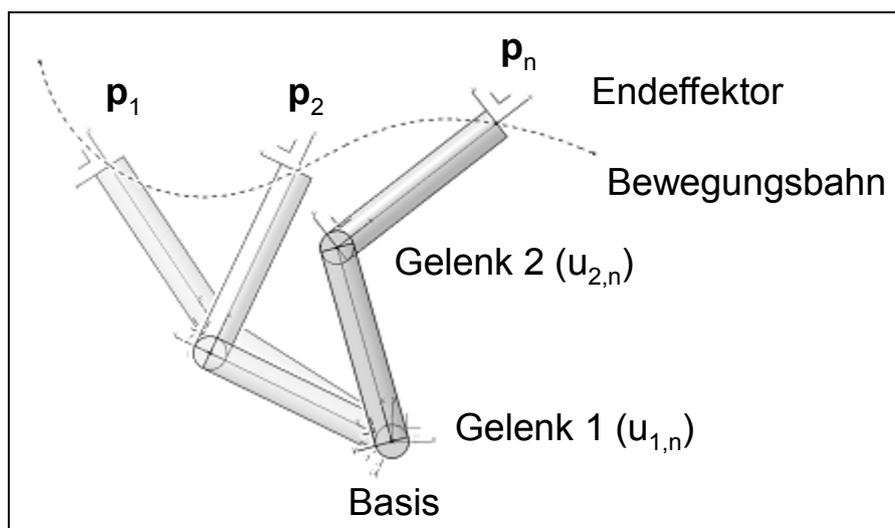


Abbildung 2-4: Kinematik bei verschiedenen Positionen

Durch eine Zeitableitung der Gelenkkoordinaten können die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden, die in den Achsen erforderlich sind, um die Bewegungsbahn abzufahren.

Um eine Aussage über die Qualität zu treffen, werden die zu minimierenden Eigenschaften in einer Zielfunktion zusammengefasst (Formel 2-2). Dabei werden die berechneten Größen (Länge, Fahrwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) zunächst mit Vergleichswerten in ein Verhältnis gebracht. Hierdurch werden prozentuale Bewertungsbeträge (P_{L_m} , P_{w_m} , P_{v_m} , P_{a_m}) ermittelt. Als Vergleichswerte werden Größen verwendet, die mit heutiger Maschinenteknik üblicherweise realisiert werden können.

Sind die Bewertungsbeträge deutlich größer als 100 %, so weist die Kinematik ein eher negatives Verhalten auf. Sind die Werte klein, so kann eine einfache technische Umsetzung der Gelenkachse erwartet werden. Die zu minimierende Zielfunktion Z für die gesamte Kinematik kann durch die Summe der durchschnittlichen Bewertungen der Einzelgelenke berechnet werden:

$$Z = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{L_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{w_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{v_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{a_i} \quad \text{Formel 2-2}$$

2.2 Optimierungsumgebung

Durch die parametrischen Modelle, die Berechnung der Achsbewegungen und die Auswertung der Zielfunktion sind die Voraussetzungen zur Anpassung der Kinematikgeometrie an den Bewegungsablauf erfüllt. Für diesen Schritt werden die Eingangsparameter von einem evolutionären Optimierungsalgorithmus so lange systematisch variiert, bis eine weitere Veränderung der Geometrie keine signifikante Verbesserung mehr bewirkt.

Zur Optimierung wird ein kommerzielles Softwaretool (OptiSLang) eingesetzt, das die entsprechenden Algorithmen zur Verfügung stellt. Abbildung 2-5 gibt einen Überblick über die Softwareumgebung.

Über eine spezielle Schnittstelle wird OptiSLang direkt an CATIA V5 gekoppelt, um die dort hinterlegten Parameter zu variieren und das erstellte Simulationsmodell zu aktualisieren. Zur Berechnung der Ergebnisse für die neue Geometrie, wird ein Visual Basic-Makro ausgeführt. Dieses liest die zu untersuchenden Bewegungsbahnen aus einer Excel-Datei ein und übergibt diese schrittweise an die Endeffektorposition des Kinematikmodells. Die berechneten Gelenkkoordinaten werden an dieselbe Datei zurückgegeben und dort gemäß der Zielfunktion ausgewertet. Um den Zielwert mit OptiSLang einlesen zu können, wird dieser in eine Textdatei geschrieben. Die Parameterwerte werden so lange vom evolutionären Optimierungsalgorithmus variiert, bis eine Abbruchbedingung erfüllt wurde.

Der Verlauf der Optimierung und die angepassten Parameter werden in einer weiteren Datei gespeichert. Die entsprechenden Verläufe der Achsbewegungen und die Bewertung können in der Excel-Datei betrachtet werden, die Gestalt der optimierten Kinematik ist in dem Simulationsmodell hinterlegt.

