

Energieeffizienter Betrieb von Industrierobotern

Energy-Efficient Operation of Industrial Robots

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Kai Benjamin Eggers
geboren am 11.04.1988 in Langenhagen

2019

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Tag der Promotion: 28.06.2019

Kurzfassung

Beim Erwerb eines Industrieroboters werden heutzutage nicht mehr nur klassische Faktoren wie die minimal erreichbare Taktzeit und die Anschaffungskosten als Kaufkriterien betrachtet, sondern auch der Leistungs- und Energiebedarf des Roboters sowie die laufenden Kosten über dessen gesamte Lebensdauer (TCO: Total Cost of Ownership). Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern sind somit sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht erstrebenswert. Die Verbesserungsansätze lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: Bei den hardwareseitigen Ansätzen wird eine Effizienzsteigerung durch Anpassung der verwendeten mechanischen und elektrischen Komponenten und/oder durch hardwarebezogene Erweiterung des Systems, zum Beispiel in Form von Energiespeichern, angestrebt. Die zweite Kategorie bilden Ansätze zur Optimierung der Software, bei denen die Ersparnisse durch energieeffizientere Bahnplanungsalgorithmen und Ablaufsteuerungen erzielt werden sollen. Die folgenden Untersuchungen fokussieren sich dabei auf die zweite Kategorie.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden softwarebasierte Ansätze zum energieeffizienten Betrieb von Industrierobotern unter möglichst praxisnahen Bedingungen vorgestellt und auf zwei Roboter verschiedener Traglastklassen angewendet. Als Szenarien werden unterschiedliche industrietypische Applikationen wie zum Beispiel Pick-and-Place- und Schweißaufgaben untersucht. Die Bahnen der Ausgangsszenarien, die als Referenz zur Bewertung des Einsparpotentials dienen, werden direkt auf einer modernen, kommerziellen Robotersteuerung geplant, sodass diese dem Stand der Technik entsprechen. Es wird ein Modell erstellt, das den Leistungs- und Energiebedarf des betrachteten Roboters in Abhängigkeit von der durchgeführten Bewegung wiedergibt. Das Modell wird für beide Roboter am Prüfstand validiert. Die vorgestellten Verfahren zum energieeffizienten Betrieb von Industrierobotern lassen sich im Wesentlichen anhand der Freiheitsgrade des Ausgangsszenarios klassifizieren: Im ersten Fall werden zeitlich veränderliche Bewegungen mit fest vorgegebener Geometrie untersucht. Anschließend werden für Aufgaben mit veränderlicher Bahngeometrie zwei Verfahren zur Bestimmung einer energieoptimalen Bahngeometrie unter Verwendung nichtlinearer Optimierungsverfahren präsentiert. Im dritten Fall wird das Einsparpotential durch Änderung der relativen Lage des Roboters zum Werkstück aufgezeigt. Für jedes Verfahren werden die Bedingungen zur Umsetzung in der Praxis sowie die Ursachen und Einflussfaktoren für die erreichbaren Ersparnisse diskutiert.

Schlagerwörter: Industrieroboter, Energieeffizienz, Bahnplanung, Optimierung.

Abstract

When purchasing an industrial robot, not only classical factors such as the maximum achievable cycle time and the acquisition costs are regarded as criteria, but also the robot's power and energy consumption and its total cost of ownership (TCO). Therefore, concepts for increasing energy efficiency of industrial robots are desirable from an ecological as well as an economic point of view. In general, the improvement strategies can be divided into two categories: hardware-related approaches aim to increase efficiency by reaching higher efficiency of mechanical and electrical components and/or by expanding the hardware of the system, for example by adding energy storage devices. The second category contains software optimization approaches that seek to reduce energy consumption through more energy-efficient path planning and sequencing algorithms. The focus of this thesis lies on the second category.

In the present work, software-based methods for the energy-efficient operation of industrial robots under industrially relevant conditions are presented and applied to two industrial robots of different payload classes. Scenarios include various industry-typical applications such as pick-and-place and welding tasks. The trajectories of the baseline scenarios, which serve as benchmark for evaluating savings, are planned directly on a modern, commercial robot controller. A model of the robot is created which reflects the power and energy requirements depending on the performed motion. The model is validated for both robots on a test bench. The presented methods for energy-efficient operation of industrial robots can be classified based on the degrees of freedom of the initial scenario. In the first case, temporally variable movements with fixed geometry are examined. Subsequently, for tasks with changeable path geometry, two methods for the determination of an energy-optimal path geometry using nonlinear optimization methods are presented. In the third case, the potential savings by changing the relative pose of the robot with respect to the workpiece are shown. For each procedure, the conditions for implementation in practice as well as the causes and influencing factors for the achievable savings are discussed.

Keywords: Industrial robots, energy efficiency, path planning, optimization.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	iv
Nomenklatur	vii
1 Einleitung	1
1.1 Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern	2
1.1.1 Hardwarebasierte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz	2
1.1.2 Softwarebasierte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz	4
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2 Modellierung des Leistungs- und Energiebedarfs von Industrierobotern	9
2.1 Definitionen	9
2.2 Koordinatentransformationen	10
2.3 Inverse Dynamik	12
2.3.1 Berechnung der Antriebsmomente	12
2.3.2 Temperaturabhängiges Reibmodell	14
2.4 Bahnplanung für Industrieroboter	14
2.4.1 Grundlagen der Bahnplanung	15
2.4.2 CP-Bewegungen	16
2.4.3 PTP-Bewegungen	17
2.5 Modellierung der aufgenommenen Netzleistung und -energie	18
2.5.1 Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs	18
2.5.2 Berechnung der aufgenommenen Netzleistung und -energie	19
3 Experimentelle Validierung des Energiemodells	23
3.1 Prüfstand und Messumgebung	23
3.1.1 KUKA KR 16	23
3.1.2 KUKA KR 210	24
3.1.3 Messaufbau zur Bestimmung der Leistungsaufnahme	24
3.2 Bestimmung der zusammengefassten Verlustleistungen	26
3.3 Identifikation der temperaturabhängigen Reibparameter	29
3.4 Vergleich von berechneter und gemessener Leistung und Energie	31

4	Verringerung des Energiebedarfs durch Änderung der Verfahzeit	37
4.1	Berücksichtigung der Bremsenschließzeit	38
4.2	Evaluation am Beispiel einzelner PTP-Bewegungen	40
4.3	Evaluation an Zufallsbahnen	43
4.4	Zusammenfassung	47
5	Optimierung der Bahngeometrie	49
5.1	Optimierung mit B-Spline-Funktionen	50
5.1.1	Approximation der Gelenkwinkelverläufe durch B-Splines	51
5.1.2	Formulierung des Optimierungsproblems	52
5.1.3	Begrenzung der Wegänderung durch Toleranzband	54
5.2	Optimierung durch Nutzung von Viapunkten	55
5.2.1	Formulierung des Optimierungsproblems	56
5.2.2	Nebenbedingungen der Optimierung	57
5.3	Vergleich der beiden Verfahren an ausgewählten Szenarien	58
5.3.1	Einzelbewegungen	59
5.3.2	Verkettete Bewegungen	65
5.3.3	Optimierung bei verschiedenen Verfahzeiten	70
5.4	Optimierung mit anderen Kostenfunktionalen	73
5.4.1	Reduktion von Leistungsspitzen	73
5.4.2	Minimierung der Verfahzeit einzelner PTP-Bewegungen	75
5.5	Zusammenfassung	76
6	Änderung der Lage der Roboterbasis	77
6.1	Vorgehen bei der Lagenänderung	78
6.2	Reduktion des Energiebedarfs durch Änderung der Basislage	80
6.2.1	Punktschweißen	80
6.2.2	Bahnschweißen	84
6.2.3	Pick-and-Place	87
6.3	Reduktion der Verfahzeit durch Änderung der Basislage	89
6.4	Zusammenfassung	92
7	Zusammenfassung und Ausblick	93
7.1	Zusammenfassung	93
7.2	Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	99

Nomenklatur

Selten bzw. nur abschnittsweise verwendete Symbole und Formelzeichen sowie abweichende Bedeutungen werden ausschließlich im Text beschrieben.

Allgemeine Konventionen

Skalar	Kleinbuchstabe (kursiv): a
Vektor	Kleinbuchstabe (fett und kursiv): \mathbf{a}
Matrix	Großbuchstabe (fett und kursiv): \mathbf{A}
Punkt	Großbuchstabe: A
Körper	Großbuchstabe (fett): \mathbf{A}

Lateinische Buchstaben

a	Gelenkbeschleunigung in Prozent
c_j	B-Spline-Kontrollpunkt
i	Laufindex zur Beschreibung des i -ten Robotergelenks
h	Funktion zur Berücksichtigung externer Krafteinflüsse bei der inversen Dynamik
i_c	Laufindex der veränderlichen Kontrollpunkte
i_v	Laufindex der veränderlichen Viapunkte
j	Laufindex der B-Spline-Kontrollpunkte
n_b	Anzahl gesamter Kontrollpunkte
n_c	Anzahl veränderlicher Kontrollpunkte
n_v	Anzahl veränderlicher Viapunkte
p	Ordnungszahl der B-Spline-Basisfunktionen
q	abtriebsseitige Gelenkposition
\dot{q}	abtriebsseitige Gelenkgeschwindigkeit
\ddot{q}	abtriebsseitige Gelenkbeschleunigung
r_C	COULOMBSche Reibung
r_v	Viskose Dämpfung
s	Bahnkoordinate
t	Zeit
t_d	diskretisierte Zeitvariable
t_{HB}	Schließzeit der Haltebremsen
u_G	Getriebeübersetzung

v	Gelenkgeschwindigkeit in Prozent
x_E, y_E, z_E	Endeffektorposition in x -, y - und z -Richtung
E_{Netz}	netzseitige Energieaufnahme
$E_{V,A}$	Verlustenergie des Antriebsstrangs
$E_{V,k}$	Verlustenergie aller Konstantverbraucher
$E_{V,R}$	Über den Bremswiderstand dissipierte Bremsenergie
J	Kostenfunktional
J_{zz}	Antriebsstrangträgheit um die z -Achse
$N_{j,p}$	B-Spline-Basisfunktion
P_A	Antriebsstrangleistung
P_{mech}	getriebeseitige mechanische Leistung
P_{Netz}	netzseitige Leistungsaufnahme
P_{ZK}	Zwischenkreisleistung
$P_{V,HB}$	Verlustleistung der Haltebremsen
$P_{V,\text{Netz}}$	netzseitige Konstantverluste
$P_{V,R}$	Verlustleistung des Bremswiderstands
$P_{V,ZK}$	zwischenkreisseitige Konstantverluste
\tilde{P}	Leistungsmesswert
T	Gesamtverfahrzeit einer Bahn
T_{init}	Gesamtverfahrzeit der Initialbahn
T_{max}	maximal zulässige Gesamtverfahrzeit
T_{opt}	Gesamtverfahrzeit der optimierten Bahn
\mathcal{Q}	Konfigurationsraum
\mathcal{X}	Arbeitsraum
\mathbf{a}	Vektor der maximalen prozentualen Achsbeschleunigungen
\mathbf{c}	Vektor mit B-Spline-Kontrollpunkten
\mathbf{f}_d	Direkte Kinematik
\mathbf{f}_i	Inverse Kinematik
\mathbf{p}_B	Parametervektor der Optimierung der Roboterbasislage
\mathbf{p}_{BS}	Parametervektor der Optimierung mit B-Splines
\mathbf{p}_{VP}	Parametervektor der Optimierung mit Viapunkten
\mathbf{q}	Vektor der Gelenkkoordinaten
\mathbf{q}_{max}	Vektor mit maximalen Gelenkwinkeln
\mathbf{q}_{min}	Vektor mit minimalen Gelenkwinkeln
\mathbf{q}_S	Startpunkt einer Bewegung in Gelenkkoordinaten
\mathbf{q}_V	Viapunkt in Gelenkkoordinaten

\mathbf{q}_Z	Zielpunkt einer Bewegung in Gelenkkoordinaten
\mathbf{u}	Vektor mit B-Spline-Knotenpunkten
\mathbf{v}	Vektor der maximalen prozentualen Achsgeschwindigkeiten
\mathbf{x}_E	Endeffektorlage in Umweltkoordinaten
${}^i\mathbf{R}_j$	orthogonale Rotationsmatrix zur Transformation eines $(KS)_j$ in ein $(KS)_i$
$\mathbf{R}_x(\alpha)$	Elementardrehung mit einem Winkel α um die x -Achse
$\mathbf{R}_y(\beta)$	Elementardrehung mit einem Winkel β um die y -Achse
$\mathbf{R}_z(\gamma)$	Elementardrehung mit einem Winkel γ um die z -Achse
${}^i\mathbf{T}_j$	homogene Transformationsmatrix zur Beschreibung der Lage von $(KS)_j$ in $(KS)_i$

Griechische Buchstaben

α, β, γ	Rotationswinkel um die x -, y - und z -Achse
ζ	Approximationsgüte
η_A	Wirkungsgrad des Antriebsstrangs
θ	HEAVISIDE-Funktion
ϑ	Motortemperatur
κ	Wandlungsrichtung des Antriebsstrangs
ρ	Euklidischer Abstand der optimierten Bahn zur Initialbahn
ρ_{\max}	Toleranzbandradius
τ_G	Getriebemoment
τ_M	Motormoment
φ	Motorwinkel
$\dot{\varphi}$	Motorwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	Motorwinkelbeschleunigung
$\boldsymbol{\tau}_M$	Vektor der Motormomente
$\boldsymbol{\tau}_G$	Vektor der Getriebemomente
$\boldsymbol{\tau}_G^*$	Vektor der Getriebemomente bei einem System ohne externe Krafteinflüsse

Koordinatensystem

$(KS)_0$	ortsfestes Inertialkoordinatensystem
$(KS)_i$	Koordinatensystem i
$(KS)_B$	Koordinatensystem der Roboterbasis
$(KS)_W$	Koordinatensystem des Werkstücks

Abkürzungen

AIDA	Automatisierungsinitiative Deutscher Automobilhersteller
AREUS	Automation and Robotics for EUropean Sustainable Manufacturing
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BS	B-Spline
CP	Continuous-Path(-Bewegung)
CIRC	Bewegungsbefehl für Kreisbewegungen in der Programmiersprache KRL
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DH	Denavit-Hartenberg
FHG	Freiheitsgrad
IFR	International Federation of Robotics
IWU	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
KRL	KUKA Robot Language
LIN	Bewegungsbefehl für Linearbewegungen in der Programmiersprache KRL
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
OR	Override
PMSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PTP	Point-To-Point(-Bewegung)
SiL	Software-in-the-Loop
TCO	Total Cost of Ownership
VP	Viapunkt
ZK	Zwischenkreis

1 Einleitung

In den letzten Jahren lässt sich ein erhebliches Wachstum im Bereich der industriellen Robotik verzeichnen: Laut der International Federation of Robotics (IFR) stieg die Zahl der verkauften Industrieroboter 2016 um 19 % und 2015 um 20 % gegenüber dem jeweiligen Vorjahr an [Int18]. Auch für die kommenden Jahre wird vergleichbares Wachstum prognostiziert. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad steigt auch die Zahl der elektrischen Antriebe und somit die Gesamtenergieaufnahme der Anlage. Entsprechend groß ist der Bedarf an Konzepten zur Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen, sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht. Dies bedeutet auch für Roboterhersteller, dass nicht mehr nur klassische Leistungsmerkmale, wie die minimal erreichbare Taktzeit und die Anschaffungskosten, als Kaufkriterien dienen, sondern auch der Energiebedarf und die „Total Cost of Ownership (TCO)“, also die Kosten über die gesamte Lebensdauer des Roboters. So wurde beispielsweise für den Karosseriebau von der Automatisierungsinitiative Deutscher Automobilisten (AIDA) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) das „AIDA Energiezertifikat für Industrieroboter im Karosseriebau“ entwickelt, mit dessen Hilfe Industrieroboter modell- und herstellerübergreifend verglichen werden können [Fra15]. Der Wunsch zum möglichst energieeffizienten Einsatz von Industrierobotern besteht demnach sowohl auf Hersteller- als auch auf Kundenseite. In Forschung und Entwicklung werden daher Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern (und/oder von mechatronischen Systemen im Allgemeinen) untersucht. Viele Ansätze befassen sich mit der Optimierung der Hardware – ein höherer Wirkungsgrad der verbauten Einzelkomponenten bewirkt unweigerlich eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades. Andere Ansätze verfolgen beispielsweise die Verringerung der bewegten Massen durch Leichtbauweise.

Neben diesen hardwareorientierten Ansätzen gibt es auch die Möglichkeit, die Energieeffizienz durch softwarebasierte Methoden weiter zu erhöhen, zum Beispiel durch Optimierung der Bewegungsplanung oder intelligente Nutzung von Stillstandzeiten. Die Ansätze können in Ergänzung zu den obigen Methoden angewendet werden und lassen sich einfacher auf bestehenden Anlagen implementieren, da keine Umrüstungen und/oder Neuanschaffungen notwendig sind. Die softwareseitige Optimierung der Energieeffizienz ist auch der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur Reduktion des Energiebedarfs von Industrierobotern sowie die Komplexität der Umsetzung und die möglichen Einsparpotentiale vorgestellt. Die Verfahren werden an modernen Industrierobotern evaluiert, um die Gültigkeit der Ergebnisse auch für industrielle Anwender (und nicht nur auf Forschungsebene) zu gewährleisten. Während die Verfahren grundsätzlich für alle Robotertypen anwendbar sind, liegen Knickarmroboter mit sechs

Freiheitsgraden aufgrund ihrer Marktdominanz und des daraus resultierenden größten absoluten Einsparpotentials im Fokus dieser Arbeit.

1.1 Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern

Im Folgenden wird ein Überblick zu existierenden Forschungsaktivitäten gegeben, die sich mit der Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern und mechatronischen Systemen beschäftigen. Der Überblick orientiert sich im Wesentlichen an dem kürzlich erschienen Beitrag von Carabin et al. [CWV17]. Wie eingangs erwähnt, lassen sich die Methoden in hardware- und softwarebasierte Verbesserungsansätze unterteilen. Zunächst werden die hardwarebasierten Ansätze in Abschnitt 1.1.1 vorgestellt, gefolgt von den softwarebasierten Ansätzen in Abschnitt 1.1.2. Auf eine Angabe von relativen oder absoluten Einsparpotentials der vorgestellten Ansätze wird im Folgenden verzichtet, da diese maßgeblich vom jeweils betrachteten System sowie dem Anwendungsszenario abhängig sind.

1.1.1 Hardwarebasierte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz

In der Literatur sind zahlreiche Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz eines mechatronischen Systems durch Änderung der eingesetzten Hardware zu finden. Der Fokus der Verbesserung liegt dabei auf unterschiedlichen Teilaspekten-/komponenten des Systems. Die Ansätze lassen sich nach [CWV17] wie folgt weiter unterteilen:

1. **Roboterwahl:** Optimale Auswahl des einzusetzenden Roboters (oder allgemein des mechatronischen Systems),
2. **Komponentenoptimierung:** Optimierung der Roboterkomponenten, zum Beispiel durch Leichtbauweise oder Erzielung höherer Einzelwirkungsgrade,
3. **Systemerweiterung:** gezielte Erweiterung des ursprünglichen Systems durch zusätzliche Komponenten wie zum Beispiel Energiespeicher.

Bereits bei der **Auswahl** des Roboters zur Lösung einer definierten Aufgabe kann der Energiebedarf des Systems erheblich beeinflusst werden [LB01, GA14, LSK15, RFdS15]. Die Ursachen für die Ersparnisse sind in der Regel die Verringerung der bewegten Massen, die (räumliche) Verkürzung der Bewegungen und/oder höhere Wirkungsgrade des Systems. Die Auswahl kann sich hierbei auf verschiedene Eigenschaften beziehen: In [LB01] werden eine serielle und eine parallele Kinematik mit je 3 Freiheitsgraden bei vergleichbaren Arbeitsräumen und Traglasten verglichen. Im betrachteten Fall weist die parallele Struktur eine deutlich höhere Energieeffizienz auf, was laut den Autoren im Wesentlichen auf die erheblich geringeren Massenträgheiten der Parallelkinematik zurückzuführen ist.

In [GA14] wird ein unteraktuierter serieller Roboterprototyp mit einem herkömmlichen Knickarmroboter zum Einsatz in einer Pick-and-Place-Applikation verglichen. Die maßgeschneiderte Struktur erzielt in den präsentierten Untersuchungen bessere Ergebnisse gegenüber der kommerziellen Lösung, als Ersparnis werden für das betrachtete Szenario 57 % angegeben. Umgekehrt können auch kinematische Redundanzen des Roboters zur Steigerung der Energieeffizienz genutzt werden, wie in [LSK15, RFdS15] gezeigt. Der Entwurf gänzlich maßgeschneiderter Lösungen durch energieoptimale Struktur- und Maßsynthese wird in [RKO17] vorgestellt.

Bei der **Komponentenoptimierung** wird eine Verbesserung der verwendeten Roboterkomponenten angestrebt. Zum einen kann der Gesamtwirkungsgrad des Robotersystems durch Verringerung der bewegten Massen erhöht werden. Die Reduktion führt zu niedrigeren benötigten Antriebsmomenten, was wiederum geringere momentenproportionale Verluste bewirkt und somit in einem höheren Gesamtwirkungsgrad resultiert. Untersuchungen zu den Momentenverringerungen durch Leichtbauweise sind in [HNJ⁺08, YHHL16] zu finden. Neben der Leichtbauweise der Roboterstruktur und/oder der Werkzeuge ist insbesondere bei seriellen Kinematiken auch eine Verringerung der bewegten Massen durch Umplatzierung der Antriebe möglich [MHY93, Kim15, AZE⁺16]. Hierzu werden die Antriebe gestellfest (oder möglichst basisnah) montiert und die Aktuierung der Gelenke erfolgt über zusätzliche mechanische Elemente wie Riemen oder Seilzüge. In [YMA12] wird der Entwurf eines planaren dreidimensionalen redundanten Manipulators mit bis zu sechs Freiheitsgraden vorgestellt, der lediglich von drei basisnahen Motoren angetrieben wird. Die Gelenke 3 bis 6 werden vom dritten Motor durch Getriebeversaltungen aktuiert.

Eine andere Möglichkeit zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems ist die Entwicklung von hocheffizienten Antriebsstrangkomponenten. In [Sai10] findet eine detaillierte Vorstellung der Verluste von Elektromotoren sowie von Strategien zu deren Verringerung statt. Methoden zur energieoptimalen Getriebedimensionierung werden in [ILZ08, IZL09] diskutiert.

Bei der **Systemerweiterung** wird eine Effizienzsteigerung durch das Einbringen zusätzlicher Energiespeicher angestrebt. Während der Verzögerungsphasen bei Roboterbewegungen arbeiten in der Regel viele oder alle Antriebe generatorisch, nach Stand der Technik wird die überschüssige Energie üblicherweise über Bremswiderstände in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Durch den Einsatz zusätzlicher Energiespeicher kann die generatorische Energie zwischengespeichert und für die folgende Bewegung wieder zur Verfügung gestellt werden. Neben Untersuchungen zu unterschiedlichen Speichermedien sind auch Ansätze zu finden, bei denen eine elektrische Kopplung mehrerer Robotersysteme, Roboterzellen oder ganzer Fabriken angestrebt wird.

Nach [KP13] lassen sich die Medien zur Zwischenspeicherung kinetischer Energie folgenden vier Gruppen zuordnen:

1. Mechanische Speicher (zum Beispiel Schwungräder),
2. elektrische Speicher (zum Beispiel Batterien oder Kondensatoren),
3. hydraulische Speicher (zum Beispiel hydropneumatische Akkumulatoren),

4. hydroelektrische Speicher (zum Beispiel Hydraulikmotoren in Verbindung mit elektrischen Generatoren).

In [KP13] werden diese hinsichtlich Spannungsstabilität, Temperaturbereich, Effizienz und Kosten verglichen. In dem Artikel werden mit einem Schwungrad die besten Ergebnisse erzielt. Die Integration, Nutzung und Regelung eines Schwungradspeichers wird für ein allgemeines mechatronisches Mehrachssystem in [HEKO15] vorgestellt. In [GEG15] wird der Einsatz von Schwungradspeichern und deren softwareseitige Integration für einen Industrieroboter untersucht. Da in der Robotik in der Regel elektrische Antriebe verwendet werden, sind hydraulische und hydroelektrische Speicher nur vereinzelt zu finden. Ausführlichere Beschreibungen zu derartigen Systemen und Anwendungsszenarien können in [KP13] und [LWDC15] nachgeschlagen werden.

Ein weiterer Ansatz der Systemerweiterung ist die energetische Kopplung mehrerer Roboter/Systeme. Die Effizienzsteigerung basiert dabei ebenfalls auf der Vermeidung von Dissipation überschüssiger kinetischer Energie. Statt dedizierter Speichermedien kann die Energie auch direkt anderen Systemen zur Verfügung gestellt werden. Hierzu werden mehrere Systeme unter einem gemeinsamen Gleichspannungsversorger betrieben, sodass ein Zwischenkreisverbund vorliegt. Dieser Ansatz wird maßgeblich im EU-Projekt *AREUS* (Automation and Robotics for European Sustainable Manufacturing) verfolgt [PAB⁺15, GGP⁺17]. Die energetische Kopplung ermöglicht wiederum weitere Optimierungsmöglichkeiten durch die Entwicklung energieeffizienter Ablaufplanungen, wie in Abschnitt 1.1.2 noch genauer erläutert wird. Bei einer genügend hohen Teilnehmerzahl im Verbund kann davon ausgegangen werden, dass sich immer ein „Abnehmer“ für überschüssige kinetische Energie findet und die Dissipation somit vollständig vermieden werden kann. Nachteilig an diesem Ansatz ist die notwendige Umrüstung bestehender Systeme auf neuartige Versorgungskonzepte. Darüber hinaus ist ein hohes Maß an herstellerübergreifender Standardisierung notwendig, damit die Kopplung verschiedener Systeme technisch überhaupt ermöglicht wird. In Deutschland wird diese Thematik im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt *DC-Industrie* adressiert [Zen16].

1.1.2 Softwarebasierte Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz

Bei den softwarebasierten Ansätzen wird die Steigerung der Energieeffizienz durch Modifikation der Bewegungs- oder Ablaufplanung erreicht. Um den Energiebedarf bei der Bewegungs- oder Ablaufplanung berücksichtigen und verringern zu können, ist zunächst ein mathematisches Modell erforderlich, mit dem der resultierende Energiebedarf für eine definierte Bewegung möglichst realitätsnah berechnet werden kann. Während häufig noch Ersatzgrößen wie die Summe der quadrierten Antriebsmomente [WRE04, ASD16] oder die mechanische Leistung des Systems betrachtet werden [BCCP10, Abe16], wird bei einigen Ansätzen bereits die direkte Modellierung und Minimierung der eigentlichen Zielgröße, also des netzseitigen Energiebedarfs, angestrebt [HKO13, MPB14]. Die Modellparameter können in der Regel teilweise aus Datenblättern der Roboter und/oder Komponenten entnommen werden, die restlichen Parameter werden anhand

etablierter Identifikationsverfahren ermittelt. Abschließend findet üblicherweise eine Validierung am Prüfstand statt, bei der eine Übereinstimmung von modelliertem und gemessenem Energiebedarf geprüft und sichergestellt wird.

Die Modelle bilden die Grundlage für die Anwendung von Optimierungsansätzen zur Reduktion des Energiebedarfs. Die Ansätze lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

1. **Bahnoptimierung:** Modifikation der Bahnen und/oder der Bahnplanungsansätze,
2. **Ablaufoptimierung:** Änderung der Ablaufplanung für einen oder mehrere Roboter.

Bei der **Bahnoptimierung** wird eine Verringerung des Energiebedarfs durch eine energieoptimale Bewegungsplanung angestrebt. Viele der auftretenden Verlustquellen des Systems besitzen eine lineare oder quadratische Abhängigkeit vom Moment oder von der Geschwindigkeit (eine Auflistung erfolgt in [CWV17]), was eine Reduktion von Verlusten (und folglich eine Steigerung der Energieeffizienz) durch Optimierung der Bahn ermöglicht. Die hierzu notwendige Verschiebung von Betriebspunkten kann zum Beispiel durch Änderung der verwendeten Bewegungsvorschriften erzielt werden, wie in [HEKO14] und in [RT16] gezeigt (in beiden Fällen für allgemeine mechatronische Systeme). Bei Robotern, insbesondere bei seriellen Kinematiken, liegt darüber hinaus eine Konfigurationsabhängigkeit der Massenträgheiten der Gelenke und folglich der benötigten Antriebsmomente vor. Somit können durch Optimierung der Bewegungsplanung Konfigurationen mit hohen Trägheiten vermieden werden. Die Abweichung von der initialen Bahn geht in der Regel mit „Umwegen“ einher, die wiederum zusätzliche Verluste verursachen. Häufig wird auch die Einhaltung weiterer Randbedingungen wie zum Beispiel einer maximalen Verfahrzeit gefordert.

Dieses nichtlineare Optimierungsproblem kann unter Verwendung verschiedener Optimierungsansätze gelöst werden. In [BCCP10] wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung von Polynombahnen genutzt, während in [HÖMO12] die Bahn durch B-Splines approximiert und mit gradientenbasierten Optimierungsverfahren optimiert wird. In beiden Fällen werden dabei Punkt-zu-Punkt-Bewegungen von Rast in Rast ohne Zwischenpunkte betrachtet (siehe Abschnitt 2.4), die sich aufgrund der beliebigen Bewegungsvorgabe im Arbeitsraum gut zur Optimierung eignen. Weitere Publikationen zu Umsetzungen für mechatronische Systeme und/oder Roboter mit weniger als 6 Freiheitsgraden sind in [CWV17] aufgelistet.

Abhängig von der betrachteten Applikation finden sich in der Praxis auch Prozesse, bei denen eine Änderung der Bahn nicht zulässig ist, zum Beispiel beim Fräsen, Kleben oder Bahnschweißen. Eine Optimierung derartiger Bahnen kann durch Änderung der relativen Lage von Werkstück und Roboter und/oder durch die Nutzung verschiedener Roboterkonfigurationen erfolgen. Bei beiden Ansätzen können die Bewegungen der einzelnen Gelenke bei unveränderter Bahn beeinflusst werden, sodass effizientere Lösungen für die Aufgabenstellung ermöglicht werden. Die energieoptimale Werkstückpositionierung wird in [URCCW09] für eine Parallelkinematik und in [MSWG14] für einen Knickarmroboter erfolgreich demonstriert.

Bei der **Ablaufoptimierung** bleiben die Geometrien der Bewegungen im Rahmen der Optimierung unverändert. Stattdessen werden Änderungen am zeitlichen Ablauf vorgenommen, zum Beispiel

durch die Eliminierung von Stillstandzeiten zugunsten einer Verlangsamung angrenzender Bewegungen. Bei vielen kommerziell erhältlichen Robotersteuerungen werden Bewegungen in der Standardeinstellung mit maximaler Dynamik durchgeführt. Da bei der Inbetriebnahme in den meisten Fällen die Einhaltung der Taktzeit im Fokus steht, werden die Bahnparameter nur selten modifiziert, sodass in der Praxis häufig Bewegungen mit angrenzenden (unnötigen) Stillstandzeiten zu finden sind. Analog zur Bahnoptimierung entsteht das Einsparpotential aus der Verringerung betriebspunktabhängiger Verluste. Bei langsameren Bewegungen treten geringere Geschwindigkeiten und/oder Beschleunigungen und demnach geringere Momente auf, während auftretende Konstantverluste bei zunehmender Verfahrszeit steigen. Eine simulative Untersuchung hierzu für parallele und serielle Kinematiken wird [PBLV13] vorgestellt. An den präsentierten Ergebnissen lässt sich der Kompromiss aus abnehmenden dynamischen und zunehmenden Konstantverlusten bei Erhöhung der Verfahrszeit deutlich erkennen, sodass sich die energieoptimale Verfahrszeit einer vorgegebenen Bewegung bestimmen lässt. Eine Erweiterung des Ansatzes erfolgt in [WLVB13], sodass der Ablauf der gesamten Roboterzelle bei der Änderung der Verfahrszeiten einzelner Roboter berücksichtigt und optimiert wird.

Wird von einer elektrischen Kopplung mehrerer Robotersysteme ausgegangen (siehe Abschnitt 1.1.1), ergeben sich aufgrund der Möglichkeit des Energieaustauschs noch weiterführende Einsparpotentiale bei der Ablaufoptimierung, sodass zum Beispiel Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen zweier Roboter im Rahmen der Optimierung übereinandergelegt werden können, um die Dissipation von Bremsenergie zu verhindern. In [GHKO14] wird ein Ansatz zur automatischen Generierung einer energieeffizienten Ablaufsteuerung für eine elektrisch gekoppelte Roboterzelle präsentiert. Die Optimierung gekoppelter Zellen wird auch im zuvor erwähnten AREUS-Projekt behandelt. Die Simulationsergebnisse sind in [RWBL17] vorgestellt.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Wie in Abschnitt 1.1 erläutert, lassen sich die existierenden Untersuchungen grundsätzlich in hardware- und softwarebasierte Ansätze unterteilen. Aufgrund der deutlichen Abgrenzung der beiden Gebiete erscheint es somit sinnvoll, sich auf eines der beiden fokussieren. Im Rahmen der Arbeit werden daher ausschließlich softwarebasierte Verbesserungsansätze betrachtet.

Trotz der großen Vielfalt an softwarebezogenen Veröffentlichungen zur Effizienzsteigerung (siehe Abschnitt 1.1.2) lassen sich in diesem Bereich noch deutliche Lücken im Stand der Forschung feststellen. Zunächst werden in der Regel nur einzelne Szenarien, also ein konkreter Roboter mit einer (Beispiel-)Applikation, betrachtet. Die publizierten Ergebnisse verschiedener Forschungsgruppen ermöglichen somit keine übergreifende Vergleichbarkeit. Darüber hinaus existieren zu vielen Ansätzen nur rein simulative Ergebnisse, deren experimentelle Bestätigung noch aussteht. Bei den Ansätzen zur Bahnoptimierung werden in den meisten Fällen als Ausgangsbahn vereinfachte Bewegungsvorschriften (zum Beispiel Polynome oder Beschleunigungstrapeze) genutzt,

die insbesondere für serielle Kinematiken aufgrund der Nichtberücksichtigung der mechanischen Kopplung nicht dem Stand der Technik entsprechen. Eine Ausnahme bildet [PDVE⁺14], was sich auch deutlich in den Ergebnissen widerspiegelt – statt Energieersparnissen im hohen zweistelligen Bereich (siehe [BCCP10, URCCW09]) werden erreichbare Ersparnisse von etwa 4 % angegeben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden softwarebasierte Ansätze zur Effizienzsteigerung von Industrierobotern unter möglichst realitätsnahen Bedingungen untersucht. Alle Ansätze werden dabei auf zwei Industrieroboter verschiedener Traglastklassen angewendet, wobei die beiden Roboter ansatzübergreifend unverändert bleiben. Als Szenarien werden verschiedene industrietypische Applikationen wie zum Beispiel Pick-and-Place- und Schweißaufgaben untersucht. Die Bahnen der Ausgangsszenarien werden direkt auf einer modernen, kommerziellen Robotersteuerung geplant, sodass diese dem Stand der Technik entsprechen. Es wird ein neuer Ansatz zur Modellierung des Energiebedarfs von Robotern vorgestellt und für beide Roboter am Prüfstand validiert. Bei Verfahren mit direkten Eingriffen in die Bahnplanungsalgorithmen werden die Optimierungsergebnisse durch weitere Messungen gestützt. Für jedes Verfahren werden die Bedingungen zur Umsetzung sowie die Ursachen und Einflussfaktoren für die erreichbaren Ersparnisse diskutiert.

Hieraus ergibt sich die folgende Gliederung der Arbeit: In Kapitel 2 erfolgen zunächst eine Vorstellung der verwendeten Definitionen sowie die Zusammenfassung wesentlicher Grundlagen zur mathematischen Modellierung von Industrierobotern. In Kapitel 3 wird der zuvor eingeführte Ansatz zur Modellierung des Energiebedarfs am Prüfstand für zwei Roboter validiert. Anschließend wird das Energiesparpotential durch Änderung der Fahrzeit einzelner Bewegungen in Kapitel 4 untersucht. Mögliche Ersparnisse durch Optimierung der Bahngeometrie werden in Kapitel 5 aufgezeigt. Der Einfluss der relativen Lage des Roboters zum Werkstück auf den Energiebedarf wird in Kapitel 6 dargestellt. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 7.

2 Modellierung des Leistungs- und Energiebedarfs von Industrierobotern

Zur Evaluierung und Optimierung des Energiebedarfs in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewegung des Roboters wird ein Modell benötigt, welches die Leistungs- und Energieflüsse für die betrachtete Bewegung mathematisch abbildet. Die hierfür verwendeten Modellierungsansätze werden im Folgenden erläutert, zusammen mit einer Auswahl an Grundlagen und Definitionen zu Themen und Begriffen, auf die in der Arbeit häufig zurückgegriffen wird. Die Begriffsdefinitionen sind in Abschnitt 2.1 zu finden. Die Grundlagen zu Koordinatensystemen und -transformationen folgen in Abschnitt 2.2. Die Berechnung der Motormomente anhand der inversen Dynamik wird in Abschnitt 2.3 erläutert. In Abschnitt 2.4 werden die Grundlagen zur Bahnplanung für Industrieroboter vorgestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit dem Modellierungsansatz zur Bestimmung der aufgenommenen Netzleistung und -energie in Abschnitt 2.5.

2.1 Definitionen

Zur Definition der verwendeten Begrifflichkeiten und Formelzeichen werden zunächst die für die Arbeit relevanten Grundlagen behandelt, auf die bei den später folgenden Energieeffizienz-betrachtungen Bezug genommen wird. Die Konfiguration eines Roboters kann in verschiedenen Bezugssystemen beschrieben werden. Grundsätzlich lässt sich dabei zwischen der Beschreibung in Gelenk- und in Umweltkoordinaten unterscheiden. Der Vektor der Gelenkkoordinaten \mathbf{q} des Roboters ergibt sich aus den aktuellen Gelenkwinkelstellungen. Die Gelenkkoordinaten entsprechen bei seriellen Kinematiken in der Regel den Minimalkoordinaten, daher ergeben sich für einen Roboter mit n Freiheitsgraden (FHG) die Gelenkkoordinaten

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T. \quad (2.1)$$

Die minimalen und maximalen Gelenkwinkel \mathbf{q}_{\min} bzw. \mathbf{q}_{\max} sind dabei in der Regel durch konstruktive Einschränkungen des Manipulators vorgegeben. Die Menge aller möglichen Gelenkwinkelkombinationen \mathcal{Q} wird als Konfigurationsraum bezeichnet:

$$\mathcal{Q} = \{\mathbf{q} \mid \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}\}. \quad (2.2)$$

Statt der Gelenkwinkel kann auch die kartesische Lage (Kombination aus Position und Orientierung) des Endeffektors zur Beschreibung genutzt werden. Für einen Mechanismus mit sechs räumlichen Freiheitsgraden setzen sich die Umweltkoordinaten

$$\mathbf{x}_E = (x_E, y_E, z_E, \alpha_E, \beta_E, \gamma_E)^T \quad (2.3)$$

aus drei translatorischen (x_E, y_E, z_E) und drei rotatorischen FHG $(\alpha_E, \beta_E, \gamma_E)$ zusammen. Die Menge aller möglichen Lagen ergibt den Arbeitsraum \mathcal{X} :

$$\mathcal{X} = \{\mathbf{x}_E \mid \mathbf{x}_E = \mathbf{f}_d(\mathbf{q}) \wedge \mathbf{q} \in \mathcal{Q}\}, \quad (2.4)$$

wobei $\mathbf{f}_d(\mathbf{q})$ die direkte Kinematik des Roboters darstellt. Der umgekehrte Zusammenhang, also die Berechnung einer Gelenkwinkelkonfiguration aus einer gegebenen Endeffektorlage, wird als inverse Kinematik \mathbf{f}_i bezeichnet:

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_E). \quad (2.5)$$

Allgemeine Ansätze zur Berechnung der direkten und inversen Kinematik für serielle Kinematiken sind in [SSVO10] zu finden. Zur Berechnung der inversen Kinematik von 6-Achs-Knickarmrobotern mit sphärischem Handgelenk, bei denen sich die Rotationsachsen der drei Handachsen in einem Punkt schneiden, kann das inverse kinematische Problem in zwei Teile zerlegt werden, bei der die Zielorientierung durch die drei Handachsen bestimmt wird, während die Positionierung des Handgelenks durch die drei Hauptachsen erfolgt. Vollständige Lösungen hierfür können in [PZ86, HS84] nachgeschlagen werden.

2.2 Koordinatentransformationen

Im Rahmen der Arbeit werden zur Beschreibung der relativen räumlichen Lage des Werkstücks und der Roboterbasis zu einem gemeinsamen Bezugspunkt verschiedene körperfeste Koordinatensysteme genutzt, wie in Bild 2.1 schematisch dargestellt. Das körperfeste Koordinatensystem des Werkstücks wird mit $(KS)_W$ bezeichnet. Da die Lage der Roboterbasis in Teilen der Arbeit als veränderlich angenommen wird, muss zwischen dem körperfesten Roboterbasiskoordinatensystem $(KS)_B$ und dem Inertialkoordinatensystem $(KS)_0$ unterschieden werden. Zur mathematischen Beschreibung der Lage eines Koordinatensystems bezüglich eines anderen können homogene Transformationsmatrizen genutzt werden. Diese setzen sich aus je einem Teil zur Angabe der Translation und der Rotation zusammen [Spr64]. So gibt beispielsweise die Matrix 0T_B die Lage des Koordinatenursprungs von $(KS)_B$ bezogen auf $(KS)_0$ folgendermaßen an:

$${}^0\mathbf{T}_B = \left(\begin{array}{ccc|c} {}^0\mathbf{R}_B & & & ({}^0)\mathbf{r}_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right). \quad (2.6)$$

Der Vektor $({}^0)\mathbf{r}_B$ beschreibt die x -, y - und z -Position des Koordinatenursprungs von $(KS)_B$, dargestellt im $(KS)_0$. Die Matrix ${}^0\mathbf{R}_B$ wird auch als Rotationsmatrix bezeichnet und gibt die Orientierung des $(KS)_B$ bezogen auf $(KS)_0$ an. Die Rotationsmatrix lässt sich durch Multiplikation von Elementardrehungen um die drei Koordinatenachsen bestimmen:

$$\text{Drehung um } x\text{-Achse mit Winkel } \alpha: \mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

$$\text{Drehung um } y\text{-Achse mit Winkel } \beta: \mathbf{R}_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

$$\text{Drehung um } z\text{-Achse mit Winkel } \gamma: \mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Die Rotationsmatrix kann nach verschiedenen Konventionen aus den Elementardrehungen zusammengesetzt werden [Die06]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Gier-Nick-Roll-Konvention zur Beschreibung der Orientierung verwendet. Dabei werden nacheinander Elementardrehungen um die Achsen des festen Originalsystems durchgeführt, in diesem Fall zuerst um die x -Achse, anschließend um die y -Achse und zuletzt um die z -Achse. Eine allgemeine Rotationsmatrix ${}^i\mathbf{R}_j$ zur Angabe der Orientierung eines $(KS)_j$, ausgedrückt in $(KS)_i$, berechnet sich entsprechend wie folgt:

$${}^i\mathbf{R}_j = \mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{pmatrix} c_\gamma c_\beta & c_\gamma s_\beta s_\alpha - s_\gamma c_\alpha & c_\gamma s_\beta c_\alpha + s_\gamma s_\alpha \\ s_\gamma c_\beta & s_\gamma s_\beta s_\alpha + c_\gamma c_\alpha & s_\gamma s_\beta c_\alpha - c_\gamma s_\alpha \\ -s_\beta & c_\beta s_\alpha & c_\beta c_\alpha \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

mit den Abkürzungen $s_\# \equiv \sin(\#)$ und $c_\# \equiv \cos(\#)$.

Durch die Verwendung homogener Transformationsmatrizen können aufeinanderfolgende, zusammengesetzte Koordinatentransformationen direkt durch eine Multiplikation der zugehörigen homogenen Transformationsmatrizen berechnet werden. Bezogen auf Bild 2.1 kann demnach die Transformation vom Werkstückkoordinatensystem $(KS)_W$ in das Inertialkoordinatensystem $(KS)_0$ als

$${}^0\mathbf{T}_W = {}^0\mathbf{T}_B {}^B\mathbf{T}_W \quad (2.11)$$

beschrieben werden. Aufgrund der Zugehörigkeit der homogenen Transformationsmatrixen zur SE(3) Lie-Gruppe (siehe [Hal15]) gilt außerdem allgemein

$${}^j\mathbf{T}_i = ({}^i\mathbf{T}_j)^{-1}. \quad (2.12)$$

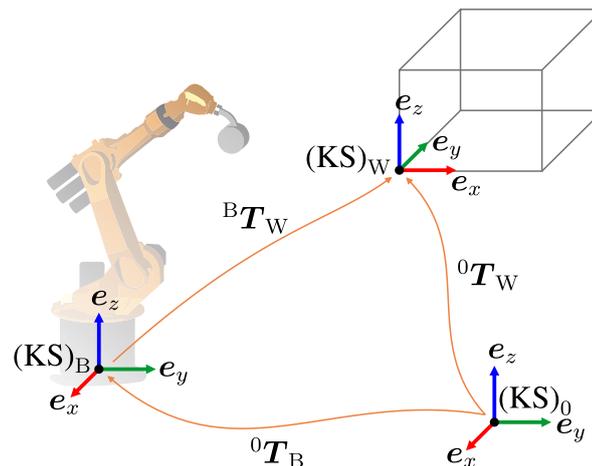


Bild 2.1: Wesentliche in der Arbeit genutzte Koordinatensysteme und -transformationen

2.3 Inverse Dynamik

Mit der inversen Dynamik werden aus einer gegebenen Gelenkbewegung (Winkelverlauf $\mathbf{q}(t)$, Geschwindigkeitsverlauf $\dot{\mathbf{q}}(t)$, Beschleunigungsverlauf $\ddot{\mathbf{q}}(t)$) die resultierenden notwendigen Antriebsmomente $\boldsymbol{\tau}(t)$ berechnet. Bei allen genannten Vektoren beschreibt das i -te Element des Vektors den jeweiligen Wert des i -ten Roboterjoints. Die inverse Dynamik wird zum Beispiel bei der Auslegung der zu verwendenden Gelenke und Aktoren, der Steuerung und Regelung sowie der Bahnplanung eingesetzt. Im Folgenden wird zunächst in Abschnitt 2.3.1 die klassische Berechnung der Antriebsmomente inklusive Berücksichtigung der Motoren und Getriebe vorgestellt. In Abschnitt 2.3.2 wird das in der Arbeit verwendete Reibmodell erläutert.

