TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Fakultät für Maschinenbau
Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme (IBF)
Prof. Dr. Egon Müller
Prof. Dr. Angelika C. Bullinger-Hoffmann

Wissenschaftliche Schriftenreihe
des Institutes für Betriebswissenschaften
und Fabriksysteme

Planung und Betrieb von Produktionssystemen im digitalen Zeitalter

Fachtagung
Vernetzt planen und produzieren - VPP2015

Sonderheft 21

ISSN 0947-2495

Verfahren der Bewegungsplanung zur Energieminimierung bei Maschinen und Robotern

Uwe Simon – SIMON Modellierungen

Abstract

Es wird ein generelles Verfahren der Bewegungsplanung zur Minimierung des Energiebedarfs vorgestellt, welches sowohl bei Maschinen, die mit mechanischen oder elektronischen Kurvenscheiben angetrieben werden, als auch bei Robotern zum Einsatz kommen kann.

Aus der Produktion in der Automobilindustrie ist bekannt, dass dort ca. 49% der elektrischen Energie von den eingesetzten Industrierobotern benötigt wird. Dabei fallen ca. 68% dieser Energie in den Bewegungsphasen der Industrieroboter an. Das bedeutet, dass fast 34% der gesamten benötigten elektrischen Energie in den Bewegungsphasen der Roboter verbraucht werden (Meike, 2014). Das Einsparpotential ist hier besonders groß, da bis dato bei der Programmierung der Bewegungen Energieaspekte eher im Hintergrund standen. Bei Feldversuchen in Produktionsanlagen zeigte sich aber, dass sich hier Energieeinsparungen gegenüber der händischen Programmierung in den Bewegungsphasen bis in den mittleren zweistelligen Prozentbereich erzielen lassen.

Das vorgestellte Verfahren erlaubt dabei prozessrelevante und nicht prozessrelevante Maschinen-/Roboterbewegungen unter dem Hauptgesichtspunkt der Energieminimierung zu modellieren. Da sehr viele Bewegungen prozessbedingt synchron ablaufen müssen und in der Regel bei nicht prozessbedingten Bewegungen größere Freiheiten vorliegen, werden deren Verknüpfungen im Verfahren berücksichtigt.

Somit kann schon im Vorfeld bei der Prozess-Simulation unter Einbeziehung der jeweiligen mechatronischen Maschinen-/Robotermodelle entscheidend deren zukünftiger Energiebedarf gesenkt werden.

1 Konzept Green Automation in Motion

1.1 Überlegungen

Bisherige (in der Literaturliste aufgeführte) Ansätze zu einer energetischen Bewegungsoptimierung basieren auf der dynamischen Modellierung des Bewegungsablaufs einer Maschinen- oder Werkzeugkomponente. Die modellierten Bewegungsbahnen beschreiben Änderungen räumlich-geometrischer Größen, beispielsweise Orts- oder Winkelkoordinaten, in der Zeit. Das hier vorgestellte Verfahren operiert hingegen prinzipiell nicht mit Orts-Zeit-, sondern mit Orts-Orts-Funktionen.

Diese Herangehensweise wurde aufgrund folgender Eigenschaften präferiert. Es wird zuallererst die Bewegungsfunktion einer beteiligten Achse oder Raumkoordinate rein geometrisch über einer eindimensionalen räumlichen Koordinate definiert. Diese Leitkoordinate beschreibt bei einer Maschine mit Kurvenscheibensteuerung in der Regel den Weg/Winkel der Leitachse und bei einer Robotersteuerung den sogenannten Bahnparameter, welchen man sich in erster Näherung als Länge der Bahn des Werkzeugmittelpunkts vorstellen kann.

Durch diesen Ansatz werden alle Bewegungen einer kurvenscheibengesteuerten Maschine oder eines Roboters allein durch die Bewegung dieser Leitkoordinate bestimmt. Im einfachsten Fall bewegt sich dabei die Leitkoordinate mit im Wesentlichen konstanter Geschwindigkeit. Mit der Beeinflussung der Geschwindigkeit der Leitkoordinate kann somit der gesamte Maschinenablauf skaliert werden. Gerade im Zuge der Anforderung von skalierbaren Prozessen hält man hiermit ein Mittel in der Hand, diese Skalierung z.B. bei entsprechenden Freiheiten der zeitlichen Abläufe durch Anpassung nur einer Leitachs/-koordinatenbewegung zu realisieren.

Durch die Verwendung nur einer Leitkoordinate kann auch die sogenannte Bahnsteuerung in der Robotik und die Kurvenscheibensteuerung der einzelnen Achsen in ein und derselben Mechanik dynamisch ineinander umgeschaltet werden. Damit können entsprechende prozessbedingte Aufgaben erledigt werden, und bei den freien Bewegungen hat man gleichzeitig die Wahl der fallweise am besten geeigneten Steuerungsart zum Ziel der Energieminimierung.

Der Anwender bzw. der Bewegungsmodellierer kann sich dabei in erster Linie auf die Festlegung geeigneter rein geometrischer Stützpunkte für den Bewegungsablauf konzentrieren. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass diese Stützpunkte solange geändert werden, bis das Ziel der Energieminimierung unter automatischer Einhaltung der dynamischen Achs- und Bahngrenzen erreicht ist.