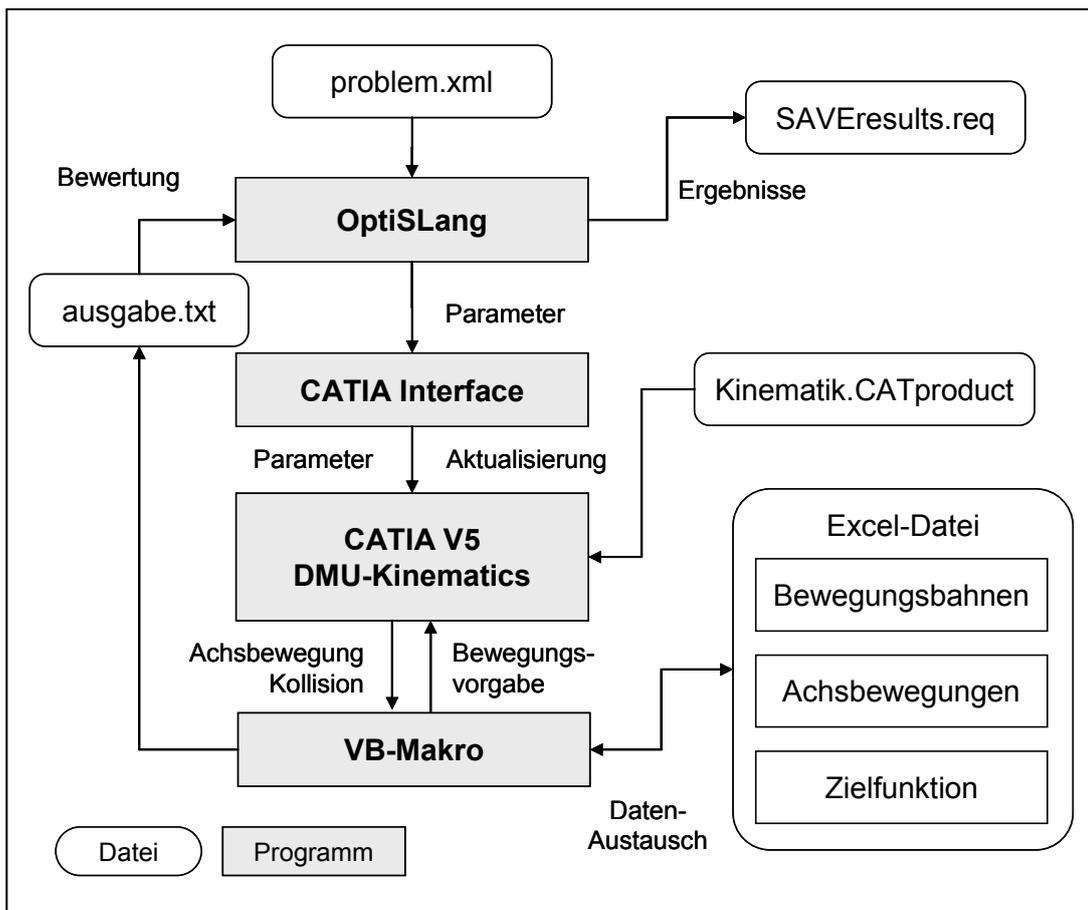


Abbildung 2-5: Softwareumgebung

3 Optimierung einer Kinematik zur Positionierung von Rohrprofilen

Die Vorgehensweise zur Anpassung und Bewertung von Maschinenkonzepten wird im Folgenden auf eine neuartige Kinematik zur Positionierung von Rohrprofilen bei der spanenden Bearbeitung angewendet. Die Bearbeitung mit herkömmlicher Maschinenteknik erfolgt in der Regel, indem das Werkstück fest eingespannt und das Werkzeug verfahren wird. Diese Art der Fertigung stellt hohe Herausforderungen an die Produktionstechnik [05], da aufgrund der hohen Längen der Werkstücke ein entsprechend großer Arbeitsraum erforderlich ist. Zusätzlich werden spezielle Spannvorrichtungen benötigt, die an die Geometrie der Werkstücke angepasst sein müssen.

Diesen Nachteilen kann entgegengewirkt werden, indem die für die Bearbeitung benötigten Bewegungen auf Werkstück und Werkzeugbewegungen aufgeteilt werden. Ein entsprechender Ansatz ist schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt und wird in [06] und [07] näher beschrieben. Die Werkstücke werden durch eine Hauptspindel bearbeitet, die innerhalb eines kleinen Arbeitsraums verfahren werden kann. Gegenüberliegend ist eine Spanntechnik angeordnet, in der das

Werkstück lokal eingespannt wird, um die Bearbeitungskräfte aufzunehmen. Damit das Profil auf seiner gesamten Länge gefertigt werden kann, muss dieses innerhalb der Spanntechnik verschoben werden. Dies kann über einen beweglichen Greifer realisiert werden, der möglichst in der Nähe des Profilendes angeordnet ist, um eine Kollision mit der Spanntechnik zu vermeiden.

Für die Bearbeitung sind eine hohe Steifigkeit und eine hohe statische und dynamische Genauigkeit erforderlich. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Bearbeitung werden diese Anforderungen jedoch nur in einem kleinen Arbeitsraum benötigt und können beispielsweise mit einer kompakten, dreiachsigen Fräsmaschine erfüllt werden.

Zur Umpositionierung des Werkstücks wird eine Kinematikstruktur mit größerem Arbeitsraum benötigt. Die Anforderungen bezüglich Steifigkeit und Bahnengenauigkeit sind jedoch deutlich geringer, woraus sich ein signifikantes Potenzial zur Kostensenkung ergibt. Dadurch, dass das Werkstück nur lokal fixiert wird, kann die Spanntechnik für unterschiedliche Geometrien eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine schnelle Umrüstung der Anlage auf eine andere Werkstückvariante und eine Reduktion der Investkosten bezüglich der Vorrichtungen.