2.3.1 Berechnung der Antriebsmomente

Die Berechnung der Antriebsmomente spielt eine maßgebliche Rolle bei der später folgenden Modellierung des bewegungsabhängigen Energiebedarfs (siehe Abschnitt 2.5). Wird der Antriebss-

trang zunächst vernachlässigt, ergeben sich bei einem System ohne externe Kräfteinflüsse die abtriebsseitigen Momente τ_G^* nach [Cra05] zu

$$\tau_G^* = M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}). \quad (2.13)$$

In der Trägheits- bzw. Massenmatrix M werden abtriebsseitige Massen und Massenträgheiten des Manipulators berücksichtigt. Der Vektor \mathbf{c} repräsentiert die Zentrifugal- und Coriolisterme, mit dem Vektor \mathbf{g} werden Gravitationsanteile beschrieben. Das Vorgehen zur Aufstellung der dynamischen Gleichungen wird ausführlich in [FO00] vorgestellt. Zur Berücksichtigung der Trägheiten des Antriebsstrangs wird die vorige Gleichung wie folgt erweitert:

$$\tau_G = \tau_G^* + \text{diag}(J_{zz_{\Lambda_1}}, \dots, J_{zz_{\Lambda_n}}) \ddot{\mathbf{q}}. \quad (2.14)$$

Dabei beschreibt $J_{zz_{\Lambda_i}}$ die abtriebsseitige Antriebsstrangträgheit des i -ten Gelenks um die jeweils zugehörige Rotationsachse. In der Antriebsstrangträgheit werden Motorwellenträgheit und Getriebeträgheit zusammengefasst, da sich die beiden Parameter im montierten Zustand nicht getrennt voneinander identifizieren lassen.

Zur Erfüllung der hohen Positioniergenauigkeitsanforderungen werden bei Industrierobotern üblicherweise spielfreie vorgespannte Getriebe verbaut, die in der Regel als Zykloidgetriebe oder Wellgetriebe (“Harmonic Drive“) ausgeführt sind [GF01]. Diese verursachen prinzipbedingt hohe und somit nicht zu vernachlässigende Reibmomente in den Gelenken. Bei der Berechnung der motorseitigen Antriebsmomente τ_M müssen die Reibeffekte entsprechend berücksichtigt werden. Ein gängiger Modellierungsansatz ist die Verwendung eines zweiteiligen Reibmodells [BI05], bestehend aus COULOMBScher Reibung (Gleitreibung) und viskoser Reibung (Dämpfung). Die Reibung wird im Modell durch die Funktion h_i abgebildet. Das motorseitige Antriebsmoment ergibt sich für jedes Gelenk i zu

$$\tau_{M_i} = \frac{1}{u_{G_i}} \tau_{G_i} + h_i(\dot{\varphi}_i), \quad \text{mit} \quad (2.15)$$

$$h_i(\dot{\varphi}_i) = r_{C_i} \text{sign}(\dot{\varphi}_i) + r_{V_i} \dot{\varphi}_i \quad \text{und} \quad (2.16)$$

$$\dot{\varphi}_i = u_{G_i} \dot{q}_i. \quad (2.17)$$

Hierbei beschreibt u_{G_i} die Getriebeübersetzung, φ_i den Motorwinkel, $\dot{\varphi}_i$ die Motorgeschwindigkeit, r_{C_i} den COULOMBSchen und r_{V_i} den viskosen Reibkoeffizienten, jeweils bezogen auf das i -te Gelenk. Analog zur Modellierung der Antriebsstrangträgheit werden auch im Reibmodell die Motor- und Getriebereibung zusammengefasst.

Bei dem verwendeten Reibmodell ergibt sich der in Bild 2.2 in blau dargestellte qualitative Reibmomentverlauf in Abhängigkeit der Motorgeschwindigkeit. Durch die Verwendung der Signumfunktion entsteht ein Sprung der modellierten Reibung bei einem Vorzeichenwechsel der

Geschwindigkeit, was sowohl bei der Modellierung als auch bei der Identifikation durch die Unstetigkeit zu unerwünschtem Verhalten führen kann. Für einen kontinuierlichen Übergang kann das Reibmoment stattdessen durch eine stetig differenzierbare Funktion approximiert werden [HAOR15], beispielsweise durch Nutzung des Tangens Hyperbolicus:

$$h_i \approx h_i \tanh(b \dot{\varphi}_i). \quad (2.18)$$

Mit dem Parameter b kann der Anstieg des Reibmoments in dem Bereich geringer Geschwindigkeiten angepasst werden. Es ergibt sich der in Bild 2.2 in grün dargestellte kontinuierliche Verlauf. Stick-Slip-Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da diese nur bei sehr geringen Geschwindigkeiten auftreten und somit zu vernachlässigbar geringen Änderungen der mechanischen Leistung führen.

2.3.2 Temperaturabhängiges Reibmodell

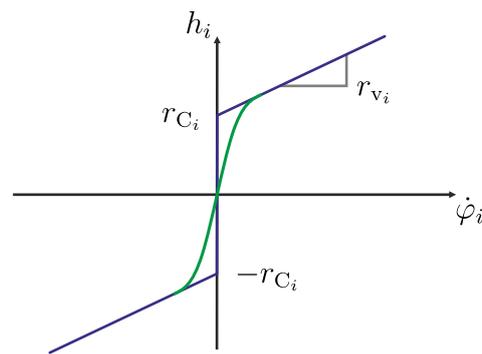
Die viskose Dämpfung wird maßgeblich durch die Viskosität der verwendeten Schmierstoffe bestimmt. Die Viskosität besitzt nach [WJVS17] eine signifikante Temperaturabhängigkeit. Diese wird insbesondere im Bereich der Robotik nur in wenigen Veröffentlichungen berücksichtigt (zum Beispiel zu finden in [BWSTB10]), in den meisten Fällen werden temperaturunabhängige Modelle angewendet (z. B. [HGGJ10, PBBG15] oder es findet nur eine sehr grobe Unterscheidung (Zustände „warm“ und „kalt“ [GGP⁺17]) statt. Bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit hat sich hingegen gezeigt, dass eine unzureichend genaue Berücksichtigung oder komplette Vernachlässigung der Robotertemperatur zu signifikanten Abweichungen bei der Modellierung der Antriebsmomente und demzufolge des Leistungs- und Energiebedarfs führt (siehe Abschnitt 3.3). Im Reibmodell wird daher die konstante viskose Dämpfungskonstante durch eine temperaturabhängige Größe ersetzt, sodass sich das Reibmodell zu

$$h_i(\dot{\varphi}_i, \vartheta_i) = r_{C_i} \operatorname{sign}(\dot{\varphi}_i) + r_{v_i}(\vartheta_i) \dot{\varphi}_i \quad (2.19)$$

ergibt, wobei ϑ_i die jeweilige Gelenktemperatur beschreibt. Da in der Regel nur in den Servomotoren Temperatursensoren verbaut sind, aber nicht in den Getrieben, kann näherungsweise die Motortemperatur zur qualitativen Abbildung des thermischen Zustands genutzt werden. In dem Fall sollten die Reibparameter auch entsprechend in Abhängigkeit der Motortemperatur identifiziert werden.

2.4 Bahnplanung für Industrieroboter

In der Arbeit wird unter anderem untersucht, ob ein energetisch effizienterer Betrieb des Roboters durch Anpassung der Parameter und/oder Algorithmen der Bahnplanung erreicht werden kann.



- COULOMBSch-viskoses Reibmodell mit sign-Funktion
- Approximation des Reibmodells mit tanh-Funktion

Bild 2.2: Reibmoment in Abhängigkeit der Motor Geschwindigkeit, dargestellt für das unmodifizierte COULOMBSch-viskose Reibmodell und die Approximation mittels tanh-Funktion

Basis hierfür bilden die im Folgenden gezeigten Bahnplanungsansätze. In Abschnitt 2.4.1 erfolgen zunächst eine Erklärung der Begrifflichkeiten und eine Einführung in die Berechnung von Bahnprofilen. Anschließend werden in den Abschnitten 2.4.2 und 2.4.3 die beiden grundlegenden Bewegungstypen vorgestellt.

2.4.1 Grundlagen der Bahnplanung

In der Literatur werden die Begriffe zur Bahnplanung nicht immer einheitlich verwendet, weshalb die hier verwendete Nomenklatur kurz vorgestellt wird. Grundsätzlich wird zwischen dem Weg und der Bahn unterschieden. Als **Weg** wird nach [NKO16] der „geometrische Ort aller Punkte/Lagen bezeichnet, die mit der Kinematik zu durchfahren sind“. Bei einer **Bahn** liegen darüber hinaus auch Informationen über den zeitlichen Ablauf der Bewegung vor. Die Definitionen der Weg- und Bahnplanung korrespondieren hierzu: Bei der **Wegplanung** wird nur der geometrische Weg vom Start zum Zielpunkt definiert, während bei der **Bahnplanung** zusätzlich die zeitabhängigen Profile von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Gelenke (und, daraus über den kinematischen Zusammenhang resultierend, des Endeffektors) bestimmt werden. Zusätzlich eingefügte Punkte zwischen Start- und Zielpunkt werden als **Viapunkte** bezeichnet. Die Kombination aus Start- und Zielpunkt sowie eventuellen Viapunkten wird im Folgenden als **Aufgabe** bezeichnet, die wiederum noch keinerlei Informationen über Weg oder Bahn beinhaltet.

Zur Berechnung der zeitlichen Verläufe von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden bei Einzelachsenanwendungen in der Regel Beschleunigungstrapezprofile eingesetzt. Bei zeitminimalen Bahnen ergibt sich die Geschwindigkeit aus der maximalen Motordrehzahl (sofern keine weiteren, anwendungsspezifischen Einschränkungen vorliegen) und die Beschleunigung aus den maximal zulässigen Motormomenten. Durch Auf- und Abrampen der Beschleunigung kann der entstehende

Ruck begrenzt werden, was sich positiv auf die Lebensdauer und das Schwingungsverhalten des Systems auswirkt.

Grundsätzlich eignet sich dieses Vorgehen auch für Industrieroboter. Hierbei werden die zu planenden Bewegungen aller Gelenke üblicherweise über eine gemeinsame Bahnkoordinate $s(t)$ synchronisiert, mit deren Hilfe sich die Bahnplanung auf die Berechnung eines einzelnen, übergeordneten Profils beschränkt. So ergibt sich eine Bahn $\mathbf{q}(t)$ im Gelenkraum von Startpunkt \mathbf{q}_S zum Zielpunkt \mathbf{q}_Z über

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_S + s(t)(\mathbf{q}_Z - \mathbf{q}_S). \quad (2.20)$$

Durch die mechanische Kopplung sowie die konfigurationsabhängige Massenträgheit der Gelenke ergibt sich bei Verwendung von Beschleunigungstrapezen häufig keine optimale Ausnutzung der Antriebe, da die zulässigen Antriebsmomente aller Gelenke zu keinem Zeitpunkt der Bahn überschritten werden dürfen. So würde zum Beispiel bei einer Bewegung aus der Strecklage heraus die hohe Massenträgheit zu einer Drosselung der Beschleunigung für die gesamte Bewegung führen. Daher wird bei Industrierobotern mit hohen dynamischen Anforderungen stattdessen ein Verlauf für $s(t)$ gesucht, bei dem zu jedem Zeitpunkt mindestens eine der dynamischen Randbedingungen der Antriebe ausgeschöpft wird. Das entstehende nichtlineare Optimierungsproblem wird in der Regel iterativ unter Verwendung nichtlinearer Optimierungsverfahren gelöst. Detaillierte Beschreibungen und Lösungen sind in [Hei99, Aur04] zu finden.

Die Synchronisierung der Einzelachsbahnen führt neben dem reduzierten Planungsaufwand auch zu optisch flüssigeren Bewegungen. Prinzipbedingt bewirkt die Synchronisation allerdings auch eine gleichzeitige Beschleunigung und Verzögerung aller Gelenke, was deutliche Nachteile hinsichtlich der Energieeffizienz der Bewegung mit sich bringen kann, wie in Kapitel 5 erläutert wird.

2.4.2 CP-Bewegungen

Bei Continuous-Path-Bewegungen oder kurz CP-Bewegungen wird dem Endeffektor ein definierter Weg im Arbeitsraum vorgegeben. Prinzipiell ist die Vorgabe jeder beliebigen Geometrie denkbar, häufig bieten die Robotersteuerungen bereits vorgefertigte Befehle für Standardformen wie Geraden (LIN-Bewegung), Kreisbögen (CIRC-Bewegung) und so weiter. CP-Bewegungen werden in der Regel immer dann benutzt, wenn die Einhaltung eines definierten Weges prozessbedingt relevant ist, zum Beispiel beim Bahnschweißen, Kleben oder Fräsen. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden häufig nach prozesseitigen Anforderungen vorgegeben, wodurch die dynamischen Grenzen des Manipulators nicht ausgereizt werden.

Die Bewegung der einzelnen Gelenke ergibt sich durch Berechnung einer Bahn im Arbeitsraum und anschließende Umrechnung in den Gelenkraum anhand der inversen Kinematik gemäß (2.5). Aufgrund der Abhängigkeiten der Rotationswinkel untereinander ist die Vorgabe einer Bahn im Arbeitsraum deutlich komplexer als im Gelenkraum, sodass für die Interpolation der Rotationswinkel spezielle Verfahren genutzt, die ausführlich in [DKL98] beschrieben werden. Darüber hinaus

müssen singuläre Konfigurationen des Manipulators bei der Planung berücksichtigt und vermieden werden. Durch den nichtlinearen Zusammenhang entsteht bei Vorgabe einer CP-Bewegung im Arbeitsraum eine komplexe Bewegung im Gelenkraum. Eine beispielhafte LIN-Bewegung ist in Bild 2.3a dargestellt, die zugehörigen Gelenkwinkelverläufe im Gelenkraum sind in Bild 2.4 zu finden. Die Wegverlängerung im Gelenkraum ist gut an den Positionsverläufen des vierten und sechsten Gelenks zu erkennen, die trotz Übereinstimmung des Start- und Zielgelenkwinkels eine Ausgleichsbewegung durchführen müssen, damit sich eine Gerade im Arbeitsraum ergibt.

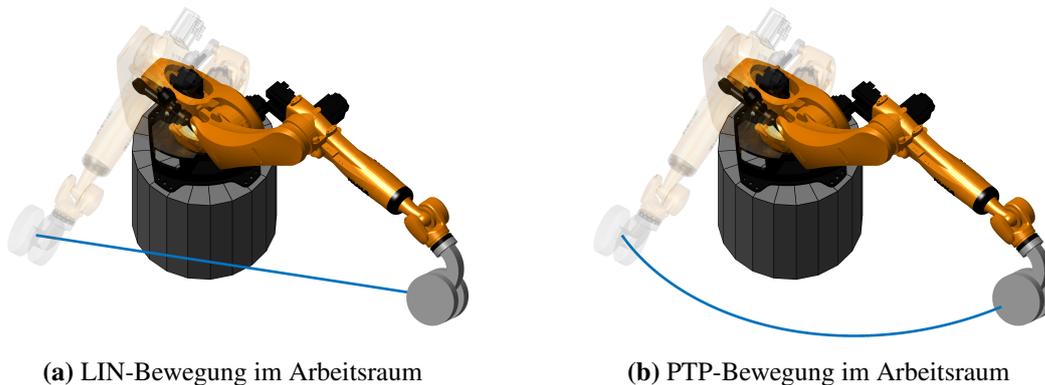


Bild 2.3: Lösung der gleichen Aufgabe mit verschiedenen Bewegungsfunktionen

2.4.3 PTP-Bewegungen

Bei einer Point-To-Point-Bewegung oder kurz PTP-Bewegung werden nur Start- und Zielpunkt der Bewegung vorgegeben, der geometrische Weg des Endeffektors ist beliebig definierbar. PTP-Bewegungen werden zum Beispiel bei Pick-and-Place-Aufgaben, beim Punktschweißen, für die Planung von An- und Rückstellbewegungen oder zahlreichen weiteren Anwendungen eingesetzt. Typischerweise werden PTP-Bewegungen als schnellstmögliche Bahn vom Start- zum Zielpunkt geplant. Hierzu wird in der Regel für jedes Gelenk eine direkte Bewegung von der Start- zur Zielkonfiguration durchgeführt, also eine Gerade im Gelenkraum. Abhängig von den verwendeten Bahnplanungsmechanismen stellt eine Gerade im Gelenkraum nicht immer zwingend die schnellste Bahn dar (siehe [ZEKO17]), es wird jedoch mit vergleichsweise geringem Planungsaufwand bereits eine sehr gute Näherung erreicht. Bei seriellen Knickarmrobotern ergibt sich für den Endeffektor durch die Verwendung rotatorischer Gelenke ein Weg aus überlagerten Kreisbewegungen der Einzelgelenke, wie in Bild 2.3b dargestellt. Die zugehörigen resultierenden Verläufe der Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und abtriebsseitigen Momente sind in Bild 2.5 abgebildet. An den Geschwindigkeitsverläufen ist die Synchronisation der Bewegungen auf die langsamste Achse deutlich zu erkennen. Trotz der gleichen Bewegungsvorschrift für alle Gelenke ergeben sich aufgrund der nichtlinearen inversen Dynamik unterschiedliche Momentenverläufe.

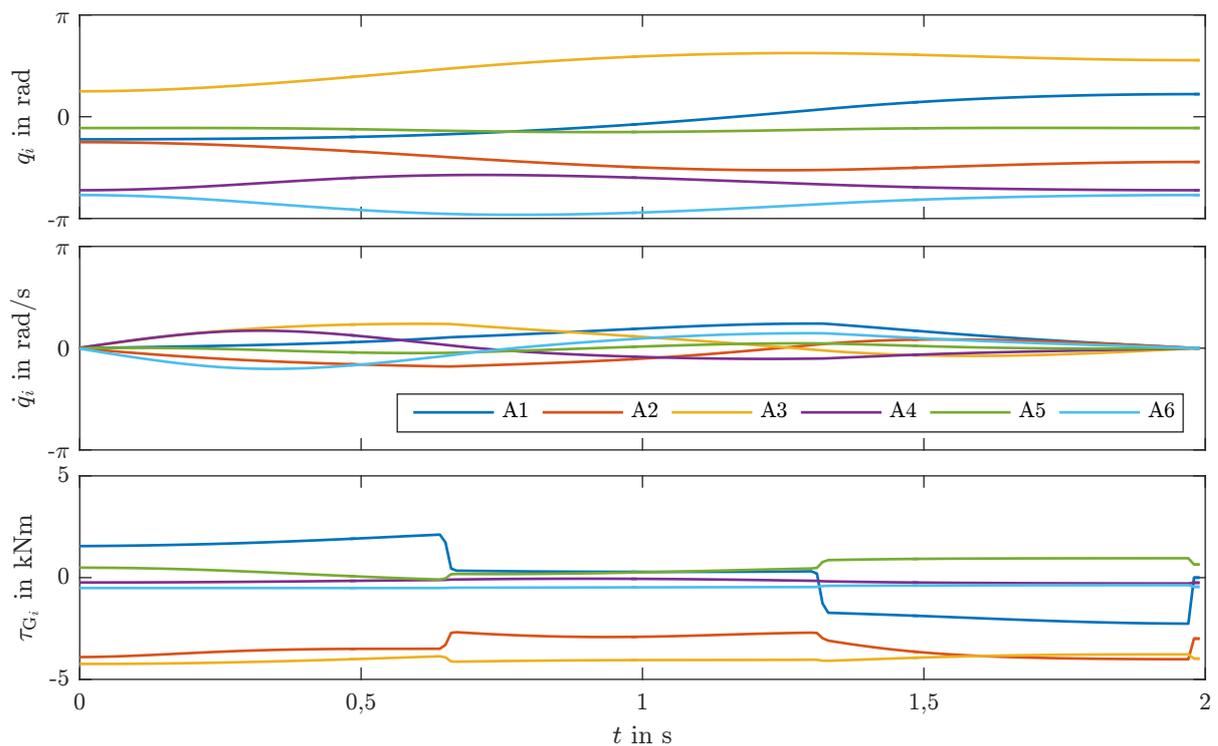


Bild 2.4: Verläufe der Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und der abtriebsseitigen Momente der Gelenke A1 bis A6 zur LIN-Bewegung aus Bild 2.3a

2.5 Modellierung der aufgenommenen Netzleistung und -energie

In den vorherigen Abschnitten wurden überwiegend allgemeine Ansätze zur mathematischen Modellierung von Industrierobotern eingeführt. Im Folgenden wird die Modellierung der Leistungs- und Energiebilanzen der elektrischen Antriebsstränge vorgestellt, die in der Arbeit als das „Energiediagramm“ bezeichnet wird. Anhand des Modells sollen qualitative und quantitative Aussagen über die Energieflüsse innerhalb der Antriebsstränge und daraus resultierend über den netzseitigen Leistungs- und Energiebedarf getroffen werden. Hierzu wird zunächst der allgemeine Aufbau der Antriebsstränge bei Industrierobotern in Abschnitt 2.5.1 vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 2.5.2 das Energiemodell ausführlich beschrieben.

2.5.1 Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs

Der typische Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs eines Industrieroboters ist in Bild 2.6 dargestellt. Als Motoren werden in der Regel dreiphasige permanenterrregte Synchronmaschinen (PMSM) eingesetzt. Neben guten dynamischen Eigenschaften weisen diese auch einen hohen Wirkungsgrad auf (etwa 90 % oder höher, abhängig von Bauform, Leistungsklasse, Betriebspunkt usw.). Die PMSM werden von Servoumrichtern angesteuert. Bei modernen Industrierobotern werden in der Regel alle Antriebsachsen über einen gemeinsamen Gleichrichter aus dem Netz

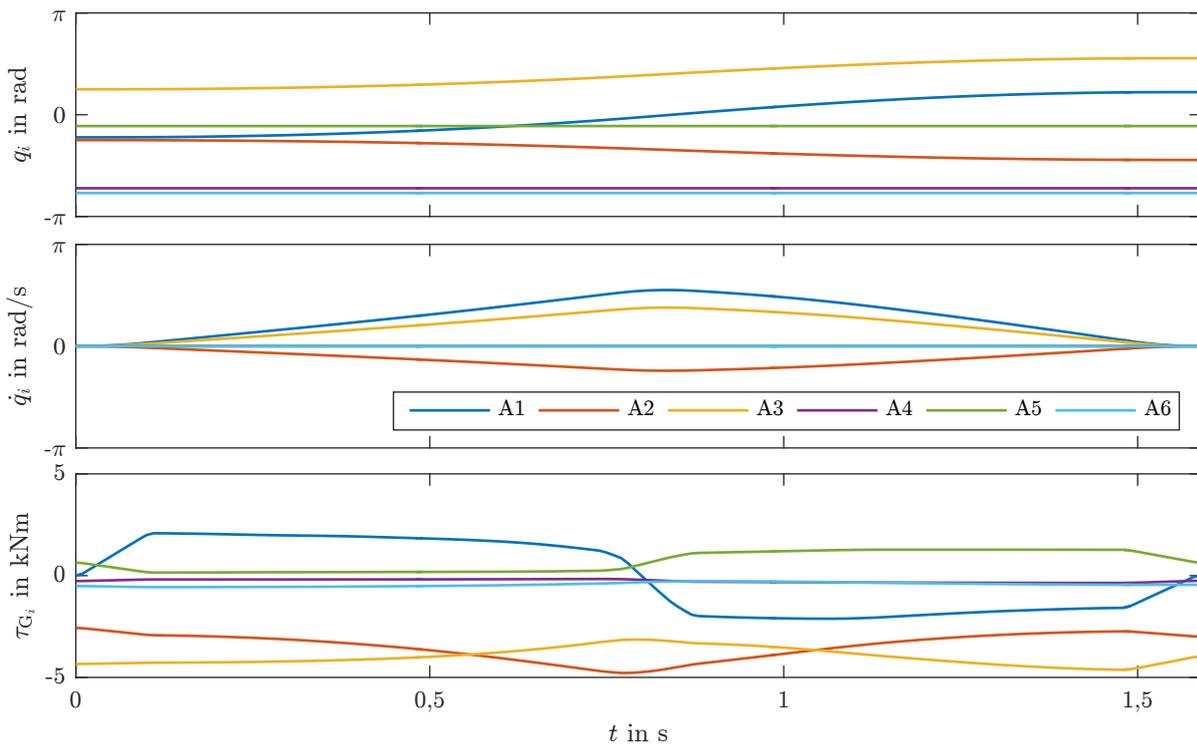


Bild 2.5: Verläufe der Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und der abtriebsseitigen Momente der Gelenke A1 bis A6 zur PTP-Bewegung aus Bild 2.3b

gespeist. Auf der als Zwischenkreis bezeichneten Gleichspannungsebene sind somit alle Achsen gekoppelt, was auch als Zwischenkreisverbund oder kurz ZK-Verbund bezeichnet wird. Da die Synchronmaschinen sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden können, ermöglicht dieser Aufbau einen bidirektionalen Energiefluss und somit den Energieaustausch zwischen den Antriebsachsen. Zur Glättung der Gleichspannung kommt üblicherweise eine ZK-Kapazität in Form von Elektrolytkondensatoren zum Einsatz. In der Regel werden bei Industrierobotern aufgrund der höheren Anschaffungskosten keine rückspeisefähigen Versorgungsmodule verbaut. Überschüssige generatorisch gewandelte Energie wird daher über einen Bremswiderstand als Wärme dissipiert, der dem Zwischenkreis zugeschaltet wird, sobald die Zwischenkreisspannung einen definierten Schwellenwert überschreitet. Die Zu- und Abschaltung des Bremswiderstands erfolgt über einen zusätzlichen Leistungshalbleiter, der als Brems-Chopper bezeichnet wird.

2.5.2 Berechnung der aufgenommenen Netzleistung und -energie

Aus dem in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Aufbau des Systems lässt sich der Modellierungsansatz zur Berechnung der aufgenommenen Netzleistung und -energie herleiten. Ausgehend von einer gegebenen Bahn wird der zeitliche Verlauf der mechanischen Leistung $P_{\text{mech},i}(t)$ jedes Gelenks vom Prozess vorbestimmt. Diese ergibt sich als Produkt des motorseitigen Moments $\tau_{M,i}$ und der Motorgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_i$:

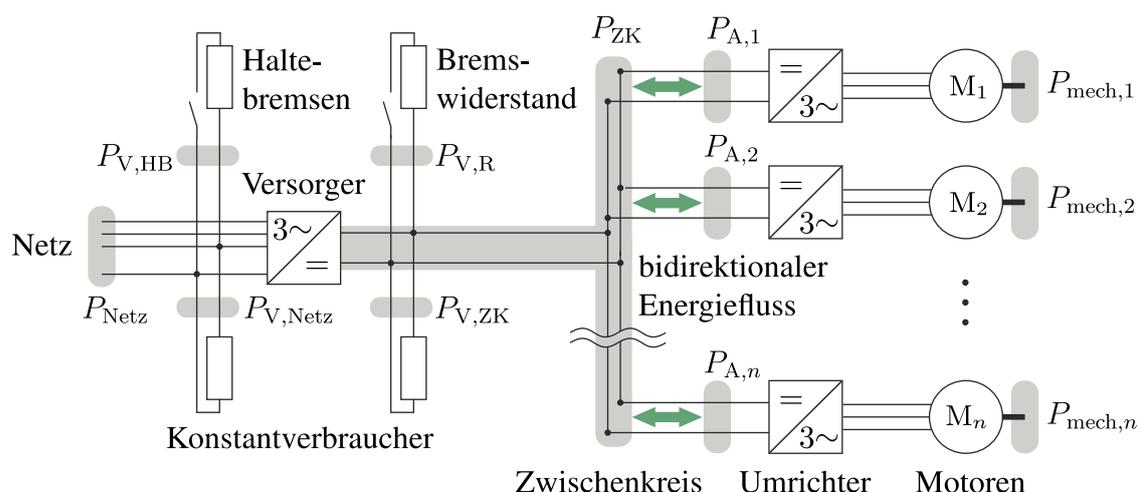


Bild 2.6: Ersatzschaltbild für die Modellierung der aufgenommenen Netzleistung und -energie

$$P_{\text{mech},i}(t) = \tau_{M,i}(t) \dot{\varphi}_i(t). \quad (2.21)$$

Der zeitliche Geschwindigkeitsverlauf wird während der Bahnplanung generiert. Aus den Bahndaten kann anhand der inversen Dynamik nach Abschnitt 2.3 der Momentenverlauf bestimmt werden. Die Antriebsstränge (also die Kombinationen aus Motor und Umrichter jedes Gelenks) werden über einen Wirkungsgrad $\eta_{A,i}$ berücksichtigt:

$$P_{A,i}(t) = P_{\text{mech},i}(t) \eta_{A,i}^{-\kappa_i(t)}, \quad \text{mit} \quad (2.22)$$

$$\kappa_i(t) = \text{sign}(P_{\text{mech},i}(t)). \quad (2.23)$$

Der Wirkungsgrad $\eta_{A,i}$ nimmt dabei Werte zwischen Null und Eins an. Grundsätzlich hängt der Wirkungsgrad einer PMSM vom Betriebspunkt der Maschine ab [CTKM10, LE03]. Die Gelenkreibung wird in der Regel nicht komponentenweise, sondern für den gesamten Antriebsstrang bestimmt und enthält somit auch die Motorreibung, die zumindest teilweise für die Betriebspunktabhängigkeit des Wirkungsgrads verantwortlich ist. Der Wirkungsgrad wird daher vereinfacht als betriebspunktunabhängig modelliert.

Die Abhängigkeit von der Wandlungsrichtung wird durch den Exponenten κ berücksichtigt, der im motorischen Betrieb den Wert Eins, im generatorischen Betrieb den Wert Minus Eins annimmt. Somit ist die Ausgangsgröße der verlustbehafteten Leistungswandlung immer kleiner als die Eingangsgröße. Während die Wirkungsgrade der Umrichter der einzelnen Gelenke sich in der Regel nur geringfügig unterscheiden, sind bei den Motoren größere Disparitäten zu verzeichnen. Insbesondere bei den kleineren Motoren der Handachsen sind die Motorwirkungsgrade häufig niedriger als bei den großen Motoren der Hauptachsen. Die Berücksichtigung gelenkspezifischer

Wirkungsgrade erhöht daher die Modelliergenauigkeit. Die Wirkungsgrade beziehen sich dabei auf die Kombination aus Umrichter und Motor.

Falls das Modell zum Monitoring der aktuellen Leistungsaufnahme oder zum Einsatz in lernenden Verfahren im laufenden Betrieb genutzt werden soll, können die Antriebsstrangleistungen $P_{A,i}$ auch direkt als Produkt aus den gemessenen Motorströmen und den Istgeschwindigkeiten der Gelenke berechnet werden. Das Verfahren der modellbasierten Berechnung der Netzleistung aus den gemessenen Motorströmen wurde als europäisches Patent angemeldet [EHKO16].

Zur Berechnung der Leistungsbilanz im Zwischenkreis wird eine Hilfsgröße P_{ZK} eingeführt, die sich aus der Summe der Antriebsleistungen aller n Achsen ergibt:

$$P_{ZK}(t) = P_{V,ZK} + \sum_{i=1}^n P_{A,i}(t). \quad (2.24)$$

Konstantverluste der Komponenten auf Zwischenkreisspannungsebene werden in einer konstanten Größe $P_{V,ZK}$ zusammengefasst. Da die in Robotersteuerungen verbauten ZK-Kondensatoren üblicherweise nur zur Spannungsglättung und nicht zur Speicherung größerer Energiemengen ausgelegt sind, wird die ZK-Kapazität bei der Modellierung vernachlässigt. Durch diese Vereinfachungen kann auf eine Modellierung der Ströme und Spannungen der einzelnen Komponenten (und somit auch auf die Identifikation und Parametrierung der elektrischen Kenngrößen) für die Leistungsberechnung verzichtet werden, was den Modellierungs- und Identifikationsaufwand erheblich verringert. Für die Validierung dieser und der folgenden getroffenen Vereinfachungen sei auf Kapitel 3 verwiesen.

Bei einer negativen Leistungsbilanz im Zwischenkreis, also für negative Werte von P_{ZK} , wird die überschüssige generatorische Leistung über einen Bremswiderstand dissipiert:

$$P_{V,R}(t) = \theta(-P_{ZK}(t)) P_{ZK}(t). \quad (2.25)$$

Durch die Modellierung auf Leistungsebene entfällt auch die Notwendigkeit zur Messung des ohmschen (Brems-)Widerstands. Im Bremswiderstand ist nur ein unidirektionaler Energiefluss möglich, was im Modell durch die HEAVISIDE-Funktion θ abgebildet wird. Damit die Funktion für den generatorischen Betrieb den Wert Eins annimmt, wird als Funktionsargument die Zwischenkreisleistung mit invertiertem Vorzeichen gewählt. Somit ergibt sich immer eine positive Netzleistung P_{Netz} :

$$P_{Netz}(t) = \theta(P_{ZK}(t)) P_{ZK}(t) + P_{V,Netz} + P_{V,HB}. \quad (2.26)$$

Im Term $P_{V,Netz}$ werden alle netzseitigen Verbraucher, also elektrische Komponenten des Robotersystems, die nicht durch den Zwischenkreis versorgt werden, zusammengefasst. Hierunter

fallen zum Beispiel Steuerungs-PC, Lüfter, Bedienpanels, digitale I/O-Klemmen und so weiter. Die Verlustleistung zum Lüften der elektromagnetisch aktuierten Haltebremsen $P_{V,HB}$ wird hiervon gesondert angegeben, um auch Bewegungen mit variablen Verfahzeiten und/oder Bremsenschließzeiten im Modell abbilden zu können. Der netzseitige Energiebedarf für eine Bewegung der Dauer T ergibt sich über den integralen Zusammenhang von Leistung und Energie zu

$$E_{\text{Netz}} = \int_0^T P_{\text{Netz}}(t) dt. \quad (2.27)$$

Analog dazu ergeben sich weitere Größen wie zum Beispiel die Menge der während der Bewegung dissipierten Bremsenergie $E_{V,R}$ aus dem Integral der zugehörigen Leistung $P_{V,R}(t)$ und so weiter. Sofern der Energiebedarf nicht explizit als zeitabhängige Größe gekennzeichnet ist, bezieht sich die Angabe im Rahmen der Arbeit immer auf das Integral über die gesamte Verfahzeit T , also $E_{\text{Netz}} \hat{=} E_{\text{Netz}}(T)$.

Die Modellierung der Leistungs- und Energieaufnahme von Industrierobotern lässt sich wie folgt zusammenfassen: Für einer vorgegebene Bahn lassen sich unter Verwendung der inversen Dynamik die mechanischen Leistungsverläufe jedes Gelenks berechnen. Im nächsten Schritt erfolgt die Bestimmung der Verluste der jeweiligen elektrischen Antriebskomponenten. Anschließend werden Zwischenkreiskopplung und Bremswiderstand berücksichtigt. Das Modell wird um netzseitige Verbraucher erweitert, sodass schließlich die Netzleistung und hieraus die netzseitige Energieaufnahme angegeben werden können.

3 Experimentelle Validierung des Energiemodells

In diesem Kapitel wird die experimentelle Validierung des zuvor eingeführten Energiemodells vorgestellt. Diese dient zum Nachweis der Gültigkeit und Plausibilität des Modellierungsansatzes. Für die Validierung werden zunächst die Modellparameter für zwei Industrieroboter verschiedener Baugrößen bestimmt, anschließend werden qualitative und quantitative Vergleiche zwischen simulierter und gemessener elektrischer Leistungs- und Energieaufnahme durchgeführt. Die Messumgebung sowie die verwendeten Roboter werden in Abschnitt 3.1 vorgestellt. Anschließend wird die Identifikation der Ersatzverlustleistungen in Abschnitt 3.2 erläutert. Die Identifikation der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Abhängigkeit der viskosen Dämpfung von der Robotertemperatur wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. Abschließend folgen die Ergebnisse der Vergleiche von Modell und Messung in Abschnitt 3.4.

3.1 Prüfstand und Messumgebung

Zur Validierung des Modells werden Messungen an zwei industriellen Knickarmrobotern mit unterschiedlicher Baugröße und Traglast durchgeführt, deren Kenndaten in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 vorgestellt werden. Anschließend wird der Messaufbau in Abschnitt 3.1.3 erläutert.

3.1.1 KUKA KR 16

Der KUKA KR 16-2 (im Folgenden als KR 16 bezeichnet) ist ein industrieller Knickarmroboter und zählt mit einer maximalen Endeffektorlast von 16 kg zu Robotern im niedrigen Traglastbereich. Das Eigengewicht des Roboters beträgt etwa 235 kg. Der Roboter ist mit permanenterregten Synchron-Servomotoren mit einer summierten Nennleistung von 8,2 kW ausgestattet. Die maximale gemessene Netzleistungsaufnahme des Roboters beträgt bei 20 °C kurzzeitig (in Beschleunigungsphasen) bis zu etwa 8 kW. Als Steuerungssystem wird eine unmodifizierte KUKA KR C4 genutzt, bei der sich die Antriebsachsen durch die Verwendung eines gemeinsamen Versorgers im Zwischenkreiverbund befinden, wie zuvor in Abschnitt 2.5.1 erläutert. Überschüssige generatorische Energie wird über einen Bremswiderstand dissipiert, eine Möglichkeit zur Rückspeisung in das Netz ist nicht vorhanden. Bei allen Messungen wurde ein nach Herstellervorgabe geformtes Testgewicht mit einer Masse von 15 kg verwendet. Weitere Zusatzlasten werden in den Versuchen nicht genutzt. Die Kinematik ist in Form von Denavit-Hartenberg-Parametern (DH-Parametern) nach [HD64] in Tabelle 3.1 angegeben. Der Roboter ist als CAD-Grafik auf der linken Seite in Bild 3.1 dargestellt.

Der in den Messungen verwendete KR 16 aus dem Institut für Mechatronische Systeme ist in Bild 3.2 zu sehen.

3.1.2 KUKA KR 210

Der KUKA KR 210 R2700 Extra (kurz KR 210) Knickarmroboter besitzt mit einer Traglast von 210 kg eine typische Baugröße für die Verwendung in der Automobilindustrie, insbesondere im Karosseriebau. Als Steuerungssystem wird bei dem verwendeten Modell analog zum KR 16 die KR C4 eingesetzt, die sich im Wesentlichen nur in den verbauten Leistungsklassen der Servoumrichter unterscheidet. Die addierte Nennleistung der Motoren beträgt 19,8 kW, die maximale gemessene netzseitige Leistungsaufnahme beträgt etwa 28 kW. Mit einem Eigengewicht von etwa 1068 kg besitzt der KR 210 ein deutlich höheres Verhältnis von Traglast zu Eigengewicht (KR 210 etwa 5:1, KR 16 etwa 15:1). Auch das Verhältnis von Robotergewicht zu Nennmotorleistung unterscheidet sich deutlich (KR 210 etwa 55:1, KR 16 etwa 30:1) bei vergleichbaren Getriebefaktoren. Darüber hinaus verfügt der KR 210 über einen hydraulischen Gewichtsausgleich an der zweiten Achse. Dieser muss bei der Berechnung der Antriebsmomente berücksichtigt werden, sodass die inverse Dynamik (2.13) für den KR 210 entsprechend [MPB14] erweitert wird. Für die Messungen im Rahmen der Arbeit wurde ein Roboter im Prüffeld der KUKA Roboter GmbH in Augsburg verwendet, der mit einem Testgewicht am Endeffektor mit einer Masse von 200 kg ausgestattet ist. Eine CAD-Grafik des Roboters ist in Bild 3.1 auf der rechten Seite abgebildet. Die DH-Parameter des Roboters sind in Tabelle 3.2 angegeben.

3.1.3 Messaufbau zur Bestimmung der Leistungsaufnahme

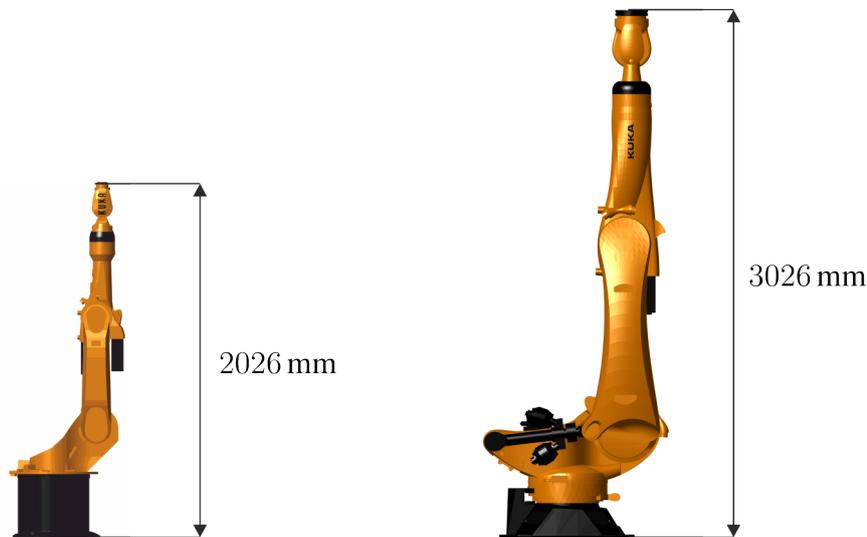
Zur Bestimmung der netzseitigen Leistungsaufnahme wurde ein Yokogawa WT3000 Leistungsanalysator verwendet. Das Messgerät bietet eine Grundgenauigkeit von $\pm 0,02\%$ vom Messwert und eine hohe Messbandbreite von Gleichspannung bis zu Frequenzen von 1 MHz [Yok11]. Zur messgerätinternen Berechnung der Leistung werden die Phasenspannungen und -ströme der Netzleitung gemessen. Für Messungen von Strömen mit Effektivwerten bis zu 30 A werden die Direkteingänge des Messgeräts verwendet. Bei größeren auftretenden Strömen können stattdessen

Tabelle 3.1: DH-Parameter des KR 16 [KUK18a]

i	θ_i	d_i in mm	a_i in mm	α_i in rad
1	q_1	675	260	$-\pi/2$
2	q_2	0	680	0
3	$q_3 - \pi/2$	0	-35	$\pi/2$
4	q_4	-670	0	$-\pi/2$
5	q_5	0	0	$\pi/2$
6	q_6	-158	0	π

Tabelle 3.2: DH-Parameter des KR 210 [KUK18b]

i	θ_i	d_i in mm	a_i in mm	α_i in rad
1	q_1	675	350	$-\pi/2$
2	q_2	0	1150	0
3	$q_3 - \pi/2$	0	-35	$\pi/2$
4	q_4	-1200	0	$-\pi/2$
5	q_5	0	0	$\pi/2$
6	q_6	-215	0	π

**Bild 3.1:** KUKA KR 16 (links) und KUKA KR 210 (rechts) im Größenvergleich

Strommesszangen angeschlossen werden, deren Ausgangsspannung bei Vorgabe der entsprechenden Parameter ebenfalls intern zur Leistungsberechnung genutzt werden kann. Insbesondere im kalten Zustand treten beim KR 210 bei Beschleunigungsvorgängen Ströme um etwa 30 A auf. Messungen am KR 16 werden somit unter Verwendung der direkten Eingänge durchgeführt, während für die Messungen am KR 210 zum Schutz des Messgeräts Agilent 1146A Strommesszangen mit einem Messbereich bis 100 A genutzt werden.

Die Messungen werden im *Cyclic*-Modus ausgeführt, in dem aus den hochfrequent aufgezeichneten Spannungen und Strömen intern unter Berücksichtigung des Phasenwinkels die Effektivleistung berechnet und ausgegeben wird. Der Takt Messwertausgabe wird durch einen externen Rechteckgenerator vorgegeben, als Taktzeit wird die vom Messgerät minimal zugelassene Taktzeit von 10 ms gewählt. Die Messdaten werden als .csv-Datei gespeichert und können mit der herstellereigenen Software *WTViewer* über Ethernet abgerufen werden. Der Laboraufbau ist in Bild 3.2, eine zugehörige schematische Skizze in Bild 3.3 zu sehen.



Bild 3.2: KR 16 und Messumgebung am Institut für Mechatronische Systeme

3.2 Bestimmung der zusammengefassten Verlustleistungen

Zur Anwendung des in Kapitel 2 vorgestellten Modellierungsansatzes müssen zunächst die unbekannt Modellparameter für die beiden betrachteten Robotertypen identifiziert werden. Die Modellierung der Netzleistungsaufnahme basiert im Wesentlichen auf dem zeitlichen Verlauf der mechanischen Leistungen der Gelenke, die sich für jedes Gelenk nach (2.21) aus dem Produkt von Motormoment $\tau_{M,i}(t)$ und Motorgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_{M,i}(t)$ ergeben. Hierbei ist der Verlauf von $\dot{\varphi}_{M,i}(t)$ aus der Bahnplanung bekannt, während Verläufe von $\tau_{M,i}(t)$ bereits für die bei Robotern übliche modellbasierte Momentenvorsteuerung (und gegebenenfalls auch für die Bahnplanung, siehe Abschnitt 2.4) berechnet werden. Dementsprechend wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die kinematischen und dynamischen Parameter bereits bekannt sind. Falls diese nicht vorliegen, lassen sie sich mit gängigen etablierten Verfahren nach [SVDS07] identifizieren. Lediglich das verwendete Reibmodell wird in der vorliegenden Arbeit erweitert. Die Identifikation der temperaturabhängigen Reibparameter wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. Neben der Reibung müssen für die Modellierung der Leistungs- und Energieverläufe demnach noch folgende Modellparameter bestimmt werden:

- Antriebsstrangwirkungsgrade $\eta_{A,i}$,
- konstante Verlustleistung zum Lüften der Haltebremsen $P_{V,HB}$,
- konstante Verlustleistung im Zwischenkreis $P_{V,ZK}$,

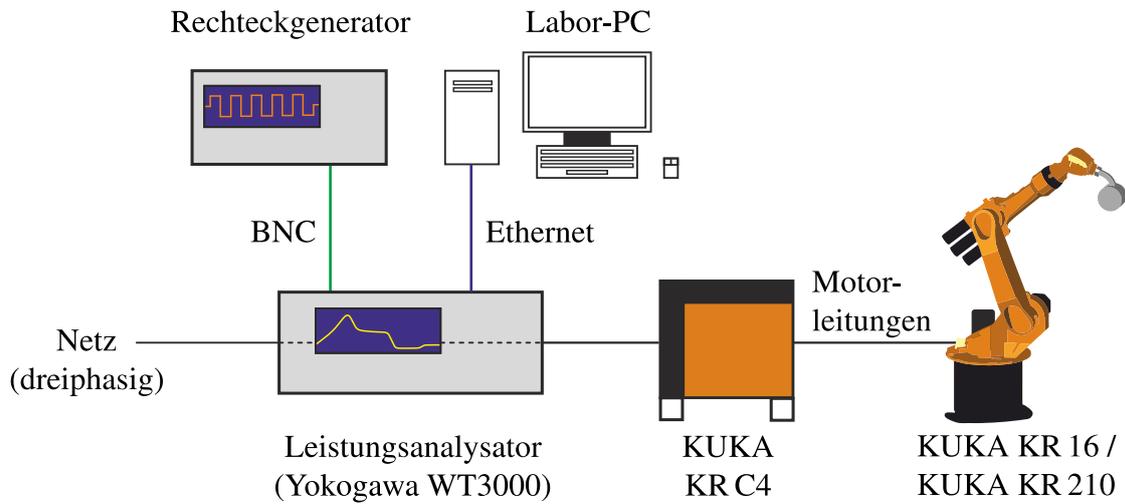


Bild 3.3: Schematische Darstellung der Leistungsmessung am Laboraufbau

- konstante netzseitige Verlustleistung $P_{V,Netz}$.

Die vereinfacht als betriebspunktunabhängig angenommenen Wirkungsgrade (siehe Abschnitt 2.5) $\eta_{A,i}$ sind in der Regel den Motordatenblättern zu entnehmen. Der Strom zum Öffnen der Haltebremse wird ebenfalls in den Datenblättern und/oder auf dem Typenschild des Motors angegeben oder kann alternativ über die im Folgenden beschriebene Messung bestimmt werden. Durch Multiplikation des Stromes mit der Betriebsspannung (in der Regel 24 V) und Aufsummieren der so erhaltenen Einzelachsleistungen ergibt sich $P_{V,HB}$. Die verbleibenden Größen $P_{V,ZK}$ und $P_{V,Netz}$ (und $P_{V,HB}$, sofern diese nicht aus Typenschildern/Datenblättern entnommen werden kann) können mit einer netzseitigen Leistungsmessung am sich bewegenden Roboter bestimmt werden. Die Bewegung kann dabei prinzipiell beliebig gewählt werden, einzige Voraussetzung ist, dass in der Verzögerungsphase der Bewegung ein genügend hoher Leistungsüberschuss bis zur Zuschaltung des Bremswiderstands im Zwischenkreis provoziert wird.