1.2 Lineare Splines

Um bei einer mechanischen Komponente in den Bewegungsphasen möglichst wenig Energie zu benötigen wurde der Ansatz der Bewegungsmodellierung mithilfe Linearer Splines gewählt.

Zum einen hängt bei einer bewegten Masse m bzw. eines bewegten Massenträgheitsmoments J die aufgenommene mechanische Maximalenergie E_{max} quadratisch von der Maximalgeschwindigkeit v_{max} bzw. ω_{max} ab, da folgender Zusammenhang gilt:

$$E_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 \text{ bzw. } E_{max} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2$$

Und zum anderen nehmen im Allgemeinen die maximalen Reibungskräfte linear mit der Maximalgeschwindigkeit v_{max} bzw. ω_{max} zu, was zusätzlich den Energiebedarf bei höheren Maximalgeschwindigkeiten negativ beeinflusst.

Durch Minimierung der benötigten Maximalgeschwindigkeiten kann man daher eine Minimierung der benötigten mechanischen Energie erreichen. In unserer geometrischen Betrachtung bedeutet das aber wiederum, dass bei angenommener nahezu gleichbleibender Leitachs-/Leitkoordinatengeschwindigkeit die Minimierung der maximalen Steigungen der Bewegungsfunktionen zur Energieminimierung führen. Eine Minimierung maximaler Steigungen kann aber dadurch erzielt werden, dass man möglichst lange Bewegungsphasen mit möglichst kleiner konstanter Steigung ausgestaltet. Und dazu eignen sich besonders Lineare Splines, welche an ihren Stützpunkten geglättet werden.