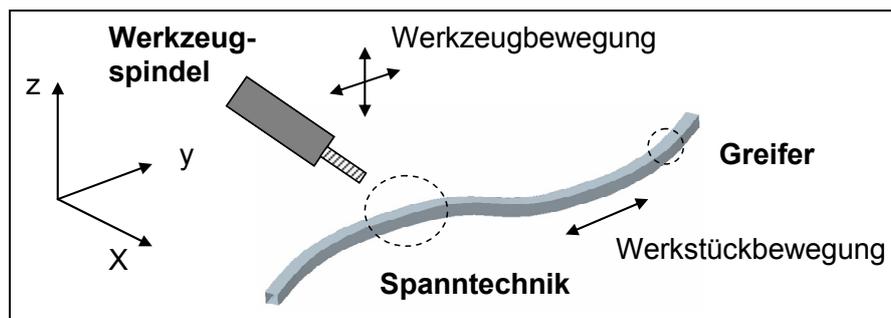


Abbildung 3-1: Bewegungsauflösung

Bei der Umpositionierung der Werkstücke in der Spanntechnik müssen komplexe Bewegungsbahnen abgefahren werden. In vorherigen Arbeiten hat sich herausgestellt, dass eine Kinematik mit sechs Drehgelenken eine gute Voraussetzung für die Profilhandhabung bietet [08]. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Geometrieparameter (z. B. Armlängen und Aufstellposition) für die Bewegungsaufgabe optimal sind.

Um diesen Aspekt genauer zu untersuchen werden dem Mechanismus vier aneinanderhängte Bewegungsabläufe vorgegeben, die für die Bearbeitung charakteristischer Werkstücke erforderlich sind (Abbildung 3-2). Eine genaue Beschreibung der Bahnvorgabe kann in [08] gefunden werden. Die Analyse und Auswertung des Maschinenverhaltens erfolgt gemäß der oben beschriebenen Vorgehensweise.

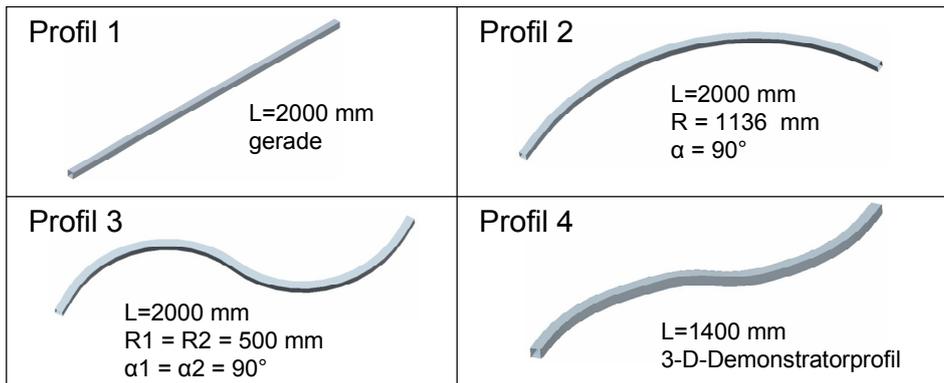


Abbildung 3-2: Charakteristische Werkstücke

3.1 Standardkinematik

Vor der Optimierung der geometrischen Parameter wird zunächst eine nicht angepasste Kinematikstruktur als Referenz untersucht. Die Geometrie lehnt sich an einen handelsüblichen Industrieroboter mit entsprechendem Arbeitsraum an. Abbildung 3-3 zeigt die Kinematik und Aufstellung eines Industrieroboters in Bezug auf ein Basiskoordinatensystem (0). Die Spanntechnik befindet sich im Nullpunkt des Koordinatensystems und der Greifer ist am Ende der kinematischen Kette, am so genannten Tool-Center-Point (TCP), angebracht. Die Aufstellposition (dx , dy und dz) wurde so gewählt, dass sich der gesamte Bewegungsablauf kollisionsfrei durchführen lässt. Die restlichen Parameter sind durch die Gestalt der Maschine vorgegeben und wurden zunächst nicht variiert. Die Gesamtlänge der kinematischen Kette inklusive der Handachsen liegt bei 2610 mm.

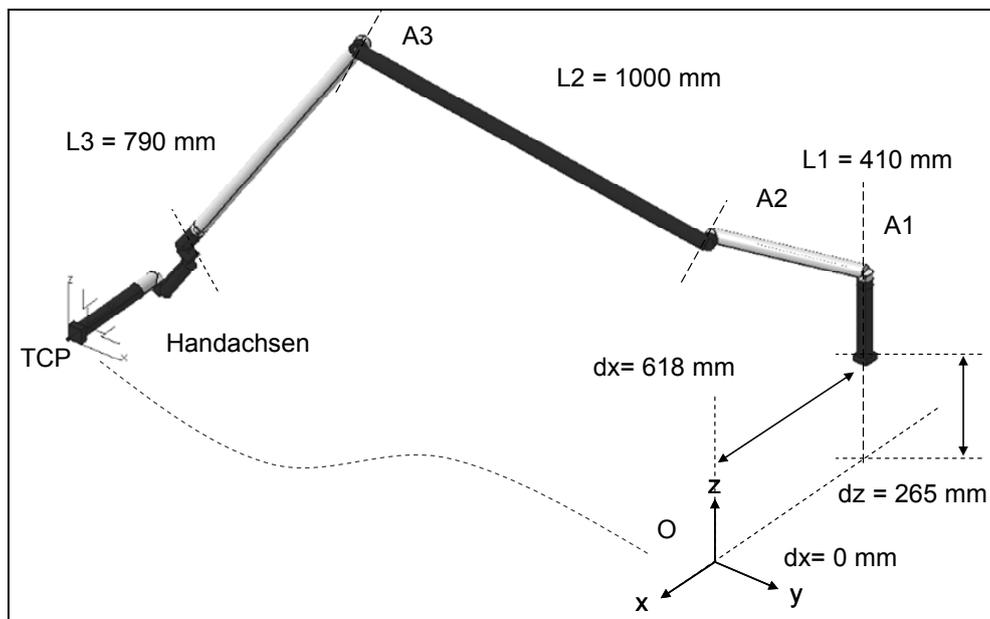


Abbildung 3-3: Geometrie der Standardkinematik

Das Bewegungsverhalten der Positionierungsachsen (A1-A3) wird in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 gezeigt. Die maximale Geschwindigkeit tritt in Achse 1 beim Positionieren von Profil 4 auf. Sie liegt mit $225.5 \text{ }^\circ/\text{s}$ deutlich über den zulässigen Herstellerangaben von $128 \text{ }^\circ/\text{s}$. Die maximale Beschleunigung beträgt $526.8 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ und liegt noch im zulässigen Bereich.