Eine beispielhafte Messung mit einem für PTP-Bewegungen typischen Leistungsverlauf ist in Bild 3.4 dargestellt. In der Verzögerungsphase wird der Zwischenkreis generatorisch versorgt, während die netzseitigen Verluste sowie die Haltebremsenverluste weiterhin netzseitig ausgeglichen werden müssen. In dieser Phase wird der Messwert \tilde{P}_1 ausgelesen. In der aktiven Haltephase mit dem zugehörigen Messwert \tilde{P}_2 sind alle Verbraucher aktiv. Im Stillstand sind die Haltebremsen eingefallen und \tilde{P}_3 entspricht direkt $P_{V,Netz}$. Aus den gemessenen Leistungen \tilde{P}_1 , \tilde{P}_2 und \tilde{P}_3 lassen sich $P_{V,ZK}$, $P_{V,Netz}$ und $P_{V,HB}$ berechnen. Die Umrechnung ergibt sich aus den beteiligten Ver-

brauchern in den jeweiligen Betriebszuständen, wie in Bild 3.5 dargestellt. Die drei Modellgrößen lassen sich demnach wie folgt bestimmen:

$$P_{V,ZK} = \tilde{P}_2 - \tilde{P}_1, \quad (3.1)$$

$$P_{V,HB} = \tilde{P}_1 - \tilde{P}_3, \quad (3.2)$$

$$P_{V,Netz} = \tilde{P}_3. \quad (3.3)$$

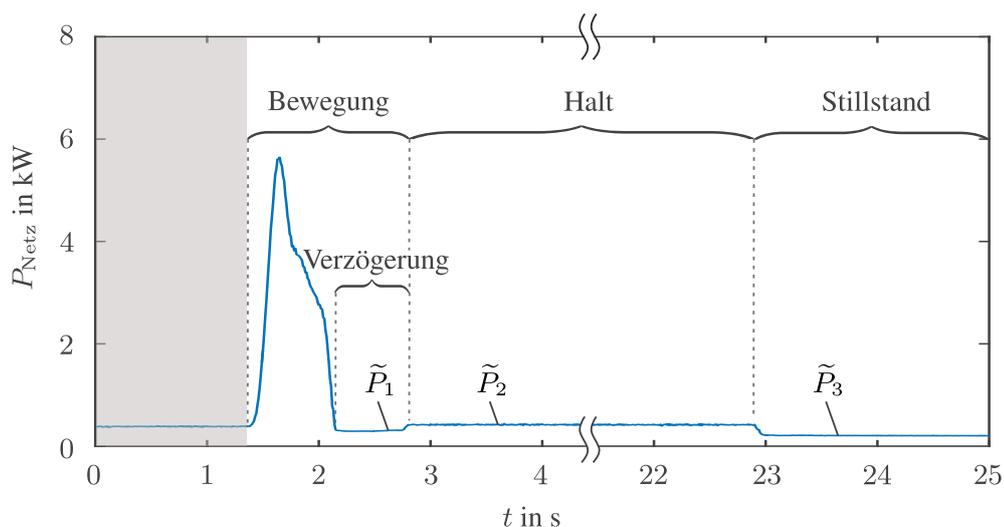


Bild 3.4: Messung der aufgenommenen Netzleistung zur Bestimmung der Konstantverlustleistungen am KR 16

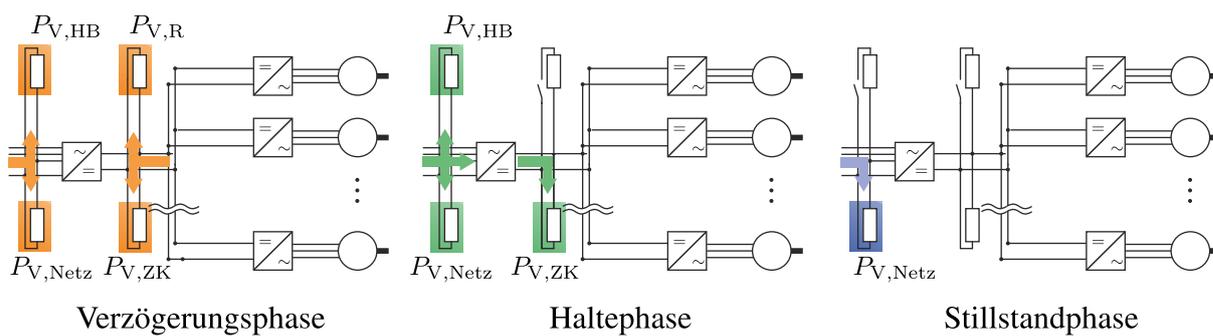


Bild 3.5: Schematische Darstellung der beteiligten Verbraucher bei den jeweiligen Messphasen

3.3 Identifikation der temperaturabhängigen Reibparameter

In Abschnitt 2.3.2 wurde eine Erweiterung des klassischen COULOMBSch-viskosen Reibmodells um eine Temperaturabhängigkeit der viskosen Dämpfung erläutert. Für die COULOMBSche Reibung werden die internen Werte des Herstellers übernommen. Die Identifikation der viskosen Dämpfung wird im Folgenden vorgestellt. Um die Notwendigkeit der Modellerweiterung zu unterstreichen, sei zunächst auf Bild 3.6 verwiesen. Dargestellt ist der Verlauf der Antriebsleistung der ersten Achse einer Folge von PTP-Bewegungen bei Motortemperaturen von 20 °C und 80 °C. Die Leistung wurde aus den aufgezeichneten Istwerten des Motormoments und der Motorgeschwindigkeit bestimmt. Durch die Verringerung der auftretenden Verluste bei höheren Motortemperaturen wird nicht nur die Leistungsaufnahme im motorischen Betrieb verringert, sondern auch der Betrag der generatorischen Leistung erhöht. Die korrekte Berücksichtigung der Reibung im Modell beeinflusst somit die quantitative Modelliergenauigkeit und folglich auch das Optimierungspotential durch die genauere Bestimmung der Leistungsbilanzen.

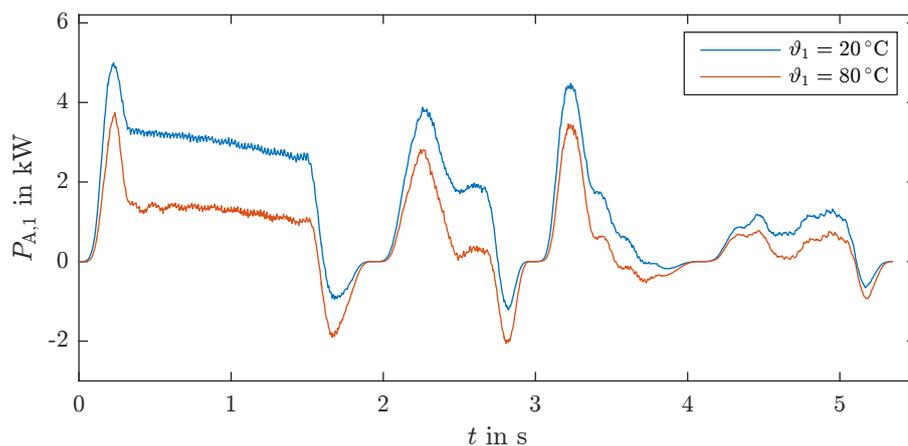


Bild 3.6: Verlauf der Antriebsleistung der ersten Achse bei Motortemperaturen 20 °C und 80 °C

Zur Identifikation der temperaturabhängigen viskosen Dämpfung am KR 16 wird eine unveränderte Folge von 20 PTP-Bewegungen bei verschiedenen Motortemperaturen abgefahren. Bei der Wahl der Anregungstrajektorie ist darauf zu achten, dass alle Gelenke ausreichend und bei verschiedenen Geschwindigkeiten bewegt werden. Hierbei wird die Leistungsaufnahme mit der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Messumgebung erfasst, zusätzlich werden die Istwerte $\tilde{\tau}_{M,i}$ der Motormomente aller Gelenke über die Trace-Funktion der Robotersteuerung aufgezeichnet. Die viskose Dämpfung lässt sich für jedes Gelenk i durch Lösen des linearen Least-Square-Problems bestimmen [GVP94]:

$$r_{v_i}(\vartheta_i) = \arg \min_{r_{v_i}} \sum_{t_d=0}^T (\tau_{M_i}(r_{v_i}(\vartheta_i), t_d) - \tilde{\tau}_{M_i}(\vartheta_i, t_d))^2, \quad (3.4)$$

wobei $\{t_d \in [0, T] \mid t_d = n_d \Delta t_d, n_d \in \mathbb{N}\}$ den diskreten Zeitschritt der Soll- und Istwerte mit einer Schrittweite $\Delta t_d = 4 \text{ ms}$ beschreibt. Die Schrittweite ist steuerungsseitig vorgegeben und unveränderlich. Die Bestimmung der viskosen Dämpfungen erfolgt dabei isoliert für jede Messung über eine vollständige Bewegungsfolge, es wird also für jeden Temperaturzustand zunächst ein eigener Dämpfungswert bestimmt. Die identifizierten Parameter der sechs Achsen über der Temperatur sind in Bild 3.7 dargestellt. Zwischen zwei Messungen werden alle Gelenke des Roboters jeweils für zwei Minuten warmgefahren. Die erwartete Temperaturabhängigkeit der viskosen Dämpfung lässt sich in den Ergebnissen der Identifikation wiederfinden, von der Messung im kältesten und wärmsten Zustand verringert sich r_{v_i} etwa auf ein Drittel. Die Ausreißer bei Temperaturen um 20°C sind auf die Erwärmung des Roboters während der Messung zurückzuführen, was durch die motorseitige Messung der Temperatur und deren geringe Auflösung von 1°C nicht berücksichtigt werden kann. Da eine Robotertemperatur von 20°C nur bei geringsten Auslastungen auftritt, kann der Fall in der Praxis sowie für die Betrachtungen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt werden. Um eine industrietytische Roboterbelastung wiederzugeben, wird der Roboter für die Messungen im Rahmen der Arbeit auf 60°C warmgefahren, sodass die Reibung im Modell für diesen Zustand parametrisiert wird.

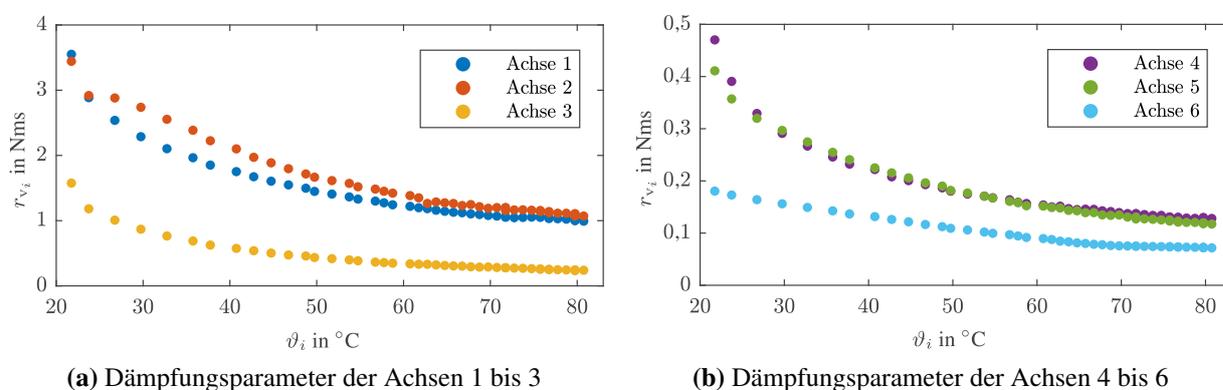


Bild 3.7: Identifizierte viskose Dämpfung aller Achsen des KR 16 über der Motortemperatur

Der zuvor gezeigte Verlauf der Antriebsleistung der ersten Achse bei einer Folge von PTP-Bewegungen ist in Bild 3.8 erneut abgebildet, dieses Mal ergänzt um die modellierte Antriebsleistung. Als Reibparameter werden die zuvor bei 20°C beziehungsweise 80°C identifizierten Werte genutzt. Es ist zu sehen, dass der Temperatureinfluss allein durch die Anpassung der viskosen Dämpfung gut abgebildet werden kann. Für die übrigen Gelenke werden vergleichbare Ergebnisse erreicht. Die erzielten Erkenntnisse wurden in [EKTO18] veröffentlicht.

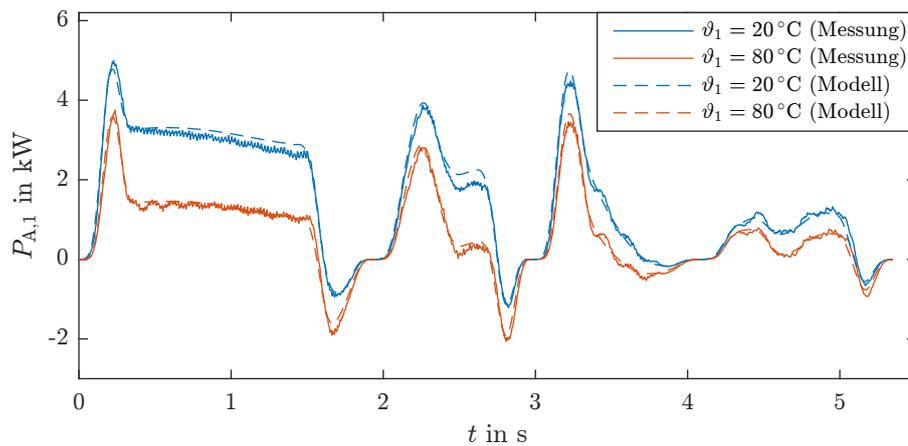


Bild 3.8: Vergleich der modellierten und aus Istwerten berechneten Antriebsleistung der ersten Achse bei Motortemperaturen 20°C und 80°C

3.4 Vergleich von berechneter und gemessener Leistung und Energie

Für die Validierung des Leistungs- und Energiemodells am Prüfstand wird eine Bewegungsfolge von fünf PTP-Bewegungen betrachtet. Diese sind in Bild 3.9 abgebildet. Die einzelnen Bewegungen sind jeweils durch eine einsekündige Pause getrennt, anhand derer der im Modell vernachlässigte Einfluss des konfigurationsabhängigen Haltemoments (beziehungsweise der resultierenden Leistung) demonstriert werden kann. Die Messung wird bei absteigenden Overrides wiederholt, um die Modellgültigkeit bei verschiedenen Betriebspunkten zu belegen. Da bei den später folgenden Optimierungen von Motortemperaturen von 60°C ausgegangen wird, werden alle Messungen bei Motortemperaturen in diesem Betriebspunkt durchgeführt.

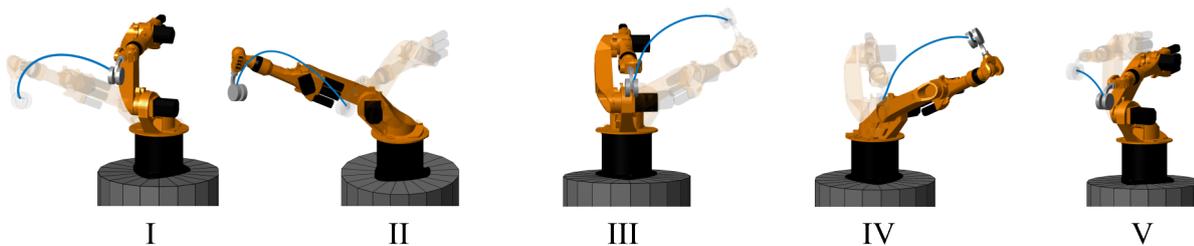


Bild 3.9: PTP-Bewegungen bei der Validierungsmessung

Die zeitlichen Verläufe der aufgenommenen Netzleistung und -energie sind in Bild 3.10 dargestellt. Anhand der Graphen lässt sich erkennen, dass der gewählte Modellierungsansatz die reale Leistungs- und Energieaufnahme qualitativ gut abbildet. Die Abweichung des Energiebedarfs des Modells zur Messung beträgt bis zu 3,8 %, die Werte sind Tabelle 3.3 zu entnehmen. Die Ungenauigkeiten bei der Messung werden vernachlässigt. Die Angaben des Energiebedarfs beziehen sich jeweils auf das Ende der Messung (also das Ende der letzten Bewegung). Die Ergebnisse zeigen auch, dass die konfigurationsabhängigen Haltemomente sehr geringen Einfluss auf die Netzleistung

nehmen. Bedingt durch die hohen Getriebeübersetzungen sind für das Aufbringen der notwendigen Haltemomente nur sehr geringe Ströme notwendig, sodass die Leistungsaufnahme lediglich im Bereich einiger Watt schwankt. Die Konfigurationsabhängigkeit der Haltemomente kann somit bei der Modellierung vernachlässigt werden. Die verbleibenden Abweichungen von simulierter und gemessener Leistung resultieren maßgeblich aus Ungenauigkeiten und/oder Vereinfachungen der inversen Dynamik, konkret der Vernachlässigung von Schwingungen und Reglereinflüssen, sowie temperaturbedingten Abweichungen der Reibparameter durch die Verwendung der Motortemperaturen. Messergebnisse zu Untersuchungen an weiteren Bahnen sind in Kapitel 5 zu finden.

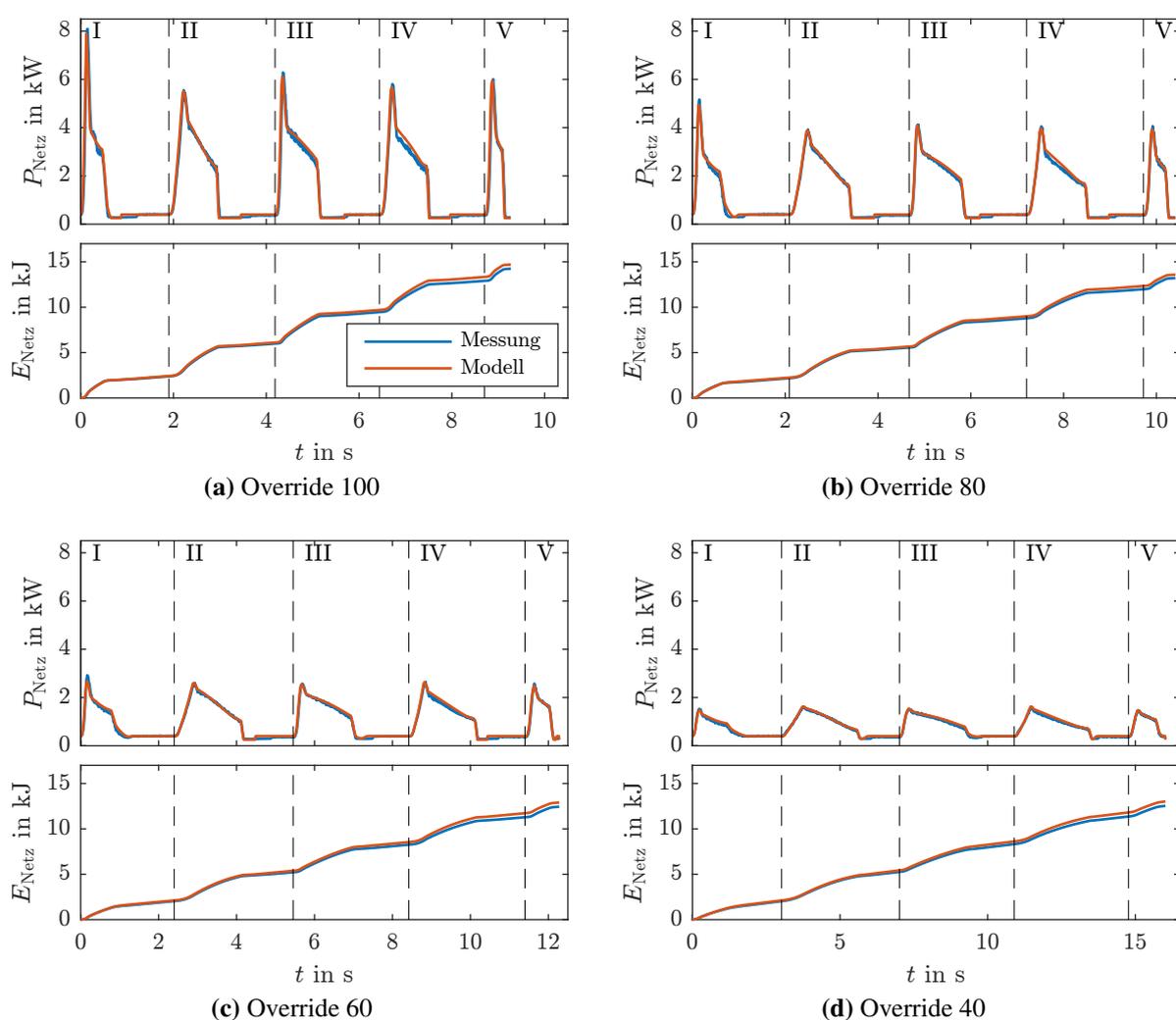


Bild 3.10: Vergleich von simulierter und gemessener Leistung und Energie am KR 16

Die Simulations- und Messergebnisse der gleichen Gelenkraumbewegung am KR 210 sind in Bild 3.11 abgebildet. Die zugehörigen Zahlenwerte des Energiebedarfs sind in Tabelle 3.4 angegeben, Messungenauigkeiten werden erneut vernachlässigt. Die im Vergleich etwas größeren

Tabelle 3.3: Ergebnisse zur Bewegung aus Bild 3.9 am KR 16 bei einer Robotertemperatur von 60 °C

Override	E_{Sim} in kJ	E_{Mess} in kJ	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
100	14,69	14,24	103,2
80	13,58	13,21	102,8
60	12,90	12,44	103,7
40	13,02	12,54	103,8

Abweichungen im Leistungsverlauf bei etwa vier und zwölf Sekunden (gekennzeichnet mit einem schwarzen beziehungsweise grünen Kreis) resultieren aus Abweichungen der Reibparameter der dritten Achse von den Herstellerwerten. Zur Veranschaulichung sind die zugehörigen mechanischen Leistungsverläufe aller Gelenke bei Override 100 in Bild 3.12 dargestellt. Durch die zu hoch angenommene Reibung ergibt sich eine im Vergleich zum KR 16 etwas höhere Abweichung des simulierten vom gemessenen Energiebedarf mit bis zu 6,6 %.

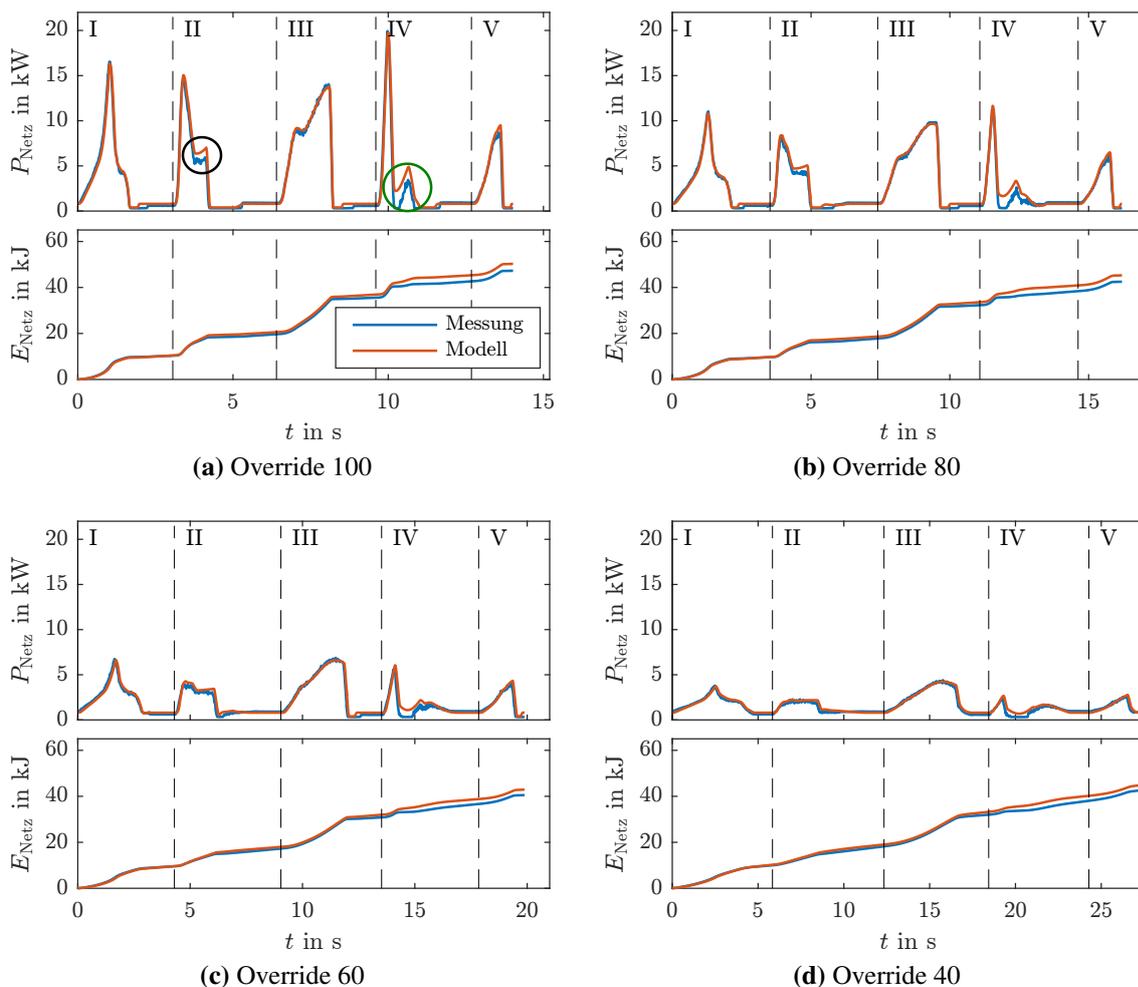
**Bild 3.11:** Vergleich von simulierter und gemessener Leistung und Energie am KR 210

Tabelle 3.4: Ergebnisse zur Bewegung aus Bild 3.9 am KR 210 bei einer Robotertemperatur von 60 °C

Override	E_{Sim} in kJ	E_{Mess} in kJ	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
100	50,28	47,28	106,4
80	45,30	42,51	106,6
60	42,96	40,53	106,0
40	44,77	42,53	105,3

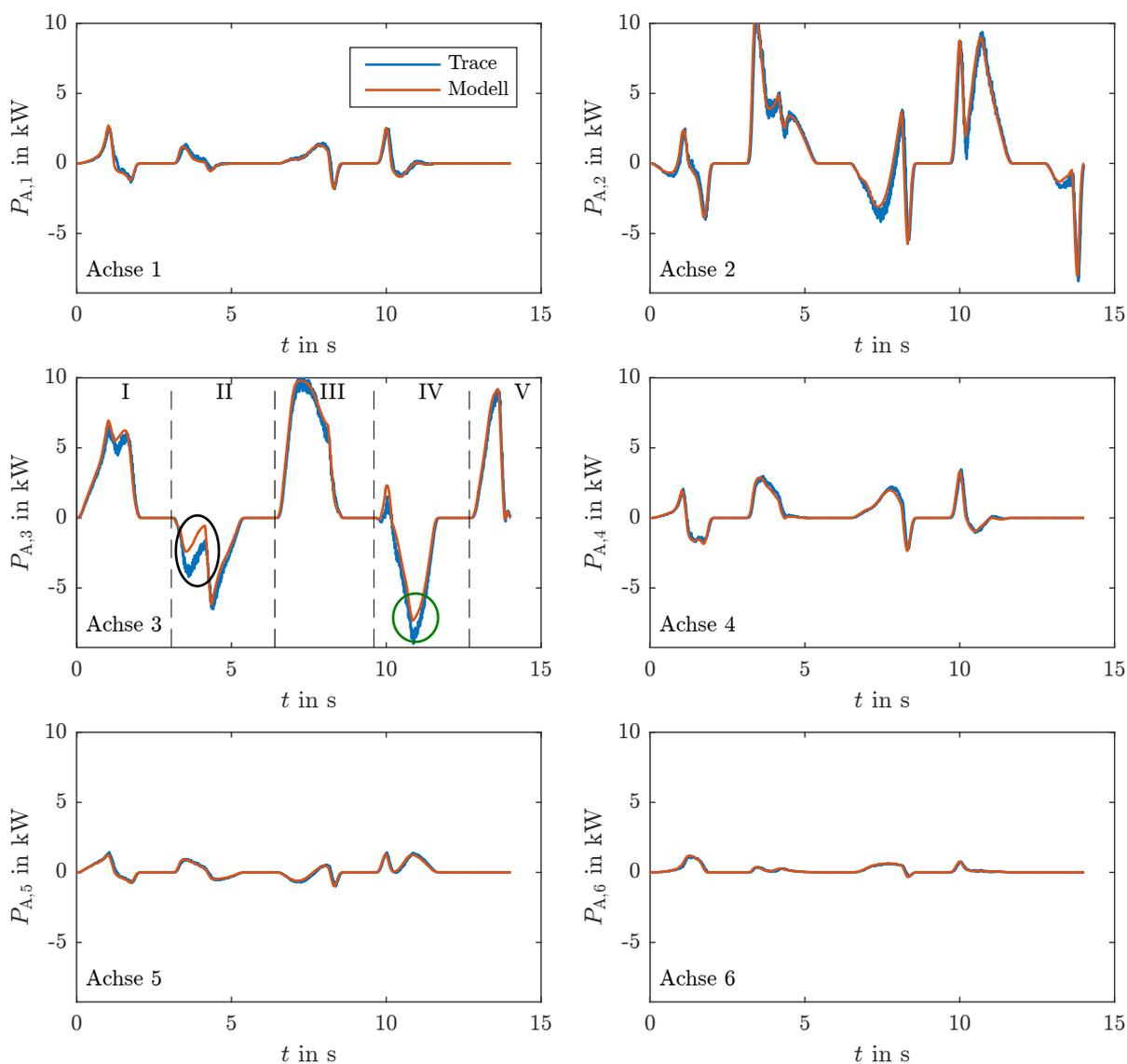


Bild 3.12: Vergleich der aus Tracedaten berechneten und der modellierten Antriebsleistungen aller Gelenke am KR 210

Die Abweichung bleibt allerdings über alle Geschwindigkeiten nahezu konstant, sodass von einer hinreichend genauen Abbildung der geschwindigkeitsabhängigen Effekte ausgegangen werden

kann. Insgesamt lässt sich erkennen, dass der gewählte Ansatz zur Modellierung des Leistungs- und Energiebedarfs auf größere Roboter übertragbar ist und auch unter Verwendung von Datenblattparametern hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Neben der Validierung der korrekten Abbildung des netzseitigen Leistungs- und Energiebedarfs im Modell soll auch die Modellierung der dissipierten Bremsleistung/-energie durch Messungen überprüft werden. Hierzu werden Strom und Spannung am Bremswiderstand gemessen und daraus die resultierende dissipierte Bremsleistung berechnet. Die Ergebnisse einer Validierungsmessung an 20 zeitminimalen PTP-Bewegungen sind in Bild 3.13 abgebildet. Die Dissipation der Bremsleistung erfolgt durch den Bremschopper pulsweitengesteuert, was in der dargestellten Leistungsmessung an den pulsförmigen Leistungsspitzen zu erkennen ist. Im Modell wird das Schaltverhalten nicht berücksichtigt und nur die dissipierte Leistung am Bremswiderstand betrachtet. Anhand der dargestellten Leistungsverläufe lässt sich zeigen, dass Beginn und Ende der Dissipation im Modell bei allen untersuchten Bewegungen korrekt abgebildet werden. Die gemessenen und simulierten Bremsenergien pro Bewegung sind als Balkendiagramm in Bild 3.14 dargestellt. Die Abweichung $E_{V,R,Sim} - E_{V,R,Mess}$ pro Bewegung bewegt sich im Bereich von etwa -20 J bis 30 J und ist in Relation zum typischen gemessenen Energiebedarf des KR 16 von etwa 1 bis 2 kJ (siehe Abschnitt 5.3.1) bei zeitminimalen PTP-Bewegungen vernachlässigbar gering.

Zusammenfassend erfolgt anhand des in Kapitel 2 vorgestellten Modellierungsansatzes eine gute qualitative und quantitative Abbildung der tatsächlich gemessenen Leistungsverläufe. Trotz der getroffenen Vereinfachungen werden sowohl verschiedene Bewegungen als auch Änderungen der Geschwindigkeiten für Roboter unterschiedlicher Traglastkategorien korrekt vom Modell wiedergegeben. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Robotertemperatur wird nachgewiesen. Auch die Berechnung der dissipierten Bremsenergie kann mit Messungen erfolgreich validiert werden.

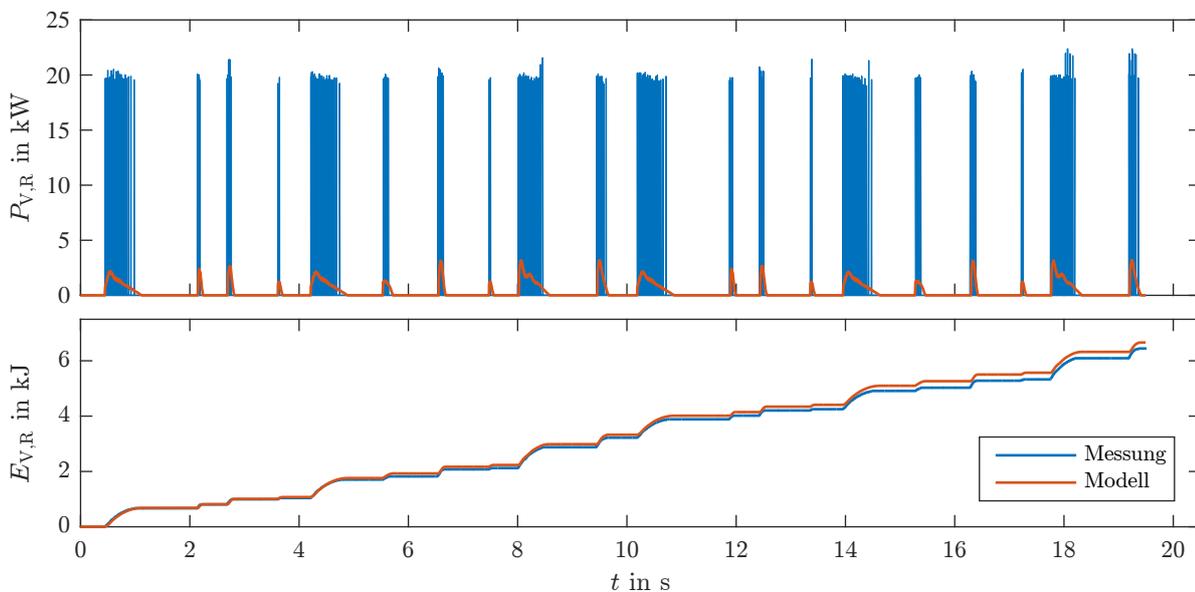


Bild 3.13: Vergleich von gemessener und simulierter Bremsleistung und -energie am KR 16

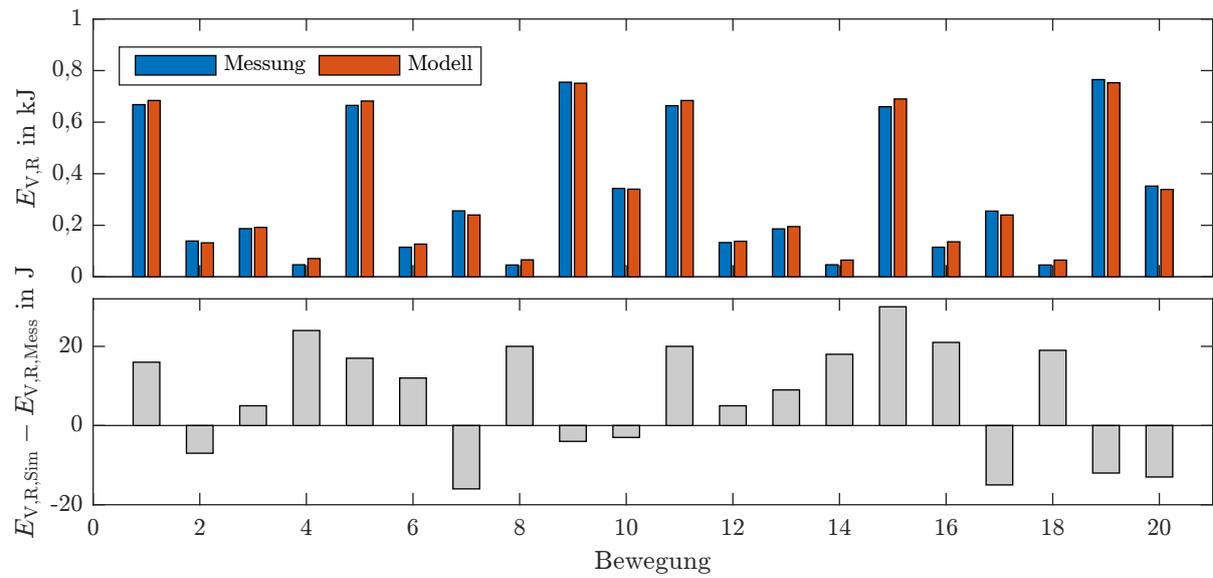


Bild 3.14: Gemessene und simulierte dissipierte Bremsenergie für 20 Bewegungen am KR 16

4 Verringerung des Energiebedarfs durch Änderung der Verfahzeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein Ansatz zur Modellierung des Leistungs- und Energiebedarfs von Industrierobotern vorgestellt und die Gültigkeit des Modells an zwei verschiedenen Prüfständen nachgewiesen. Unter Verwendung dieses Modells soll nun der erste Ansatz zur Effizienzsteigerung von Industrierobotern untersucht und evaluiert werden. Dieser befasst sich mit der Verringerung des Energiebedarfs durch Veränderung der Bewegungsdauer bei gleichbleibendem geometrischen Weg im Arbeitsraum.

In vielen Fällen sind die Fertigungsstraßen hinsichtlich der Gesamttaktzeit optimiert, sodass eine Verlängerung der Gesamttaktzeit der Anlage zugunsten einer Verringerung des Energiebedarfs in der Praxis in der Regel nicht toleriert wird. Zur Anpassung der Verfahzeit kommen daher hauptsächlich Bewegungen in Frage, die nicht den „Flaschenhals“ des Prozesses darstellen, also über Wartezeiten vor oder nach einer Bewegung verfügen. Da bei CP-Bewegungen die Geschwindigkeit in der Regel anhand des Fertigungsprozesses vorgegeben wird (zum Beispiel beim Bahnschweißen, Kleben oder Fräsen), können diese auch nicht zeitlich verändert werden. Durch die taktzeitoptimale Auslegung der Maschinen werden bei Industrierobotern in den meisten Fällen sämtliche Bewegungen mit maximaler Geschwindigkeit programmiert, was bei den meisten Herstellern der Standardeinstellung beim Einteachen von PTP-Bewegungen entspricht. Häufig ist dies beispielsweise bei An- und Rückstellbewegungen, also den Bewegungen hin zum und weg vom Werkstück vor und nach einem fertigenden Schritt, zu finden. Diese sind oftmals als PTP-Bewegungen mit maximaler Geschwindigkeit programmiert, die mit Wartezeiten vor und/oder nach der Bewegung verbunden sind. Zur Verdeutlichung ist in Bild 4.1 die gemessene Leistungsaufnahme eines Industrieroboters in der Karosseriefertigung eines Automobilherstellers dargestellt, bei der die Haltephasen des Roboters in orange gekennzeichnet wurden. Die Haltephasen wurden anhand der aufgezeichneten Robotergeschwindigkeit bestimmt und liegen unmittelbar vor oder hinter PTP-Bewegungen. Die vorgenannten Bedingungen zur Änderung der Verfahzeit einzelner Bewegungen sind also auch in der industriellen Praxis oft erfüllt.

Da sich der geometrische Weg des Roboters durch die Anpassung der Verfahzeit nicht ändert, ist auch eine nachträgliche Optimierung bereits bestehender Anlagen in vielen Fällen problemlos denkbar, insbesondere dann, wenn sich innerhalb des Arbeitsraums des Roboters keine weiteren sich bewegenden Maschinen befinden. Falls sich hingegen beispielsweise die Arbeitsräume zweier Roboter überschneiden, ist auch bei der Veränderung der Verfahzeit die Anwendung einer Kollisionsüberwachung notwendig, zum Beispiel nach [AH02]. Im Folgenden wird von

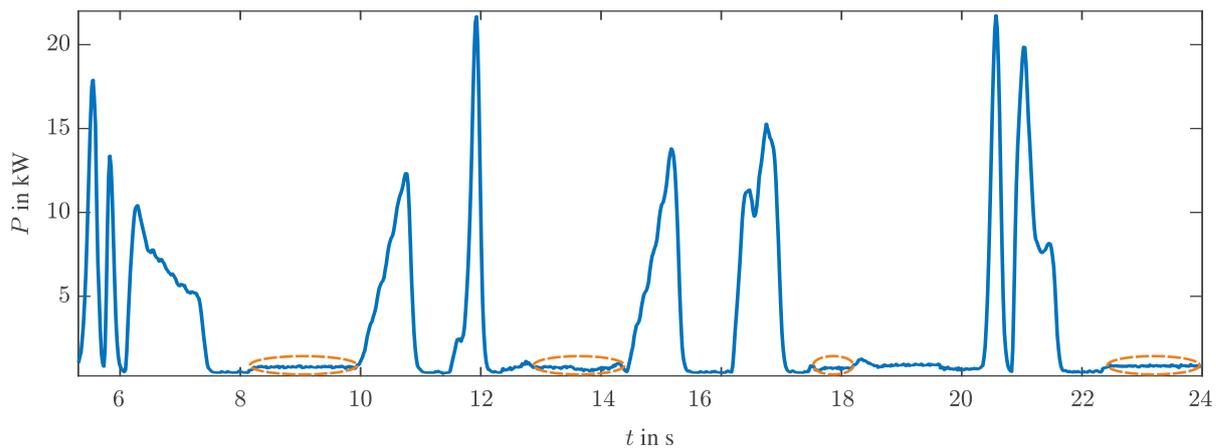


Bild 4.1: Ausschnitt einer Leistungsmessung am Roboter im Karosseriebau mit orange gekennzeichneten Haltephasen

einer Zelle ohne weitere Roboter oder andere ortsveränderliche Systeme ausgegangen, sodass die Kollisionsüberwachung entfällt.

Das Kapitel gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 4.1 wird der Einfluss und die Berücksichtigung der Bremsenschließzeit beschrieben. Um das Vorgehen zur Untersuchung des Zusammenhangs von Verfahzeit und Energiebedarf genauer zu erläutern, wird dieses zunächst anhand einer einzelnen Bewegung detailliert in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Evaluation in Abschnitt 4.3 auf eine größere Menge an Zufallsbahnen ausgeweitet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 4.4. Teile der in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse wurden in [EZKO17] veröffentlicht.

4.1 Berücksichtigung der Bremsenschließzeit

Für eine Angabe des Einsparpotentials durch Anpassung der Verfahzeit von Bewegungen ist es unter anderem notwendig, die Ansteuerung der Haltebremsen des betrachteten Roboters zu berücksichtigen, wie im Folgenden genauer erläutert wird. Zunächst wird hierzu die Bremsenansteuerung kurz vorgestellt. Bei Industrierobotern erfolgt die Ansteuerung der Haltebremsen in der Regel automatisch. Beim Start einer neuen Bewegung werden die Haltebremsen gelüftet. Erfolgt nach Ende der Bewegung kein weiterer Bewegungsbefehl, fallen nach Ablauf der Bremsenschließzeit die Haltebremsen wieder ein. Bei KUKA-Robotern beträgt die standardmäßige Bremsenschließzeit 20 Sekunden. Auch wenn es erste Bestrebungen gibt, diese auf fünf Sekunden zu verkürzen [Klü12], ist dies noch nicht Stand der Technik. Als Beispiel sei die zuvor vermessene Roboterzelle aus der Karosseriefertigung erwähnt, bei der die Bremsenschließzeit trotz Inbetriebnahme im Jahr 2014 nach wie vor 20 Sekunden beträgt.

In Abschnitt 3.2 wurde anhand einer Beispielmessung gezeigt, dass sich die Leistungsaufnahme in der Haltephase (aktives Halten des Roboters durch die Antriebe bei gelüfteten Haltebremsen) und in der Stillstandphase, in der die Haltebremsen eingefallen sind, deutlich unterscheiden. Die Ursachen hierfür sind zum einen die auftretenden Verluste durch Aufbringen der Haltemomente der Motoren, zum anderen die nicht zu vernachlässigenden Verluste zum dauerhaften Lüften der Haltebremsen. Konkret betragen die gemessenen Verlustleistungen beim KR 16 400 W in der Halte- und 200 W in der Stillstandphase. Beim KR 210 wird der Unterschied durch die größer dimensionierten Haltebremsen noch deutlicher: Die gemessenen Verlustleistungen betragen hier 800 W in der Halte- und 200 W in der Stillstandphase. Die zugehörigen Messungen sind in Bild 4.2 abgebildet. Die Verlustleistungen schwanken im Bereich einiger Watt abhängig von der Roboterpose (bei gelüfteter Bremse), der aktuellen Rechenleistung der Robotersteuerung sowie dem Zustand der Lüfter und anderer Peripherielemente. Diese Abweichungen sind in Relation zu der Leistungsaufnahme während der Bewegung im Kilowattbereich allerdings vernachlässigbar.

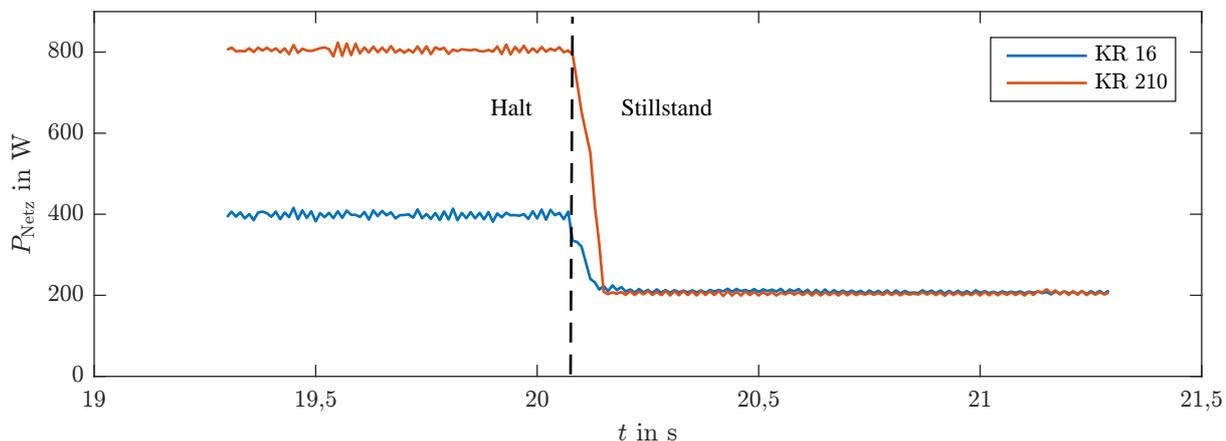


Bild 4.2: Gemessene Leistung vor und nach Einfallen der Haltebremsen am KR 16 und KR 210

Aus den Messwerten wird schnell ersichtlich, dass auch die Bremsenansteuerung Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz des Systems bietet. Aus energetischer Sicht ist eine möglichst geringe Bremsenschließzeit immer zu bevorzugen, da in der Stillstandphase die zuvor beschriebenen Halte- und Haltebremsenverluste nicht mehr anfallen. Bei einer zu gering gewählten Bremsenschließzeit werden allerdings die zulässigen Schließzyklen der Haltebremsen schneller überschritten, sodass die Haltebremsen die lebensdauerbegrenzenden Bauteile des Roboters werden [Klü12, MPB14]. Ein Austausch der Haltebremsen ist mit einer aufwendigen Demontage der Motoren und einem daraus resultierenden Stillstand des Roboters/der Anlage verbunden und muss somit vermieden werden. Eine bessere Lösung bietet eine intelligente Bremsenansteuerung, bei der die Bremsen sofort einfallen, wenn nach der Bewegung eine hinreichend lange Stillstandzeit folgt. Hierdurch bleiben die Schließzyklen der Haltebremse unverändert. Die Herausforderung besteht dabei in der Erkennung der folgenden Stillstandzeiten. Das Verfahren bietet sich insbesondere bei vollständig repetitiven Prozessen an, da die Stillstandzeiten hier einmalig bestimmt und die Bremsenschließzeit

ten entsprechend parametrisiert werden können. Eine ausführliche Beschreibung dieses Ansatzes kann in [Pet17] gefunden werden.