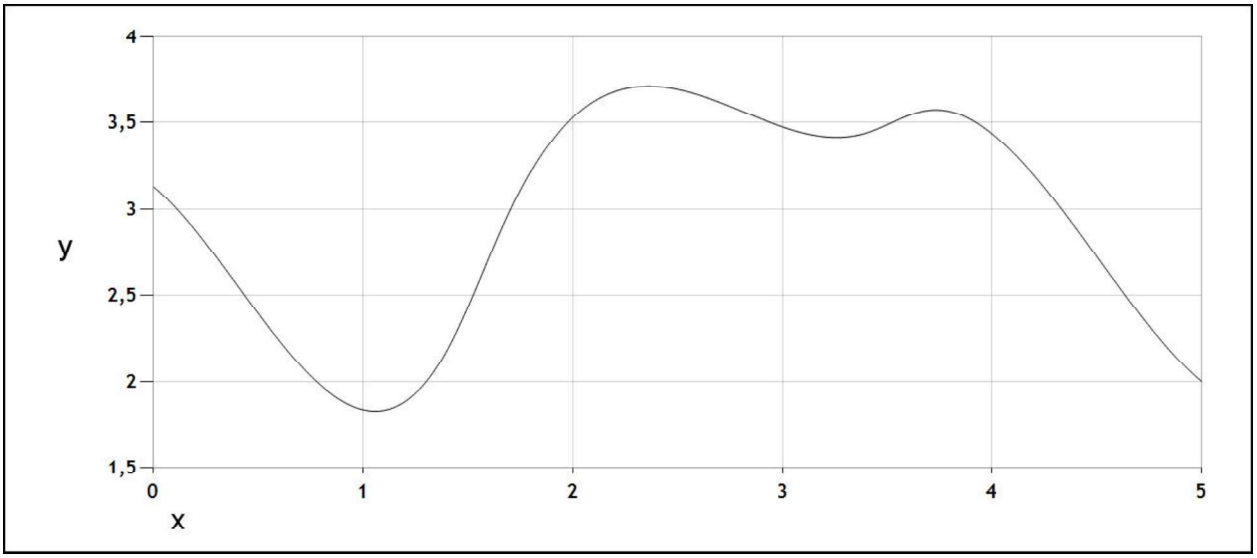

Abbildung 1: Kubischer Spline

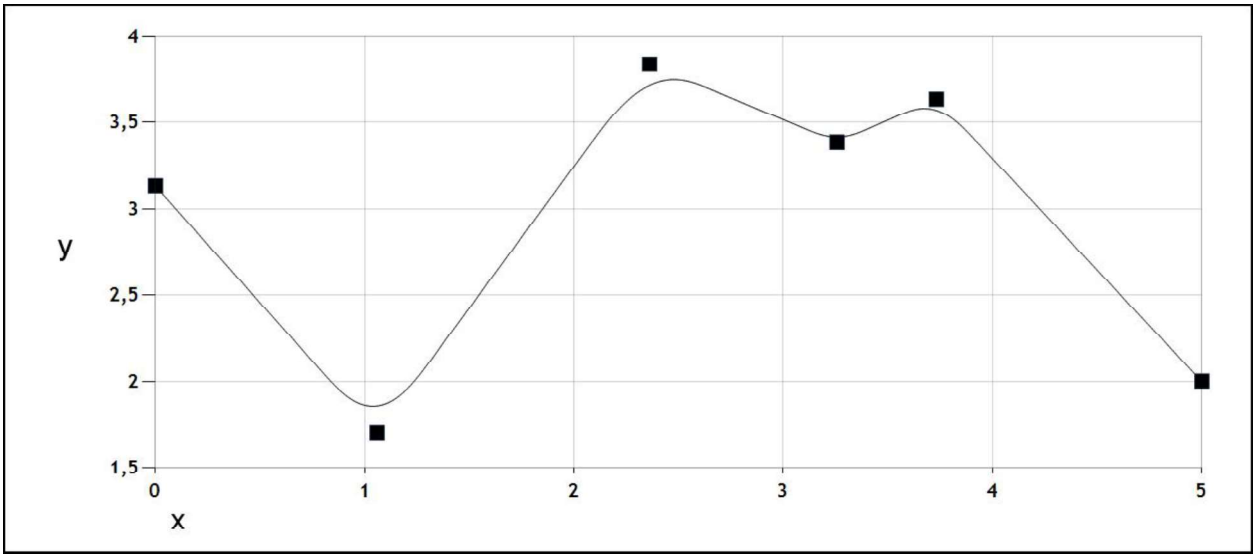

Abbildung 2: Geglätteter Linearer Spline als Annäherung des Kubischen Splines

In Abbildung 1 ist eine Bewegungsfunktion unter Verwendung eines kubischen Splineverlaufs für eine Folgeachsposition/-koordinate über einer Leitachsposition/-koordinate dargestellt.

Definiert man nun an den Umkehrpunkten der Bewegungsfunktion geeignete Stützpunkte, so kann die Bewegungsfunktion unter Verwendung von geglätteten Linearen Splines sehr gut angenähert werden, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