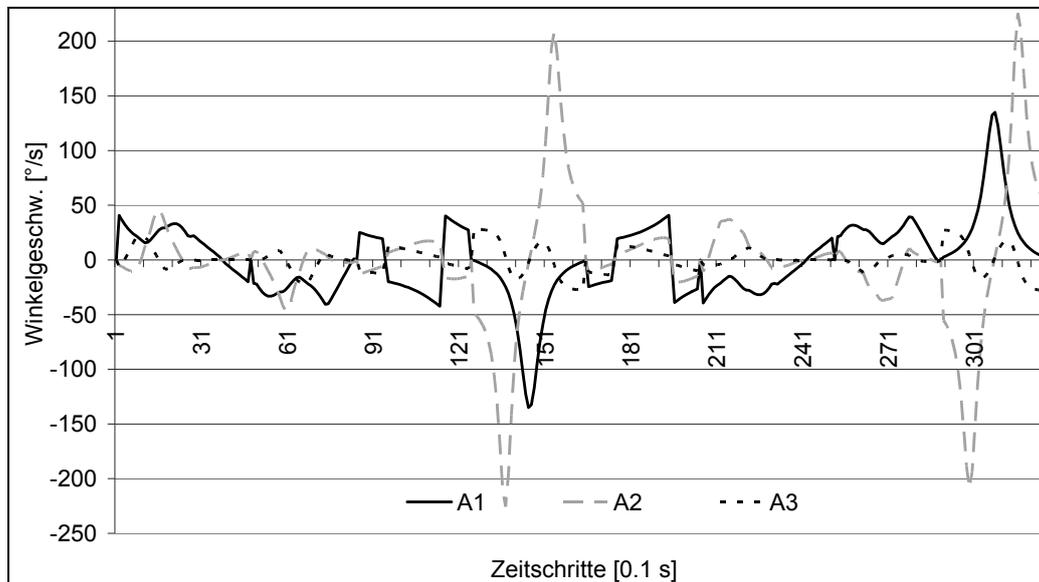


Abbildung 3-4: Gelenkgeschwindigkeiten (Profil 4)

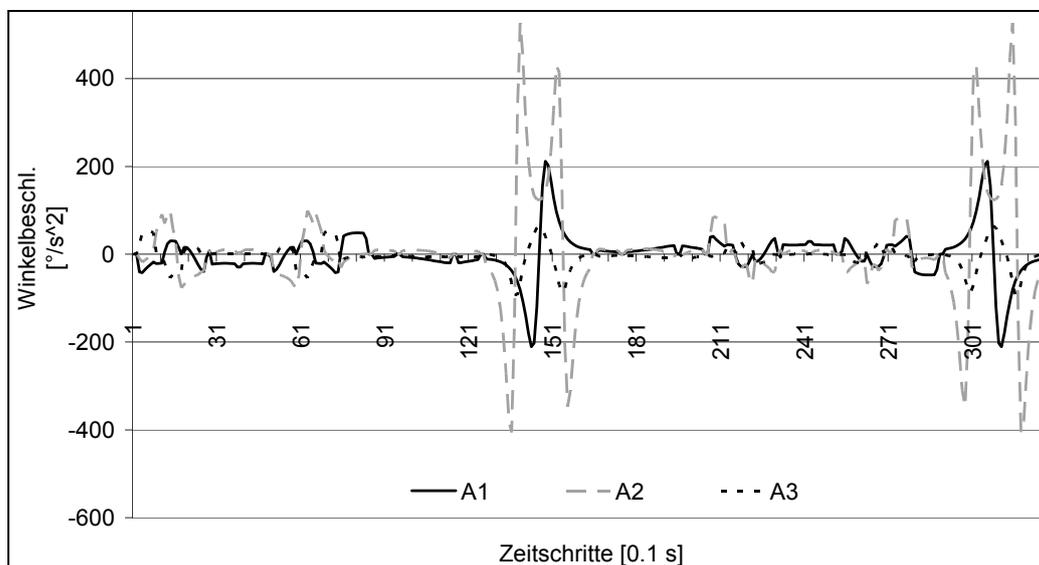


Abbildung 3-5: Gelenkbeschleunigungen (Profil 4)

Die berechneten Grenzwerte, die Vergleichswerte und die entsprechende Zielfunktion sind in Abbildung 3-6 zusammengefasst. Die Geometrie des Industrieroboters ist grundsätzlich geeignet, um die Bewegungsbahnen abzufahren, da alle erforderlichen Positionen kollisionsfrei erreicht werden können. Positiv ist die vergleichsweise geringe Länge der kinematischen Kette, mit der der

komplette Arbeitsraum abgedeckt werden kann. Weniger gut sind die hohen Achsgeschwindigkeiten. So muss die vorgegebene Geschwindigkeit beim Umpositionieren reduziert werden, um die Anforderungen mit der Kinematik erfüllen zu können. Der Wert der dimensionslosen Zielfunktion liegt bei 233.6.