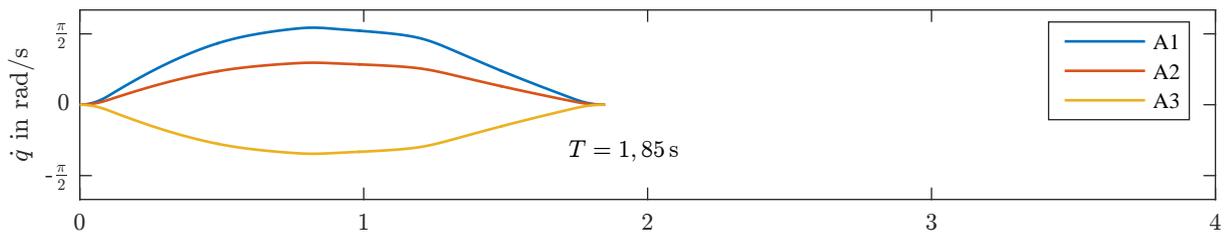
Abhängig von der Art der Pause nach einer Bewegung (Halt oder Stillstand) verändert sich auch das Einsparpotential durch Veränderung der Verfahzeit. Um dies bei den folgenden Untersuchungen zu berücksichtigen, werden jeweils beide „Extremfälle“ berücksichtigt, zum einen eine unendlich große Bremsenschließzeit $t_{HB} = \infty$, zum anderen der energetische Optimalfall mit $t_{HB} = 0$. Bei der Betrachtung einzelner Bewegungen entspricht das Verhalten bei $t_{HB} = \infty$ dem des standardmäßigen Wertes von $t_{HB} = 20$ s, da in beiden Szenarien die Bremse für die Dauer der Untersuchung gelüftet bleibt. Sämtliche weiteren Fälle können aus den Ergebnissen für die beiden Extremfälle abgeleitet werden, wie in den folgenden Abschnitten noch genauer erläutert wird.

4.2 Evaluation am Beispiel einzelner PTP-Bewegungen

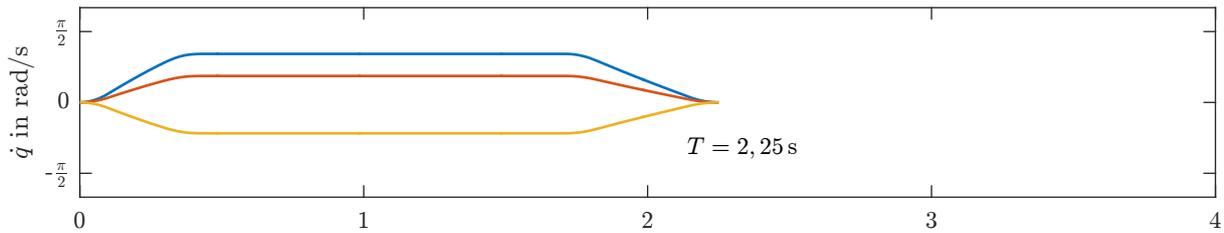
Der Zusammenhang von Verfahzeit und Energiebedarf soll zunächst anhand ausgewählter Bewegung detailliert untersucht und erläutert werden. Hierzu wird eine PTP-Bewegung bei ansteigenden Verfahzeiten wiederholt und der resultierende Energiebedarf bestimmt. In Abschnitt 3.4 wurde gezeigt, dass die Leistungsflüsse über das gesamte betrachtete Verfahzeitspektrum mit gleichbleibender Genauigkeit modelliert werden können. Bei der Planung der Bahnen wird direkt auf die Planungsalgorithmen der Steuerung mittels Software-in-the-Loop (SiL) zurückgegriffen. Zur Änderung der Verfahzeit wird die Override-Funktion (OR) der Robotersteuerung genutzt. Obwohl der OR in der Praxis lediglich als Inbetriebnahmefunktion zum Testen von Bewegungen bei verringerter Geschwindigkeit verändert wird, ist er für die folgenden Untersuchungen einer Änderung der maximalen Geschwindigkeiten und/oder Beschleunigungen der Achsen vorzuziehen, da mit dem OR die Verfahzeit unmittelbar und unabhängig von der betrachteten Bewegung beeinflusst werden kann. Während die Änderung der Verfahzeit durch eine Maximalgeschwindigkeitsbegrenzung auf beispielsweise 50 % von der Bewegung abhängt (und bei Nichterreichen des jeweiligen Maximalwerts auch unter Umständen gar keinen Einfluss hat), sorgt eine Änderung des OR von OR 100 auf OR 50 immer für eine Verdoppelung der Verfahzeit, wie in Bild 4.3 dargestellt.

Darüber hinaus ist es für einen realistischen und aussagekräftigen Vergleich identischer Bewegungen mit verschiedenen Verfahzeiten notwendig, die Mess- oder Simulationsdauern anzugleichen und die Halte- und Stillstandphasen bei der Betrachtung zu berücksichtigen, wie in Abschnitt 4.1 erläutert. Der Angleich ist in Bild 4.4 dargestellt. Trotz unterschiedlicher Verfahzeiten wird bei der Berechnung des Energiebedarfs für alle Bewegungen die Verfahzeit der langsamsten Bahn als Integrationsbereich gewählt. Abhängig von der gewählten Bremsenansteuerung wird die Leistungsaufnahme während der Halte- beziehungsweise Stillstandphase angepasst.

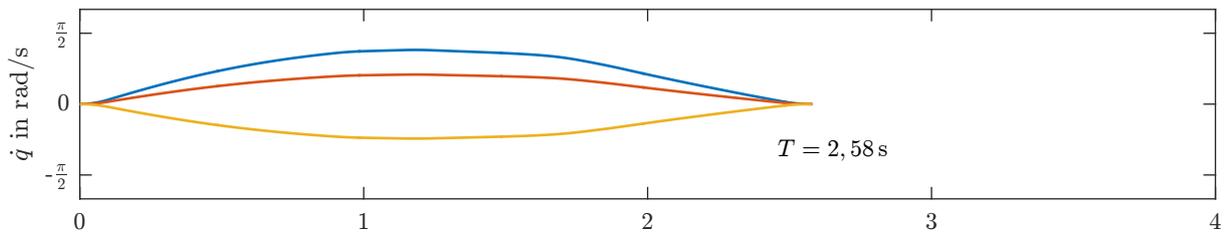
Die Simulationsergebnisse für den netzseitigen Energiebedarf einer einzelnen PTP-Bewegung am KR 16 sind in Bild 4.5 dargestellt, in Bild 4.5a für $t_{HB} = \infty$ und in Bild 4.5b für $t_{HB} = 0$. Die Bewegung wird zunächst beliebig gewählt. Der OR wird in Fünf-Prozent-Schritten von OR 100



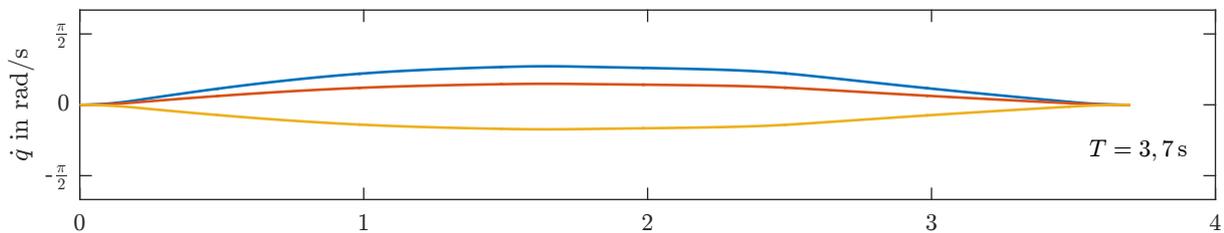
(a) Geschwindigkeitsverlauf der Hauptachsen bei OR 100, VEL 100, ACC 100



(b) Geschwindigkeitsverlauf der Hauptachsen bei OR 100, VEL 50, ACC 100



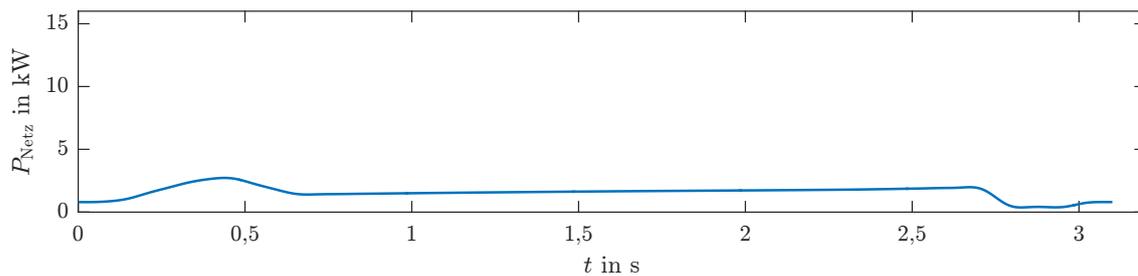
(c) Geschwindigkeitsverlauf der Hauptachsen bei OR 100, VEL 100, ACC 50



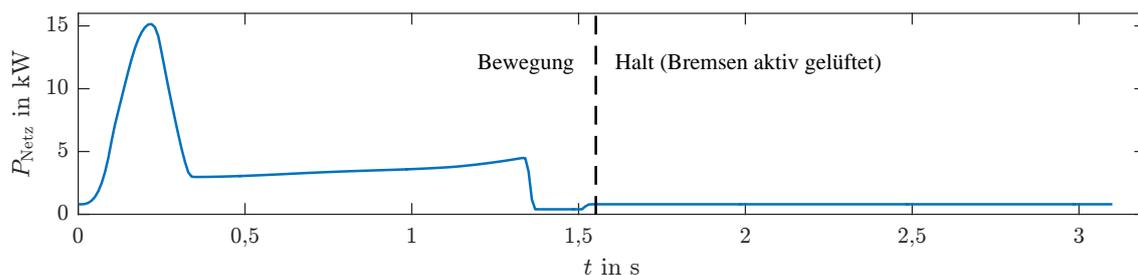
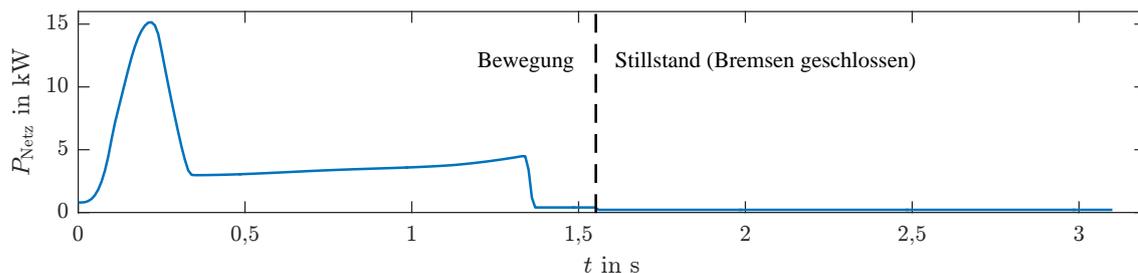
(d) Geschwindigkeitsverlauf der Hauptachsen bei OR 50, VEL 100, ACC 100

Bild 4.3: Änderung der Verfahrszeit durch Begrenzung der maximalen Beschleunigung (ACC), der maximalen Geschwindigkeit (VEL) oder des OR. Nur die Änderung des OR bewirkt eine bahnunabhängige zeitliche Streckung.

bis OR 20 verringert. Die Simulationsdauer entspricht der Verfahrszeit der langsamsten Bewegung (also bei OR 20). Noch geringere Werte für den OR werden nicht betrachtet, da OR 20 bereits eine Verfünffachung der Verfahrszeit bedeutet und entsprechend lange Pausen in der Praxis nur in Ausnahmefällen auftreten. Die dunkelblauen Säulen geben den Energiebedarf während der Bewegungsphase an, während die hellblauen Säulen die Halte- beziehungsweise Stillstandverluste beschreiben, die aus dem Angleich der Simulationsdauer resultieren.



(a) Beispielhafter Leistungsverlauf der langsamsten Bewegung (hier OR 50)

(b) Angleich der schnellsten Bewegung bei $t_{HB} = \infty$ (c) Angleich der schnellsten Bewegung bei $t_{HB} = 0$ **Bild 4.4:** Angleich der Verfahzeit bei verschiedenen Bremsenschließzeiten

Für den Fall $t_{HB} = \infty$ ergibt sich ein stetig fallender Gesamtenergiebedarf bei zunehmender Verfahzeit (also abnehmendem OR). Die Verringerung des Energiebedarfs resultiert nicht nur aus der Verringerung der dissipierten Bremsenergie $E_{V,R}$, sondern auch der Verluste des Antriebsstrangs $E_{V,A}$ (Bild 4.5c), die sich aus den Haft- und Gleitreibungsverlusten sowie den momentenproportionalen Verlusten, die über den Wirkungsgrad abgebildet werden, zusammensetzen. Die Konstantverluste $E_{V,k}$ steigen linear mit der Verfahzeit. Es sei angemerkt, dass die Summe der Verluste nicht dem Gesamtenergiebedarf entspricht, da dem System durch die Konfigurationsänderung noch potentielle Energie hinzugeführt oder entzogen wird.

Für $t_{HB} = \infty$ wäre somit die langsamste Bahn auch gleichzeitig die effizienteste, sodass bei der Optimierung eines bestehenden Prozesses die Verfahzeit lediglich derart verlängert werden müsste, dass die angeschlossene Haltezeit entfällt. Für den zweiten Fall bei $t_{HB} = 0$ ist diese strenge Monotonie nicht mehr vorhanden; stattdessen zeichnet sich durch die Zunahme der Konstantverluste bei steigender Verfahzeit ein „badewannenförmiger“ Verlauf ab. In diesem Szenario lässt sich

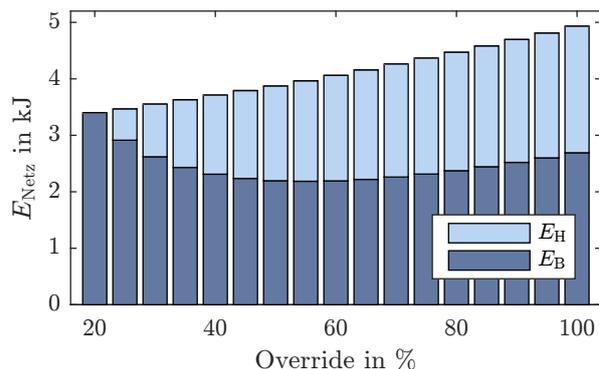
somit eine energieoptimale Verfahrszeit bestimmen, bei der die Summe aus Konstantverlusten, dynamischen Verlusten und dissipierter Energie minimal ist. Im Fall der betrachteten Bewegung findet der Umschlag bei OR 40 beziehungsweise Erhöhung der Verfahrszeit um Faktor 2,5 statt. Eine weitere Verlangsamung wäre demnach energetisch nicht sinnvoll und führt zur erneuten Erhöhung des Energiebedarfs. Die maximale Ersparnis durch die Verlangsamung beträgt im gezeigten Fall 21,2 % gegenüber der Bahn mit minimaler Verfahrszeit. Für den Betrieb mit $t_{HB} = 0$ ergeben sich Ersparnisse von 31,1 % für OR 20 und 21,4 % für OR 40.

Analog zu den Untersuchungen am KR 16 sind die Ergebnisse für eine vergleichbare Bahn am KR 210 in Bild 4.6 dargestellt. Hierbei wurden die gleichen Start- und Zielgelenkwinkel wie zuvor genutzt, bedingt durch die unterschiedlichen kinematischen und dynamischen Parameter ändert sich allerdings die resultierende Bahn. Trotz der deutlich unterschiedlichen Baugrößen und Traglasten lässt sich die Änderung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Verfahrszeit gut vergleichen. Auch beim größeren KR 210 findet sich für $t_{HB} = \infty$ ein stetig sinkender Energiebedarf bei zunehmender Verfahrszeit wieder (Bild 4.6a). Der badewannenförmige Verlauf bei $t_{HB} = 0$ (Bild 4.6b) ist noch stärker ausgeprägt, da die Konstantverluste beim KR 210 im Halt und im Stillstand weiter auseinanderliegen (siehe Abschnitt 4.1). Bei der Verteilung der Verluste in Bild 4.6c ist außerdem zu sehen, dass beim KR 210 erheblich mehr Energie über den Bremswiderstand dissipiert wird. Durch die größeren bewegten Massen wird mehr kinetische Energie im System gespeichert, sodass in Verzögerungsphasen ein größerer (relativer und absoluter) Energieüberschuss entsteht. Darüber hinaus verfügen die leistungsstärkeren Motoren des KR 210 über höhere Wirkungsgrade und lassen deutlich geringere Maximalgeschwindigkeiten gegenüber den kleineren Motoren des KR 16 zu (siehe [KUK18a, KUK18b]), was wiederum zu geringeren dynamischen Verlusten führt.

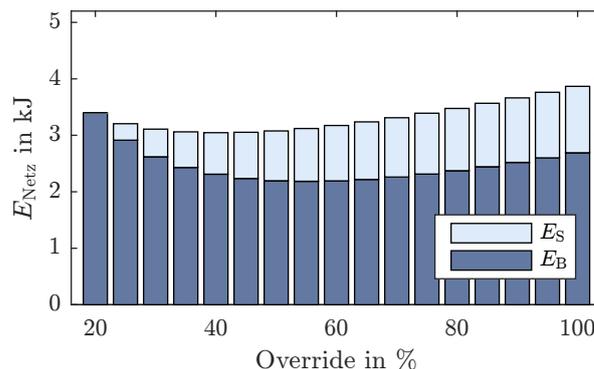
Auch beim KR 210 ergibt sich der geringste Energiebedarf für die betrachtete Bewegung bei OR 40 bei $t_{HB} = 0$, die Ersparnis beträgt 37,6 %. Bei einem System mit $t_{HB} = \infty$ ergeben sich Einsparpotentiale von 43,2 % bei OR 20 und 37,5 % bei OR 40.

4.3 Evaluation an Zufallsbahnen

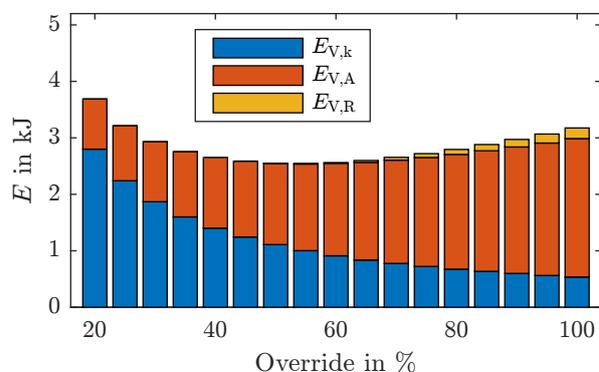
Nachdem in Abschnitt 4.2 das Vorgehen zur Evaluation des Einsparpotentials durch Veränderung der Verfahrszeit detailliert vorgestellt wurde, werden die Untersuchungen im Folgenden auf eine große Anzahl an Bewegungen ausgeweitet. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass eine Ersparnis nicht nur in Einzelfällen und/oder bei ausgewählten Bewegungen möglich ist. Für die Auswertung wird demnach ein Algorithmus benötigt, welcher zufällige Kombinationen aus Start- und Zielposen generiert. Für möglichst allgemeingültige Aussagen sollten sich die generierten Bewegungen über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilen. Hierzu bietet sich eine Vorgabe der Start- und Zielkonfigurationen im Gelenkraum an. Wenn für jedes Gelenk der gültige Wertebereich abgedeckt wird, resultiert daraus die Nutzung des gesamten Arbeitsraums.



(a) Netzseitiger Energiebedarf für $t_{HB} = \infty$ während der Bewegung (E_B) und der Haltephase (E_H)



(b) Netzseitiger Energiebedarf für $t_{HB} = 0$ während der Bewegung (E_B) und der Stillstandphase (E_S)



(c) Aufteilung der Verluste der Bewegungsphase in Konstantverluste $E_{V,k}$, Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$

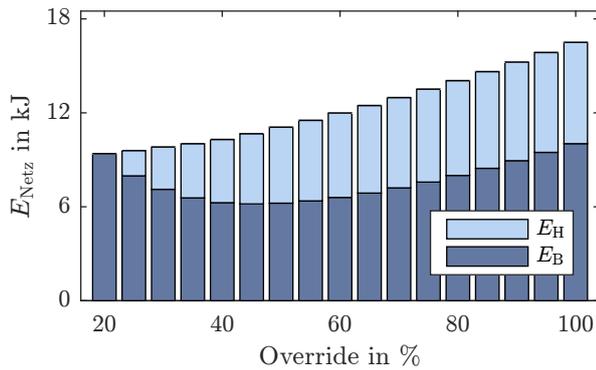


(d) Betrachtete PTP-Bewegung mit Start- und Zielkonfiguration (letztere transparent dargestellt)

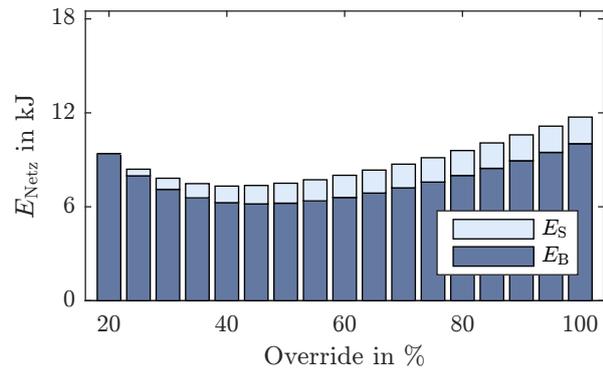
Bild 4.5: Darstellung des Energiebedarfs über der Zeit für eine ausgewählte PTP-Bewegung am KR 16

Die Konfigurationen werden wie folgt generiert: Für jedes Gelenk werden diskret verteilte mögliche Stellungen innerhalb der Endlagen verteilt. Für ein beispielhaftes Gelenk mit den Endlagen $q_{\min} = -20^\circ$ und $q_{\max} = 100^\circ$ und einer Aufteilung in fünf Positionen ergeben sich somit die gültigen Werte $\{-20^\circ, 10^\circ, 40^\circ, 70^\circ, 100^\circ\}$. Die Aufteilung wird für jedes Gelenk wiederholt. Für die Start- und Zielkonfigurationen werden daraus anschließend zufällige Positionen ausgewählt. Zusätzlich wird vorgegeben, dass sich mindestens ein Gelenk um mindestens 45° bewegen muss. Kürzere Bewegungen werden aufgrund der niedrigen absoluten Energieaufnahme in Verbindung mit geringer praktischer Relevanz nicht berücksichtigt. Für die Planung der PTP-Bahnen wird analog zu Abschnitt 4.2 die Bahnplanung der Robotersteuerung benutzt.

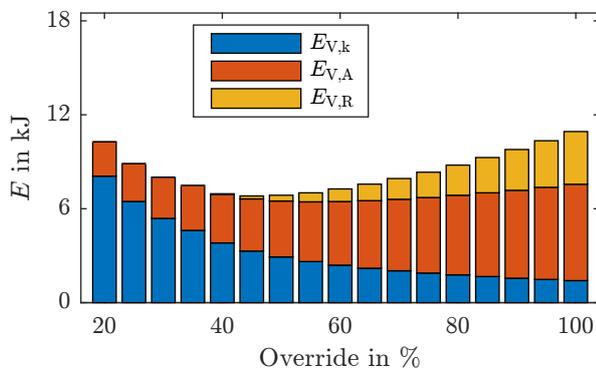
Die Ergebnisse der Auswertung von 1.000 Bewegungen des KR 16 bei jeweils 17 verschiedenen Verfahzeiten sind in Bild 4.7 als Kastendiagramme nach [Cle15] abgebildet. Dargestellt ist der prozentuale Energiebedarf (bezogen auf den Energiebedarf bei OR 100) über dem Override, jeweils für beide Szenarien der Bremsenansteuerung und beide Roboter. Der rote Strich gibt dabei den



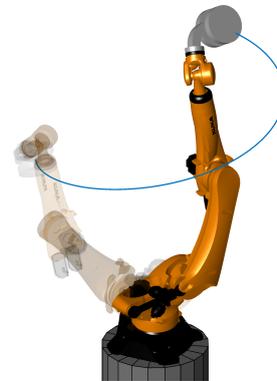
(a) Netzseitiger Energiebedarf für $t_{HB} = \infty$ während der Bewegung (E_B) und der Haltephase (E_H)



(b) Netzseitiger Energiebedarf für $t_{HB} = 0$ während der Bewegung (E_B) und der Stillstandphase (E_S)



(c) Aufteilung der Verluste der Bewegungsphase in Konstantverluste $E_{V,k}$, Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$



(d) Betrachtete PTP-Bewegung mit Start- und Zielkonfiguration (letztere transparent dargestellt)

Bild 4.6: Untersuchung einer vergleichbaren PTP-Bewegung am KR 210

Median des Energiebedarfs aller betrachteten Bewegungen an. Der blaue Kasten markiert den Bereich, der die mittleren 50 % der Daten umfasst. Die schwarzen Antennen kennzeichnen den anderthalbfachen Interquartilsabstand, in dem sich etwa 99,3 % der Werte befinden. Werte außerhalb dieses Bereiches werden als Ausreißer bezeichnet und sind als rote Kreuze dargestellt.

Die Kastendiagramme geben zu erkennen, dass sich die qualitativen Verläufe der untersuchten Beispielbewegung aus Abschnitt 4.2 auch bei beliebig gewählten Bahnen wiederfinden. Für den Fall $t_{HB} = \infty$ (Bild 4.7a und Bild 4.7b) besteht bei sämtlichen simulierten Bewegungen eine streng monotone Abnahme des Energiebedarfs bei steigender Verfahrszeit (dies lässt sich nicht unmittelbar aus dem Kastendiagramm ablesen, sondern ergibt sich aus der Auswertung der zugrundeliegenden Simulationsergebnisse). Für $t_{HB} = 0$ sind hingegen die zuvor gezeigten badewannenförmigen Verläufe wiederzuerkennen (Bild 4.7c und Bild 4.7d). Da beim KR 16 selbst bei Abwärtsbewegungen die dissipierte Bremsenergie vergleichsweise niedrig ausfällt, weisen die Ergebnisse auch eine geringere Bahnabhängigkeit und somit eine geringere Streuung der Ergebnisse auf, was sich in den Größen der Boxen und Antennen widerspiegelt.

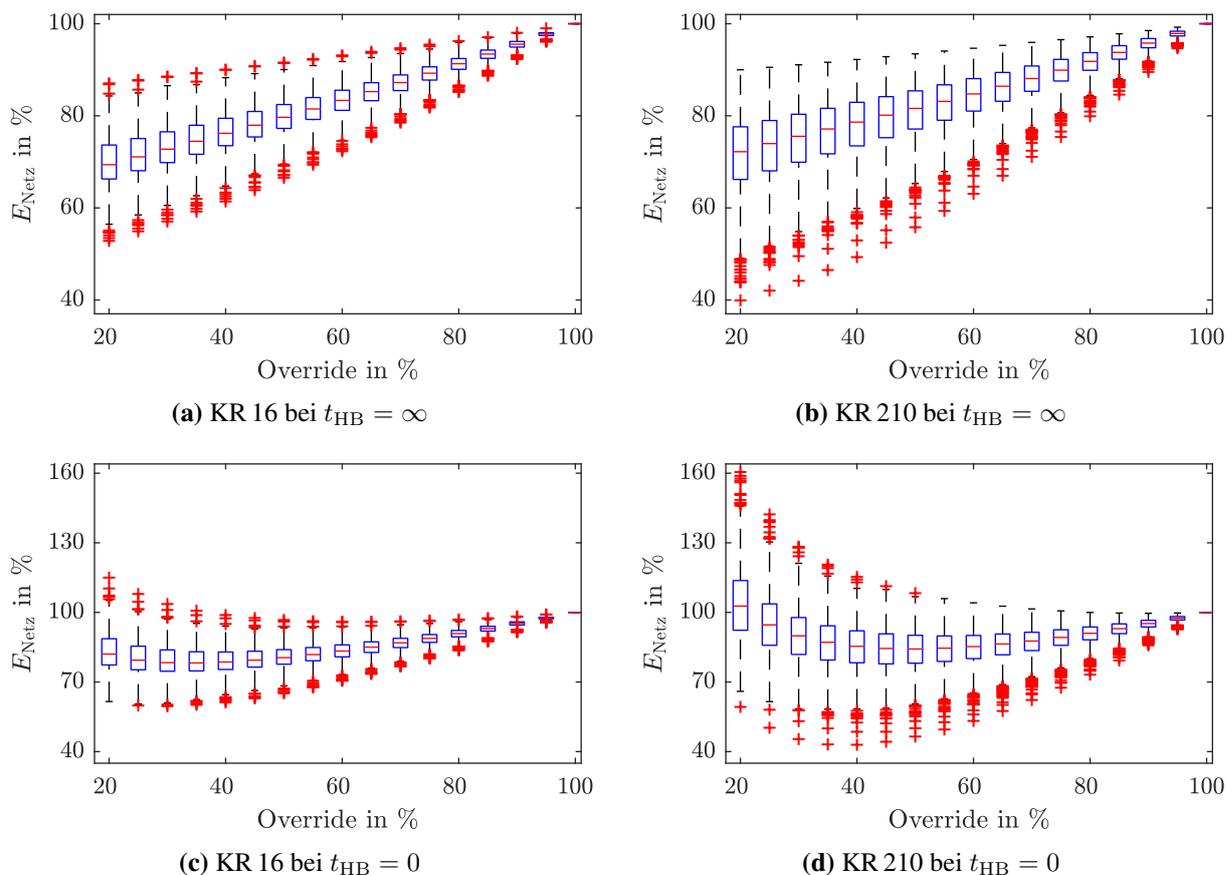


Bild 4.7: Auswertung von jeweils 1.000 Zufallsbewegungen am KR 16 und KR 210

Bei $t_{\text{HB}} = \infty$ ist die langsamste Bewegung in allen Fällen auch die energieeffizienteste, sodass sich das Einsparpotential direkt an dem Kasten für OR 20 ablesen lässt. Für $t_{\text{HB}} = 0$ sind in Bild 4.8 die energieoptimalen ORs der Bewegungen als Histogramme dargestellt. Für den KR 16 ergeben sich überwiegend Fahrten mit OR 30 bis OR 40 als energetisches Optimum (Bild 4.8a), während am KR 210 der energetisch optimale OR für etwa 85 % der Bewegungen zwischen OR 40 und OR 60 liegt (Bild 4.8b). Da beim KR 16 die Halte- und Stillstandverluste enger beieinanderliegen (200 W und 400 W beim KR 16 statt 200 W und 800 W beim KR 210), werden noch langsamere Bewegungen entsprechend weniger bestraft, sodass sich die Optima in Richtung der längsten Verfahzeit verschieben. Die aus den optimalen ORs resultierenden Ersparnisse für beide Roboter sind in Bild 4.9 abgebildet.

Abschließend sind zur Veranschaulichung die Bewegungen mit dem größten und kleinsten Einsparpotential in Bild 4.10 für den KR 210 dargestellt. Bei Abwärtsbewegungen ist der Anteil an dissipierter Bremsenergie in der Regel höher, sodass bei diesen häufig auch die größten prozentualen Ersparnisse erzielt werden können (Bild 4.10a). Der größere prozentuale Anteil ergibt sich auch dadurch, dass durch die Nutzung der im System gespeicherten potentiellen Energie der Absolutwert des netzseitigen Energiebedarfs deutlich niedriger ausfällt. Die geringsten Ersparnisse stellen sich

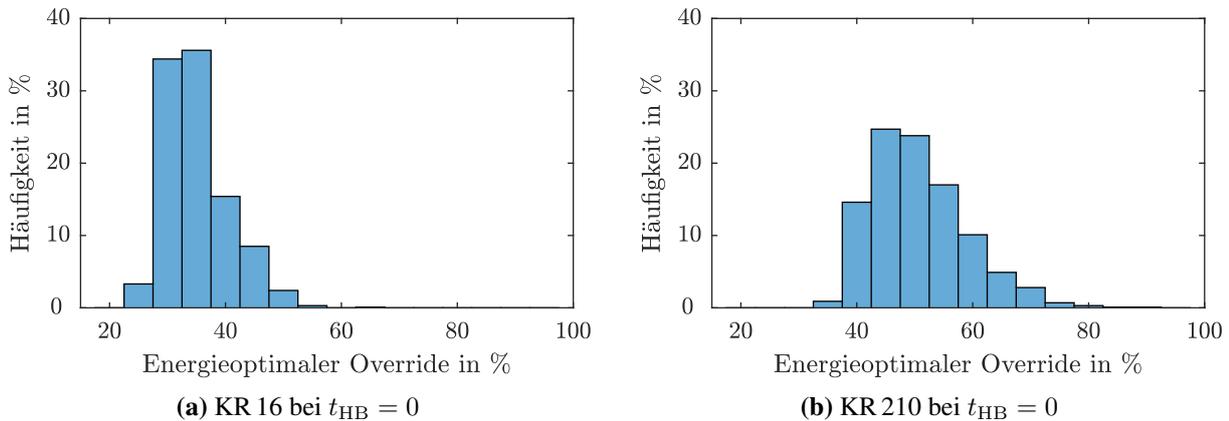


Bild 4.8: Häufigkeitsverteilung der energieoptimalen Overrides

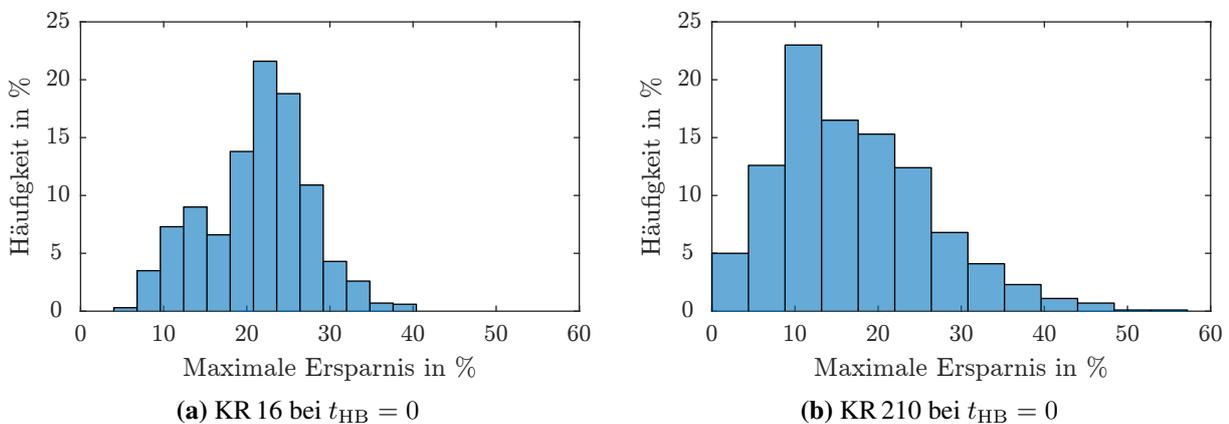


Bild 4.9: Häufigkeitsverteilung des maximalen Einsparpotentials

neben Aufwärtsbewegungen bei handachslastigen Bewegungen ein, da bei diesen bedingt durch die geringere mechanische Leistung sowie den fehlenden Gravitationseinfluss bei den Achsen 4 und 6 auch der Anteil der Bremsenergie geringer ausfällt (Bild 4.10b). Beim KR 16 sind vergleichbare Tendenzen feststellbar, sodass auf eine Abbildung der Bewegungen verzichtet wird.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass eine Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern durch Änderung der Verfahzeit erzielt werden kann. Die Höhe der potentiellen Ersparnisse hängt dabei maßgeblich von der Bewegung, dem verwendeten Roboter und zusätzlichen Randbedingungen wie der Ansteuerung der Haltebremsen ab. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass in zahlreichen Szenarien signifikantes Einsparpotential vorhanden ist. Die zu erwartenden Ersparnisse wurden für eine große Anzahl an Zufallsbewegungen ausgewertet und beispielhafte Bahnen mit besonders hohem und niedrigem Einsparpotential vorgestellt. Bei Bewegungen mit anschließender Haltezeit,

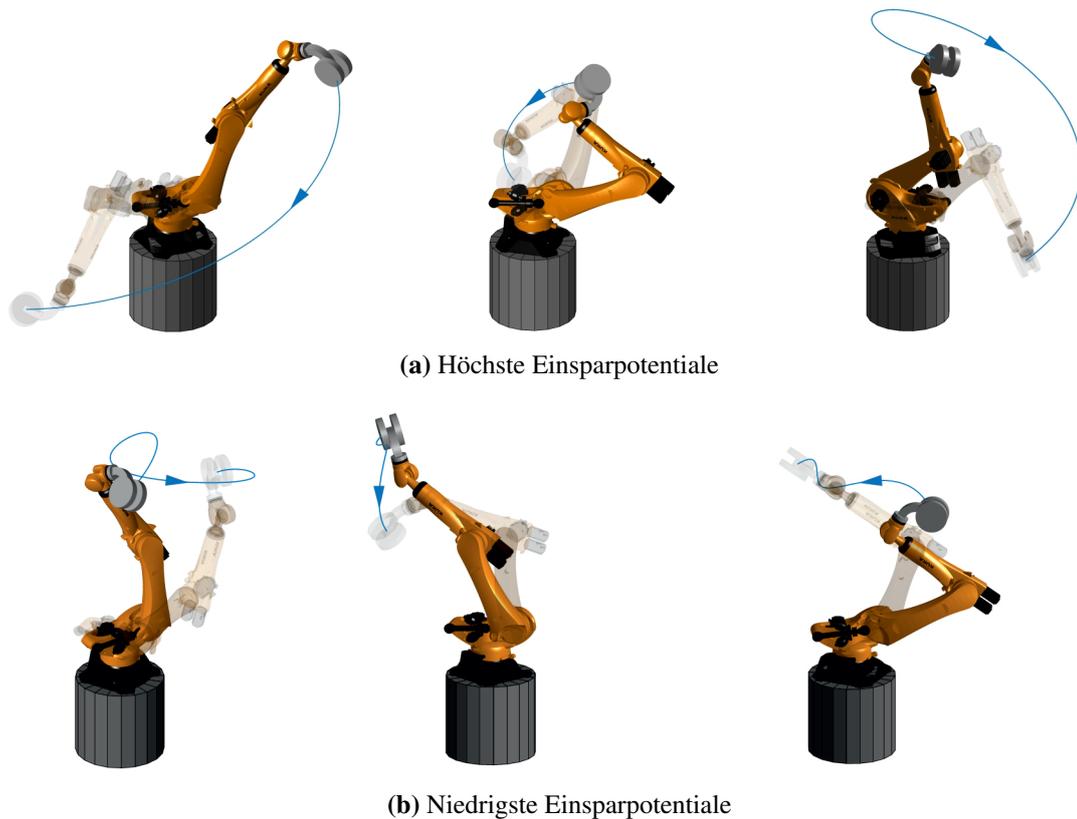


Bild 4.10: Bewegungen des KR 210 mit den höchsten und niedrigsten Einsparpotentialen

in der die erforderlichen Haltemomente aktiv von den Servomotoren gestellt werden, sind möglichst langsame Bewegungen energetisch zu bevorzugen. Dieses Szenario ist nach Stand der Technik aufgrund der standardmäßig langen Bremsenschließzeiten für einen Großteil der Anwendungsfälle gültig. Bei Einsatz von intelligenten oder auf das System angepassten Haltebremsensteuerungen ist die energieoptimale Verfahrzeit in der Regel nicht mehr die langsamste, sondern muss für die jeweilige Bahn gezielt bestimmt werden. Falls die bahnspezifische Bestimmung aufgrund fehlender Datenbasis nicht möglich oder zu aufwendig ist, kann als „Daumenwert“ eine Verlangsamung der Bahn etwa bis zur Verdopplung der ursprünglichen minimalen Verfahrzeit (entspricht OR 50) angestrebt werden. Die Verbesserungsmaßnahme zeichnet sich insbesondere durch die einfache Umsetzung und nachträgliche Anpassung in bestehenden Systemen aus.

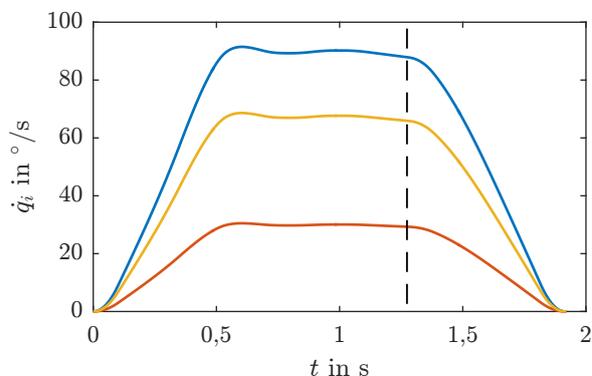
5 Optimierung der Bahngeometrie

In Kapitel 4 stehen Bewegungen im Fokus, bei denen die Verfahrzeit zur Steigerung der Energieeffizienz angepasst werden kann, während der geometrische Weg als unveränderlich fest vorgegeben ist. Im Folgenden werden nun zwei Optimierungsansätze vorgestellt, die eine gezielte Änderung des Weges zur Effizienzsteigerung nutzen. Die Verfahrzeit wird dabei als unveränderlich betrachtet, um das Einsparpotential isoliert anhand der Änderung des Weges untersuchen und bewerten zu können.

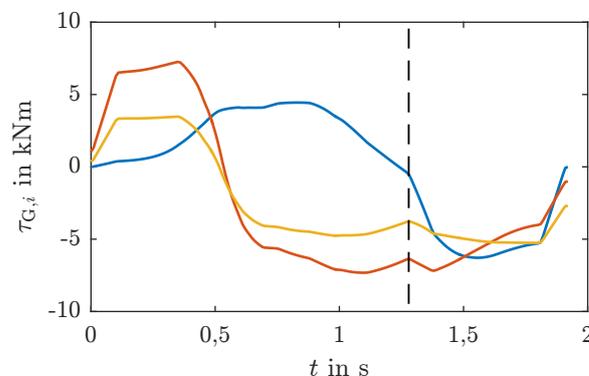
Bei den herkömmlichen, zeitoptimalen Planungsansätzen werden die PTP-Bewegungen mit Hilfe einer übergeordneten Bahnkoordinate $s(t)$ geplant (siehe Abschnitt 2.4). Durch anschließende Multiplikation der Bahnkoordinate mit der relativen Bewegung $\Delta \mathbf{q}$ der Gelenke ergeben sich Bahnprofile, bei denen die Beschleunigungs-, Konstantgeschwindigkeits- und Verzögerungsphasen aller Gelenke zeitlich synchronisiert sind. Mit diesem Ansatz muss nur ein einziges Bahnprofil errechnet werden, welches die dynamischen Randbedingungen aller Achsen berücksichtigt. Neben einer Verringerung des Rechenaufwands wird auch die Umsetzung verschiedener weiterer Funktionen wie zum Beispiel das Überschleifen zweier PTP-Bewegungen vereinfacht.

Gleichzeitig führt die synchronisierte Bahnplanung jedoch häufig dazu, dass in der Verzögerungsphase mehrere oder alle Achsen generatorisch betrieben werden, wie in Bild 5.1 dargestellt. Da im Zwischenkreisverbund kein motorisch arbeitender Abnehmer vorhanden ist, wird die überschüssige Energie über den Bremswiderstand dissipiert. Im Hinblick auf die Energieeffizienz des Systems ist der synchronisierte Planungsansatz somit keineswegs optimal. Neben der Verringerung der dissipierten Energie können weitere Ersparnisse durch die Ausnutzung der mechanischen Kopplung entstehen, sodass beispielsweise Konfigurationen mit hohen Massenträgheiten (und daraus resultierenden höheren benötigten Antriebsmomenten) vermieden werden können. Beim ersten in diesem Kapitel betrachteten Optimierungsansatz wird die Synchronität gezielt zugunsten des Energieaustauschs über den Zwischenkreisverbund und der daraus folgenden Steigerung der Energieeffizienz durch Verringerung der dissipierten Bremsenergie aufgelöst. Dieser Optimierungsansatz unter Verwendung von Basis-Spline-Funktionen wird in Abschnitt 5.1 vorgestellt. Ein alternatives Verfahren, bei dem die Bahnplanung der Robotersteuerung in einer SiL-Konfiguration genutzt wird, ist in Abschnitt 5.2 zu finden. Hierbei werden die Initialbahnen mit Hilfe von Viapunkten derart erweitert, dass sich unter Verwendung der herkömmlichen Bahnplanungsalgorithmen energieeffizientere Bahnen bei gleichbleibender Verfahrzeit ergeben. Die Optimierungsergebnisse beider Verfahren werden in Abschnitt 5.3 an ausgewählten Szenarien gegenübergestellt und verglichen. Ein kurzer Ausblick zur Optimierung unter Anwendung abweichender Kostenfunktionen ist in Abschnitt 5.4 gegeben.

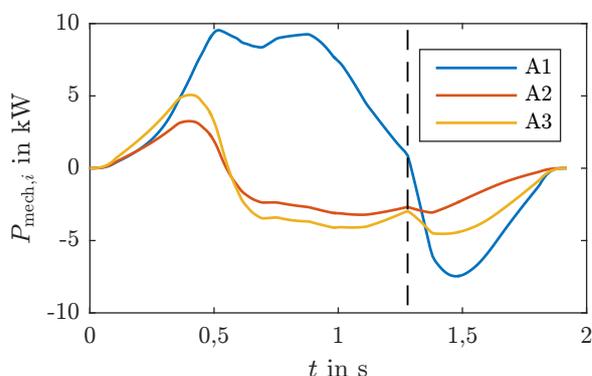
Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse in Abschnitt 5.5.



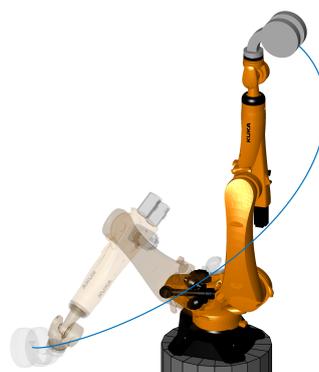
(a) Geschwindigkeitsverläufe



(b) Getriebeseitige Momentenverläufe



(c) Verläufe der mechanischen Leistungen



(d) Betrachtete PTP-Bewegung

Bild 5.1: Verläufe der Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q}_i , getriebeseitigen Momente $\tau_{G,i}$ und mechanischen Leistungen $P_{\text{mech},i}$ der Hauptachsen bei synchronisierter Bahnplanung einer beispielhaften PTP-Bewegung am KR 210. Die schwarze Linie kennzeichnet den Beginn der Verzögerungsphase.