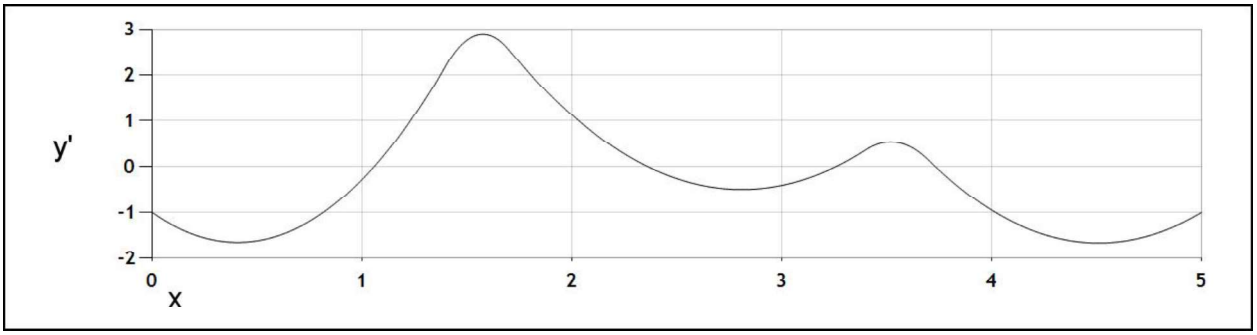

Abbildung 3: Kubischer Spline, 1. Ableitung

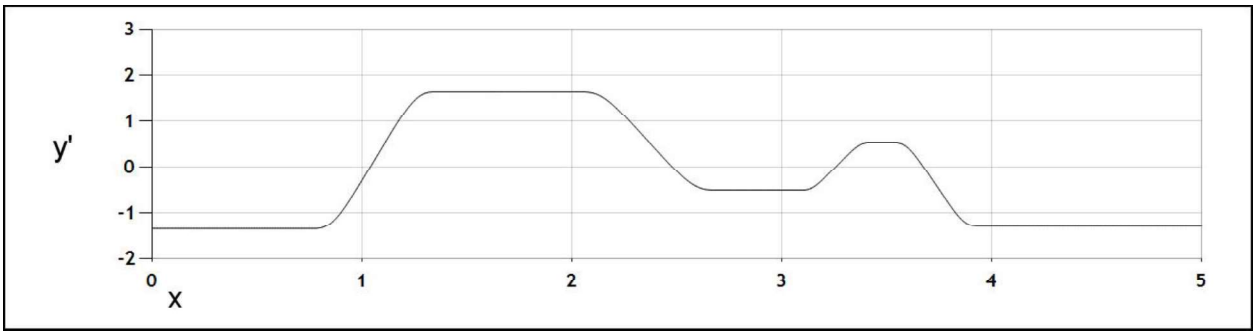

Abbildung 4: Geglätteter Linearer Spline, 1. Ableitung

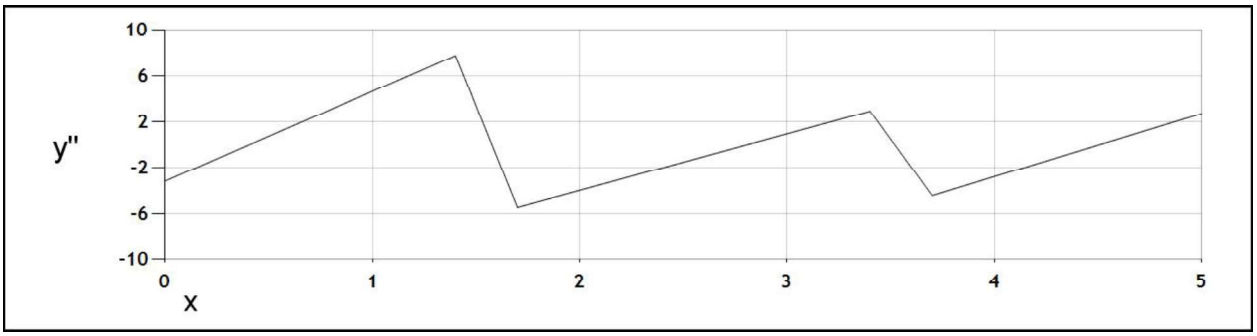

Abbildung 5: Kubischer Spline, 2. Ableitung

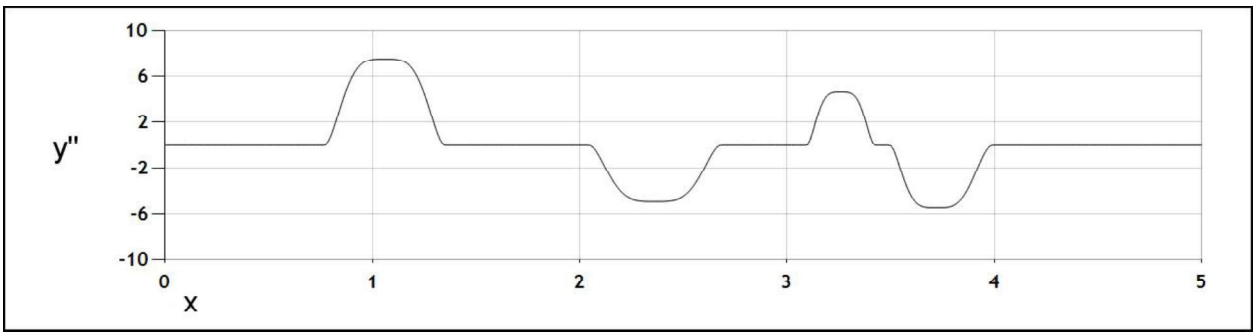

Abbildung 6: Geglätteter Linearer Spline, 2. Ableitung

Entscheidend zur Energieminimierung ist allerdings die Betrachtung der Ableitungen der kubischen Splinefunktion und der angenäherten geglätteten Linearen Splinefunktion. Hier sind die Maxima der 1. Ableitung y‘ bei der geglätteten Linearen Splinefunktion wesentlich

gegenüber der kubischen Splinefunktion verringert, was sich sogar quadratisch auf die aufgenommene mechanische Energie auswirkt.

Die Maxima der 2. Ableitungen y‘‘, welche in der dynamischen Betrachtung maximale Beschleunigungen bzw. dann maximale Kräfte oder Drehmomente wiederspiegeln, lassen sich durch geeignete Wahl der Glättungsübergangsfunktionen und Glättungsbereiche aber entsprechend deckeln. Im Verfahren können für die Übergangsbereiche allein oder als Ersatz eines Linearstücks samt angrenzenden Übergangsbereichen zur Beschleunigungsführung optimierte Polynome zum Einsatz kommen. Bei einer Kurvenscheibensteuerung hat das zusätzlich den Vorteil, dass gängige Steuerungssysteme diese bis in der Regel Polynomgrad 7 beherrschen.

1.3 Kurvenscheiben- und Bahnsteuerung vereint

In der Robotik beginnt üblicherweise die Auslegung von Bahn- oder Punkt-zu-Punkt-Bewegungen durch eine geeignete Auswahl von Raum- und Orientierungsstützpunkten für den Werkzeugmittelpunkt durch den Anwender im Teach-Betrieb. Dabei ist das Überfahren dieser Stützpunkte nicht zwingend notwendig, weshalb man sich des Überschleifens der Bewegungsabschnitte an den Stützpunkten bedient. Die Überschleifbewegungen werden dabei von den gängigen Robotersteuerungen automatisch berechnet und ausgeführt. Intern verwendet die Robotersteuerung dazu den sogenannten Bahnparameter, welchen man sich in erster Näherung wie schon erwähnt als Länge der Bahn des Werkzeugmittelpunkts vorstellen kann.

Das vorgestellte Verfahren bedient sich bei der Robotersteuerung dieses Bahnparameters und verwendet ihn als geometrische Leitkoordinate x. Die angesprochenen Raum- und Orientierungsstützpunkte lassen sich dann für jede Raum- bzw. Orientierungskoordinate X_i in der Form $(x_i, X_i(x_i))$ darstellen. Aus den Raum- und Orientierungsstützpunkten erhält man nach der kinematischen Transformation auch die entsprechenden Positionsstützpunkte q_i für jede der einzelnen Roboterachsen mit $(x_i, q_i(x_i))$.