	Einheit	A1	A2	A3	Durchschnitt
Länge (L_u)	mm	410	1000	790	
Vergleichswert (V_L)	mm	1000	1000	1000	
prozent. Wert (P_L)	%	41.0	100.0	79.0	73.3
Max. Geschw. (v_u_max)	°/s	155.7	225.5	45.4	
Vergleichswert (V_v)	°/s	128	128	128	
prozent. Wert (P_v)	%	121.6	176.2	35.5	111.1
Max. Geschw. (a_u_max)	°/s ²	413.7	526.8	93	
Vergleichswert (V_a)	°/s ²	700	700	700	
prozent. Wert (P_a)	%	59.1	75.3	13.3	49.2
Zielfunktion					233.6

Abbildung 3-6: Eigenschaften der Standardkinematik

3.2 Optimierung der Struktur

Um die Eigenschaften der Kinematik zu verbessern, wird im Folgenden die Geometrie an die Bewegungsbahnen angepasst. Dies geschieht mit Hilfe der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Softwareumgebung. Durch eine Minimierung der Zielfunktion sollen möglichst alle Eigenschaftsgrößen verbessert werden. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass das neue Design einen ausreichenden Arbeitsraum hat und beim Abfahren der Bewegungsbahn singuläre Stellungen vermieden werden.

Diese Aspekte werden indirekt durch die Zielfunktion berücksichtigt. So treten in der Nähe von Singularitäten ungünstige Übersetzungsverhältnisse auf, wodurch sehr hohe Gelenkgeschwindigkeiten und -beschleunigungen auftreten. Hierdurch wird der Entwurf automatisch schlechter bewertet. Wenn die Bewegungsbahn den Arbeitsraum verlässt, führt dieses zu einem abrupten Stillstand der Kinematikstruktur. Hierdurch treten wiederum sehr hohe Beschleunigungsspitzen auf, was sich stark negativ auf die Zielfunktion auswirkt.

Wenn die geometrischen Parameter so gewählt werden, dass bereits die erste Position im Arbeitsraum nicht erreicht werden kann, tritt ein Sonderfall auf. Der Mechanismus kann von der eingesetzten Software nicht simuliert werden, wodurch für alle Gelenkpositionen 0 ausgegeben wird. Es treten somit keine Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auf, was sich zunächst sehr positiv auf die Zielfunktion auswirkt. Um zu vermeiden, dass solch ein Design als Optimum ausgegeben wird, überprüft eine Nebenbedingung, ob der Mechanismus permanent in Ruhe ist ($v_u = 0$). Ist dies der Fall, wird das Design verworfen. Eine zweite Nebenbedingung überprüft die Kollision zwischen den Verbindungsgliedern und den Werkstücken.

Bei der Optimierung wird die Aufstellposition über fünf Parameter (dx , dy , dz , $W1$ und $W2$) und die Gestalt der kinematischen Kette über 9 Parameter angepasst. Diese sind jeweils zwei Längen und ein Winkel (d , a , und α) für Achse 1-3. Der

evolutionäre Algorithmus lässt sich über verschiedene Einstellungen (z.B. Größe der Startpopulation und Anzahl der Generationen) an das Optimierungsproblem angleichen.

Die verwendete Software bietet zwei Voreinstellungen für den Algorithmus [09]: Global Search und Design Improvement. Die erste Einstellung beginnt mit einer vergleichsweise großen Startpopulation von 10 Individuen, die während jeder Iterationsschleife relativ stark verändert werden. Sie dient dazu, einen möglichst großen Lösungsraum abzusuchen. Das Design Improvement wird verwendet, um einen vorhandenen Entwurf weiter zu verbessern. Diese Variante beginnt mit einem vom Benutzer zu definierenden Parametersatz, der während jeder Iteration vergleichsweise wenig verändert wird. Im Vergleich zum Global Search konvergiert die Einstellung für die hier dargelegte Problemstellung schneller zu einem Optimum.

Bei der Anpassung der Kinematikkonzepte wird mit beiden Voreinstellungen gearbeitet. Zunächst wird eine globale Suche über 40 Generationen durchgeführt, um einen großen Lösungsraum abzudecken und sich nicht auf ein lokales Minimum zu beschränken. Der vielversprechendste Entwurf wird anschließend über ein Design Improvement so lange angeglichen, bis eine weitere Variation der Parameter keine signifikante Verbesserung der Zielfunktion ergibt. In Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 sind die Verläufe beider Optimierungen dargestellt.

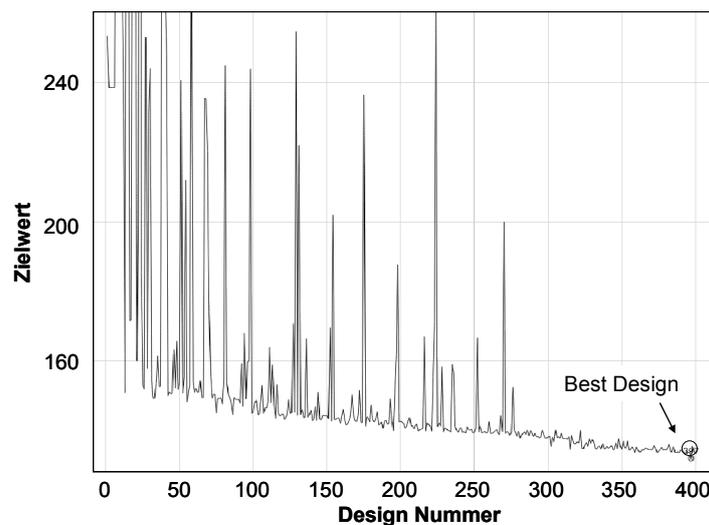


Abbildung 3-7: Optimierungsverlauf Global Search

Beim ersten Optimierungslauf wird von Parametersätzen ausgegangen, die gleichmäßig im Lösungsraum verteilt liegen. Im Laufe der Optimierung kann der Zielwert sukzessive auf ca. 135 verbessert werden. Der Entwurf fällt damit bereits deutlich besser aus als die Standardgeometrie.