5.1 Optimierung mit B-Spline-Funktionen

Der erste Optimierungsansatz basiert auf der Approximation und anschließenden Änderung der Bahnen mit Hilfe von Basis-Spline-Kurven (oder kurz B-Splines). Die Minimierung des Energiebedarfs unter Verwendung von B-Splines basiert auf [HÖMO12] und wird im Rahmen der Arbeit durch ein validiertes Modell des Leistungs- und Energiebedarfs, eine zeitminimale Planung der Ausgangsbahn sowie zusätzliche Randbedingungen verbessert. Das prinzipielle Vorgehen bei der Optimierung ist als Schaubild in Bild 5.2 dargestellt. Die Ausgangsbahn wird analog zum vorherigen Kapitel direkt mit den Algorithmen der Robotersteuerung generiert. Die resultierenden zeitdiskreten Gelenkwinkelverläufe werden unabhängig voneinander mit Hilfe von B-Spline-

Kurven approximiert. Im Rahmen des Optimierungsverfahrens werden die Kontrollpunkte der B-Spline-Kurven nun derart manipuliert, dass sich eine energieoptimale Trajektorie bei gleichbleibender Fahrzeit ergibt. Die Approximation der Gelenkwinkelverläufe durch B-Spline-Kurven wird in Abschnitt 5.1.1 erläutert. Das Optimierungsverfahren ist in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, die zugehörigen Nebenbedingungen werden in den Abschnitten 5.1.2 und 5.1.3 aufgeführt.

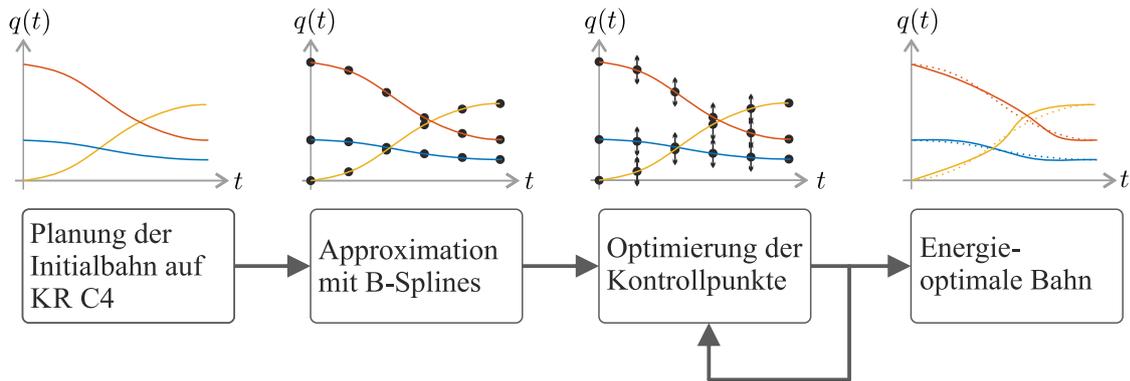


Bild 5.2: Prinzipielles Vorgehen bei der Bahnoptimierung mit Hilfe von B-Splines

5.1.1 Approximation der Gelenkwinkelverläufe durch B-Splines

Wie in Bild 5.2 dargestellt, werden die zu optimierenden Bahnen zunächst auf der Steuerung geplant. Die so erzeugten zeitdiskreten Gelenkwinkelverläufe müssen zur Änderung der Bahn im Rahmen der Optimierung zunächst durch eine Hilfsfunktion approximiert werden. Hierzu werden B-Spline-Kurven gewählt, deren Funktionsweise im Folgenden kurz erläutert werden soll. Eine B-Spline-Kurve mit n_b Kontrollpunkten c_j setzt sich aus mehreren Basisfunktionen $N_{j,p}(t)$ der Ordnung p zusammen [PT95]. In Abhängigkeit der Knotenpunkte $\mathbf{u} = [u_0, \dots, u_{n_b+p+1}]^T$ mit $u_j \leq u_{j+1} \forall j = 0, \dots, n_b + p$ berechnen sich die Basisfunktionen rekursiv wie folgt:

$$N_{j,0}(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } u_j \leq u < u_{j+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{für } p = 0 \text{ sowie} \quad (5.1)$$

$$N_{j,p}(t) = \frac{u - u_j}{u_{j+p} - u_j} N_{j,p-1}(t) + \frac{u_{j+p+1} - u}{u_{j+p+1} - u_{j+1}} N_{j+1,p-1}(t) \quad \text{für } p > 0. \quad (5.2)$$

Anschließend kann die B-Spline-Kurve, die im betrachteten Fall dem Gelenkwinkelverlauf $q_i(t)$ entspricht, durch eine gewichtete Addition der Basisfunktionen zusammengesetzt werden:

$$q_i(t) = \sum_{j=0}^{n_b} c_{i,j} N_{j,p}(t). \quad (5.3)$$

Die Wichtungsfaktoren $c_{i,j}$ entsprechen dabei den Kontrollpunkten $\mathbf{c}_i = [c_{i,0}, \dots, c_{i,n_b}]^T$. Der Knotenpunktvektor \mathbf{u} , dessen Elemente den zeitlichen Abstand der Kontrollpunkte definieren, wird für alle Gelenke i identisch und äquidistant gewählt. Da sich eine Variation der Kontrollpunkte nach (5.3) nur auf einzelne Basisfunktionen und demnach nur lokal auf den Kurvenverlauf auswirkt, sind B-Spline-Kurven gut zur Optimierung von Trajektorien geeignet. Anwendungsbeispiele bei verschiedenen Trajektorienoptimierungsproblemen sind in [HH07, HÖMO12, RLH12] zu finden.

Zur Nachbildung der auf der Robotersteuerung erzeugten Gelenkwinkelverläufe mit B-Splines werden die Kontrollpunkte durch eine Least-Square-Approximation bestimmt [PT95]. Bei der Betrachtung von Rast-in-Rast-Bewegungen werden die ersten und letzten drei Kontrollpunkte festgesetzt, um den Ruhezustand im Start- und Zielpunkt zu erzwingen [HH07]. Die Approximation einer Beispielbahn mit variabler Anzahl an Kontrollpunkten ist in Bild 5.3 dargestellt. Die in den Bildern angegebene Anpassungsgüte ζ wurde anhand des normierten mittleren quadratischen Fehlers (englisch normalized root mean square Error oder kurz NRMSE) für die jeweils dargestellte Größe bestimmt. Es ist zu erkennen, dass eine hohe Anpassungsgüte des Gelenkwinkelverlaufs noch nicht zwingend eine gute Abbildung der aus den approximierten Gelenkwinkelverläufen berechneten Geschwindigkeits- und Momentenverläufe bedeutet. Zur möglichst guten Abbildung ist demnach eine hohe Anzahl an Kontrollpunkten erstrebenswert. Mit der Anzahl der Kontrollpunkte steigen allerdings auch der Optimierungsaufwand sowie die Welligkeit der Geschwindigkeit der optimierten Trajektorie [Kot13], sodass ein vertretbarer Kompromiss gefunden werden muss. Bei den folgenden Untersuchungen wird n_b in Abhängigkeit von der betrachteten Bahn solange erhöht, bis die Anpassungsgüte des Momentenverlaufs 0,9 oder größer beträgt und die Nebenbedingungen aus Abschnitt 5.1.2 auch nach der Approximation nicht verletzt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass eine hinreichend genaue Abbildung der Initialbahn unabhängig von der Bahnlänge gegeben ist.

5.1.2 Formulierung des Optimierungsproblems

Nach Approximation der zu optimierenden Bahn durch B-Splines kann diese nun anhand der Kontrollpunkte $c_{i,j}$ beschrieben und manipuliert werden. Im Rahmen der Optimierung werden die Kontrollpunkte derart verschoben, dass sich eine energetisch effizientere Bahn ergibt. Durch entsprechende Verschiebung der Kontrollpunkte ist es prinzipiell auch möglich, Bahnen mit einer kürzeren Verfahrzeit als der initialen zu generieren. Der zu optimierende Parametervektor \mathbf{p}_{BS} setzt sich aus den reduzierten Kontrollpunktvektoren $\mathbf{c}_{i,\text{red}}$ zusammen, bei denen die unveränderlichen ersten und letzten Kontrollpunkte entfernt wurden (siehe Abschnitt 5.1.1):

$$\mathbf{p}_{BS} = [\mathbf{c}_{1,\text{red}}^T, \dots, \mathbf{c}_{n_c,\text{red}}^T]^T, \text{ mit} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{c}_{i,\text{red}} = [c_{i,3}, \dots, c_{i,n_b-3}]^T. \quad (5.5)$$

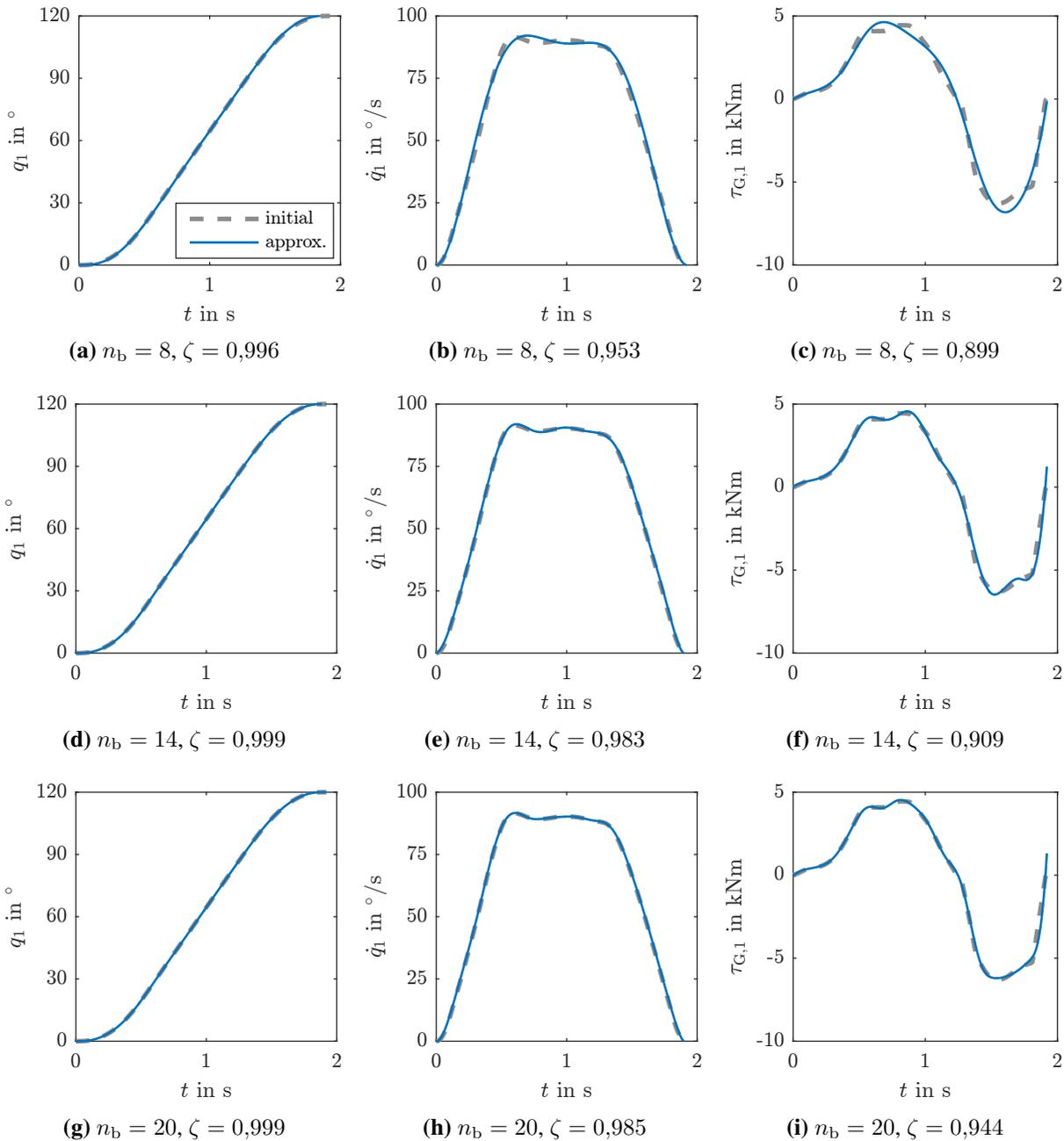


Bild 5.3: Einfluss der Anzahl an Kontrollpunkten n_b auf die Approximationsgüte ζ für q_1 , \dot{q}_1 und $\tau_{G,1}$

Mit n_c wird dabei die Anzahl der veränderlichen Kontrollpunkte bezeichnet. Das Optimierungsproblem lässt sich somit wie folgt darstellen:

$$\mathbf{p}_{BS,opt} = \arg \min_{\mathbf{p}_{BS}} J(\mathbf{p}_{BS}). \quad (5.6)$$

Bei der Optimierung des Energiebedarfs entspricht das Kostenfunktional $J(\mathbf{p}_{\text{BS}})$ der netzseitigen Energieaufnahme E_{Netz} :

$$J(\mathbf{p}_{\text{BS}}) = E_{\text{Netz}}(\mathbf{p}_{\text{BS}}) = \int_0^T P_{\text{Netz}}(\mathbf{p}_{\text{BS}}, t) dt. \quad (5.7)$$

Zur Lösung wird der Active-Set-Algorithmus genutzt, der das Optimierungsproblem in mehrere Subprobleme geringerer Komplexität unterteilt und diese unter Verwendung von Lagrange-Multiplikatoren löst. Ausführliche Beschreibung des Optimierungsalgorithmus und Informationen zur praktischen Anwendung sind in [NW06, Fle13] zu finden. Ein vergleichbares Optimierungsproblem wurde unter Verwendung des Active-Set-Algorithmus in [Kot13] gelöst. Im Rahmen der Optimierung werden folgende kinematische und dynamische Ungleichungsnebenbedingungen berücksichtigt:

$$\begin{aligned} q_i(t) - q_{\max,i} &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ q_{\min,i} - q_i(t) &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ |\dot{\varphi}_i(t)| - \dot{\varphi}_{\max,i} &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ |\tau_{\text{G}_{\max,i}}| - \tau_{\text{G}_i}(t) &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ |\tau_{\text{M}_{\max,i}}(\dot{\varphi}_i(t))| - \tau_{\text{M}_i}(t) &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ -z_{\text{E}}(t) &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\ T_{\text{opt}} - T_{\text{init}} &\leq 0. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Die Grenzwerte der Gelenkwinkel $q_{\min,i}$ bzw. $q_{\max,i}$, Motorgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}_{\max,i}$, Getriebemomente $\tau_{\text{G}_{\max,i}}$ und Motormomente $\tau_{\text{M}_{\max,i}}$ können aus den jeweiligen Datenblättern entnommen werden. Das maximale Motormoment ergibt sich aus dem Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld des Motors und besitzt daher eine Abhängigkeit von $\dot{\varphi}_i$. Die Einschränkung für z_{E} dient zur Kollisionsvermeidung mit dem Boden und wird unter Verwendung der direkten Kinematik geprüft. Eigenkollisionen des Roboters werden durch Berücksichtigung von $q_{\min,i}$ und $q_{\max,i}$ unterbunden. Schließlich darf die Verfahrzeit T_{opt} der optimierten Bahn nicht länger sein als die initiale Verfahrzeit T_{init} .

5.1.3 Begrenzung der Wegänderung durch Toleranzband

Zur Einschränkung der maximalen Änderung des geometrischen Weges kann zusätzlich ein Toleranzband um die Initialbahn parametrisiert werden. Der Einsatz bietet sich insbesondere bei der Optimierung von verketteten PTP-Bewegungen an, bei denen die ursprüngliche Bewegungsform annähernd beibehalten werden soll. Schematisch ist dies in Bild 5.4 dargestellt.

Das Toleranzband wird durch eine maximale Abweichung ρ_{\max} der optimalen Bahn von der initialen parametrisiert. Für jeden Punkt der zeitdiskreten optimierten Bahn wird der Abstand zum

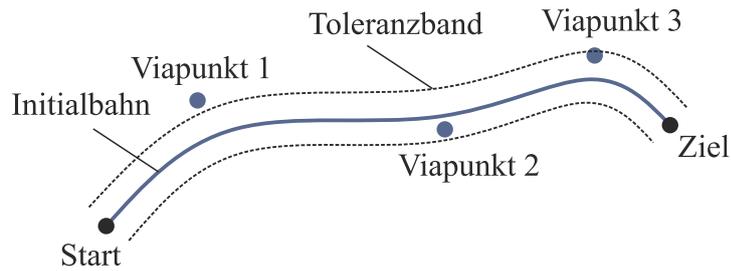


Bild 5.4: Schematische Darstellung des Toleranzbandes

nächstgelegenen Punkt der zeitdiskreten initialen Bahn berechnet und als zusätzliche Nebenbedingung

$$\rho(t) - \rho_{\max} \leq 0 \quad \forall t \in [0; T] \quad (5.9)$$

überprüft. Für ρ_{\max} kann statt eines konstanten Wertes bei Bedarf auch eine Funktion vorgegeben werden, sodass das Band an beliebigen Stellen verjüngt oder geweitet werden kann. Durch die Diskretisierung der Bahnen verbleibt ein systematischer Fehler bei der Abstandberechnung, da nicht der tatsächliche Abstand der Bahnen, sondern nur der diskretisierten Punkte bestimmt wird. Wie in Bild 5.5 dargestellt, ist der berechnete Abstand immer größer als der reale, sodass der systematische Fehler nicht zu einer unbemerkten Verletzung der Nebenbedingung führt. Falls für die betrachtete Applikation vollständige Konstruktionsdaten vorliegen, können auch komplexere Methoden zur Kollisionserkennung als Nebenbedingung berücksichtigt werden, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

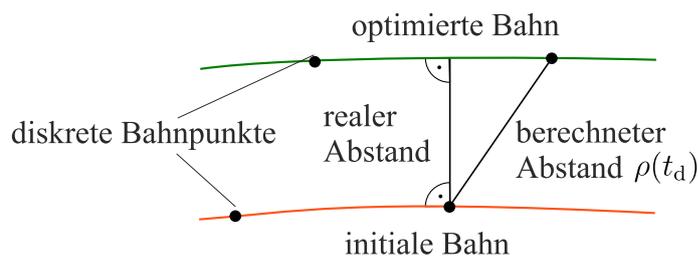


Bild 5.5: Fehler bei der Abstandberechnung durch Diskretisierung der Bahnen

5.2 Optimierung durch Nutzung von Viapunkten

Ein Nachteil des in Abschnitt 5.1 vorgestellten Optimierungsansatzes unter Verwendung von B-Splines besteht darin, dass sich die Ergebnisse nicht ohne Weiteres zurück auf die Steuerung

übertragen lassen. Schnittstellen zur Vorgabe von Sollwerten stehen bei den meisten Herstellern nur begrenzt und vorwiegend für Forschungs- und Entwicklungszwecke zur Verfügung. Darüber hinaus erfordert der B-Spline-Ansatz hohes Systemwissen, da für die Optimierung alle dynamischen Randbedingungen des Roboters bekannt sein müssen. Der im Folgenden vorgestellte Ansatz nutzt daher die herstellereigenen Bahnplanungsfunktionen zur Vorgabe einer energieoptimalen Bahn. Der Ablauf der Optimierung ist in Bild 5.6 dargestellt. Analog zum vorherigen Verfahren wird die initiale Bahn von der Robotersteuerung generiert. Im Rahmen der Optimierung werden nicht mehr direkt die Gelenkwinkelverläufe manipuliert, sondern stattdessen das Programm zu deren Erzeugung auf der Steuerung. Hierzu wird die in Abschnitt 4.2 beschriebene SiL-Konfiguration genutzt. Es können bestehende Viapunkte der Bahn verschoben und/oder weitere Viapunkte hinzugefügt werden. Trotz Verwendung der synchronisierten Bahnplanung der Robotersteuerung können durch die Einführung zusätzlicher Viapunkte die Bewegungen einzelner Achsen verschoben und somit energetisch ungünstige Konfigurationen vermieden und/oder die Menge dissipierter Bremsenergie reduziert werden. Start- und Zielpunkt der Bewegung bleiben unverändert. Zur Erzeugung der Startwerte für neue Viapunkte werden diese auf den halben Weg zweier bestehender Punkte im Gelenkraum mit vollem Überschliff gelegt. Durch die Verwendung der synchronen Bahnplanung liegen diese somit immer auf der Initialbahn. Das hier beschriebene Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und erstmalig in [ZEKO17] veröffentlicht.

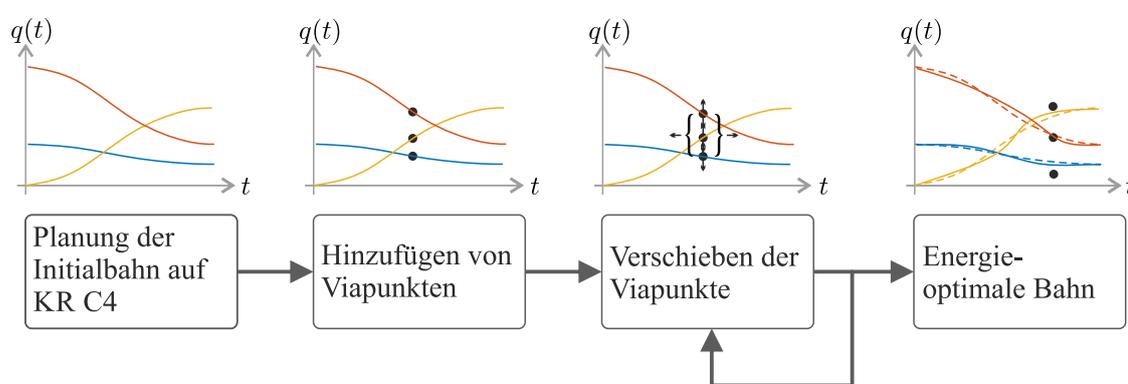


Bild 5.6: Prinzipielles Vorgehen bei der Bahnoptimierung unter Verwendung von Viapunkten

5.2.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Da die zusätzlich eingefügten Viapunkte q_V im Rahmen der Optimierung verschoben werden sollen, finden sich diese auch im zu optimierenden Parametervektor wieder. Darüber hinaus können durch die Verschiebung der Viapunkte auch Zeitersparnisse gegenüber der Initialbahn entstehen, die aus einer Verringerung der konfigurationsabhängigen Massenträgheiten der Gelenke resultieren. Die verringerten Trägheiten führen zu höheren möglichen Beschleunigungen bei gleichbleibenden (maximalen) Motormomenten. Die Zeitersparnisse können wiederum nach den Erkenntnissen aus

Kapitel 4 genutzt werden, indem die Bahn bis zum Erreichen der initialen Verfahzeit verlangsamt wird (sofern dies energetisch sinnvoll ist). Zur Verlangsamung können die maximalen prozentualen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der jeweiligen Gelenke anhand der Werte a_i und v_i vorgegeben werden. Diese entsprechen den Befehlen $\$acc_axis[i]$ beziehungsweise $\$vel_axis[i]$ in der Programmiersprache KRL. Der zu optimierende Parametervektor \mathbf{p}_{VP} ergibt sich zu

$$\mathbf{p}_{VP} = [\mathbf{a}^T, \mathbf{v}^T, \mathbf{q}_{V,1}^T, \dots, \mathbf{q}_{V,n_V}^T]^T, \quad \text{mit} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_n]^T \quad \forall a_i \in [0; 100], \quad (5.11)$$

$$\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_n]^T \quad \forall v_i \in [0; 100], \quad (5.12)$$

$$\mathbf{q}_{V,i_V} = [q_{V,i_V,1}, \dots, q_{V,i_V,n}]^T \quad \forall q_{V,i_V,i} \in [q_{\min,i}; q_{\max,i}]. \quad (5.13)$$

Hierbei beschreibt n_V die Anzahl der veränderlichen Viapunkte \mathbf{q}_{V,i_V} mit dem Laufindex i_V des aktuell betrachteten Viapunkts. Das Optimierungsproblem lässt sich somit wie folgt darstellen:

$$\mathbf{p}_{VP,opt} = \arg \min_{\mathbf{p}_{VP}} J(\mathbf{p}_{VP}). \quad (5.14)$$

Das Kostenfunktional $J(\mathbf{p}_{VP})$ entspricht bei Optimierung des Energiebedarfs erneut der netzseitigen Energieaufnahme E_{Netz} :

$$J(\mathbf{p}_{VP}) = E_{\text{Netz}}(\mathbf{p}_{VP}) = \int_0^T P_{\text{Netz}}(\mathbf{p}_{VP}, t) dt. \quad (5.15)$$

Die Formulierung des Optimierungsproblems gleicht (5.6) unter Verwendung des neuen Parametervektors \mathbf{p}_{VP} . Da auch bei diesem Ansatz ein nichtlineares Optimierungsproblem mit zu erfüllenden Ungleichungsnebenbedingungen (siehe Abschnitt 5.2.2) vorliegt, wird erneut der Active-Set-Algorithmus zur Lösung verwendet. Ein beispielhaftes Programm vor und nach Änderung durch die Optimierung ist in Bild 5.7 dargestellt. Die in rot abgebildeten Änderungen/Erweiterungen des initialen Quelltexts sind die Ergebnisse des Optimierungsverfahrens.

5.2.2 Nebenbedingungen der Optimierung

Da bei der Optimierung unter Nutzung von Viapunkten die Bahnplanung auf der Robotersteuerung durchgeführt wird, entfallen im Vergleich zu (5.16) einige der Nebenbedingungen. Genau genommen verschiebt sich die Überprüfung der Einhaltung in die steuerungsseitige Bahnplanung. Dies gilt für alle aus der Bahnplanung resultierenden Größen, also konkret die Begrenzungen der Motor- und Getriebemomente sowie der Motorgeschwindigkeiten. Die minimalen und maximalen Gelenkwinkelgrenzen der interpolierten Bahn werden ebenfalls bei der Bahnplanung überwacht,

1 ;Initiale Geschw. und Beschl. in %	1 ;Optimierte Geschw. und Beschl. in %
2 for $i = 1$ to 6	2 for $i = 1$ to 6
3 \$acc_axis[i] = 75	3 \$acc_axis[i] = $a_{i,opt}$
4 \$vel_axis[i] = 90	4 \$vel_axis[i] = $v_{i,opt}$
5 endfor	5 endfor
6	6
7	7 ;Überschliffradius in %
8	8 \$apo.cptp = 100
9	9
10 ;Fahrt zur Startposition	10 ;Fahrt zur Startposition
11 PTP q_S	11 PTP q_S
12 HALT	12 HALT
13	13 ;zusätzlicher Viapunkt mit Überschliff
14	14 PTP $q_{V,1}$ c_{ptp}
15 ;Fahrt zur Zielposition	15 ;Fahrt zur Zielposition
16 PTP q_Z	16 PTP q_Z
(a) Initialer Quelltext	(b) Optimierter Quelltext

Bild 5.7: Beispielhafter Quelltext vor und nach der Optimierung mit $n_V = 1$, angelehnt an die Programmiersprache KUKA Robot Language (KRL)

die Einhaltung der Gelenkraumgrenzen bei Verschiebung der Viapunkte wird durch die Begrenzung der Optimierungsparameter in (5.13) sichergestellt. Die Ungleichungsnebenbedingungen ergeben sich somit zu

$$\begin{aligned}
 -z_E(t) &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\
 \rho(t) - \rho_{\max} &\leq 0 \quad \forall t \in [0; T], \\
 T_{\text{opt}} - T_{\text{init}} &\leq 0.
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

5.3 Vergleich der beiden Verfahren an ausgewählten Szenarien

Die beiden vorgestellten Optimierungsansätze sollen nun anhand verschiedener Szenarien, die sich an typischen industriellen Anwendungen orientieren, verglichen und bewertet werden. In Abschnitt 5.3.1 wird die Optimierung einzelner (also unverketteter) PTP-Bewegungen vorgestellt. In Abschnitt 5.3.2 sind die Optimierungsergebnisse für verkettete Bewegungen zu finden. Die Untersuchungen werden simulativ für beide Roboter durchgeführt und am KR 16 zusätzlich mit Messungen validiert. Neben den dargestellten Ergebnissen sind die Ergebnisse zu Untersuchungen an weiteren Bewegungen für den KR 16 in [Die15] und für den KR 210 in [ZEKO17] zu finden.

5.3.1 Einzelbewegungen

Zuerst werden einzelne (also unverkettete) PTP-Bewegungen von Rast in Rast betrachtet, wie sie häufig bei der An- und Rückstellbewegung bei spanenden oder schweißenden Prozessen oder beim Greifen in Pick-and-Place-Applikationen zu finden sind. Aus diesen Beispielanwendungen leiten sich auch die im Folgenden betrachteten Bahnen ab. In Bild 5.8a ist eine Bewegung mit der initialen und den beiden optimierten Wegverläufen am KR 16 abgebildet, die der Anstellbewegung beim Schweißen nachempfunden ist und aus der Referenzposition des Roboters startet. Für die Optimierung werden $n_b = 20$ und $n_v = 2$ gewählt. Es wird von einem kollisionsfreien Raum ausgegangen und somit kein Toleranzband genutzt. Kollisionen mit dem Boden werden durch Begrenzung von z_E vermieden. Bei den initialen Bewegungen werden die Achsgeschwindigkeiten auf 90 % und die -beschleunigungen auf 75 % der maximal möglichen Werte gesetzt. Zum einen lässt sich dies dadurch begründen, dass nach den Erkenntnissen aus Kapitel 4 davon ausgegangen werden kann, dass eine zeitminimale Fahrt energetisch nicht sinnvoll und in vielen Fällen für die Gesamttaktzeit nicht notwendig ist. Zum anderen entstehen bei einer langsameren Initialbahn mehr Freiheiten für die Optimierung, da die dynamischen Randbedingungen nicht schon vor der Optimierung vollständig ausgereizt werden. Grundsätzlich ist jedoch auch eine energetische Optimierung von zeitoptimalen Bahnen möglich, wie in [ZEKO17] gezeigt. Zur Verringerung der maximalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden die KRL-Befehle `$vel_axis` beziehungsweise `$acc_axis` genutzt. Prinzipiell lässt sich auch eine Verlangsamung durch Verringerung des Overrides erzielen, dieser wird aber in der Regel nur in Inbetriebnahmeszenarien auf Werte unter 1 reduziert.

In Bild 5.8b sind die netzseitige Energieaufnahme E_{Netz} , die Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ sowie die dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$ für die drei Bahnen am KR 16 als Säulendiagramme dargestellt. Der Roboter wird für diese und alle folgenden Messungen auf 60 °C warmgefahren, Messungenauigkeiten werden vernachlässigt. Analog zu den Ergebnissen aus Kapitel 4 fällt der Anteil der dissipierten Bremsenergie beim KR 16 sehr gering aus, selbst bei Abwärtsbewegungen. Hierdurch ist entsprechend auch das Einsparpotential durch Optimierung des Weges bei kleinen Robotern eingeschränkt. Dennoch ist zu erkennen, dass sich der Energiebedarf durch die Optimierung verringern lässt und das Optimierungsverfahren das Verbesserungspotential ausschöpft. Im Viapunkt-basierten Ansatz wird die Achssynchronität nicht aufgehoben, wodurch die Dissipation von Bremsenergie nicht gänzlich vermieden werden kann. Die B-Spline-basierte Bahnoptimierung unterliegt dieser Einschränkung nicht, sodass die dissipierte Bremsenergie weiter reduziert wird. Durch die zusätzlichen Gelenkbewegungen beim B-Spline-Ansatz fallen die Antriebsstrangverluste insgesamt etwas höher aus als bei der Initialbahn. Darüber hinaus ist an den Wegverläufen zu erkennen, dass auch ohne Begrenzung der maximal zulässigen Wegänderung der geometrische Weg nur geringfügig geändert wird, da Abweichungen vom Initialweg prinzipiell eine Verlängerung des Weges im Gelenkraum bedeuten. Ein zu starker „Umweg“ wird daher energetisch bestraft und stellt in diesem Fall keine energieoptimale Lösung dar.

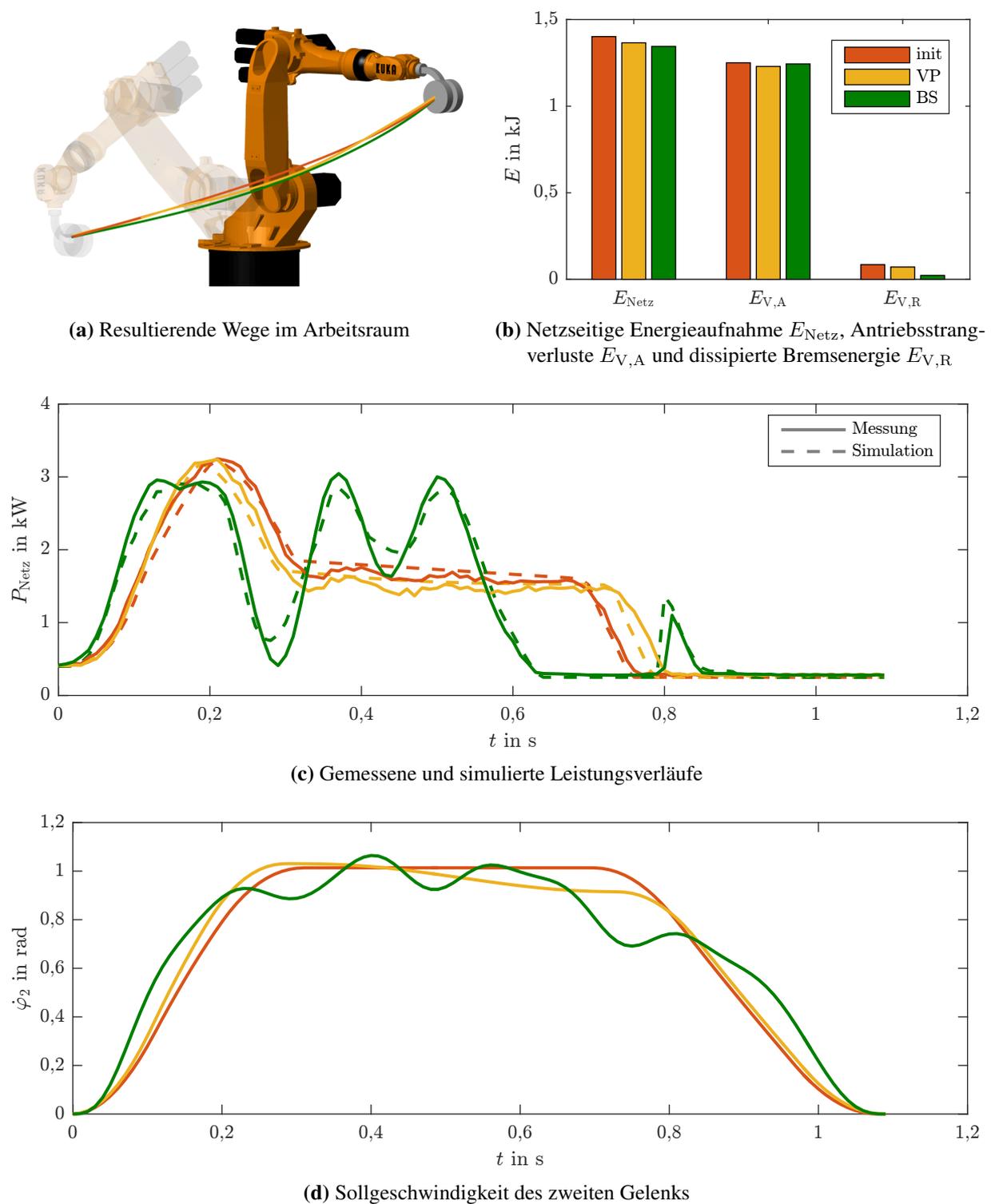


Bild 5.8: Optimierung einer Anstellbewegung am KR 16. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Tabelle 5.1: Simulations- und Messergebnisse zur Anstellbewegung am KR 16

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %	E_{Mess} in kJ	E_{Mess} in %	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
inital	1,402	100,0	1,407	100,0	99,6
opt. Viapunkte	1,366	97,4	1,374	97,7	99,4
opt. B-Spline	1,345	96,0	1,349	95,9	99,6

Eine Leistungsmessung am in Kapitel 3 vorgestellten Prüfstand zeigt, dass sich die Simulationsergebnisse auch in der Praxis bestätigen lassen. Die simulierten und gemessenen Leistungsverläufe der drei Bewegungen sind in Bild 5.8c dargestellt. Wie in Kapitel 3 erläutert, resultiert der Restfehler hauptsächlich aus Abweichungen der inversen Dynamik und insbesondere der Reibparameter, was sich sichtbar bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit der initialen sowie der mit Viapunkten optimierten Bewegung im Bereich von etwa 0,3 bis 0,7 Sekunden abzeichnet. Weitere Fehlerquellen sind die Nichtberücksichtigung von Totzeiten, Regel-/Schleppfehlern sowie Schwingungen des Antriebsstrangs und der Struktur. Bei Betrachtung der aufgenommenen Netzenergie wird eine sehr gute Übereinstimmung erzielt: sowohl die Berechnung des quantitativen Energiebedarfs als auch der durch die Optimierung zu erwartenden Ersparnis weichen um weniger als ein Prozent ab, die genauen Werte sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Beim Leistungsverlauf der mit B-Splines optimierten Bahn ist eine Oszillation zu erkennen, die sich auch in den Sollbewegungen der Gelenke wiederfindet. Zur Veranschaulichung sind die Sollgeschwindigkeiten beispielhaft für das zweite Gelenk in Bild 5.8d dargestellt. Die Oszillation ergibt sich prinzipbedingt, da sich geringe Änderungen des Positionsverlaufs durch Verschieben der B-Spline-Knotenpunkte verstärkt in den zugehörigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen abbilden. Zur Reduktion der Schwingung können zum Beispiel entweder zusätzliche Kostenfunktionale eingeführt oder die Bahn nachträglich gefiltert werden. Da der B-Spline-Ansatz das theoretisch mögliche Einsparpotential aufzeigen soll und die Bahnen im Rahmen der definierten Randbedingungen gültig sind, wird von einer nachträglichen Bearbeitung der Bahnen abgesehen.

Die Optimierung einer vergleichbaren Bewegung mit identischem Start- und Zielpunkt im Gelenkraum am KR 210 ist in Bild 5.9 dargestellt. Zunächst ist in Bild 5.9a zu erkennen, dass die optimierten Wegverläufe der beiden Verfahren denen des KR 16 stark ähneln. Bei der Optimierung wird der Weg erneut nach unten korrigiert, was zu einem Abflachen des Weges und somit zu einer ausgedehnten Verzögerungsphase führt. Hierdurch können die zwischenkreisseitigen Verluste länger durch überschüssige Bremsleistung kompensiert werden, sodass eine Verringerung der dissipierten Bremsenergie $E_{V,R}$ resultiert (siehe Bild 5.9b). An den Verlustverteilungen der Bahnen ist zu erkennen, dass sich das Einsparpotential bei der betrachteten Bewegung größtenteils aus der Verringerung der Bremsenergie und nur sehr begrenzt aus der Verringerung der Antriebsstrangverluste ergibt. Bei der Optimierung mit B-Splines kann durch die Möglichkeit zur asynchronen Bahnplanung die Menge dissipierter Bremsenergie noch weiter gesenkt werden. Durch den insgesamt größeren Anteil an dissipierter Bremsenergie beim KR 210 ist beim größeren Roboter auch das (relative und absolute) Einsparpotential höher. Eine weitere oder vollständige Reduktion der

dissipierten Bremsenergie wird durch die geforderte Einhaltung der initialen Verfahrzeit verhindert. Bei der gezeigten Bahn beträgt der netzseitige Energiebedarf 94,6 % bei Optimierung mit Viapunkten und 85,7 % bei Optimierung mit B-Splines, wie Tabelle 5.2 zu entnehmen ist.

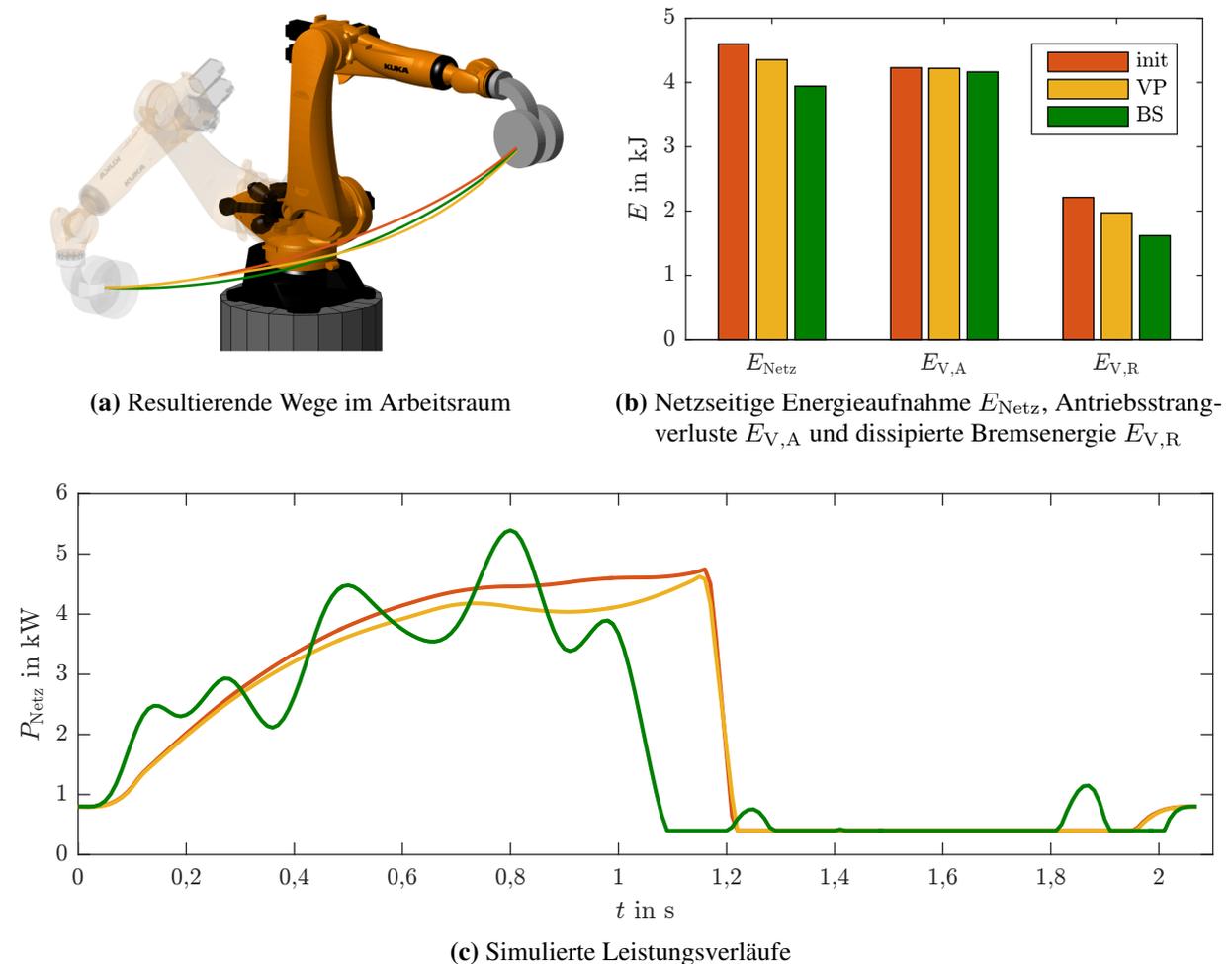


Bild 5.9: Optimierung einer Anstellbewegung am KR 210. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Nach der Optimierung der Anstellbewegung wird im Folgenden die zugehörige Rückstellbewegung betrachtet, bei der sich der Roboter nach Beendigung des Prozessschrittes typischerweise zurück in die Referenzposition bewegt. Während bei der beispielhaften Anstellbewegung eine Abwärtsbewegung stattfindet, wird für die Rückstellbewegung eine Aufwärtsbewegung angenommen. Grundsätzlich können die An- und Rückstellbewegungen in Abhängigkeit von der zugrundeliegenden Aufgabe beliebig geartet sein. Die Einstellungen der Optimierung entsprechen denen der Anstellbewegung.

Tabelle 5.2: Simulationsergebnisse zur Anstellbewegung am KR 210

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %
inital	4,599	100,0
opt. Viapunkte	4,353	94,6
opt. B-Spline	3,942	85,7

Die initiale und die optimierten Bewegungen des KR 16 sind in Bild 5.10a dargestellt, zusammen mit den Verlustverteilungen in Bild 5.10b und den simulierten und gemessenen Leistungsverläufen in Bild 5.10c. Da die Bewegung entgegen der Gravitation durchgeführt wird, kann diese auch nicht zur Optimierung genutzt werden; einzelne Achsen können sich nicht mehr „fallen lassen“ und dem

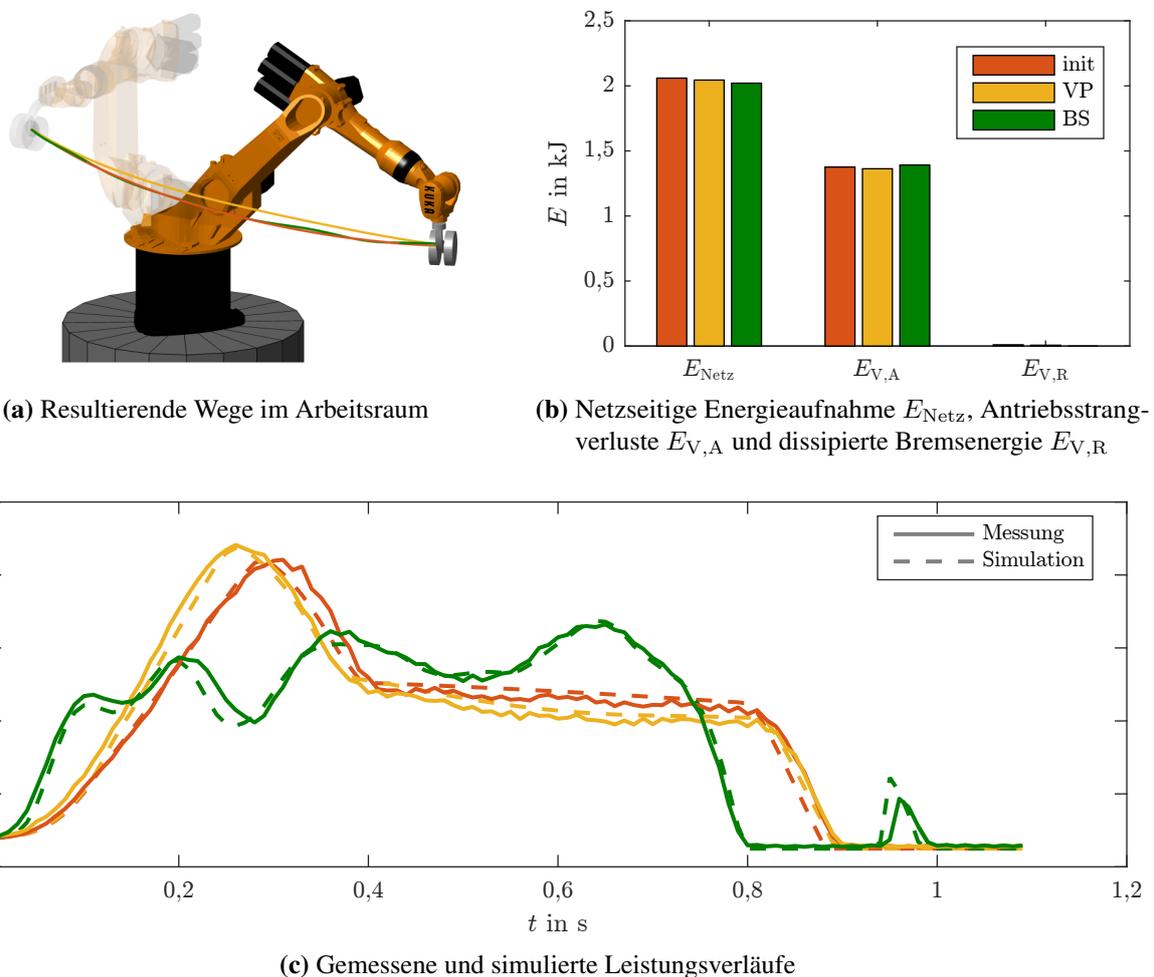


Bild 5.10: Optimierung einer Rückstellbewegung am KR 16. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Zwischenkreis so generatorische Leistung bereitstellen. Dementsprechend ist auch das Einsparpotential durch die Optimierung merkbar geringer. Zusätzlich wird durch die Aufgabe die Zufuhr potentieller Energie vorgegeben, deren Menge durch die feste Zielposition nicht verändert werden kann. Hierdurch steigen sowohl der Gesamtenergiebedarf als auch der Anteil „unveränderlicher“ Energie der Bewegung, sodass das prozentuale Einsparpotential geringer ausfällt. Die simulierten und gemessenen Leistungsverläufe sind in Bild 5.10c abgebildet. Die Effizienzsteigerungen bei dieser Bewegung fallen mit bis zu 1,0 % (Messung) beziehungsweise 1,9 % (Simulation) sehr gering aus, wie Tabelle 5.3 zu entnehmen ist. Für den KR 210 werden mit Ersparnissen bis zu 3,9 % vergleichbare, wenn auch etwas bessere Ergebnisse erzielt (siehe Tabelle 5.4). Die zugehörigen Bewegungs- und Leistungsverläufe des KR 210 sind in Bild 5.11 zu sehen.