Definiert man bei jedem Stützpunkt entsprechende Glättungsbereiche $s_i(x_i)$ auf dem Bahnparameter, unserer Leitkoordinate, dann sind wir in der Lage, einen geglätteten Linearen Spline sowohl für jede Raum- bzw. Orientierungskoordinate als auch für jede Robotereinzelachse vollständig zu beschreiben.

Die geglätteten Linearen Splines für die Raum- bzw. Orientierungskoordinaten bestimmen dabei die Bahn- und Orientierungskoordinaten des Werkzeugmittelpunkts im 3D-Raum mit 3D-Orientierung des Werkzeugs. Den Roboter betrachtend als Kurvenscheibenmaschine beschreiben die geglätteten Linearen Splines für die einzelnen Roboterachsen die Folgeachspositionswerte über der Leitkoordinate, unseres Bahnparameters.

Wir haben somit zwei Modelle zur Optimierung einer Roboterbewegung zur Verfügung, einmal die Bahn des Werkzeugmittelpunkts betrachtend, einmal den Roboter modelliert als Kurvenscheibenautomat. Beide Modelle beziehen sich geometrisch aber auf denselben Basisparameter, den Bahnparameter, der somit eine universale geometrische Leitkoordinate darstellt. Zudem weiß man durch die kinematische Transformation und die Transformation der

Ableitungen in der Robotik an jedem Punkt den Zusammenhang zwischen Bahn- bzw. Orientierungskoordinaten und Robotereinzelachskoordinaten X, X', X'' ⇔ q, q', q''

Das hat nun den Vorteil, dass sehr einfach die beiden Modelle wechselseitig ineinander übergehen können. Erreicht wird dies durch die Definition eines Übergangsglättungsbereichs an einem der Stützpunkte. Möchte man z.B. von der Bahnsteuerung in die Kurvenscheibensteuerung wechseln, so kann man die Bahn- bzw. Orientierungskoordinaten einschließlich ihrer Ableitungen am Beginn des Übergangsglättungsbereich in die Robotereinzelachskoordinaten und deren Ableitungen transformieren. Mit diesen Daten berechnet man dann die Übergangsglättungspolynome in die jeweilig folgenden linearen Abschnitte der Kurvenscheibensteuerung. Der Wechsel von der Kurvenscheibensteuerung in die Bahnsteuerung geht analog vonstatten.

2 Energieminimierung

2.1 Automatisierte Parameteroptimierung

Modelliert man eine Bewegungsaufgabe unter Verwendung geometrischer geglätteter Linearer Splines so hat man sowohl für Kurvenscheibenautomaten als auch für Roboter folgende freie Parameter:

- Geometrische Stützpunkte Kurvenscheibe ($x_i(x_i)$, $q_i(x_i)$) oder Bahn ($x_i(x_i)$, $X_i(x_i)$)
- Glättungsbereiche $s_i(x_i)$

Dabei bezeichnen die $x_i(x_i)$ die veränderbaren Stützstellen im Leitkoordinatenbereich in Abhängigkeit der ursprünglichen Stützstellen x_i, mit welchen der ursprüngliche geometrisch geglättete Lineare Spline erstellt bzw. berechnet wurde. Verschiebt man somit eine Stützstelle $x_i(x_i)$ im Leitachskoordinatenbereich für alle Folgeachsen/-koordinaten gleich, dann bedeutet das, dass der zugehörige Stützpunkt beim Abfahren der Bewegung etwas früher oder etwas später erreicht wird. Die Bewegung bleibt aber synchron für alle Folgeachsen/-koordinaten. Genauso verhält es sich mit den Glättungsbereichen $s_i(x_i)$, bleiben diese gleich für alle Folgeachsen/-koordinaten, so bleiben die Bewegungen synchron.

Man hat hier also ein Mittel zur Hand, mit welchem man prozessbedingt synchron ablaufende Bewegungen beibehalten kann, trotzdem aber die Spielräume nutzen kann, um die Bewegungen energieminimal zu gestalten.

Unter Einhaltung verschiedener Randbedingungen wie Achs-/Bahngrenzen, Achs-/Bahndynamiken in Abhängigkeit der Leitachs-/Bahnparameterdynamik, eventuell Kollisionsüberwachung, können diese Spielräume für automatisierte Optimierungen Verwendung finden. Ziel ist hier die Energieminimierung generell bei Maschinen mit zusammenspielenden synchronen und/oder asynchronen Achsen und bei Bahnsteuerungen.

2.2 Simulationen

Bei Tests unter realen Bedingungen in der Automobilproduktion wurden Einsparungen bei Einzelbewegungen im zweistelligen Prozentbereich nachgewiesen. Hier müssen allerdings die simulativen Modelle noch genauer auf die Produktionsbedingungen abgestimmt werden.

Weitergehende simulierte automatisierte Optimierungstestläufe unter Einbeziehung des kompletten mechanischen Robotermodells und verschiedener Bewegungsarten sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Dabei wurden dieselben Freiheitsbereiche an den Stützpunkten gewählt und ein automatischer Optimierungsalgorithmus suchte das Minimum der mechanischen Energieaufnahme. Aufgrund der sich ergebenden resultierenden Bewegungen, welche räumlich und dynamisch differieren, ist ein Eins-zu-Eins-Vergleich allerdings nicht unbedingt maßgebend. Vielmehr lässt sich eine Tendenz ableiten, dass unter Verwendung von Linearen Splines nicht nur die Möglichkeit von synchronen Bewegungen besteht, sondern sich niedrigere Energieminima erzielen lassen.