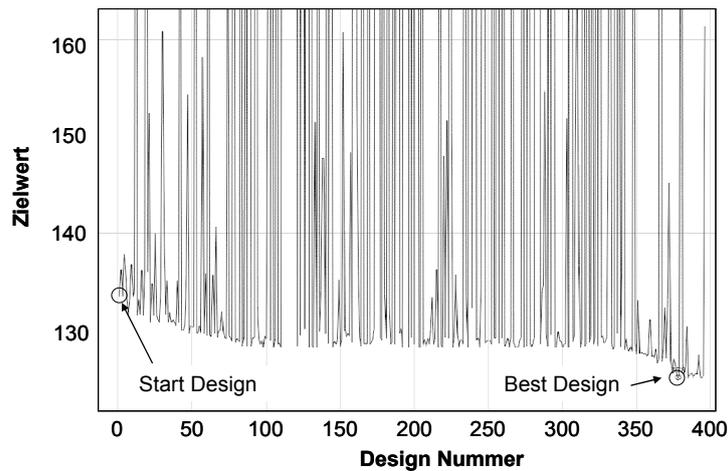


Abbildung 3-8: Optimierungsverlauf Design Improvement

Der zweite Optimierungslauf verbessert dieses Design weiter, sodass ein Zielwert von 125.1 erreicht wird. Bei beiden Verläufen sind Designs erkennbar, die einen sehr hohen Zielwert haben. Diese haben in der Regel einen unzureichenden Arbeitsraum oder Singularitäten im Arbeitsbereich. Das optimierte Konzept ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Auch hier befindet sich die Spanntechnik im Ursprung des Basiskoordinatensystems (0) und der Greifer am TCP.

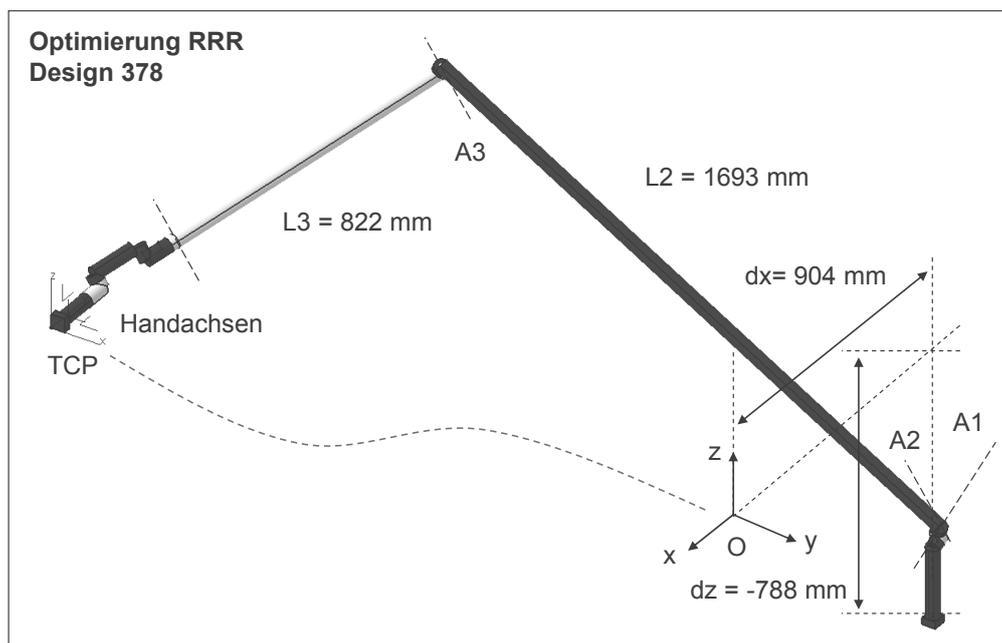


Abbildung 3-9: Kinematik nach der Optimierung

Die deutlichste Veränderung ist die neue Orientierung der ersten Achse ($\alpha_2 = 65^\circ$). Diese wird Abbildung 3-10 gezeigt. Die Orientierung von Achse 2 und 3 (A2, A3) haben sich nicht relativ zu Achse 1 geändert. Der Abstand zwischen den ersten beiden Gelenken (L1) hat sich deutlich verringert, während L2 und L3 angestiegen sind.

Die Gesamtlänge der Struktur ist mit 2700 mm nur unwesentlich höher, als die der Standardkinematik. Die Achsgeschwindigkeiten konnten hingegen deutlich reduziert werden. Der maximale Wert von 49.3 °/s tritt beim Verschieben von Profil 3 in Achse 2 auf. Die Beschleunigungen sind bei der angepassten Kinematik ebenfalls deutlich geringer. Der maximale Wert liegt bei 10.7 °/s². Diese Beschleunigung tritt in Achse 3 auf, ebenfalls beim Verschieben von Profil 3. Die Bewegungsverläufe sind in Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 dargestellt.