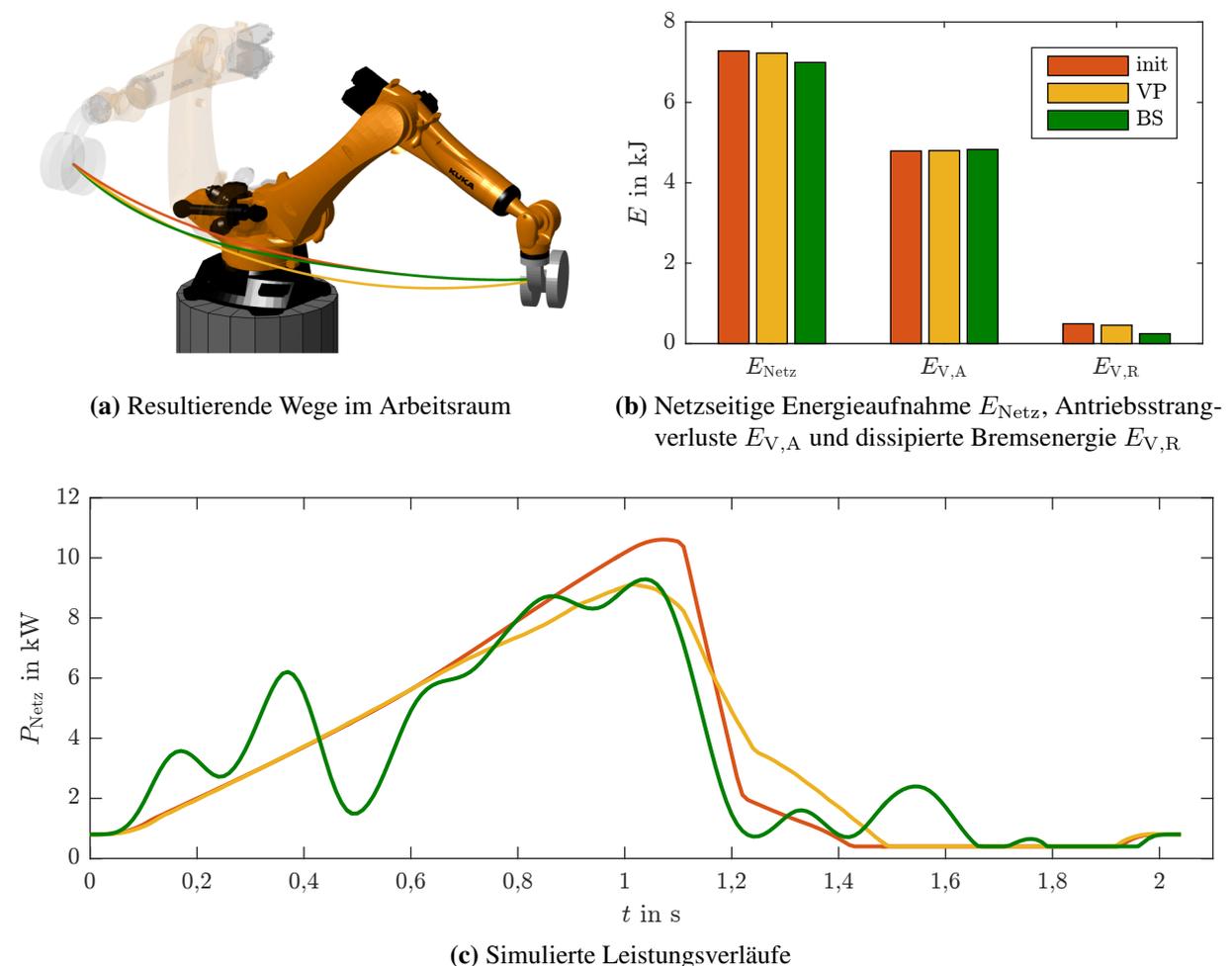


Bild 5.11: Optimierung einer Rückstellbewegung am KR 210. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Tabelle 5.3: Simulations- und Messergebnisse zur Rückstellbewegung am KR 16

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %	E_{Mess} in kJ	E_{Mess} in %	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
inital	2,060	100,0	2,076	100,0	99,2
opt. Viapunkte	2,045	99,3	2,065	99,5	99,0
opt. B-Spline	2,021	98,1	2,056	99,0	98,3

Tabelle 5.4: Simulationsergebnisse zur Rückstellbewegung am KR 210

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %
inital	7,280	100,0
opt. Viapunkte	7,226	99,2
opt. B-Spline	6,996	96,1

5.3.2 Verkettete Bewegungen

Als nächstes werden die Einsparpotentiale bei der Optimierung verketteter PTP-Bewegungen untersucht. Ein typisches Anwendungsbeispiel hierfür ist der Materialtransport bei Pick-and-Place-Aufgaben, der sich in der Regel aus drei verschliffenen PTP-Bewegungen zusammensetzt (Material vom Boden abheben, Transport über die Zielposition, Material ablassen). Eine derartige Bewegung ist in Bild 5.12 dargestellt.

Bei den zuvor untersuchten Einzelbewegungen wird das Einsparpotential maßgeblich durch die Menge dissipierter Bremsenergie bestimmt, da der initiale PTP-Planungsalgorithmus bereits den kürzesten Weg im Gelenkraum nutzt. Bei verketteten Bewegungen ist dies nicht der Fall, da durch die (aufgabenbedingte) Verwendung von Viapunkten zusätzliche Verfahrenswegen für die einzelnen Gelenke eingefügt werden. Die Bewegungen können im Rahmen der Optimierung verkürzt werden, sowohl im Gelenk- als auch im Arbeitsraum. Daraus resultierend nimmt die Wahl des Toleranzbandradius auch deutlichen Einfluss auf die Optimierungsergebnisse. Dieser wird für den KR 16 zu 5 cm und für den KR 210 zu 8 cm festgelegt, um den größeren Armlängen des KR 210 Rechnung zu tragen und somit vergleichbare Änderungen im Gelenkraum zuzulassen.

Die initiale und die optimierten Bewegungen sind in Bild 5.12a dargestellt. Die Abkürzung des Weges wird bei beiden Optimierungsverfahren vor allem an den beiden Eckpunkten sichtbar. Energetisch lässt sich die Auswirkung an der Reduktion der Antriebsstrangverluste erkennen, wie in Bild 5.12b dargestellt. Entsprechend den in Tabelle 5.5 aufgelisteten Werten kann in diesem

Tabelle 5.5: Simulations- und Messergebnisse zur Pick-and-Place-Bewegung am KR 16

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %	E_{Mess} in kJ	E_{Mess} in %	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
inital	1,307	100,0	1,398	100,0	93,5
opt. Viapunkte	1,107	84,7	1,157	82,8	95,7
opt. B-Spline	1,063	81,3	1,098	78,5	96,8

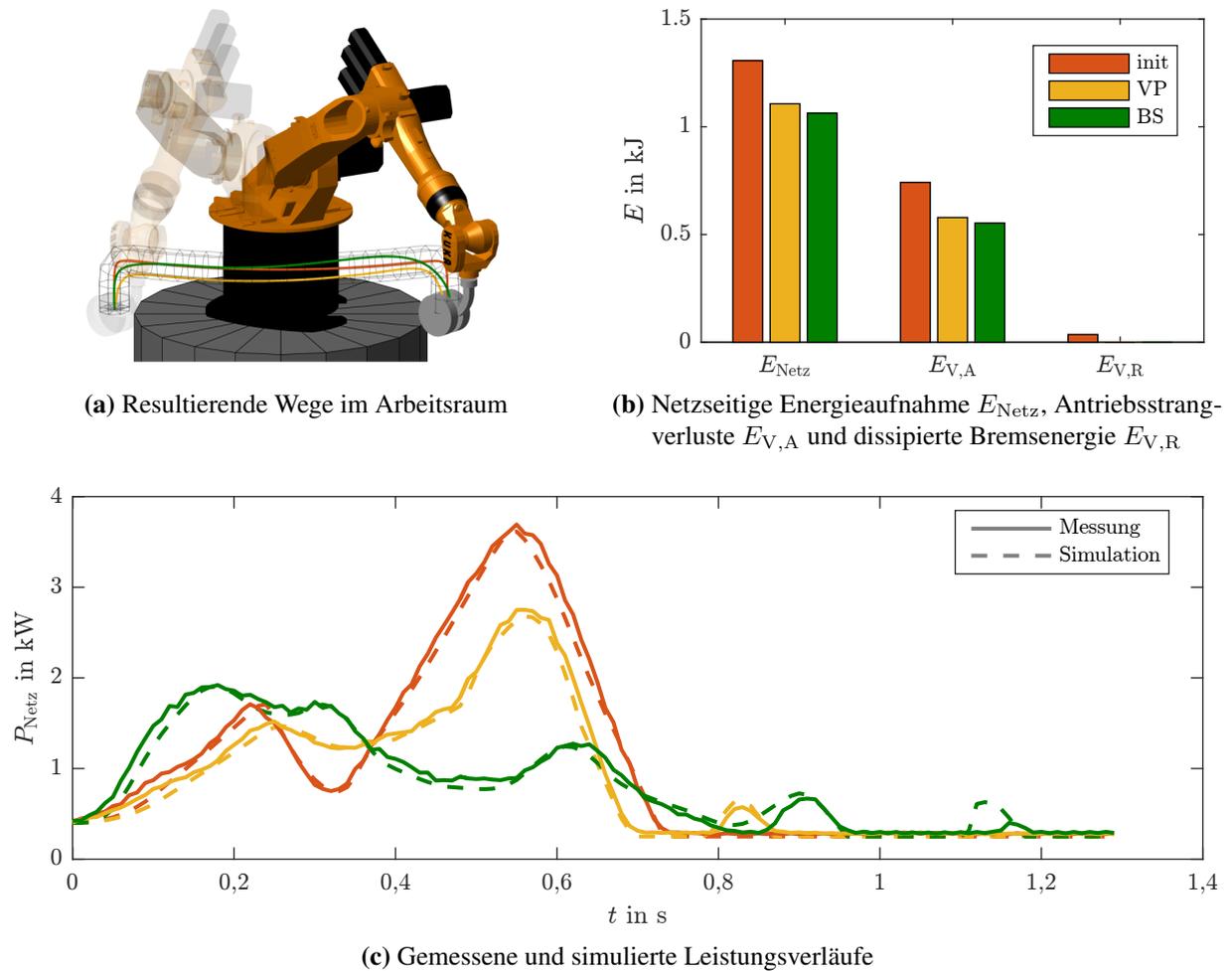
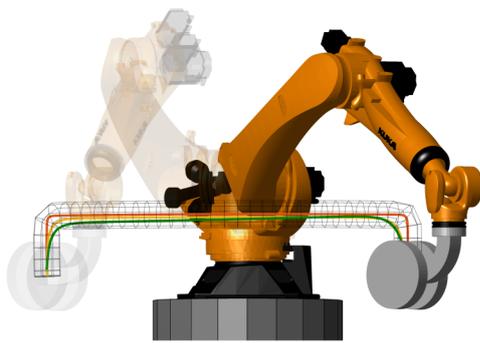
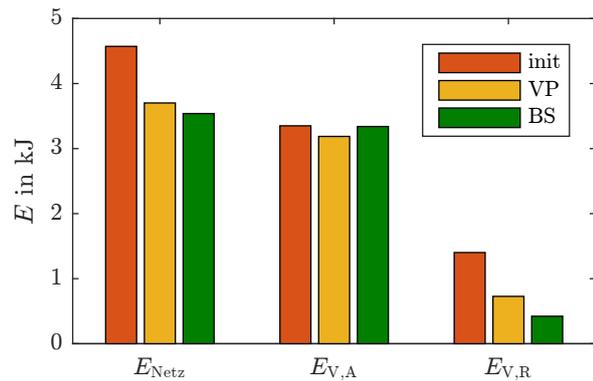
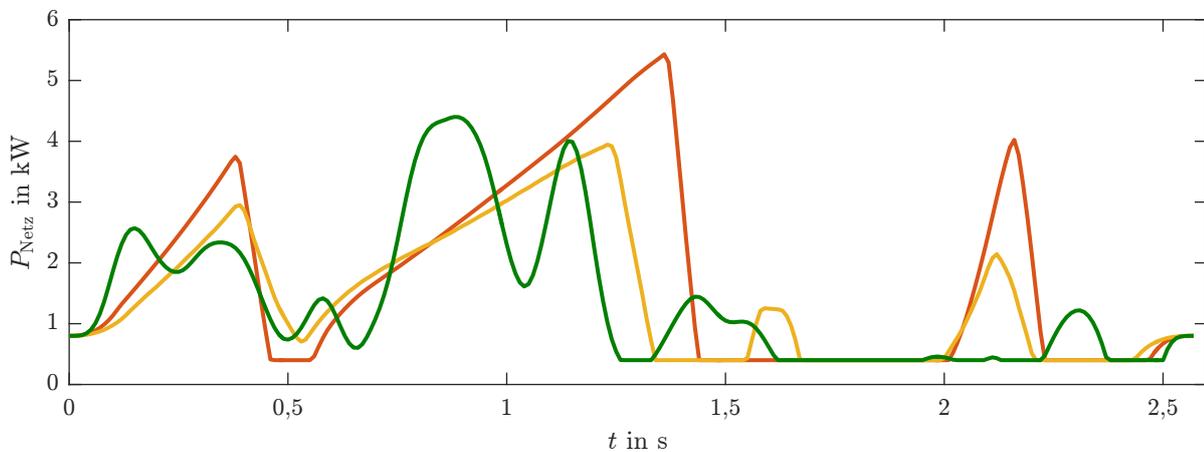


Bild 5.12: Optimierung einer Pick-and-Place-Bewegung am KR 16. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Szenario eine maximale Ersparnis von 20,4 % mit Messungen belegt werden. Die zugehörigen simulierten und gemessenen Leistungsverläufe sind in Bild 5.12c abgebildet. Die Optimierungsergebnisse für die gleiche Gelenkraumaufgabe am KR 210 sind in Bild 5.13 dargestellt. Wie bei den Einzelbewegungen ist erneut ein höherer Anteil an dissipierter Bremsenergie am Gesamtenergiebedarf zu erkennen, der im Rahmen der Optimierung deutlich reduziert werden kann. Die prozentuale Ersparnis fällt gemäß Tabelle 5.6 mit 19,0 % (VP) beziehungsweise 22,6 % (BS) noch etwas höher als beim kleineren Manipulator aus.



(a) Resultierende Wege im Arbeitsraum

(b) Netzseitige Energieaufnahme E_{Netz} , Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$ 

(c) Simulierte Leistungsverläufe

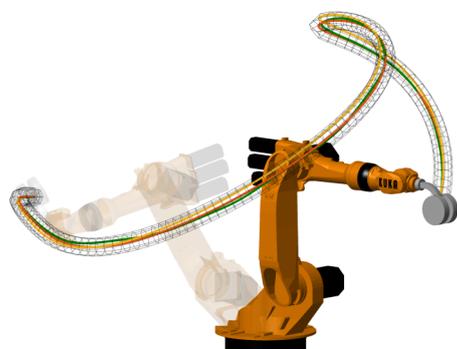
Bild 5.13: Optimierung einer Pick-and-Place-Bewegung am KR 210. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Tabelle 5.6: Simulationsergebnisse zur Pick-And-Place-Bewegung am KR 210

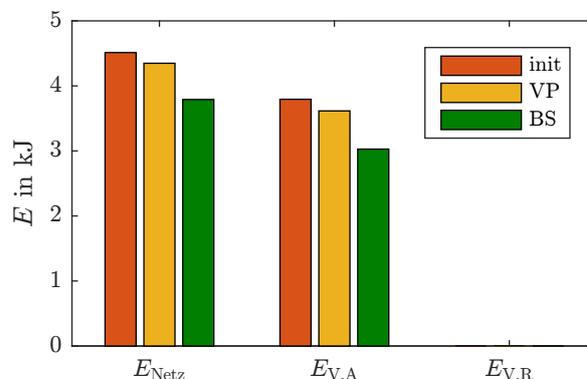
	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %
inital	4,571	100,0
opt. Viapunkte	3,702	80,1
opt. B-Spline	3,539	77,4

Als letztes wird eine beliebig geartete verkettete Bewegung untersucht, wie sie zum Beispiel bei Handhabungsprozessen in beengten Räumen anzutreffen ist. Die Bewegung am KR 16 ist zusammen mit den zugehörigen Optimierungsergebnissen in Bild 5.14 dargestellt. Die Ersparnisse der beiden Optimierungen unterscheiden sich in diesem Fall mit 13,3 % (BS) gegenüber 3,9 % (VP) deutlich, wie Tabelle 5.7 zu entnehmen ist. Im betrachteten Szenario wird der Lösungsraum der VP-Optimierung stärker eingeschränkt, da zusätzliche Viapunkte in der Nähe der initialen

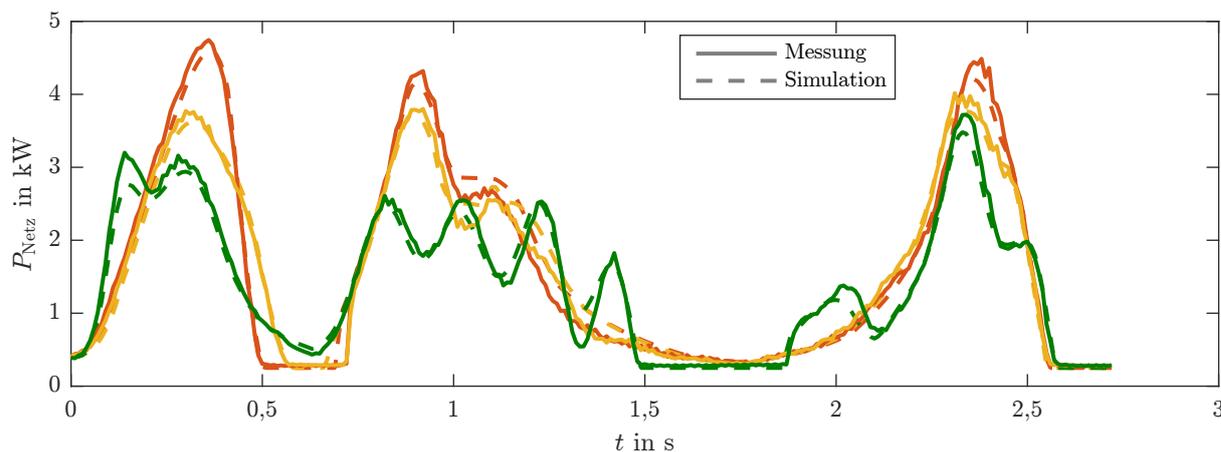
Viapunkte die Segmentlängen und damit den Verschleiß der anliegenden Segmente beeinflussen, was zu einem Verlassen des Toleranzbandes führt.



(a) Resultierende Wege im Arbeitsraum



(b) Netzseitige Energieaufnahme E_{Netz} , Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$



(c) Gemessene und simulierte Leistungsverläufe

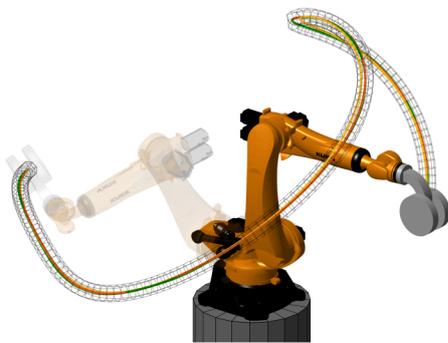
Bild 5.14: Optimierung einer verketteten Bewegung am KR 16. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Tabelle 5.7: Simulations- und Messergebnisse zur verketteten Bewegung am KR 16

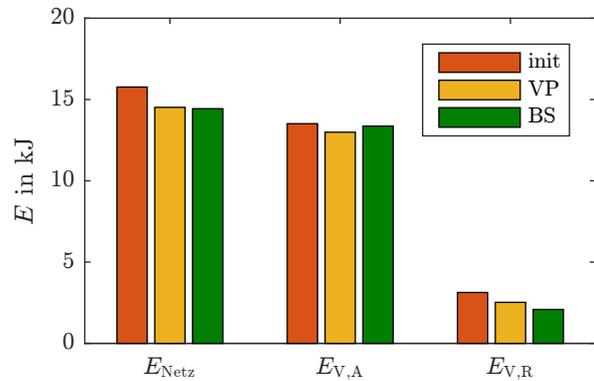
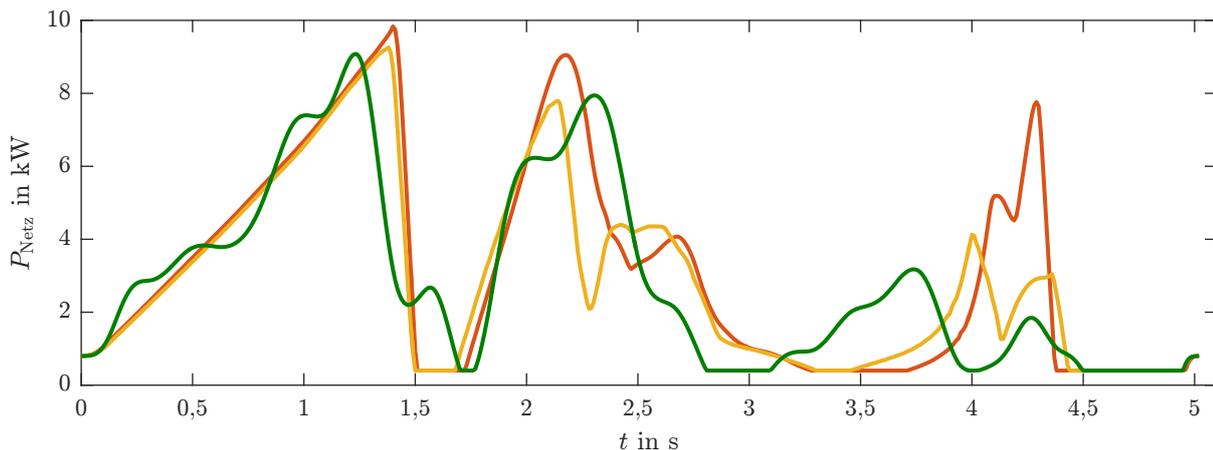
	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %	E_{Mess} in kJ	E_{Mess} in %	$E_{\text{Sim}}/E_{\text{Mess}}$ in %
initial	4,513	100,0	4,482	100,0	100,1
opt. Viapunkte	4,384	96,4	4,305	96,1	101,8
opt. B-Spline	3,790	84,0	3,899	86,7	97,2

Die Ergebnisse für den KR 210 sind in Bild 5.15 und Tabelle 5.8 dargestellt, die Ersparnisse betragen 8,4 % (BS) und 7,9 % (VP). Die bessere Nutzung des Einsparpotentials bei der BS-Optimierung am KR 210 resultiert zum einen aus der Möglichkeit zur Reduktion der dissipierten

Bremsenergie, zum anderen aus den größeren Abständen der aufgabenspezifischen Viapunkte im Arbeitsraum, sodass die zuvor beschriebene Wechselwirkung mit hinzugefügten Viapunkten abgeschwächt wird.



(a) Resultierende Wege im Arbeitsraum

(b) Netzseitige Energieaufnahme E_{Netz} , Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$ 

(c) Simulierte Leistungsverläufe

Bild 5.15: Optimierung einer verketteten Bewegung am KR 210. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Tabelle 5.8: Simulationsergebnisse zur verketteten Bewegung am KR 210

	E_{Sim} in kJ	E_{Sim} in %
inital	15,766	100,0
opt. Viapunkte	14,518	92,1
opt. B-Spline	14,434	91,6

Bei allen betrachteten Szenarien werden in der Simulation und am Prüfstand mit dem B-Spline-basierten Optimierungsansatz die höchsten Ersparnisse erzielt. Prinzipbedingt besitzt die Methode

durch die Planung einzelner Bahnen für jedes Gelenk mehr Freiheiten in der Optimierung, wodurch mögliche Einsparpotentiale besser ausgeschöpft werden können. Die Viapunkt-basierte Optimierung bietet allerdings andere Vorteile wie eine deutlich einfachere Implementierung, da auf robuste und bekannte Bahnplanungsfunktionen zurückgegriffen und der Umweg über die Approximation der Initialbahn vermieden wird. Darüber hinaus können die asynchronen B-Spline-Bahnen nicht mit den derzeitig verfügbaren Mechanismen der Robotersteuerung nachträglich angepasst werden, zum Beispiel durch die Veränderung (das „Umteachen“) von Punkten. Diese Nachteile könnten allerdings durch eine herstellerseitige Implementierung der Algorithmen behoben werden. Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, resultieren aus der Optimierung und Verschiebung der B-Spline-Knotenpunkte Bahnen mit einer größeren Welligkeit im Vergleich zur synchronen Bahnplanung, was zu stärkeren Schwingungen sowie zu einer größeren mechanischen Belastung des Systems führen kann. Die Welligkeit ist auch an den Leistungsverläufen der optimierten Bewegungen zu erkennen.

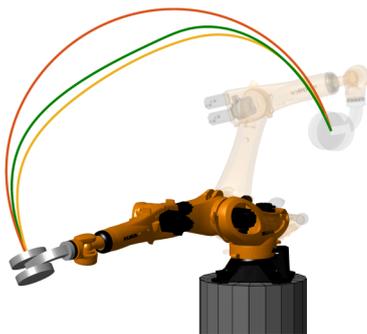
5.3.3 Optimierung bei verschiedenen Verfahrzeiten

Während bei den vorangegangenen Untersuchungen von einer festen (maximalen) Verfahrzeit ausgegangen wird, soll im Folgenden der Einfluss der maximalen Verfahrzeit auf das relative und absolute Einsparpotential sowie auf die resultierenden energieoptimalen Bahnen dargestellt werden. Hierzu wird eine Bewegung bei verschiedenen initialen Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen optimiert. Die Untersuchungen werden simulativ am KR 210 durchgeführt, da sich anhand der größeren Mengen dissipierter Bremsenergie der Einfluss der Verfahrzeit auf die Optimierungsergebnisse deutlicher abzeichnet als beim kleineren KR 16. Die maximale Verfahrzeit T_{\max} entspricht dabei der Verfahrzeit der Initialbahn T_{init} . Die Kombinationen von Gelenkgeschwindigkeit v und Gelenkbeschleunigung a werden zu 100/100, 90/75 (entspricht den vorigen Optimierungen), 60/60 und 40/40 gewählt. Die Angaben gelten für alle Gelenke. Die resultierenden Werte für T_{\max} können in Tabelle 5.9 eingesehen werden.

Die Ergebnisse der Optimierung bei maximaler Geschwindigkeit und Beschleunigung sind in Bild 5.16 dargestellt. Der Energiebedarf der optimierten Bahnen beträgt 83,5 % für den Viapunkt-Ansatz 82,2 % und für den B-Spline-Ansatz, wie Tabelle 5.9 zu entnehmen ist. Die Aufteilung der Verluste aus Bild 5.16b zeigt, dass die Ersparnis in beiden Fällen im Wesentlichen aus der Reduktion der dissipierten Bremsenergie resultiert. Da Abweichungen von der initialen PTP-Bewegung prinzipbedingt eine Verlängerung des Weges einer oder mehrerer Achsen im Gelenkraum verursachen, steigen entsprechend auch die Antriebsstrangverluste gegenüber der initialen Bewegung an.

Tabelle 5.9: Optimierungsergebnisse für verschiedene maximale Verfahrzeiten

Bahn (v/a)	T_{\max} in s	E_{Netz} in kJ	E_{Netz} in %
inital (100/100)	3,0	11,792	100,0
opt. Viapunkte	3,0	9,849	83,5
opt. B-Spline	3,0	9,691	82,2
inital (90/75)	3,5	11,330	100,0
opt. Viapunkte	3,5	9,106	80,4
opt. B-Spline	3,5	8,994	79,4
inital (60/60)	4,0	9,575	100,0
opt. Viapunkte	4,0	8,956	93,5
opt. B-Spline	4,0	8,720	91,1
inital (40/40)	5,3	9,159	100,0
opt. Viapunkte	5,3	8,445	92,2
opt. B-Spline	5,3	8,341	91,1



(a) Resultierende Wege im Arbeitsraum

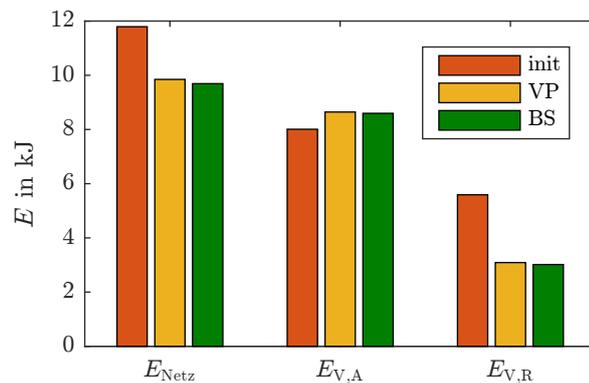
(b) Netzseitige Energieaufnahme E_{Netz} , Antriebsstrangverluste $E_{V,A}$ und dissipierte Bremsenergie $E_{V,R}$

Bild 5.16: Optimierung einer PTP-Bewegung am KR 210 für $v = 100$ und $a = 100$. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Als nächstes erfolgt die Optimierung für eine Initialbahn mit verringerten Maximalgeschwindigkeiten und -beschleunigungen von $v = 90$ und $a = 75$. Die Wege im Arbeitsraum sowie die Energieaufnahmen und Verlustverteilungen sind in Bild 5.17 zu sehen. Die Ersparnis fällt gemäß Tabelle 5.9 mit bis zu 20,6 % etwas höher als bei minimaler Verfahrzeit aus. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei den vorliegenden Randbedingungen auch die Bewegung des zeitkritischen Gelenks im Rahmen der Optimierung verändert werden kann. Auch in diesem Fall ergibt sich die verringerte Energieaufnahme durch Reduktion der dissipierten Bremsenergie.

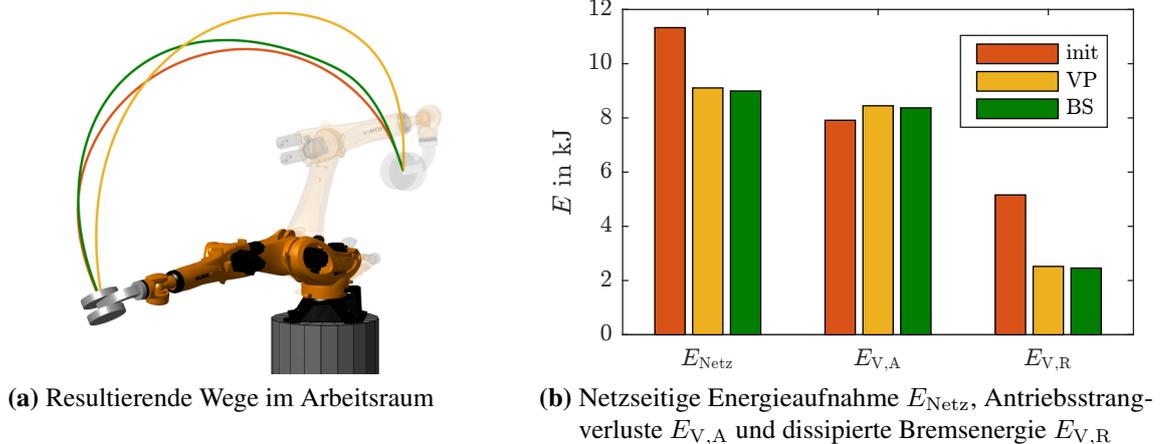


Bild 5.17: Optimierung einer PTP-Bewegung am KR 210 für $v = 90$ und $a = 75$. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

Mit zunehmender Steigerung der Verfahrszeit nimmt auch das relative und absolute Einsparpotential ab, wie die Ergebnisse für $v = 60$ und $a = 60$ beziehungsweise $v = 40$ und $a = 40$ in Tabelle 5.9 zeigen. Die zugehörigen Bewegungen und Aufteilungen der Verluste sind in Bild 5.18 und Bild 5.19 zu finden. Die Menge dissipierter Bremsenergie der Initialbewegung wird bereits durch die Verringerung der Geschwindigkeit und Beschleunigung reduziert, sodass auch die Ersparnisse durch Optimierung der Bahn geringer ausfallen. Dennoch wird in beiden Szenarien eine Reduktion der netzseitigen Energieaufnahme um bis zu 8,9 % gegenüber der Initialbahn bei gleicher Geschwindigkeit erreicht.

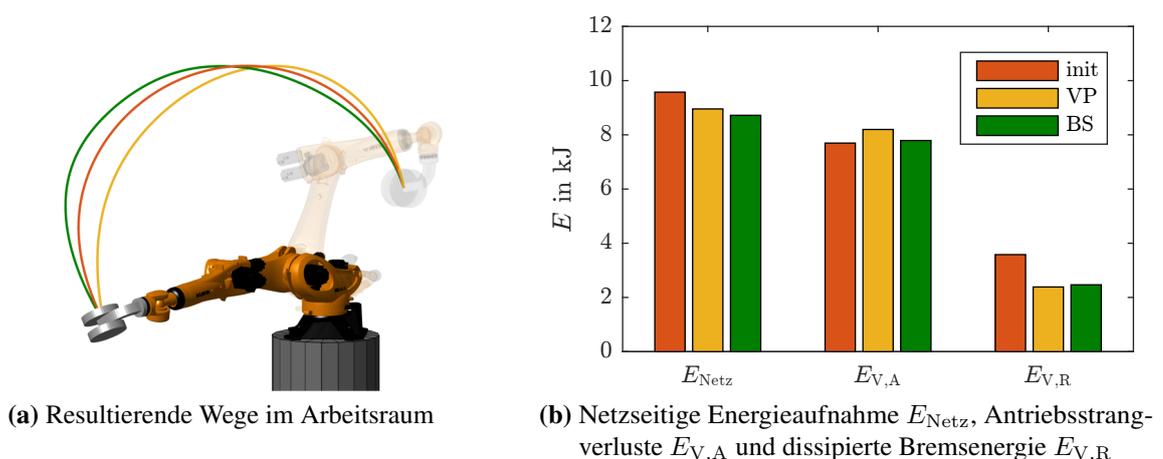


Bild 5.18: Optimierung einer PTP-Bewegung am KR 210 für $v = 60$ und $a = 60$. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

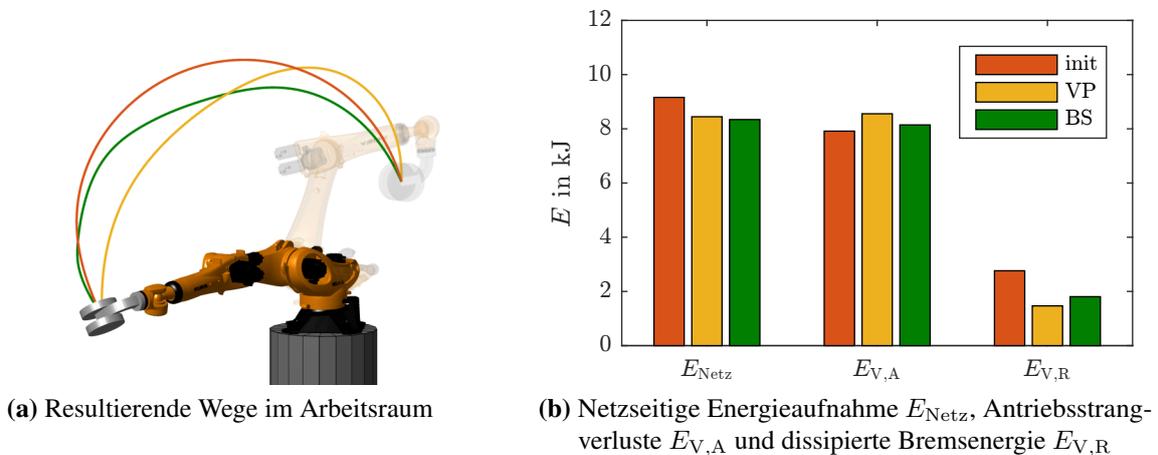


Bild 5.19: Optimierung einer PTP-Bewegung am KR 210 für $v = 40$ und $a = 40$. Die Initialbahn ist rot, die optimierten Bahnen sind gelb (Viapunkt-Ansatz) und grün (B-Spline-Ansatz) dargestellt.

5.4 Optimierung mit anderen Kostenfunktionalen

Neben der in dieser Arbeit im Fokus stehenden Reduktion des netzseitigen Energiebedarfs können die vorgestellten Optimierungsansätze auch zur Optimierung anderer Aspekte übertragen und genutzt werden. Hierzu ist lediglich eine Anpassung des Kostenfunktionalen (5.7) und der Nebenbedingungen (5.16) notwendig. Im Folgenden soll dies anhand zweier Beispiele demonstriert werden. Zunächst wird in Abschnitt 5.4.1 die Möglichkeit zur Minimierung von Leistungsspitzen vorgestellt. In Abschnitt 5.4.2 wird die Optimierung zur Verringerung der Verfahrzeit genutzt.

5.4.1 Reduktion von Leistungsspitzen

Bei industriellen Großkunden richtet sich der zu zahlende Strompreis nicht nur nach der abgenommenen Energiemenge, sondern unter anderem auch nach den auftretenden Leistungsspitzen [Goc16]. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann es demnach sinnvoll sein, Leistungsspitzen einzelner Abnehmer zu verringern und/oder gezielt zu verschieben. Zur Verringerung können bei Industrierobotern für Bewegungen, die langsamer als die minimale Verfahrzeit durchgeführt werden, möglichst geringe Maximalbeschleunigungen und möglichst große Maximalgeschwindigkeiten parametrisiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Absenkung bietet die Verwendung der zuvor vorgestellten Optimierungsverfahren. Hier eignet sich insbesondere die Optimierung unter Verwendung von B-Splines, da durch den asynchronen Bahnplanungsansatz die Beschleunigungsphasen

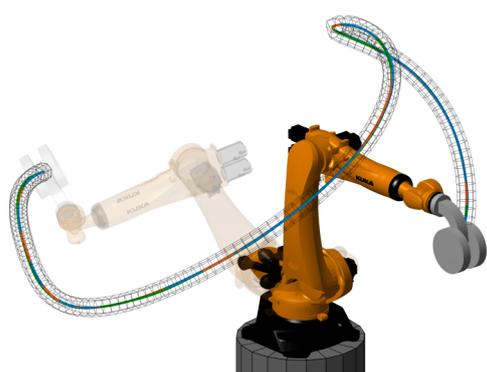
der einzelnen Achsen gegeneinander verschoben werden können. Hierzu wird das Kostenfunktional aus (5.7) wie folgt angepasst:

$$J(\mathbf{p}_{VP}) = \max(P_{\text{Netz}}(\mathbf{p}_{VP}, t)). \quad (5.17)$$

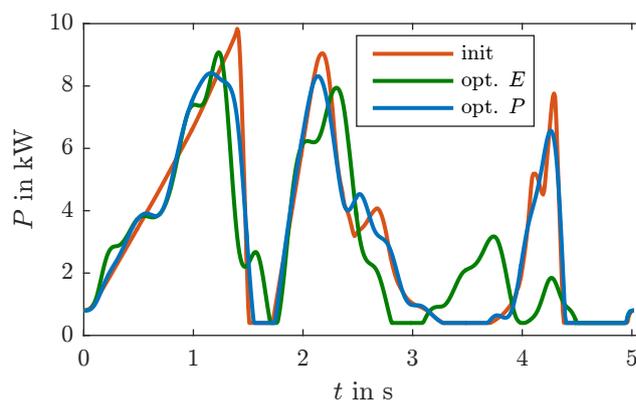
Grundsätzlich sind je nach Anwendungsfall beliebige Erweiterungen und/oder Änderungen der Kostenfunktion denkbar. So könnte zum Beispiel nicht nur die höchste Leistungsspitze einer Bewegung, sondern alle lokalen Maxima in das Kostenfunktional einfließen. Im Folgenden wird nur die Verringerung der „globalen“ Spitze der betrachteten Bewegung angestrebt. Die Ungleichungsnebenbedingungen aus (5.16) werden um die Bedingung erweitert, dass der netzseitige Energiebedarf der optimierten Bahn $E_{\text{Netz,opt}}$ den Bedarf $E_{\text{Netz,init}}$ nicht übersteigen darf:

$$E_{\text{Netz,opt}} - E_{\text{Netz,init}} \leq 0. \quad (5.18)$$

Die Einhaltung der restlichen Nebenbedingungen ist weiterhin erforderlich. Die Simulationsergebnisse einer derartigen Optimierung für den KR 210 sind in Bild 5.20 dargestellt, zur besseren Vergleichbarkeit ist außerdem der zuvor bestimmte Leistungsverlauf bei Optimierung des Energiebedarfs abgebildet. Die Leistungsspitze kann von 9,83 kW auf 8,41 kW verringert werden, was einer prozentualen Reduktion von 14,5 % entspricht. Bezüglich der energieoptimalen Bewegung sinkt die Spitzenleistung um 0,67 kW oder 7,4 %.



(a) Resultierende Wege im Arbeitsraum



(b) Simulierte Leistungsverläufe

Bild 5.20: Minimierung der Spitzenleistung (blau) einer verketteten Bewegung am KR 210. Die Spitzenleistung verringert sich um 14,5 % bezüglich der initialen und 7,4 % bezüglich der energieoptimalen Bewegung.

5.4.2 Minimierung der Verfahzeit einzelner PTP-Bewegungen

Das klassische Kriterium zur Bahnoptimierung in der Robotik, insbesondere bei PTP-Bewegungen, ist die Minimierung der benötigten Verfahzeit. Eine schnellere Durchführung einer zeitkritischen Bewegung bedeutet eine geringere Gesamttaktzeit und somit eine höhere zeitliche Produktivität der Anlage. Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, werden in modernen Robotersteuerungen bereits fortgeschrittene Planungsalgorithmen zur Optimierung der Verfahzeit verwendet, bei denen versucht wird, die Randbedingungen des Antriebsstrangs zu jedem Zeitpunkt auszureizen. Durch die nichtlinearen dynamischen Zusammenhänge und die mechanische Kopplung der Gelenke sind die Ansätze klassischen Beschleunigungstrapezprofilen deutlich überlegen.

Bei der Planung von PTP-Bewegungen wird für jedes Gelenk der im Gelenkraum kürzeste (direkte) Weg geplant. Es gibt allerdings Bewegungen, bei denen ein „Umweg“ der nicht zeitkritischen Gelenke zur Verringerung der Gesamtverfahzeit genutzt werden kann, wie im Folgenden kurz demonstriert werden soll. Hierfür wird der Optimierungsansatz unter Verwendung von Viapunkten genutzt. Das Kostenfunktional lässt sich als

$$J(\mathbf{p}_{VP}) = T(\mathbf{p}_{VP}) \quad (5.19)$$

mit der resultierenden Verfahzeit T darstellen. Im Gegensatz zu Abschnitt 5.4.1 wird der Energiebedarf nicht als Ungleichungsnebenbedingung berücksichtigt, da bei zeitkritischen Bewegungen eine Erhöhung des Energiebedarfs bei gleichzeitiger Verringerung der Verfahzeit in der Regel in Kauf genommen wird.

Die Optimierungsergebnisse zweier beispielhafter Bewegungen sind in den Bildern 5.21a und 5.21b dargestellt. Die Verfahzeit kann im ersten Fall um 13,2 %, im zweiten um 11,8 % reduziert werden. Wie an den optimierten Bewegungen zu erkennen ist, ergibt sich das Potential zur Reduktion der Verfahzeit vor allem durch Reduktion der Trägheiten der Gelenke. Zum Vergleich sind die energieoptimalen Bewegungen ebenfalls abgebildet, die Energieersparnis bezogen auf die jeweilige Initialbahn beträgt 17,18 % (links) und 13,4 % (rechts). Der Energiebedarf der zeitoptimierten Bahn ändert sich im Vergleich zur Initialbahn für die betrachtete Bewegung mit 99,3 % nur geringfügig.

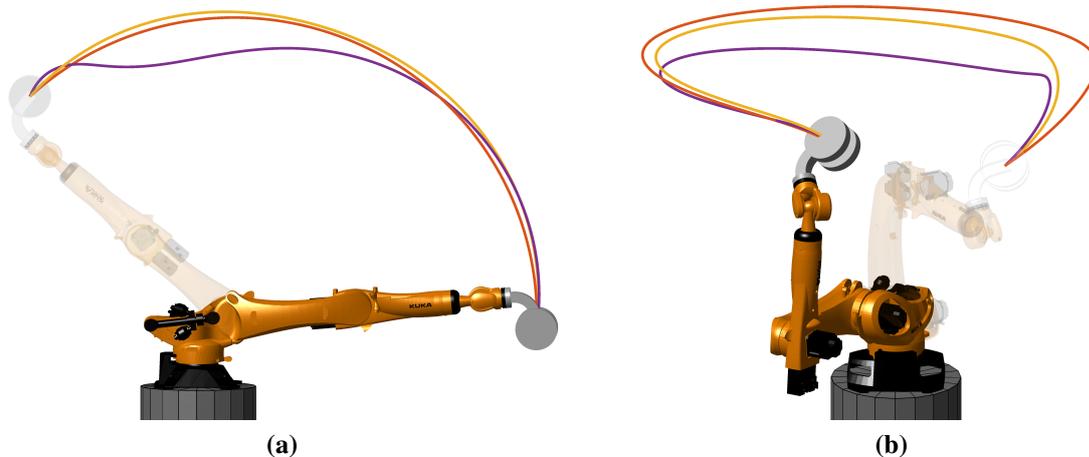


Bild 5.21: Minimierung der Verfahzeit (violett) zweier PTP-Bewegungen am KR 210. Die Verfahzeit verringert sich um 13,2 % (links) und 11,8 % (rechts). Die energieoptimale Bahn (VP) ist gelb dargestellt.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird das energetische Einsparpotential einer Roboterbewegung durch Optimierung des geometrischen Weges vorgestellt. Hierzu werden zwei verschiedene Optimierungsansätze gewählt. Der erste basiert auf der Approximation der Initialbewegung unter Verwendung von B-Splines und der anschließenden Optimierung der Kontrollpunkte. Neben diesem aus anderen Bahnoptimierungsproblemen bekannten Verfahren wird ein weiterer Ansatz präsentiert, der in einer SiL-Konfiguration auf die Bahnplanung der Robotersteuerung zurückgreift und eine mögliche Ersparnis durch das Hinzufügen zusätzlicher und/oder die Änderung bestehender Viapunkte erzielt. Für beide Verfahren wird der Active-Set-Algorithmus verwendet.