Tabelle 1: Vergleichende Simulationen

	Bewegungsprofil	**Energiebedarf vorher [J]**	**Energiebedarf nachher [J]**	**Bemerkungen**
	Lineare Splines Einzelachsen	**11908** (Abb. 7)	**5655** (Abb. 8) **7117**	Achsbewegungen asynchron Achsbewegungen synchron
	Lineare Splines Bahnkoordinaten	**13756** (Abb. 9)	**6221** (Abb. 10) **7708**	Bahnbewegungen asynchron Bahnbewegungen synchron
	Kubische Splines Einzelachsen	**14146**	**6008** **7234**	Punkte asynchron überfahren Punkte synchron überfahren
	Kubische Splines Bahnkoordinaten	**15576**	**7152** **7575**	Punkte asynchron überfahren Punkte synchron überfahren

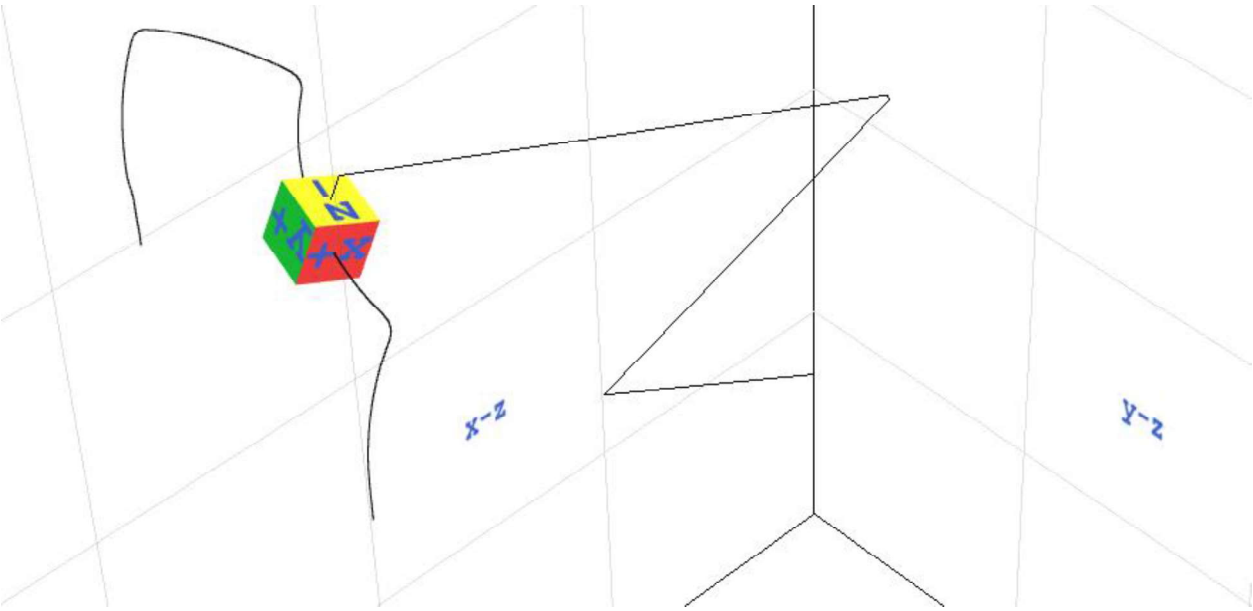

Abbildung 7: Punkt-zu-Punkt-Bewegung eines 6-Achs-Roboters mit beibehaltenem linearem Bahnstück am Start (Aufnahme) und Ende (Ablage) gewandelt in Lineare Splines der Einzelachsen