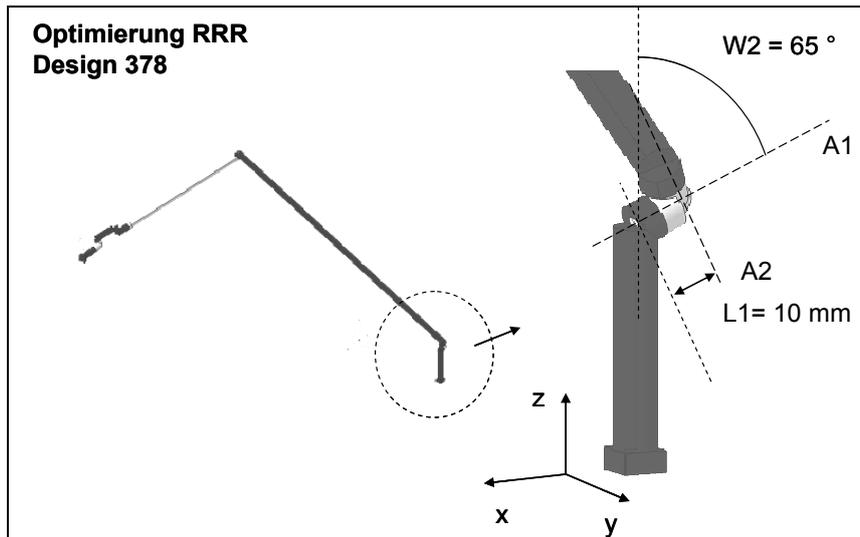


Abbildung 3-10: Winkeländerung nach der Optimierung

Abbildung 3-11 fasst die Eigenschaften des optimierten Konzepts zusammen. Die neue Geometrie ist entscheidend besser an die Bewegungsabläufe angepasst. Die Zielfunktion konnte auf ca. 53% des ursprünglichen Wertes reduziert werden, was an den geringeren Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen liegt. Hierdurch ergeben sich deutliche Vorteile bei der Antriebsauslegung. Es können kleinere und leichtere Motoren verwendet werden, was die Kosten und die Maschinendynamik positiv beeinflusst. Da eine geringere Masse bewegt werden muss, wird zusätzlich die Auslegung der tragenden Struktur vereinfacht.

	Einheit	A1	A2	A3	Summe
Länge (L_u)	mm	10	1693	822	2525
Vergleichswert (V_L)	mm	1000	1000	1000	3000
prozent. Wert (P_L)	%	1.0	169.3	82.2	84.2
Max. Geschw. (v_u_max)	°/s	36.3	49.3	37	122.6
Vergleichswert (V_v)	°/s	128	128	128	384
prozent. Wert (P_v)	%	28.4	38.5	28.9	31.9
Max. Geschw. (a_u_max)	°/s ²	49.5	64.8	75	189.3
Vergleichswert (V_a)	°/s ²	700	700	700	2100
prozent. Wert (P_a)	%	7.1	9.3	10.7	9.0
Zielfunktion					125.1