An den Optimierungsergebnissen lässt sich erkennen, dass im Vergleich zu den Untersuchungen aus Kapitel 4 das Einsparpotential deutlich stärker von der betrachteten Bewegung sowie vom Roboter abhängt. Bei der Optimierung einzelner PTP-Bewegungen ergibt sich das Einsparpotential überwiegend durch die Reduktion der dissipierten Bremsenergie. Beim größeren KR 210 wird sowohl relativ als auch absolut mehr Energie über den Bremswiderstand dissipiert, wodurch sich ein entsprechend höheres Einsparpotential ergibt.

Bei der Optimierung verketteter Bewegungen kann sich die Ersparnis zusätzlich durch Verkürzungen des Weges im Gelenkraum ergeben und ist somit weniger stark vom betrachteten Manipulator abhängig. Die Simulationsergebnisse zur Optimierung sowohl einzelner als auch verketteter Bewegungen werden erfolgreich am KR 16 anhand von Leistungsmessungen validiert. Ergänzend zur Optimierung des Energiebedarfs wird kurz auf die Nutzung der Optimierung bei Verwendung weiterer Kostenfunktionale, konkret der Verfahzeit sowie der Spitzenleistung, eingegangen.

6 Änderung der Lage der Roboterbasis

Nachdem in den Kapiteln 4 und 5 die Reduktion des Energiebedarfs durch unmittelbare Änderungen der Bahnprofile erzielt wurde, wird im Folgenden das Einsparpotential durch Optimierung der Lage der Roboterbasis untersucht. Mit einer Änderung der Basislage des Roboters innerhalb einer Roboterzelle können bei fester Lage des Werkstücks beziehungsweise der betrachteten Aufgabe die resultierenden Bahnen im Gelenk- und Arbeitsraum und somit auch der Energiebedarf beeinflusst werden. Eine schematische Darstellung dazu ist in Bild 6.1 zu finden. Dabei spielt es für die Bahnplanung grundsätzlich keine Rolle, ob die Lage des Roboters oder des Werkstücks verändert wird, lediglich die relative Lage der zugehörigen körperfesten Koordinatensysteme zueinander ist relevant. Welche der beiden Komponenten in der Praxis verschoben werden sollte, hängt von der Anwendung ab: Während sich bei einer Fertigungsstraße im Automobilbereich ein Versetzen des Roboters in der Regel einfacher gestaltet, könnte beispielsweise bei einem Palettierroboter die Anpassung der Palettenlage mit deutlich weniger Aufwand verbunden sein. Im Folgenden wird von einer festen Werkstücklage bei variabler Lage der Roboterbasis ausgegangen.

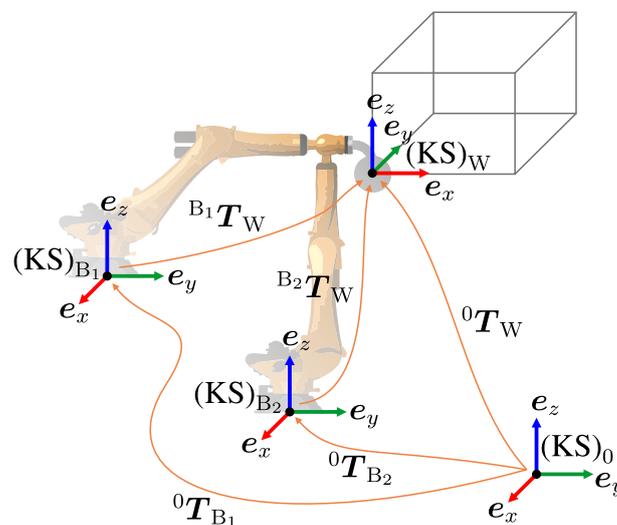


Bild 6.1: Schematische Darstellung zur Verschiebung der Roboterbasis

Das Kapitel gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 6.1 werden das Vorgehen zur Lagenänderung sowie die zugehörige Auswertung beschrieben. Die Ergebnisse bei Anwendung des Verfahrens auf verschiedene Szenarien sind in Abschnitt 6.2 aufgeführt. In Abschnitt 6.3 wird die Beeinflussung der minimal erreichbaren Bearbeitungszeit durch Verschiebung der Basis untersucht. Abgeschlossen wird das Kapitel analog zu den vorherigen Kapiteln mit einer kurzen Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse in Abschnitt 6.4.

6.1 Vorgehen bei der Lagenänderung

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, wird von einer festen Werkstücklage bei veränderlicher Lage der Roboterbasis ausgegangen. Im Modell wird die Änderung durch eine Anpassung der homogenen Transformationsmatrix 0T_B abgebildet. Nach (2.11) ergibt sich dadurch eine Änderung von ${}^B T_W$ und somit über den inversen kinematischen Zusammenhang eine Änderung der Gelenkwinkel zum Erreichen der geforderten Zielpose(n). Die Matrix 0T_B lässt sich über sechs Parameter, jeweils drei zur Beschreibung von Translation $({}_{(0)}x_B, {}_{(0)}y_B, {}_{(0)}z_B)$ und Rotation $(\alpha_B, \beta_B, \gamma_B)$ manipulieren (siehe Abschnitt 2.2). In der Praxis ist eine Verschiebung der Roboterbasis in $(0)x$ - und $(0)y$ -Richtung einfach umzusetzen, abgesehen vom eventuell begrenzten Bauraum innerhalb der Zelle. Eine Verschiebung in positiver $(0)z$ -Richtung kann anhand eines Podestes realisiert werden. Wenn $(KS)_0$ auf Höhe des Hallenbodens angenommen wird, ist ein Versatz in negativer $(0)z$ -Richtung nur mit größerem Aufwand möglich.

Eine Rotation um α oder β , also um die $(0)x$ - oder $(0)y$ -Achse, würde in einer ungleichmäßigen Belastung für die Getriebe resultieren und ist daher in der Regel herstellerseitig nicht vorgesehen [KUK18a]. Ausnahmen hierzu bilden die Decken- oder Wandmontage, bei denen ein Gestell und entsprechend zusätzlicher Bauraum benötigt wird. Diese Sonderfälle werden im Folgenden nicht betrachtet, grundsätzlich lassen sich die gezeigten Methoden jedoch auf alle Montagevarianten anwenden. Demnach setzt sich der Parametervektor \mathbf{p}_B zur Änderung der Roboterbasislage wie folgt zusammen:

$$\mathbf{p}_B = ({}_{(0)}x_B, {}_{(0)}y_B, {}_{(0)}z_B, \gamma_B)^T. \quad (6.1)$$

Das Vorgehen zur Berechnung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Basislage ist in Bild 6.2 dargestellt. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

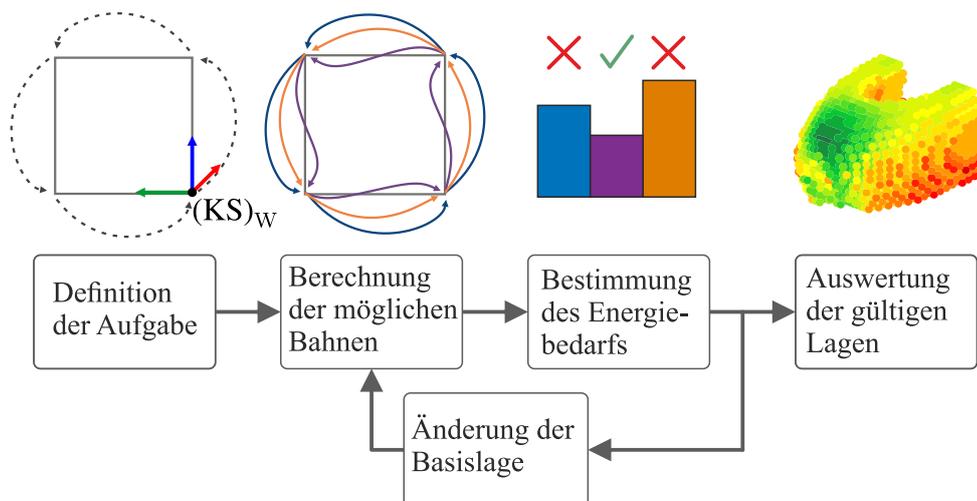


Bild 6.2: Berechnung des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Basislage

Definition der Aufgabe: Die Aufgabe wird derart definiert, dass sich eine zyklische Bewegung ergibt, bei der die Startpose der Zielpose entspricht. Wenn dies nicht berücksichtigt wird, ändert sich die im System gespeicherte konfigurationsabhängige potentielle Energie durch die Anpassung der Basislage. Hierdurch würde in der Auswertung ein scheinbar größerer oder geringerer Energiebedarf entstehen, der sich erst in der (nicht betrachteten) Folgebewegung ausgleichen und somit den Einfluss der Basislage auf den Energiebedarf verfälschen würde. Demnach werden ausschließlich geschlossene Bewegungszüge mit identischer Start- und Zielpose betrachtet. Im Gegensatz zu den vorigen Verfahren besteht bei der Änderung der Basislage die Möglichkeit, auch Aufgaben zu optimieren, die CP-Bewegungen beinhalten. Bei Applikationen mit PTP-Bewegungen wird eine Bearbeitungszeit T_{\max} vorgegeben, um eine einheitliche Gesamtverfahrenszeit zu erzielen und dadurch eine bessere Vergleichbarkeit der Basislagen zu gewährleisten. Bei Aufgaben, die ausschließlich aus CP-Bewegungen bestehen, ergibt sich die Bearbeitungszeit bereits aus der Bewegungsvorschrift, da die Geschwindigkeiten im Arbeitsraum vorgegeben werden und somit ohnehin für alle Basislagen identisch sind. Die An- und Rückstellbewegung aus der beziehungsweise in die Referenzpose werden nicht als Teil der Aufgabe betrachtet, da ansonsten die Entfernungen von der Referenzpose zur Start- und zur Zielpose die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen würden.

Berechnung der gültigen Bahnen: Die zur Erfüllung der Aufgabe notwendigen Gelenkwinkelkonfigurationen werden anhand der inversen Kinematik berechnet, deren Lösung sich in Abhängigkeit der betrachteten Basislage ändert. Aufgrund der Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik können gegebenenfalls mehrere gültige Konfigurationen gefunden werden, sodass sich verschiedene mögliche Bahnen im Arbeitsraum (PTP) und/oder im Gelenkraum (PTP und CP) ergeben. Die in Bild 6.2 dargestellten mehreren Bahnen resultieren also aus der Konfigurationsabhängigkeit der inversen Kinematik. Bei den Untersuchungen in diesem Kapitel wird die Bahnplanung der Robotersteuerung über SiL genutzt. Eine Berücksichtigung der kinematischen und dynamischen Randbedingungen findet bereits während der Bahnplanung statt und muss bei der Lagenänderung nicht zusätzlich geprüft werden. Bei Überschreitung der Gelenkwinkelgrenzen für Achse 1 kann γ_{B_k} der aktuellen Basislage k derart angepasst werden, dass sich die Aufgabe im gültigen Gelenkraum befindet (sofern möglich).

Berechnung des Energiebedarfs: Für sämtliche zuvor gefundenen Lösungen wird in diesem Schritt der resultierende Energiebedarf berechnet. Bei PTP-Aufgaben werden zur besseren Vergleichbarkeit alle Bahnen gemäß Kapitel 4 auf die maximale Bearbeitungszeit T_{\max} mit $t_{\text{HB}} = \infty$ gestreckt. Alle Lösungen außer derjenigen mit dem niedrigsten Energiebedarf werden verworfen, der niedrigste gefundene Energiebedarf wird der aktuellen Basislage für die spätere Auswertung zugeordnet.

Änderung der Basislage: Grundsätzlich kann zur Suche der energieoptimalen Basisposition ein globaler Optimierungsalgorithmus verwendet werden. Ein Ansatz unter Verwendung des Parti-

kelschwarmalgorithmus (siehe [Ken11]) wurde im Rahmen dieser Arbeit in [EHKO14] publiziert. Stattdessen wird im Folgenden ein Brute-Force-Ansatz genutzt, um nicht nur das energetische Optimum, sondern auch den Einfluss der Lagenänderung auf den Energiebedarf besser untersuchen und darstellen zu können. Die Lagenänderung wird mit einer diskreten Schrittweite in allen Richtungen angenommen, sodass sich aufgrund des begrenzten Arbeitsraums des Roboters ein endlicher Lösungsraum ergibt. Bei Bedarf kann die Schrittweite in der Nähe des so gefundenen Optimums verringert werden. Da die An- und Rückstellbewegung nicht als Teil der Aufgabe ausgewertet werden, hat γ_{B_k} keinen Einfluss auf den resultierenden Energiebedarf und wird nicht bei der Änderung der Basislage berücksichtigt, sondern wie zuvor beschrieben bei der Berechnung der gültigen Bahnen.

Auswertung: Mit den vorherigen Schritten kann jeder Basislage k ein resultierender minimaler Energiebedarf zugeordnet werden. Die einzelnen Basislagen werden als Punkte dargestellt, deren Farbe den zugehörigen Energiebedarf widerspiegelt. Die Basislage mit dem niedrigsten resultierenden Energiebedarf wird zusätzlich gekennzeichnet.

6.2 Reduktion des Energiebedarfs durch Änderung der Basislage

Das zuvor beschriebene Vorgehen zur Verschiebung der Basislage wird im Folgenden auf verschiedene Anwendungsszenarien übertragen und für diese ausgewertet. Die Auswertung erfolgt simulativ und jeweils für beide in der Arbeit betrachteten Robotertypen. Zuerst wird in Abschnitt 6.2.1 ein Punktschweißszenario betrachtet, bei dem die vier Ecken eines Quadrats nacheinander angefahren werden müssen. Als zweite Aufgabe sollen in Abschnitt 6.2.2 die Ecken des gleichen Quadrates über LIN-Bewegungen verbunden werden, sodass sich ein Bahnschweißszenario ergibt. Die letzte Aufgabe leitet sich aus einer typischen Pick-and-Place-Applikation ab und wird in Abschnitt 6.2.3 vorgestellt.

6.2.1 Punktschweißen

Als erste Aufgabe wird eine Bewegungsabfolge betrachtet, die einem Punktschweißvorgang nachempfunden ist. Hierfür wird ein Quadrat mit einer Seitenlänge von $\ell = 0,3$ m und einer maximal zulässigen Bearbeitungszeit $T_{\max} = 1,8$ s vorgegeben, dessen Eckpunkte vom Roboter angefahren werden müssen. Die Bewegungen zwischen den Eckpunkten werden als unverschiffene PTP-Bewegungen mit Halt in den Eckpunkten P_1 bis P_5 durchgeführt. Die Aufgabe ist in Bild 6.3 skizziert.

Der Bereich der gültigen Basislagen wird als Quader definiert. Die Kantenlängen ergeben sich aus dem erreichbaren Arbeitsraum des Roboters und werden für den KR 16 auf 2 m begrenzt. In $(0)y$ -Richtung wird die Kantenlänge verdoppelt. Die Basislagen sind demnach wie folgt beschränkt:

$$0 \leq (0)x_{B_k} \leq 2 \text{ m}, \quad (6.2)$$

$$-2 \text{ m} \leq (0)y_{B_k} \leq 2 \text{ m}, \quad (6.3)$$

$$0 \leq (0)z_{B_k} \leq 2 \text{ m}. \quad (6.4)$$

Die Lage des Start- und Zielpunktes und somit des $(KS)_W$ wird zu

$${}_{(0)}\mathbf{x}_W = (2,2 \text{ m}, -\ell/2, 1 \text{ m}, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)^T \quad (6.5)$$

definiert. Mit einer Schrittweite von 0,1 m in allen Richtungen ergeben sich $21 \cdot 21 \cdot 41 = 18.081$ auszuwertende Basislagen.

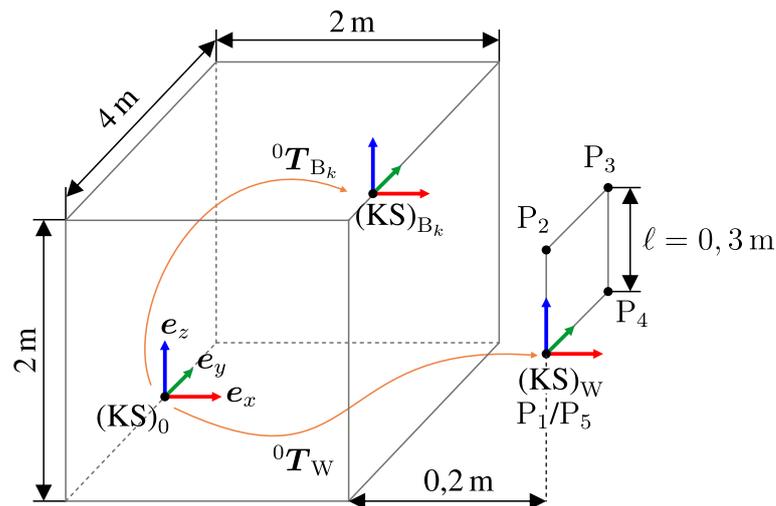


Bild 6.3: Gültige Basislagen des KR 16 für die betrachtete Punktschweißaufgabe

Die Ergebnisse der Brute-Force-Untersuchung am KR 16 sind in Bild 6.4 dargestellt. Die farbigen Punkte repräsentieren jeweils eine Basislage, für die eine gültige Lösung der Aufgabe gefunden werden kann. Für die betrachtete Anwendung existieren 4.135 Basislagen mit gültiger Lösung. Die Farbe gibt den Energiebedarf entsprechend der abgebildeten Skala an, demnach repräsentieren dunkelgrüne Punkte Basislagen mit dem niedrigsten, dunkelrote Punkte Basislagen mit dem höchsten Energiebedarf. Die Energiewerte sind normiert auf den niedrigsten resultierenden Energiebedarf E_{\min} von 1,19 kJ. Die zugehörige energieoptimale Basislage ist in Bild 6.4a mit einem weißen Kreuz gekennzeichnet. Die mit einem blauen Kreuz markierte Basislage ist zunächst beliebig gewählt und wird für spätere Vergleiche als beispielhafte Referenzlage herangezogen, um den Einfluss der Basisverschiebung auf die Bahnplanung sowie die Leistungsaufnahme zu demonstrieren. Die Energieaufnahme in dieser Referenzlage beträgt 1,48 kJ. Es ist zu erkennen, dass die energetisch

beste Basislage diejenige mit dem weitesten Abstand in der ${}_{(0)}x_{(0)}y$ -Ebene zum Werkstück ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die Distanz die geringsten Bewegungen im Gelenkraum ergeben, was trotz der durch die Strecklage bedingten höheren Massenträgheiten zur geringsten Energieaufnahme führt.

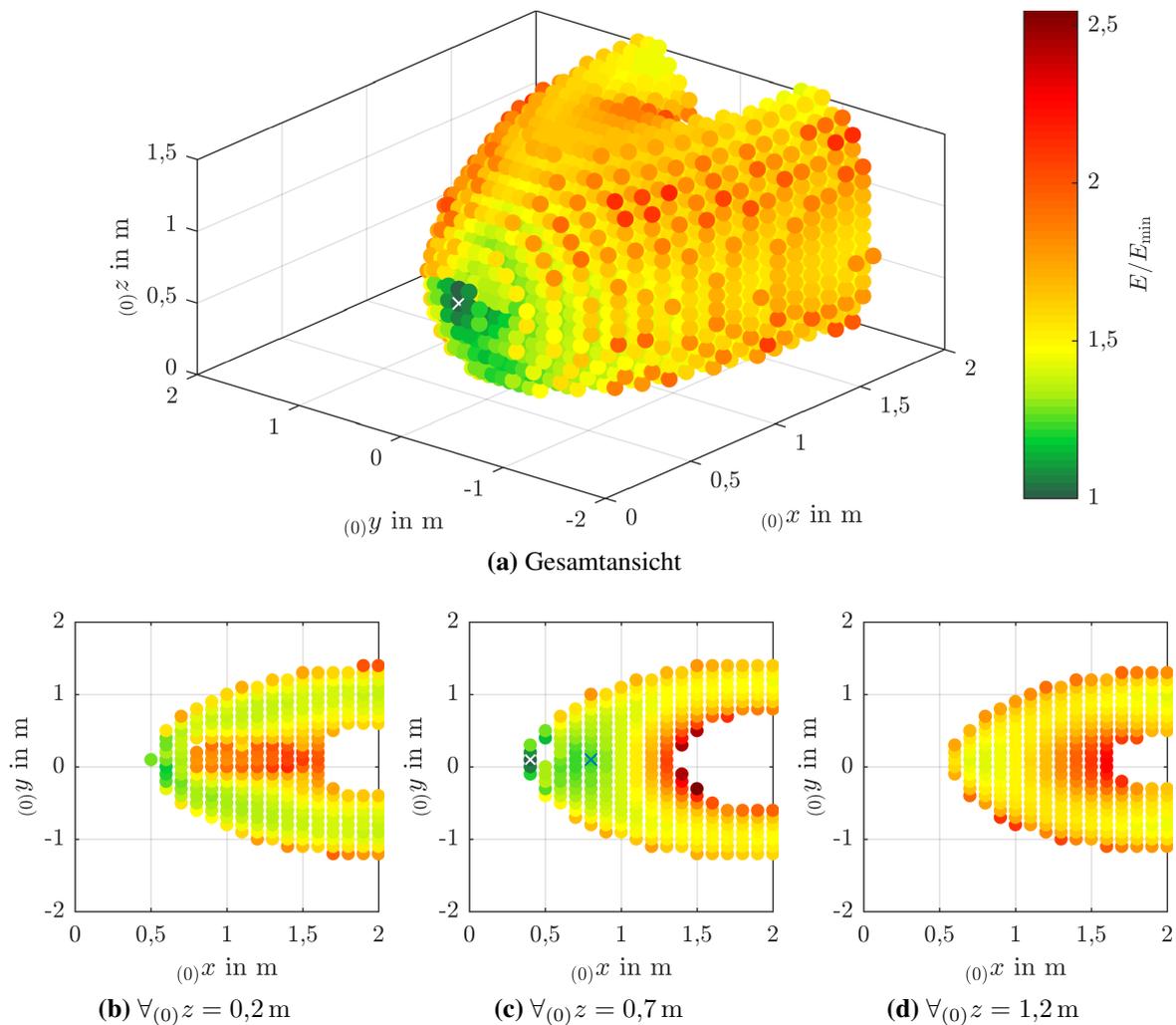
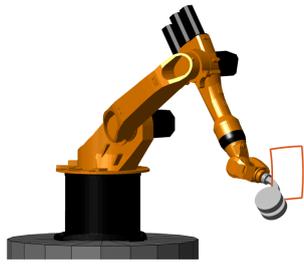
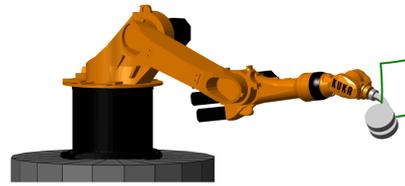


Bild 6.4: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf bei der Punktschweißaufgabe am KR 16

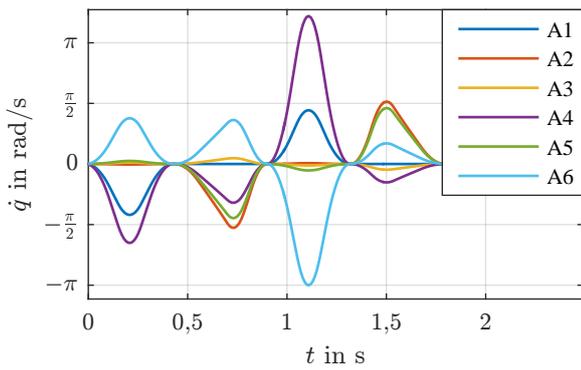
Die Angabe einer relativen oder absoluten Ersparnis ist bei der Verschiebung der Basislage nicht ohne Weiteres möglich, da sich kein „Normalfall“, also keine eindeutig definierte Referenzlage bestimmen lässt. Um dennoch den Einfluss der Basisverschiebung auf die Bahnplanung und auf die Leistungsaufnahme darstellen zu können, sind die Posen, Geschwindigkeits- und Leistungsverläufe für die energieminimale Lage sowie die zuvor definierte Referenzlage in Bild 6.5 zu sehen. Die Basislagen unterscheiden sich lediglich in der Entfernung in ${}_{(0)}x$ -Richtung zum Werkstück. Die Leistungsaufnahme verringert sich insbesondere bei der Auf- und Abwärtsbewegung, zu erkennen



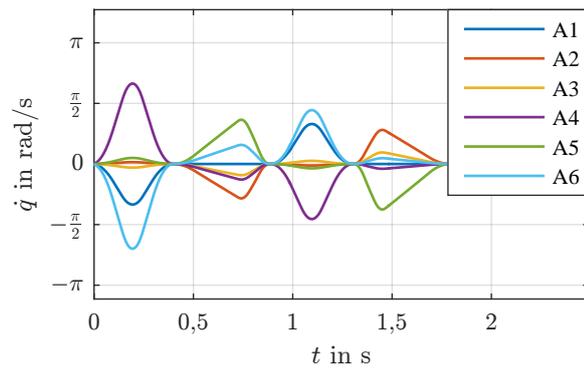
(a) Startkonfiguration bei Referenzbasislage



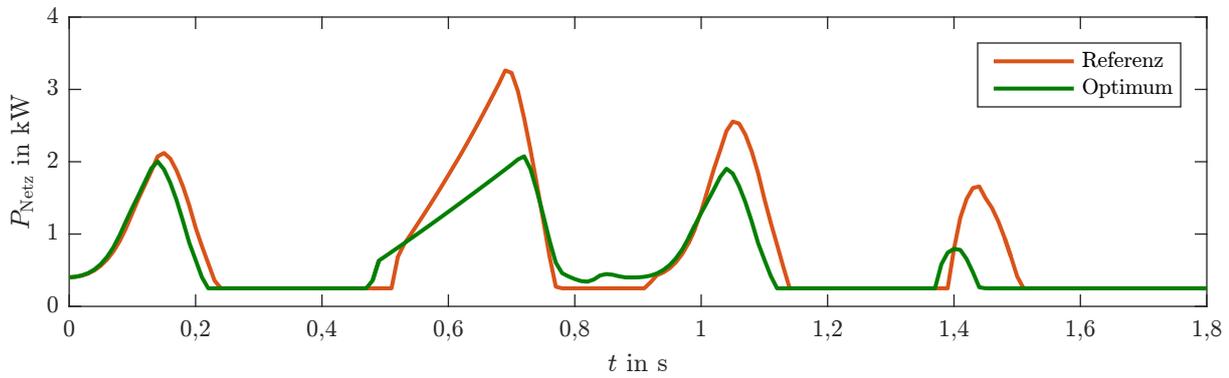
(b) Startkonfiguration bei optimaler Basislage



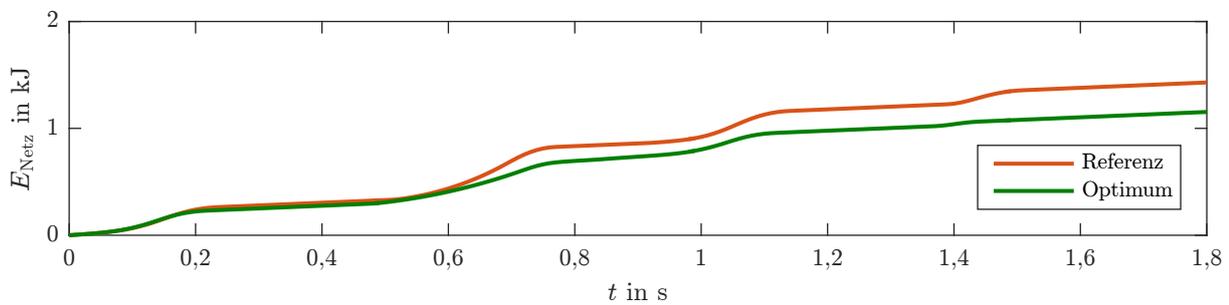
(c) Geschwindigkeitsverläufe für Referenzbasislage



(d) Geschwindigkeitsverläufe für optimale Basislage



(e) Vergleich der Leistungsverläufe



(f) Vergleich der Energieverläufe

Bild 6.5: Vergleich von optimaler Lage und Referenzlage für Punktschweißzenario am KR 16

an der zweiten und vierten Leistungsspitze in Bild 6.5e. An den Geschwindigkeitsverläufen in Bild 6.5c und Bild 6.5d lässt sich ablesen, dass dies auf die verringerte Bewegung des zweiten Gelenks zurückzuführen ist, welche in der Strecklage über einen größeren Hebelarm verfügt. Darüber hinaus ist an den Geschwindigkeitsverläufen der Handachsen zu erkennen, dass bei der Referenzlage eine stärkere Korrektur der Rotation durch die Achsen 4 und 6 notwendig ist.

Für die Untersuchung am KR 210 wird die Aufgabe aufgrund des größeren Arbeitsraums leicht modifiziert. Die Seitenlänge des Quadrats wird von $\ell = 0,3 \text{ m}$ auf $\ell = 0,4 \text{ m}$ und die maximale Bearbeitungszeit T_{\max} von $1,8 \text{ s}$ auf $2,7 \text{ s}$ erhöht. Der Raum gültiger Basislagen wird auf

$$0 \leq {}_{(0)}x_{B_k} \leq 3 \text{ m}, \quad (6.6)$$

$$-3 \text{ m} \leq {}_{(0)}y_{B_k} \leq 3 \text{ m}, \quad (6.7)$$

$$0 \leq {}_{(0)}z_{B_k} \leq 3 \text{ m} \quad (6.8)$$

erweitert. Die Schrittweite wird auf $0,15 \text{ m}$ in allen Richtungen angepasst, sodass sich erneut 18.081 mögliche Basislagen ergeben. Die Ergebnisse sind in Bild 6.6 dargestellt. Insgesamt können 4.199 Basislagen mit gültiger Lösung gefunden werden. Grundsätzlich sind die gleichen Tendenzen wie zuvor beim KR 16 bezüglich der optimalen Basislage zu erkennen.

Die energieoptimale Basislage befindet sich in diesem Fall erneut annähernd zentral vor dem Werkstück, allerdings nicht in der maximal möglichen Entfernung in ${}_{(0)}x$ -Richtung. Für die weiter entfernten Lagen in der gleichen ${}_{(0)}x$ - ${}_{(0)}y$ -Ebene ist eine stärkere Korrektur der Rotation durch die Handachsen zur Lösung der Aufgabe erforderlich, was aufgrund der zusätzlichen Distanz im Gelenkraum zu schlechteren Ergebnissen führt. Durch die verhältnismäßig höheren Motorleistungen der Handachsen im Vergleich zum KR 16 (siehe Abschnitt 3.1) ist der Effekt beim größeren Roboter deutlicher sichtbar, während beim kleineren KR 16 die Bewegung der Hauptachsen maßgeblich den resultierenden Energiebedarf bestimmt.

6.2.2 Bahnschweißen

Die zweite Aufgabe soll einen Bahnschweißprozess repräsentieren. Hierzu wird erneut das im vorigen Abschnitt vorgestellte Quadrat mit unveränderter Lage des Werkstücks bezüglich des $(KS)_0$ sowie dem gleichen Raum der möglichen Basislagen für den jeweiligen Roboter verwendet. Die einzige Änderung besteht somit in der Verbindung der Eckpunkte, die jetzt nicht mehr mit PTP-Bewegungen, sondern mit LIN-Bewegungen umgesetzt wird. Demnach sind die 3.988 möglichen Basislagen, bei denen sich eine gültige Lösung finden lässt, eine Untermenge der 4.135 gültigen

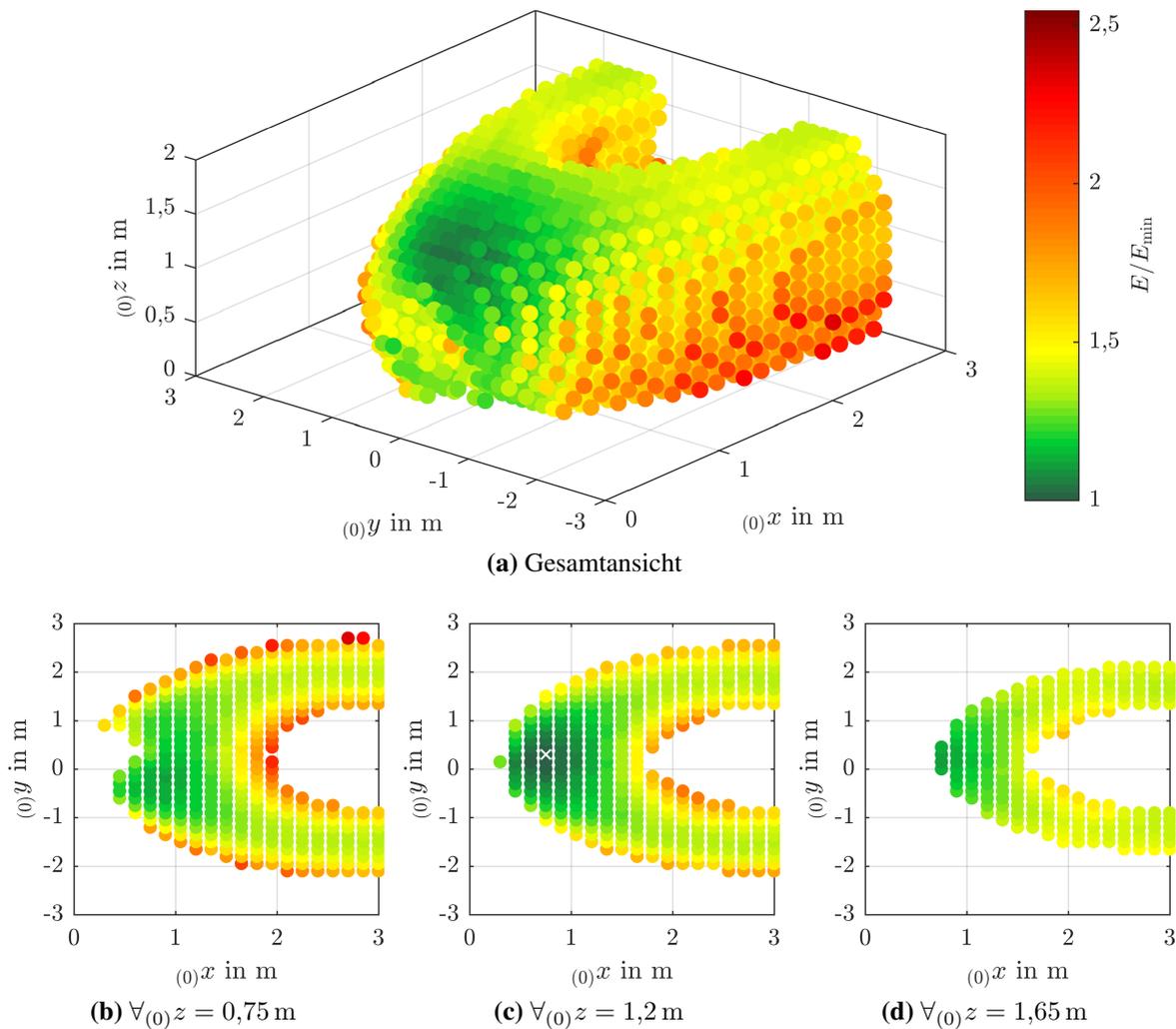


Bild 6.6: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf bei der Punktschweißaufgabe am KR 210

Basislagen aus der Punktschweißaufgabe. Die Bearbeitungszeit wird beim KR 16 aufgrund der langsameren Bewegungsvorschrift auf 2,4 s erhöht. Da die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der LIN-Bewegungen im Arbeitsraum vorgegeben werden, ergibt sich für alle Basislagen eine identische Bearbeitungszeit. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Bild 6.7 dargestellt. Im Vergleich zur Punktschweißaufgabe ändert sich die optimale Basislage nur geringfügig. Wie an der überwiegend grünen Färbung der einzelnen Basislagen in der Grafik zu erkennen ist, wird der Einfluss der Basislage auf den Energiebedarf bei Verwendung von LIN-Bewegungen merklich verringert. Dies ist zum einen auf die fehlende Möglichkeit zur Abkürzung der Wege im Gelenkraum zurückzuführen. Zum anderen können bei PTP-Bewegungen Verringerungen der Bearbeitungszeit zur Verlangsamung der Bahn und somit zu Energieeinsparungen genutzt werden, was bei LIN-Bewegungen ebenfalls entfällt. Schließlich sind bei der Punktschweißaufgabe auch Lösungen mit

Konfigurationswechseln möglich, die jedoch häufig zu zusätzlichen Wegen im Gelenkraum und entsprechend hohem Energiebedarf führen.

Für den KR 210 wird ebenfalls die Aufgabenvorschrift aus Abschnitt 6.2.1 genutzt. Die PTP-Bewegungen werden durch LIN-Bewegungen ersetzt. Die Bearbeitungszeit wird auf 3,6 s erhöht, die restlichen Randbedingungen bleiben unverändert. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Bild 6.8 dargestellt. Wie beim KR 16 ist der Einfluss der Basislage auf den Energiebedarf nach wie vor deutlich zu erkennen, das Einsparpotential wird jedoch im Vergleich zur Punktschweißaufgabe aus den zuvor genannten Gründen verringert. Auch für den KR 210 ändert sich die energieoptimale Basislage bei Änderung der Bewegungsvorschrift nur marginal.

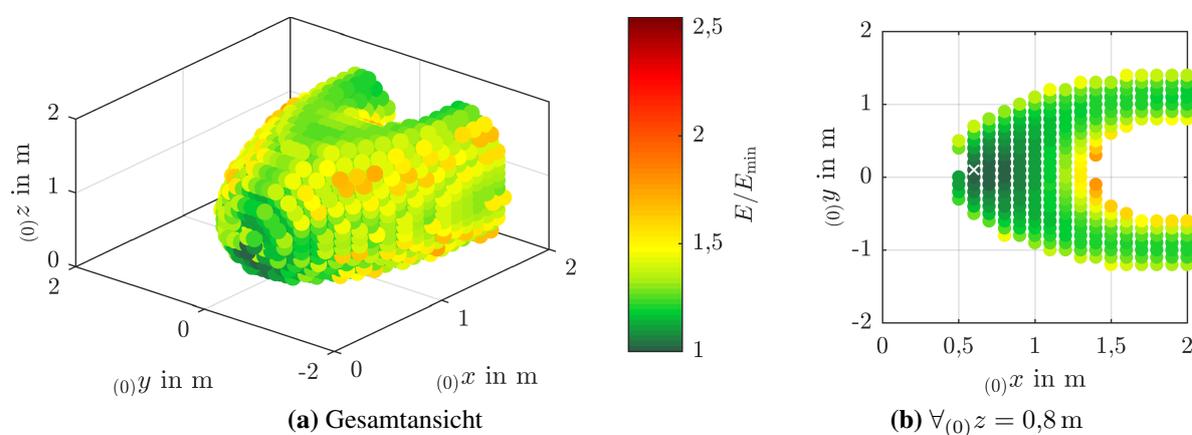


Bild 6.7: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf beim Bahnschweißen am KR 16

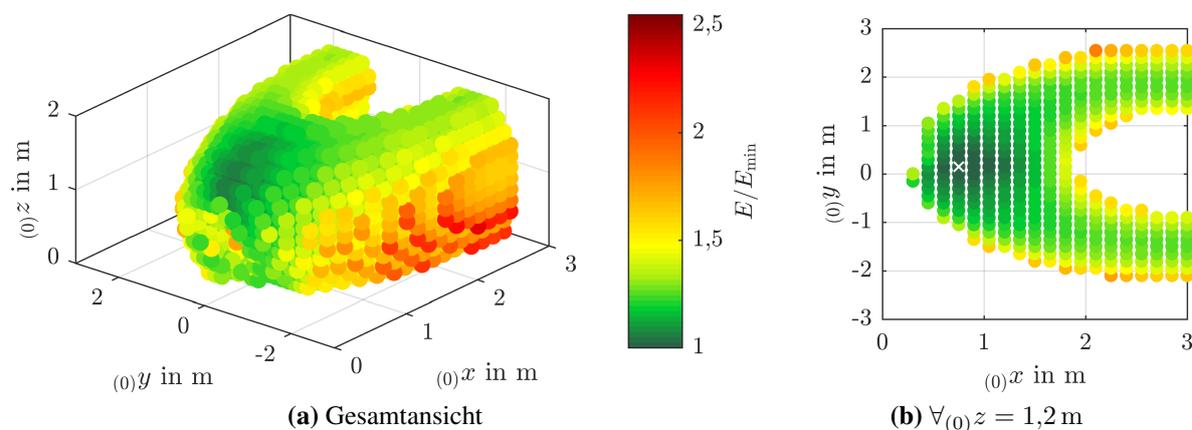


Bild 6.8: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf beim Bahnschweißen am KR 210

6.2.3 Pick-and-Place

Als letzte Aufgabe wird ein Pick-and-Place-Szenario betrachtet. Der Bereich der gültigen Basislagen bleibt für beide Roboter unverändert zu den vorherigen Untersuchungen. Die Aufgabe ist mit Maßen für den KR 16 in Bild 6.9 dargestellt. Der Start- und Zielpunkt P_1 beziehungsweise P_7 sowie der Ablagepunkt P_4 sind Haltepunkte, die Punkte $V_{\#}$ sind Viapunkte und werden vollständig verschliffen. Das zu transportierende Werkstück soll um $0,2\text{ m}$ in ${}_{(0)}z$ -Richtung angehoben beziehungsweise abgesenkt und um $0,6\text{ m}$ in ${}_{(0)}y$ -Richtung versetzt werden. Die Aufgabe ist $0,2\text{ m}$ in ${}_{(0)}x$ -Richtung entfernt vom gültigen Basislagenbereich. Der Endeffektor soll beim Aufnahme- und Ablagepunkt in Richtung des Bodens zeigen. Es wird ein kompletter Zyklus (also die Kombination aus Hin- und Rückfahrt) betrachtet, sodass Start- und Zielpunkt der Aufgabe identisch sind. Demnach ergeben sich für die Start- und Ziellage die Umweltkoordinaten

$${}_{(0)}\mathbf{x}_{E,S} = (2,2\text{ m}, 0,3\text{ m}, 1\text{ m}, 180^\circ, 0^\circ, 0^\circ)^T. \quad (6.9)$$

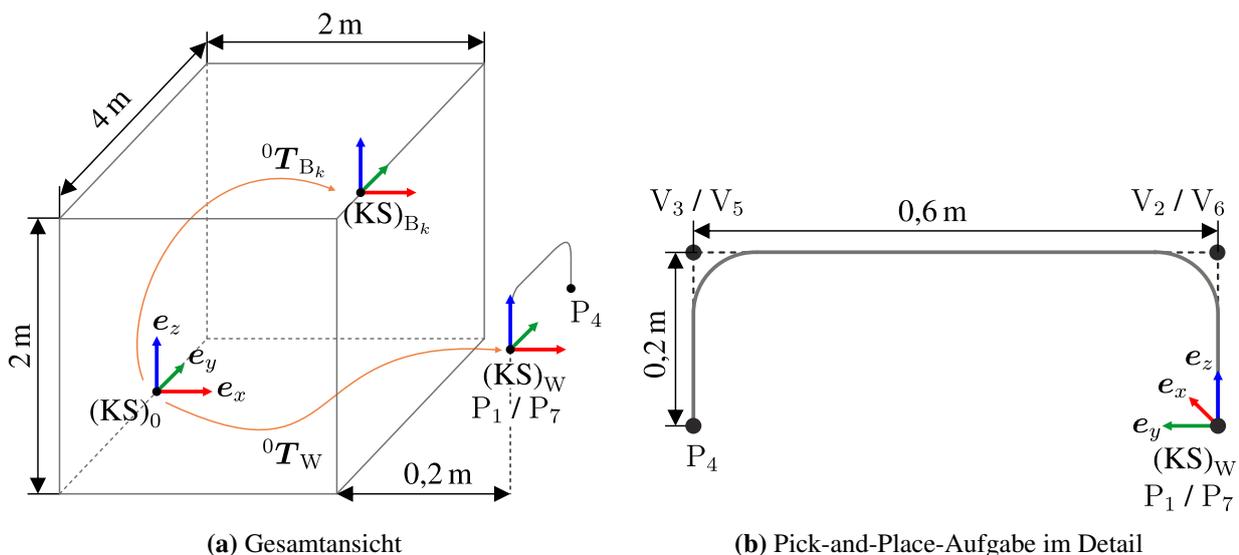


Bild 6.9: Pick-and-Place-Aufgabe, bemaßt für den KR 16

Als maximale Bearbeitungszeit werden $T_{\max} = 2\text{ s}$ vorgegeben. Für die Rückfahrt (P_4 bis P_7) wird eine Gewichtsreduktion des Werkzeugs von 15 kg auf 10 kg angenommen, um die Ablage des zu transportierenden Werkstücks zu simulieren. Die Änderungen des Schwerpunkts und der Trägheit werden vernachlässigt.

Die Untersuchungsergebnisse sind in Bild 6.10 dargestellt. Aufgrund der größeren zurückzulegenden Distanzen im Arbeitsraum im Vergleich zu den Schweißaufgaben ist der Lösungsraum stärker eingeschränkt, es ergeben sich 2.551 Basislagen mit gültigen Lösungen. Auch bei der

Pick-and-Place-Aufgabe wird eine Bearbeitung in Strecklage energetisch favorisiert, die Gründe hierfür entsprechen den zuvor genannten. Generell ist erneut eine hohe Effizienz bei möglichst weiter Entfernung in ${}_{(0)}x$ -Richtung und gleichzeitiger zentraler Lage in ${}_{(0)}y$ -Richtung zu erkennen.