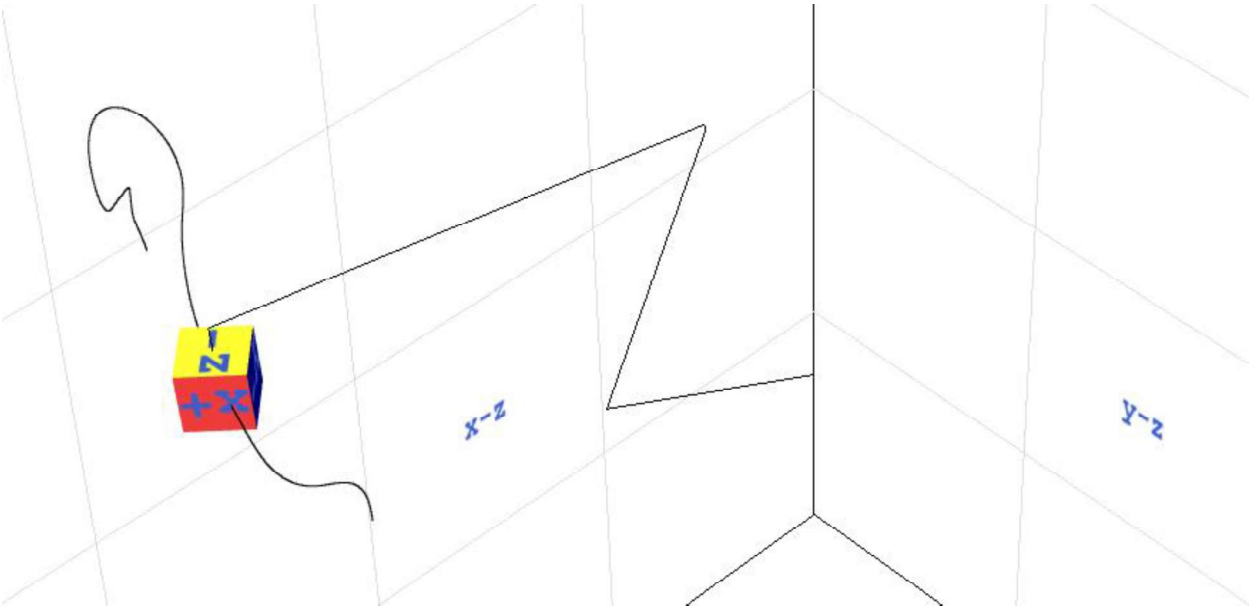

Abbildung 8: Energieoptimierte Bewegung unter Verwendung von Linearen Splines der Einzelachsen mit beibehaltenem linearem Bahnstück am Start (Aufnahme) und Ende (Ablage)

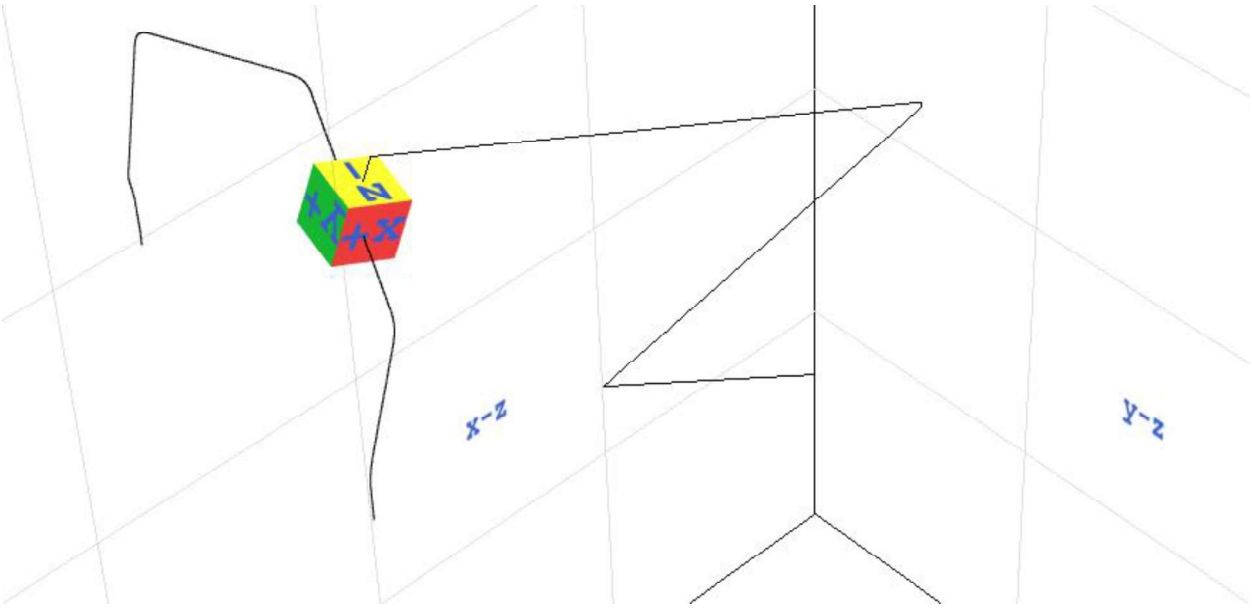

Abbildung 9: Lineare Bahnbewegung eines 6-Achs-Roboters mit Überschleifen gewandelt in Lineare Splines der Bahnkoordinaten