Abbildung 3-11: Eigenschaften nach der Optimierung

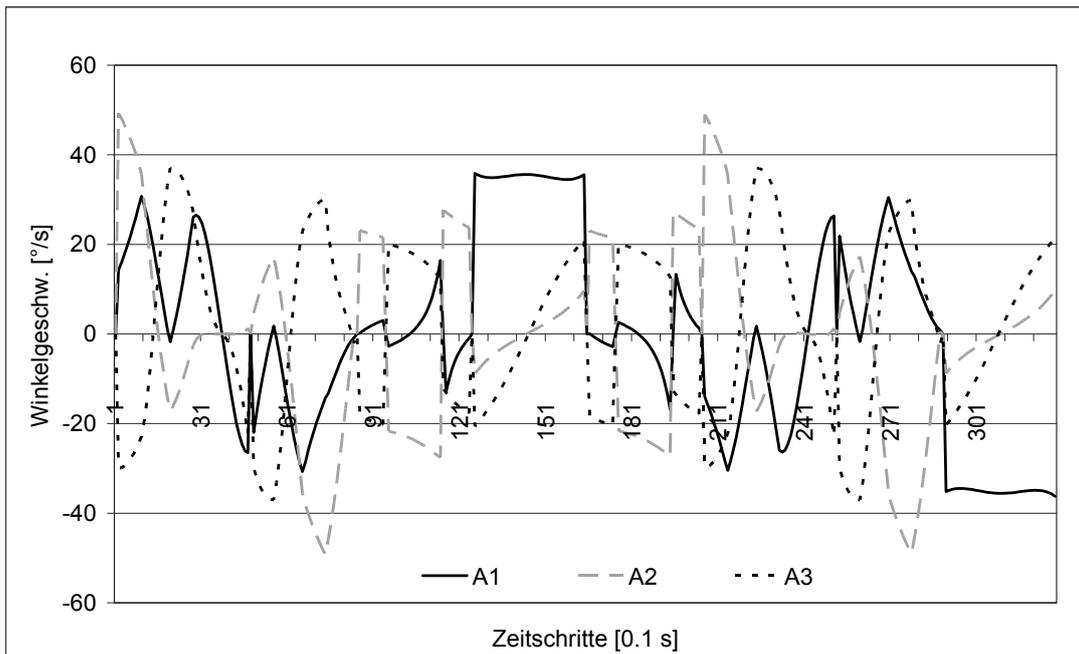


Abbildung 3-12: Achsgeschwindigkeiten nach der Optimierung

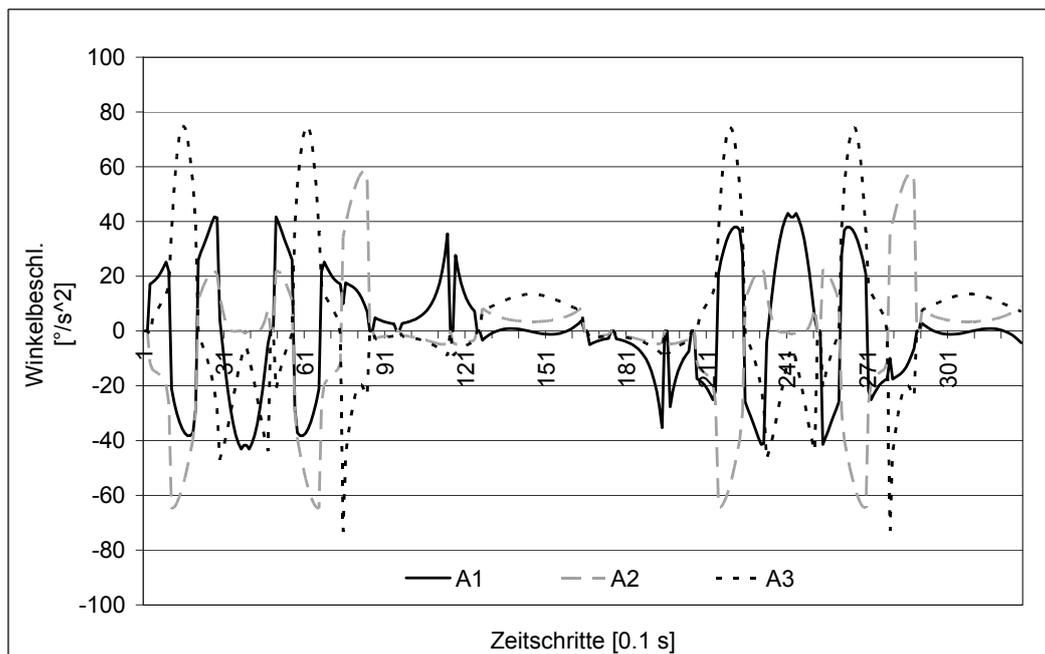


Abbildung 3-13: Achsbeschleunigungen nach Optimierung

4 Zusammenfassung

Um das Potenzial einer Maschinenkinematik beurteilen zu können, ist es erforderlich, diese zunächst an die vorgegebene Aufgabe anzupassen. Dies kann über die Kopplung einer Software zur Parameteroptimierung an ein kinematisches Simulationsmodell erfolgen. Mit Hilfe einer entsprechenden Softwareumgebung wurde eine Roboterstruktur zur Positionierung von Strangpressprofilen optimiert. Dabei konnte das Gesamtverhalten deutlich verbessert werden. Die neue Geometrie kann voraussichtlich mit deutlich kleineren Motoren angetrieben werden, wodurch sich Kosten einsparen lassen und die Auslegung der tragenden Struktur vereinfacht wird. Da das Simulationsmodell parametrisch aufgebaut ist, kann es ebenfalls verwendet werden, um die optimale Kinematik für weitere Aufgaben zu identifizieren. Hierfür muss lediglich die Bahnvorgabe ausgetauscht werden und eine erneute Optimierung gestartet werden.

Um endgültig eine favorisierte Lösung auszuwählen, müssen weitere kinematische Ketten untersucht werden. Hierbei empfiehlt es sich ebenfalls, zunächst die Geometrie an die Aufgabe anzupassen, bevor diese abschließend bewertet wird.

5 Referenzen

- [01] Kreuzer, E. J.: Industrieroboter : Technik, Berechnung und anwendungsorientierte Auslegung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1994, ISBN 3-540-54630-8.
- [02] Craig, J. J.: Introduction to Robotics – Mechanics and Control. 3. Auflage, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River 2005, ISBN 0-13-123629-6.
- [03] Nwokah, O.: The Mechanical Systems Design Handbook. CRC Press LLC, Boca Raton 2002, ISBN 0-8493-8596-2.
- [04] Walker, B.: Die virtuelle Werkzeugmaschine in der Produktentwicklung – Abwendungs-Szenarien und Potenziale. wbk Herbsttagung „Virtuelle Produktion – Digitale Planungswelt vom Prozess zur Fabrik“, Karlsruhe 2003, ISSN 1618-1484.
- [05] Fleischer, J.; Schmidt-Ewig, J. P.: Innovative Machine Kinematics for Combined Handling and Machining of Three-Dimensional Curved Light weight Extrusion Structures. In: Annals of the CIRP, 54 (2005), S. 317-320.
- [06] Fleischer, J.; Munzinger, C.; Schmidt-Ewig, J. P.: Kombinierte Handhabungs- und Bearbeitungs kinematik. In: Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 661 (2007), S. 397-423.

- [07] Fleischer, J.; Lanza, G.; Munzinger, C.; Ruch, D.; Schmidt-Ewig, J. P.; Schneider, M.; Stengel, G.: Maschinentechnik zur flexiblen Herstellung räumlich gekrümmter Strangpressprofile. In: ZWF, Band 101, Heft 7/8 (2006), S. 426-430.
- [08] Fleischer, J.; Schmidt-Ewig, J. P.: Simulationsgestützte Konzeption von Handhabungskinematiken. Entwurf einer Maschinenkinematik zur produktflexiblen Bearbeitung von gekrümmten Rohrprofilen. In: wt Werkstattstechnik online, Band 98, Heft 3 (2008), S. 176-184.
- [09] N.N.: OptiSLang Manual, Version 2.1. Dynardo GmbH, Weimar 2007

Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.