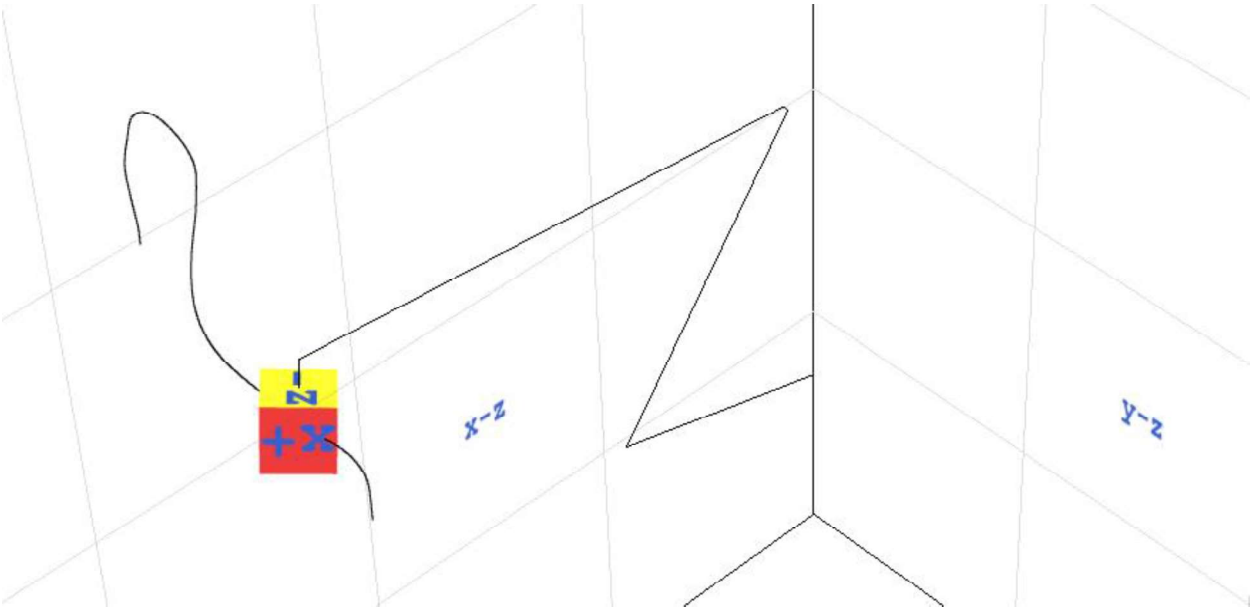

Abbildung 10: Energieoptimierte Bewegung unter Verwendung von Linearen Splines der Bahnkoordinaten

2.3 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde das Konzept Green Automation in Motion mit der Zielsetzung der Energieminimierung vorgestellt. Dieses neu entwickelte Verfahren zur allgemeinen Bewegungssteuerung von Kurvenscheibenautomaten und Robotern ermöglicht das Denken nur in Stützpunkten statt in Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Das Verfahren basiert auf geometrisch geglätteten Linear Splines, welche es nicht nur erlauben, Kurvenscheiben- und Bahnsteuerung wechselseitig ineinander übergehen zu lassen, sondern auch prozessbedingte synchrone und asynchrone Bewegungen einfach zu realisieren.

Bisherige automatisierte Simulationsoptimierungen unter Einbeziehung mechanischer Modelle haben gezeigt, dass mit geometrischen geglätteten Linear Splines in der Regel größere Energieeinsparungen möglich sind als bei Verwendung anderer üblicher Spline- oder herkömmlicher Bewegungsarten.

Es steht noch an, bei den automatisierten Optimierungsläufen die mechanischen Modelle auf komplette mechatronische Modelle zu erweitern, um den Energiebedarf von der Bahn/Kurvenscheibenbewegung bis zur Stromversorgung miteinbeziehen zu können. Die Software SERVOsoft® der kanadischen Firma ControlEng Corporation bietet dazu eine Möglichkeit. Basierend auf den mit mechanischen Modellen voroptimierten Bewegungen wurden damit die Energieeinsparmöglichkeiten schon bestätigt.

Die flexible Handhabung der Bewegungsmodellierung und die Möglichkeit der Skalierung der Bewegungsabläufe unter Verwendung von geometrischen geglätteten Linear Splines öffnet auch die Tür für die Einbindung in Modellierungs- und Steuerungssoftware, welche im Rahmen von Industrie 4.0 für die zukünftigen Anforderungen an Prozesse benötigt wird.

Literatur

Paryanto, Matthias Brossog, Johannes Kohl, Jochen Merhof, Simon Spreng, Jörg Franke (2014): "Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system"; *Procedia CIRP*, 23 (2014), Seiten 131 bis 136

Davis Meike, Leonids Ribickis (2011): "Industrial Robot Path Optimization Approach with Asynchronous FLY-BY in Joint Space", © 2011 *IEEE*, 978-1-4244-9312-8/11, Seiten 911 bis 915

Christian Hansen, Julian Öltjen, Davis Meike, Tobias Ortmaier (2012): "Enhanced Approach for Energy-Efficient Trajectory Generation of Industrial Robots", 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, © 2012 *IEEE*, 978-1-4673-0430-6/12, Seiten 1 bis 7

Marcello Pellicciari, Giovanni Berselli, Federico Balugani, Davis Meike, Francesco Leali (2013): "On Designing Optimal Trajectories for Servo-Actuated Mechanismns Through Highly Detailed Virtual Prototypes", 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), © 2013 *IEEE*, 978-1-4673-5320-3/13, Seiten 1780 bis 1785

Abdullah Mohammed, Bernard Schmidt, Lihui Wang, Liang Gao (2014): "Minimising Energy Consumption for Robot Arm Movement", The 8th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET2014), Stuttgart, 2014

Davis Meike (2014).: Vortrag Energieeffizienz in der Robotik, *4. VDI-Fachtagung Industrielle Robotik mit Fachausstellung*, 01./02. Juli 2014 Baden-Baden