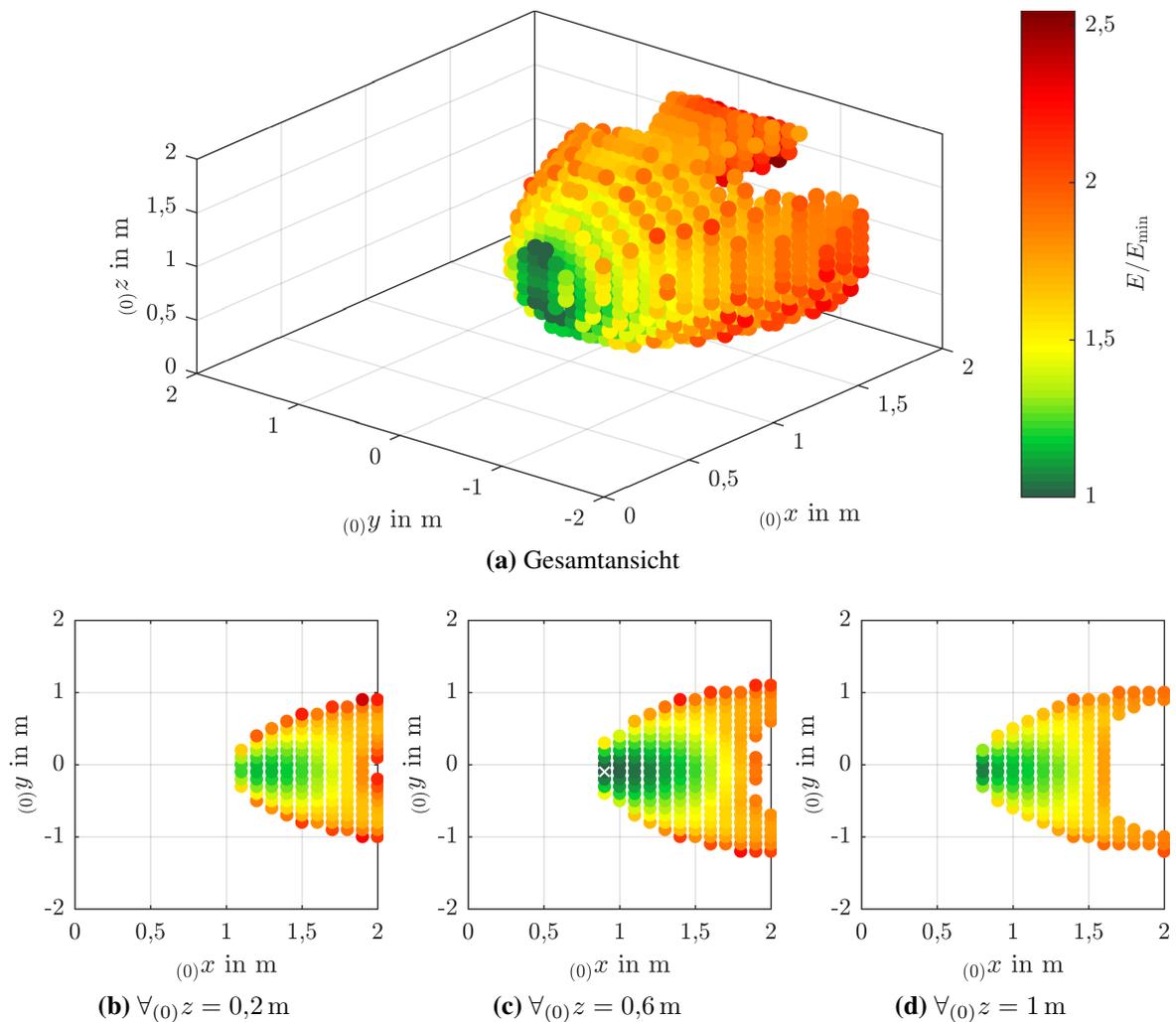


Bild 6.10: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf bei der Pick-and-Place-Aufgabe am KR 16

Für den KR 210 wird die Anhebung in ${}_{(0)}z$ -Richtung auf 0,3 m, der Versatz in ${}_{(0)}y$ -Richtung auf 0,9 m und die Entfernung in ${}_{(0)}x$ -Richtung auf 3,2 m erhöht. Die Bearbeitungszeit wird zu 3 s angepasst. Das Gewicht des Werkzeugs wird bei der Rückfahrt von 200 kg auf 150 kg verringert. Die Ergebnisse sind in Bild 6.11 dargestellt und sind im Wesentlichen identisch mit denen des KR 16. Da die Aufgabe einen dominanten Anteil an translatorischen Bewegungen besitzt und nur in zwei Punkten (Start/Ziel und Ablage) eine feste Orientierung fordert, bestimmen die Hauptachsen

maßgeblich den Energiebedarf, sodass sich in diesem Fall auch für den größeren KR 210 sich die Bearbeitung in Strecklage am energieeffizientesten erweist.

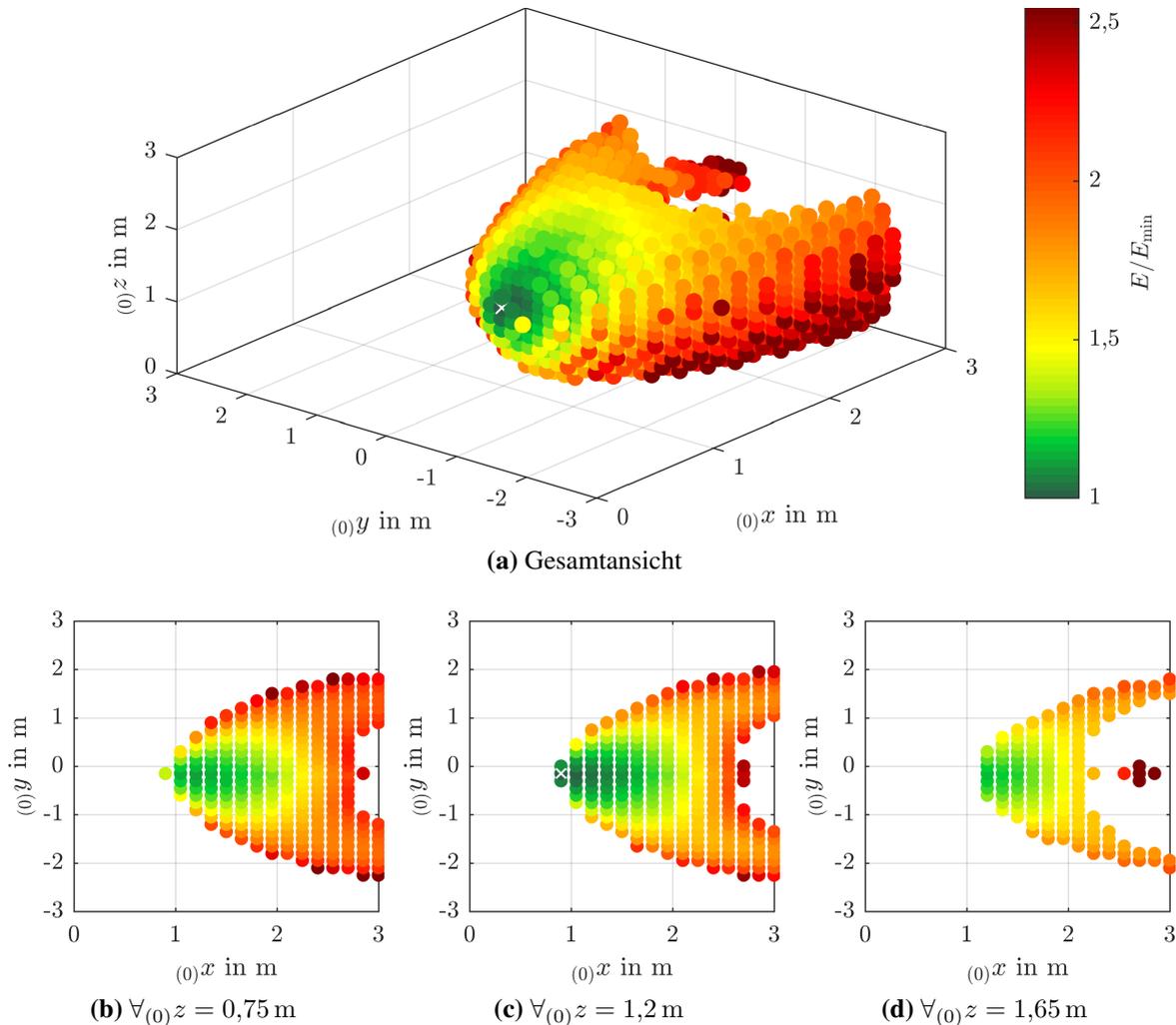


Bild 6.11: Zusammenhang von Basislage und Energiebedarf bei der Pick-and-Place-Aufgabe am KR 210

6.3 Reduktion der Verfahrzeit durch Änderung der Basislage

Ergänzend zu den Untersuchungen zum Einfluss der Basislage auf den Energiebedarf wird im Folgenden dargestellt, inwiefern die minimal erreichbare Bearbeitungszeit durch die Wahl der Basislage beeinflusst werden kann. Hierzu wird erneut das in Abschnitt 6.2.1 vorgestellte Punktschweißszenario am KR 16 betrachtet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Bild 6.12 dargestellt. Die Farbe der Punkte gibt jetzt die Bearbeitungszeit T an, normiert auf den Wert der minimalen

gefundenen Lösung T_{\min} . Die optimale Basislage ist erneut durch ein weißes Kreuz gekennzeichnet. Es ist zu sehen, dass nicht nur der Energiebedarf, sondern auch die Bearbeitungszeit erheblich durch die Wahl des Aufstellortes beeinflusst wird. Während die energieoptimale Lösung sich bei größtmöglicher Entfernung der Basis vom Werkstück eingestellt hat, ist dies bei der zeitoptimalen Lösung nicht der Fall, da sich durch die höheren konfigurationsabhängigen Massenträgheiten geringere mögliche Gelenkbeschleunigungen ergeben. Die zeitoptimale Basis ergibt sich stattdessen aus dem besten Kompromiss aus möglichst geringer Massenträgheit und möglichst kurzer Gelenkraumbewegung, jeweils insbesondere bezogen auf das zeitkritische Gelenk.

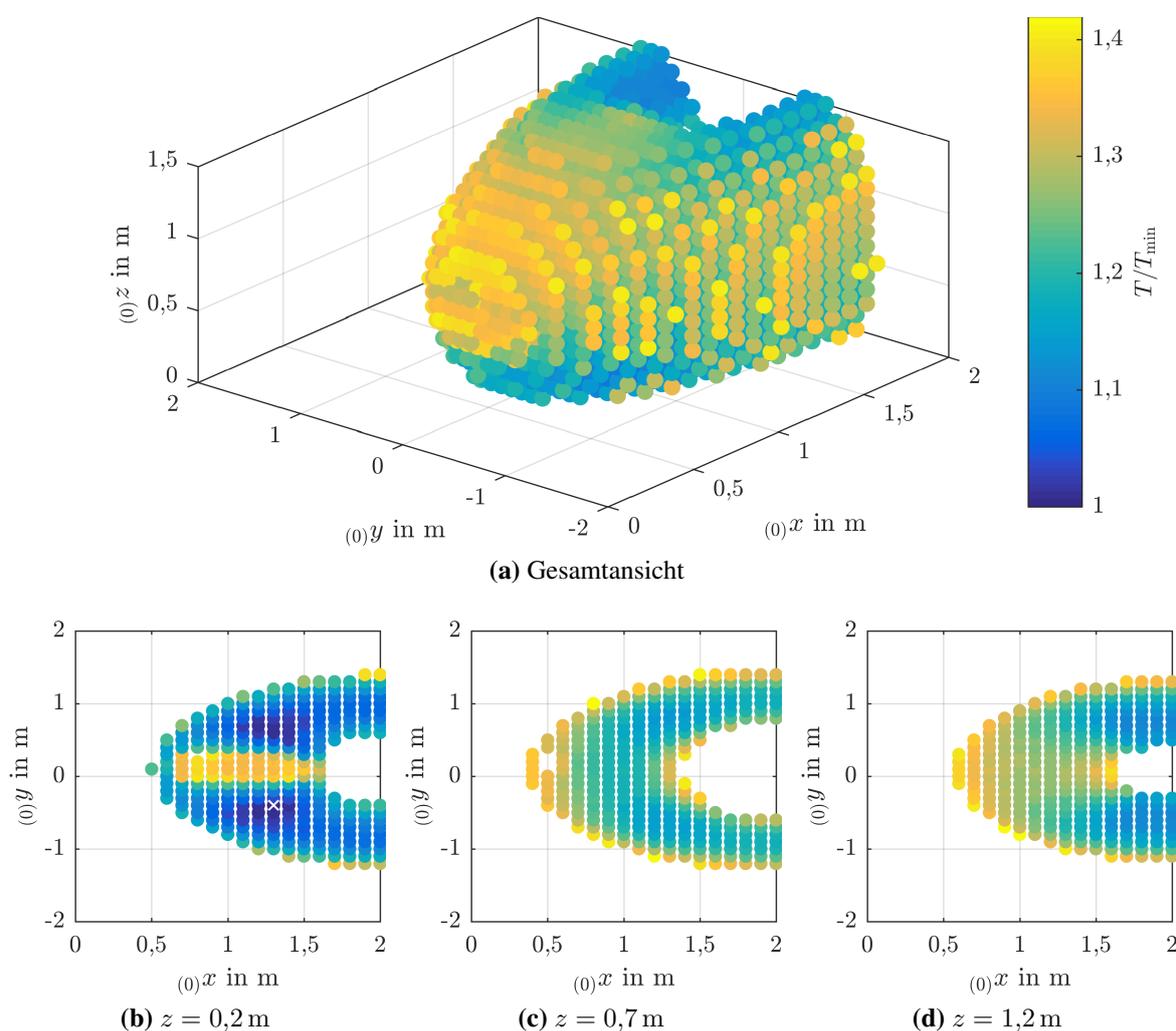


Bild 6.12: Einfluss der Basislage auf die Bearbeitungszeit bei der Punktschweißaufgabe am KR 16

In Bild 6.13 ist der Zusammenhang von Energiebedarf und minimaler Bearbeitungszeit für alle in Kapitel 6 betrachteten Szenarien dargestellt, die mit PTP-Bewegungen gelöst wurden. Für die

Bahnschweißaufgabe ist die Betrachtung nicht möglich, da die Bearbeitungszeit prozessseitig vorgegeben ist. Jeder Punkt entspricht erneut einer gültigen Basislage. Die sichtbare „Kante“ resultiert aus den Vorgaben der jeweiligen maximalen Bearbeitungszeit T_{\max} , bei deren Überschreitung die Lösungen nicht mehr als gültig gewertet werden. Während sich bei den Lagen mit besonders langsamer Bearbeitungszeit überwiegend auch ein hoher Energiebedarf ergibt und umgekehrt, ist bei Lösungen mit geringer Bearbeitungszeit oder geringem Energiebedarf kein unmittelbarer Zusammenhang der beiden Größen zu erkennen. Demnach lässt sich auch bei der Basisverschiebung festhalten, dass Erhöhungen der maximal zulässigen Bearbeitungszeit zur energetischen Optimierung genutzt werden können. Darüber hinaus lässt sich das Verfahren zur Basisverschiebung auch zur zeitlichen Optimierung zeitkritischer Anwendungen nutzen.

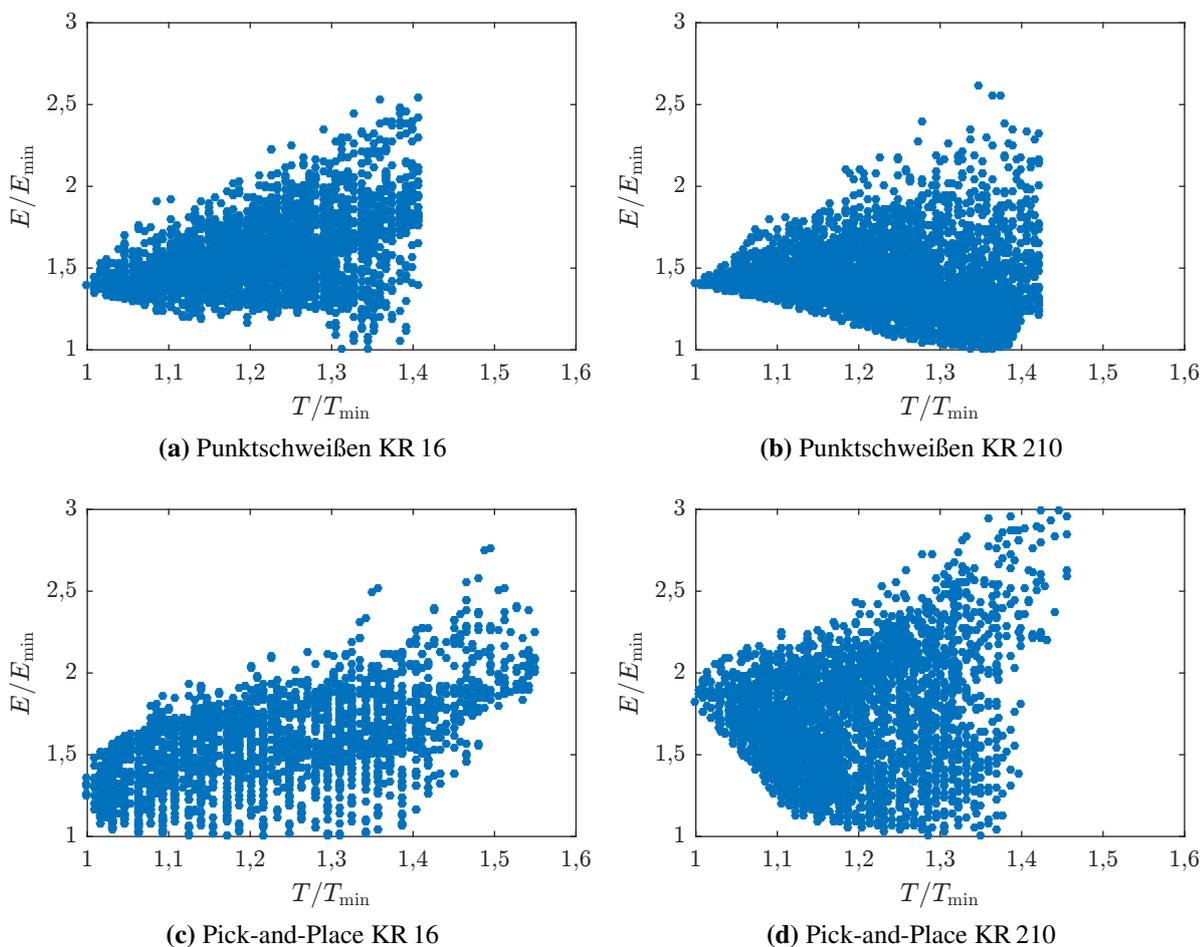


Bild 6.13: Zusammenhang von Energiebedarf und Bearbeitungszeit bei verschiedenen Szenarien

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Roboterbasislage auf den Energiebedarf untersucht. Hierzu werden verschiedene industrietypische Anwendungsfälle definiert, bei denen die Basislage unter Verwendung eines Brute-Force-Ansatzes in sämtlichen Raumrichtungen verschoben und der resultierende Energiebedarf simulativ bestimmt wird. Sowohl aufgaben- als auch roboterübergreifend lässt sich signifikantes Einsparpotential durch die Verschiebung aufzeigen. Die energetischen Ersparnisse entstehen dabei überwiegend durch die Verkürzung der zurückzulegenden Wege im Gelenkraum. Diese Verkürzung tritt insbesondere in der Nähe der Strecklage auf, da die Hauptachsen hier über die größten Hebelarme verfügen und somit die vorgegebenen Strecken im Arbeitsraum mit den geringsten Gelenkraumbewegungen zurücklegen können. Ein weiterer Effekt ist eine mögliche Verringerung der Verfahzeit, die wiederum nach den Erkenntnissen aus Kapitel 4 zur Reduktion des Energiebedarfs genutzt werden kann.

Während die Bewegung in oder nahe der Strecklage die energetisch besten Ergebnisse erzielt, sei darauf hingewiesen, dass sich diese Konfiguration bedingt durch die großen Hebelarme negativ auf andere Kenngrößen wie zum Beispiel die Steifigkeit oder die Absolutgenauigkeit auswirken kann. Darüber hinaus besteht bei Nutzung der Strecklage die Gefahr, dass bei leichten Modifikationen des Werkstücks oder der Aufgabe diese kinematisch nicht mehr erfüllt werden kann. Bei Bedarf können diese und/oder weitere Faktoren durch das Hinzufügen zusätzlicher Nebenbedingungen bei der Bestimmung der Basisposition berücksichtigt werden.

Abschließend wird das Verfahren zur Reduktion der minimal erreichbaren Bearbeitungszeit verschiedener Aufgaben angewendet. Auch bei der geänderten Zielgröße wird ersichtlich, dass die Performanz des Roboters erheblich von der relativen Lage von Roboterbasis zu Werkstück beeinflusst wird. Die energieoptimale Basislage entspricht im Regelfall nicht der zeitoptimalen, sodass bei Optimierungen in der Praxis für zeitkritische Bewegungen ein anderes Gütefunktional als für die unkritischen Bewegungen gewählt werden sollte. Die Reduktion von Energiebedarf und/oder Verfahzeit durch Änderung der Basislage eignet sich sowohl für neue als auch bestehende Anlagen und zeichnet sich durch eine einfache Umsetzung mit geringen anfallenden Kosten aus.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination aus stetig wachsenden Roboterinstallationen und dem Bestreben nach einer möglichst nachhaltigen und energieeffizienten Produktion ergeben ein zunehmendes Bestreben zur Erhöhung der Energieeffizienz von Industrierobotern. Bei der Anschaffung eines Roboters spielen somit nicht mehr nur Faktoren wie Traglast und Dynamik, sondern auch die Energieeffizienz des Systems eine zunehmende Rolle. Der Bedarf an Methoden zum energieeffizienten Betrieb besteht daher sowohl auf (Roboter-)Hersteller- als auch auf Kundenseite. Die Verbesserungsansätze lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: Bei den hardwarebezogenen Ansätzen wird eine Effizienzsteigerung durch Verbesserung der verwendeten mechanischen und elektrischen Komponenten und/oder durch Hardware-Erweiterung des Systems, zum Beispiel in Form von Energiespeichern, angestrebt. Die zweite Kategorie bilden Ansätze zur Optimierung der Software, bei denen die Ersparnisse durch energieeffizientere Bahnplanungsalgorithmen und Ablaufsteuerungen erzielt werden sollen. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit fokussieren sich dabei auf die zweite Kategorie. Es werden verschiedene softwarebasierte Verbesserungsansätze für zwei moderne Industrieroboter umgesetzt und die resultierenden Einsparpotentiale in industrietypischen Applikationen untersucht. Die erzielten Erkenntnisse werden in Abschnitt 7.1 zusammengefasst. Ein Ausblick zur weiteren Verwendung der vorgestellten Modellierungs- und Optimierungsansätze erfolgt in Abschnitt 7.2.

7.1 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 1 die Notwendigkeit zur Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern erläutert, gefolgt von einer Übersicht zu aktuellen Forschungsaktivitäten in diesem Themenbereich. Während nach Stand der Forschung zahlreiche softwarebasierte Ansätze zur Effizienzsteigerung zu finden sind, lassen sich auch Wissenslücken bezüglich der Vergleichbarkeit, Umsetzbarkeit, dem Einsparpotential bei möglichst realitätsnahen Applikationen sowie deren Ursachen feststellen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen diese Punkte daher untersucht und diskutiert werden.

Der hierzu notwendige Modellierungsansatz zur netzseitigen Leistungs- und Energieaufnahme von Industrierobotern wird in Kapitel 2 vorgestellt. Hierbei werden gegenüber bisherigen Ansätzen Vereinfachungen bei der Betrachtung des elektrischen Teils getroffen, sodass die Modellierung rein auf Leistungs- und nicht auf Strom- und Spannungsebene erfolgen kann. Hierdurch wird die Anzahl der notwendigen beschreibenden Parameter erheblich reduziert.

Die Parametrierung und Validierung des Modells für zwei Industrieroboter verschiedener Baugrößen und Traglasten erfolgt in Kapitel 3. Die Zulässigkeit der getroffenen Vereinfachungen kann an beiden Prüfständen bestätigt werden. Darüber hinaus wird gezeigt, dass bei Industrierobotern die Robotertemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Modelliergenauigkeit besitzt und somit zwingend Berücksichtigung finden muss.

In den Kapiteln 4 bis 6 werden verschiedene Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern untersucht. Die Aufteilung erfolgt im Wesentlichen anhand der zulässigen Änderungen an der Applikation. In Kapitel 4 werden Bewegungen betrachtet, deren Geometrie als unverändert angenommen wird, während die Verfahrzeit energetisch optimiert werden darf. Für beide zuvor eingeführten Industrieroboter werden 1.000 zufällige PTP-Bewegungen generiert und der Energiebedarf jeder Bewegung wird in 17 Schritten absteigend von der minimalen bis zur fünffachen Verfahrzeit ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bestimmung einer energieoptimalen Verfahrzeit maßgeblich von der Ansteuerung der Haltebremsen des Systems abhängt. Wenn diese als permanent gelüftet angenommen werden, stellt für alle betrachteten Szenarien die langsamste Bewegung gleichzeitig die energieeffizienteste dar. Bei Verwendung einer intelligenten Bremsensteuerung kann die Verlangsamung von Bewegungen weiterhin zur Effizienzsteigerung genutzt werden, das energetische Optimum der Verfahrzeit besitzt dann jedoch eine Abhängigkeit von der Bahn. Als Faustwert wird für die meisten Bewegungen etwa bis zur Verdopplung der Verfahrzeit eine stetige Verringerung der Energieaufnahme erzielt. Verglichen mit zeitminimalen Bewegungen lässt sich ein Energiesparpotential im Bereich von etwa 10 bis 20 % feststellen. Die Verbesserungsmaßnahme zeichnet sich insbesondere durch die einfache Umsetzung und nachträgliche Anpassung in bestehenden Systemen aus.

Nach der Betrachtung zeitlich veränderlicher, aber geometrisch fester Bewegungen wird in Kapitel 5 die umgekehrte Ausgangssituation angenommen, also Bewegungen mit vorgegebener (maximaler) Verfahrzeit bei eingeschränkt oder gänzlich frei veränderlicher Geometrie. Zur Optimierung der Geometrie werden zwei verschiedene Verfahren vorgestellt. Im ersten Verfahren werden die Bahnen auf einer kommerziellen Robotersteuerung geplant und unter Verwendung von B-Splines approximiert. Die Gelenkwinkelbahnen können somit unabhängig voneinander anhand der Knoten- und Kontrollpunkte mathematisch beschrieben werden. Die Kontrollpunkte können in einem nichtlinearen Optimierungsverfahren derart verschoben werden, dass sich eine möglichst energieminimale Bewegung des Roboters ergibt. Die Methode zeichnet sich durch die Möglichkeit zum Verlassen der Achssynchronität und der prinzipiell beliebigen Bahnänderung aus. Die Planung der Initialbahnen auf einer kommerziellen Steuerung bietet einen plausiblen Referenzwert und gewährleistet realitätsnahe Ergebnisse. Im zweiten Verfahren soll eine Verringerung durch direkte Manipulation der zu planenden Bahnen auf der Robotersteuerung erreicht werden. Hierzu werden bei PTP-Bewegungen Viapunkte eingefügt, die im Rahmen einer nichtlinearen Optimierung verschoben werden können. Zur Bahnplanung wird dabei direkt die Robotersteuerung genutzt, sodass erneut realitätsnahe Ergebnisse gewährleistet sind und die Optimierungsergebnisse auch unmittelbar auf kommerzielle Systeme übertragen werden können. Beide Verfahren werden erneut

auf zwei Roboter in verschiedenen industrienahen Szenarien angewendet und ausgewertet. An den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass im Vergleich zu den Untersuchungen im vorigen Kapitel das Einsparpotential deutlich stärker von der betrachteten Bewegung sowie vom Roboter abhängt. Bei der Optimierung einzelner PTP-Bewegungen ergibt sich das Einsparpotential überwiegend durch die Reduktion der dissipierten Bremsenergie. Beim größeren KR 210 wird sowohl relativ als auch absolut mehr Energie über den Bremswiderstand abgeführt, wodurch sich entsprechend höhere Einsparpotentiale ergeben. Prinzipbedingt werden mit der B-Spline-Optimierung in allen Szenarien die größten Ersparnisse erzielt, während sich mit dem Viapunkt-basierten Ansatz in einigen Fällen die Einsparpotentiale nicht vollständig ausschöpfen lassen. Bei der Optimierung verketteter Bewegungen kann sich die Reduktion des Energiebedarfs zusätzlich durch Verkürzungen der Wege im Gelenkraum ergeben, sodass sich bei deren Optimierung ein insgesamt etwas höheres Einsparpotential ergibt.

Die Reduktion des Energiebedarfs durch Änderung der Basislage des Roboters wird in Kapitel 6 untersucht. Beim Verschieben der Basislage ändert sich die relative Lage des Roboters zum Werkstück, sodass die Verschiebung zu einer indirekten Manipulation der resultierenden Gelenkwinkelbahnen genutzt werden kann. Analog zu den vorherigen Kapiteln werden die Untersuchungen an zwei Robotern und für mehrere verschiedene Aufgaben durchgeführt. Während zuvor ausschließlich PTP-Bewegungen zur Betrachtung in Frage kamen, ist bei dieser Methode auch die Reduktion des Energiebedarfs von CP-Bewegungen möglich. Zur Auswertung wird die Basislage unter Verwendung eines Brute-Force-Ansatzes in sämtlichen Raumrichtungen verschoben und der resultierende Energiebedarf simulativ bestimmt. Sowohl aufgaben- als auch roboterübergreifend lässt sich signifikantes Einsparpotential durch die Verschiebung aufzeigen. Die energetischen Ersparnisse entstehen dabei maßgeblich durch die Verkürzung der zurückzulegenden Wege im Gelenkraum sowie durch die Verringerung der Verfahrzeit, die wiederum nach den Erkenntnissen aus Kapitel 4 zur Reduktion des Energiebedarfs genutzt werden kann. Die Änderung der Basislage eignet sich sowohl für neue als auch bestehende Anlagen und zeichnet sich durch eine einfache Umsetzung mit geringen anfallenden Kosten aus.

7.2 Ausblick

Aufbauend auf den vorgestellten Erkenntnissen werden am Institut für Mechatronische Systeme in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Software Engineering (beides Leibniz Universität Hannover) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes *Entwurf energieeffizienter mechatronischer Systeme durch Kopplung automatischer Steuerungssynthese und Trajektorienplanung* („EffiSynth“) Möglichkeiten zur automatisierten Generierung energieeffizienter Ablaufsteuerungen untersucht. Die Bewertung und Optimierung der Abläufe erfolgt unter Verwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsansätze. Als Applikation wird eine Roboterzelle mit drei Knickarmrobotern und zwei Förderbändern im Zwischenkreisverbund betrachtet. Nach einer initialen Optimierung des Ablaufs wird dieser als Quellcode generiert und

auf eine zentrale Robotersteuerung geladen. Die einzelnen Prozessschritte werden mit den vorgestellten Methoden weiter optimiert. Die Ergebnisse werden der Ablaufoptimierung zurückgemeldet und dort in der nächsten Optimierungsiteration weiterverwendet. Der Ansatz wird in [GKG⁺18] detailliert vorgestellt.

Ein ähnlicher, jedoch größer skaliertes Ansatz wird durch den Forschungsverbund DC-Industrie verfolgt. Ziel des Verbunds ist eine Entwicklung von Komponenten und Verfahren zur Einführung fabrikweiter Gleichspannungs-Zwischenkreisverbunde. Die Untersuchungen beziehen sich neben den herkömmlichen Verbrauchern auch auf die Integration zusätzlicher Energiespeicher (zum Beispiel Batterien oder Schwungräder) und dezentraler Energieeinspeisungen (zum Beispiel Solarzellen oder Windkraftanlagen). Durch eine intelligente Ansteuerung der Einzelsysteme soll somit ein möglichst effizienter Betrieb der gesamten Anlage gewährleistet werden. Das imes ist hierbei Forschungspartner der Bosch-Rexroth AG und entwickelt unter anderem Multiscale-Modelle für die Leistungsbilanzen der einzelnen Teilnehmer. Für die Modellierung der Verbraucher werden dabei im Wesentlichen die in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsansätze verwendet.

Auch in der Firma forward ttc GmbH, die sich 2012 aus dem Institut für Mechatronische Systeme ausgegründet hat, werden Modelle zur Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfs von Industrierobotern angewendet, die auf den hier präsentierten Ansätzen basieren. In einem Projekt mit einem Automobilhersteller werden Energiesparpotentiale im roboterlastigen Karosseriebau aufgezeigt. Genauere Projektinhalte sind nicht öffentlich zugänglich. Darüber hinaus nutzt forward ttc die Modelle im Rahmen virtueller Roboterschulungen, wie in Bild 7.1 dargestellt. Die Modelle werden zur Anzeige des resultierenden Energiebedarfs bei Vorgabe einer Bewegung verwendet.

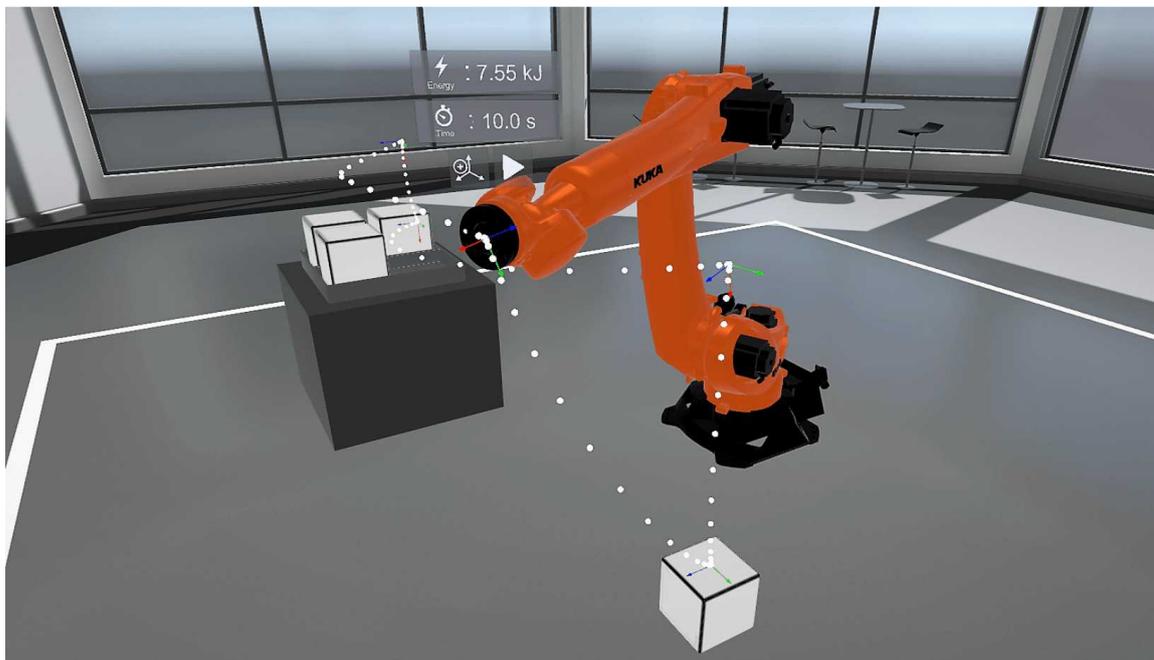


Bild 7.1: Bahnvorgabe mit Energieverbrauchsanzeige in der virtuellen Trainingswelt [Tho17]

Hierdurch soll der Anwender für die Thematik sensibilisiert und auf einfache Energiesparansätze wie zum Beispiel die Verringerung der Verfahrszeit zeitunkritischer Bewegungen hingewiesen werden. Perspektivisch ist auch die Integration der hier vorgestellten Verfahren zur Reduktion des Energiebedarfs in der virtuellen Umgebung denkbar, beispielsweise durch Optimierung der Roboterlage und/oder der Bahnen in Verbindung mit der Anzeige der resultierenden Bewegungen.

Literaturverzeichnis

- [Abe16] ABE, AKIRA: *An effective trajectory planning method for simultaneously suppressing residual vibration and energy consumption of flexible structures*. Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, 4:19–27, 2016.
- [AH02] AKELLA, SRINIVAS und SETH HUTCHINSON: *Coordinating the motions of multiple robots with specified trajectories*. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 624–631, 2002.
- [ASD16] AYTEN, KAGAN KORAY, MEHMET NECIP SAHINKAYA und AHMET DUMLU: *Optimum trajectory generation for redundant/hyper-redundant manipulators*. IFAC-PapersOnLine, 49:493–500, 2016.
- [Aur04] AURNHAMMER, ANDREAS: *Optimale Stochastische Trajektorienplanung und Regelung von Industrierobotern*. VDI-Verlag, 2004.
- [AZE⁺16] AZIZ, MINA AS, M ZHANIBEK, ALI SA ELSAYED, MOHAMMED OM ABDULRAZIC, SAMER YAHYA, HAIDER AF ALMURIB und MAHMOUD MOGHAVVEMI: *Design and analysis of a proposed light weight three DOF planar industrial manipulator*. In: *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Seiten 1–7, 2016.
- [BCCP10] BAILÓN, W PÉREZ, E BARRERA CARDIEL, I JUÁREZ CAMPOS und A RAMOS PAZ: *Mechanical energy optimization in trajectory planning for six DOF robot manipulators based on eighth-degree polynomial functions and a genetic algorithm*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Seiten 446–451, 2010.
- [BI05] BONA, B. und M. INDRI: *Friction Compensation in Robotics: an Overview*. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Seiten 4360–4367, 2005.
- [BWSTB10] BITTENCOURT, A. C., E. WERNHOLT, S. SANDER-TAVALLAHEY und T. BROGARDH: *An extended friction model to capture load and temperature effects in robot joints*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 6161–6167, 2010.
- [Cle15] CLEFF, THOMAS: *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA*. Gabler Verlag, 2015.

- [Cra05] CRAIG, JOHN J: *Introduction to robotics: mechanics and control*. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
- [CTKM10] CANDERS, W. R., G. TAREILUS, I. KOCH und H. MAY: *New design and control aspects for electric vehicle drives*. In: *Proceedings of the International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC)*, 2010.
- [CWV17] CARABIN, GIOVANNI, ERICH WEHRLE und RENATO VIDONI: *A Review on Energy-Saving Optimization Methods for Robotic and Automatic Systems*. *Robotics*, 6(4):39, 2017.
- [Die06] DIEBEL, JAMES: *Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors*. 58(15-16):1–35, 2006.
- [Die15] DIERSSEN, FRANK: *Steigerung der Energieeffizienz von Industrierobotern durch modellbasierte Trajektorienoptimierung*. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2015.
- [DKL98] DAM, ERIK B, MARTIN KOCH und MARTIN LILLHOLM: *Quaternions, interpolation and animation*. Datalogisk Institut, Københavns Universitet Copenhagen, 1998.
- [EHKO14] EGGERS, KAI, CHRISTIAN HANSEN, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Reduction of Energy Consumption by Optimized Robot Cell Design*. In: *Proceedings of the Symposium on Automated Systems and Technologies*, Seiten pp. 65–70. PZH Verlag (<http://www.ast.uni-hannover.de/935.html>), 2014.
- [EHKO16] EGGERS, KAI, CHRISTIAN HANSEN, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Method for real-time monitoring of the power envelope and/or energy flow of a drive device and drive device and computer programme for the same*. Angemeldet als Europäisches Patent EP3255513A1, 2016.
- [EKTO18] EGGERS, KAI, ELIAS KNÖCHELMANN, SVENJA TAPPE und TOBIAS ORTMAIER: *Modeling and experimental validation of the influence of robot temperature on its energy consumption*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seiten 239–243, 2018.
- [EZKO17] EGGERS, KAI, ZYGIMANTAS ZIAUKAS, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots*. In: *Proceedings of the International Conference on Industrial, Enterprise, and Systems Engineering (ICoIESE)*, 2017.
- [Fle13] FLETCHER, ROGER: *Practical methods of optimization*. John Wiley & Sons, 2013.
- [FO00] FEATHERSTONE, R. und D. ORIN: *Robot dynamics: equations and algorithms*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 826–834, 2000.

- [Fra15] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK: *AIDA Energiezertifikat für Robotik in der Automobilindustrie*. <https://www.aida-zertifikat.de/de/Energiezertifikat.html>, 2015. Abrufdatum 09.06.2018.
- [GA14] GLODDE, ARNE und MOHSEN AFROUGH: *Energy efficiency evaluation of an underactuated robot in comparison to traditional robot kinematics*. *Procedia CIRP*, 23:127–130, 2014.
- [GEG15] GALE, SERGE, ARNFINN AAS EIENSEN und JAN TOMMY GRAVDAHL: *Modelling and simulation of a flywheel based energy storage system for an industrial manipulator*. In: *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, Seiten 332–337. IEEE, 2015.
- [GF01] GROTE, KARL-HEINRICH und JÖRG FELDHUSEN: *Dubbel - Taschenbuch Fur Den Maschinenbau (20., Neubearb. U. Erw. Aufl.) (English and German Edition)*. Springer, 2001.
- [GGP⁺17] GREBERS, RITVARIS, MICHELE GADALETA, ARTURS PAUGURS, ARMANDS SENFELDS, ANSIS AVOTINS und MARCELLO PELLICCIARI: *Analysis of the Energy Consumption of a Novel DC Power Supplied Industrial Robot*. In: *Proceedings of the International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)*, Seiten 311 – 318, 2017.
- [GHKO14] GREENYER, JOEL, CHRISTIAN HANSEN, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Towards synthesizing energy-efficient controllers for modern production systems from scenario-based specifications*. *Procedia Technology*, 15:388–397, 2014.
- [GKG⁺18] GRITZNER, DANIEL, ELIAS KNÖCHELMANN, JOEL GREENYER, KAI EGGERS, SVENJA TAPPE und TOBIAS ORTMAIER: *Specifying and Synthesizing Energy-Efficient Production System Controllers that Exploit Braking Energy Recuperation*. In: *2018 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2018.
- [Goc16] GOCHERMANN, JOSEF: *Energiewende in der Industrie*. In: *Expedition Energiewende*, Seiten 115–145. Springer, 2016.
- [GVP94] GAUTIER, M., P. O. VANDANJON und C. PRESSE: *Identification of inertial and drive gain parameters of robots*. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Seiten 3764–3769, 1994.
- [Hal15] HALL, BRIAN: *Lie groups, Lie algebras, and representations: an elementary introduction*. Springer, 2015.
- [HAOR15] HEIMANN, BODO, AMOS ALBERT, TOBIAS ORTMAIER und LUTZ RISSING: *Mechatronik: Komponenten-Methoden-Beispiele*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015.

- [HD64] HARTENBERG, RICHARD SCHEUNEMANN und JACQUES DENAVIT: *Kinematic synthesis of linkages*. 1964.
- [Hei99] HEIM, ALEXANDER: *Modellierung, Simulation und optimale Bahnplanung bei Industrierobotern*. Herbert Utz Verlag, 1999.
- [HEKO14] HANSEN, CHRISTIAN, KAI EGGERS, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Task Specific Trajectory Profile Selection for Energy Efficient Servo Drive Movements*. In: *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Band 31. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2014.
- [HEKO15] HANSEN, CHRISTIAN, KAI EGGERS, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Comparative Evaluation of Energy Storage Application in Multi-Axis Servo Systems*. Proceedings of The 14th IFToMM World Congress, 2015.
- [HGGJ10] HAMON, PAULINE, MAXIME GAUTIER, PHILIPPE GARREC und ALEXANDRE JANOT: *Dynamic identification of robot with a load-dependent joint friction model*. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM)*, Seiten 129–135, 2010.
- [HH07] HUSSONG, ANDREAS und BODO HEIMANN: *Restricted minimum-effort motion planning for serial manipulators*. In: *Proceedings of 12th IFToMM World Congress*, 2007.
- [HKO13] HANSEN, CHRISTIAN, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Experimental validation of advanced minimum energy robot trajectory optimization*. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Seiten 1–8. IEEE, 2013.
- [HNJ⁺08] HAGN, ULRICH, MATHIAS NICKL, STEFAN JÖRG, GEORG PASSIG, THOMAS BAHLS, ALEXANDER NOTHHELPER, FRANZ HACKER, LUC LE-TIEN, ALIN ALBU-SCHÄFFER, RAINER KONIETSCHKE et al.: *The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications*. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(4):324–336, 2008.
- [HÖMO12] HANSEN, CHRISTIAN, JULIAN ÖLTJEN, DAVIS MEIKE und TOBIAS ORTMAIER: *Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots*. In: *Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on*, Seiten 1–7. IEEE, 2012.
- [HS84] HOLLERBACH, J. und G. SAHAR: *Wrist-partitioned inverse kinematic accelerations and manipulator dynamics*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 152–161, 1984.

- [ILZ08] IZUMI, TERUYUKI, ZUOWEI LI und HAI ZHOU: *A reduction ratio for minimizing dissipated energy in a mechatronic system with a gear train*. *Mechatronics*, 18(10):529–535, 2008.
- [Int18] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS: *Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots*. <https://ifr.org>, 2018. Abrufdatum 25.06.2018.
- [IZL09] IZUMI, TERUYUKI, HAI ZHOU und ZUOWEI LI: *Optimal design of gear ratios and offset for energy conservation of an articulated manipulator*. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 6(3):551–557, 2009.
- [Ken11] KENNEDY, JAMES: *Particle swarm optimization*. In: *Encyclopedia of machine learning*, Seiten 760–766. Springer, 2011.
- [Kim15] KIM, YONG-JAE: *Design of low inertia manipulator with high stiffness and strength using tension amplifying mechanisms*. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 5850–5856, 2015.
- [Klü12] KLÜGER, PETER: *Der Beitrag des Roboters zur effizienten Fabrik*. <http://www.computer-automation.de/feldebene/robotik/artikel/88186/>, 2012. (Abrufdatum 17.09.2017).
- [Kot13] KOTLARSKI, JENS: *Leistungssteigerung von Parallelrobotern basierend auf kinematischer Redundanz*. *Berichte aus dem imes*. PZH Verlag, 2013.
- [KP13] KAPOOR, RADHIKA und C MALLIKA PARVEEN: *Comparative study on various KERS*. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Band 3, Seiten 3–5, 2013.
- [KUK18a] KUKA ROBOTER GMBH: *Spezifikationen KR 16-2*, 2018.
- [KUK18b] KUKA ROBOTER GMBH: *Spezifikationen KR 210 Quantec Extra*, 2018.
- [LB01] LI, YAN und GARY M BONE: *Are parallel manipulators more energy efficient?* In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Seiten 41–46, 2001.
- [LE03] LUKIC, S. M. und A. EMADO: *Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps*. In: *Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference*, Seiten 543–550, 2003.
- [LSK15] LEE, GIUK, SEUNG-KI SUL und JONGWON KIM: *Energy-saving method of parallel mechanism by redundant actuation*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(4):345–351, 2015.
- [LWDC15] LUO, XING, JIHONG WANG, MARK DOONER und JONATHAN CLARKE: *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*. *Applied Energy*, 137:511–536, 2015.

- [MHY93] MA, SHUGEN, SHIGEO HIROSE und HIROSHI YOSHINADA: *Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator*. IEEE Control Systems, 13(1):30–36, 1993.
- [MPB14] MEIKE, DAVIS, MARCELLO PELLICCIARI und GIOVANNI BERSELLI: *Energy efficient use of multirobot production lines in the automotive industry: Detailed system modeling and optimization*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 11(3):798–809, 2014.
- [MSWG14] MOHAMMED, ABDULLAH, BERNARD SCHMIDT, LIHUI WANG und LIANG GAO: *Minimizing energy consumption for robot arm movement*. Procedia CIRP, 25:400–405, 2014.
- [NKO16] NÜLLE, KATHRIN, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Skript zur Vorlesung Robotik I*. Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover, 2016.
- [NW06] NOCEDAL, JORGE und STEPHEN WRIGHT: *Numerical Optimization*. Springer-Verlag, 2006.
- [PAB⁺15] PELLICCIARI, M, A AVOTINS, K BENGTSSON, G BERSELLI, N BEY, B LENNARTSON und D MEIKE: *AREUS - Innovative hardware and software for sustainable industrial robotics*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Seiten 1325–1332, 2015.
- [PBBG15] PELLICCIARI, M., G. BERSELLI, F. BALUGANI und M. GADALETA: *Increasing position accuracy and energy efficiency of servo-actuated mechanisms*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Seiten 1339–1344, 2015.
- [PBLV13] PELLICCIARI, M., G. BERSELLI, F. LEALI und A. VERGNANO: *A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots*. Mechatronics, 23(3):326 – 334, 2013.
- [PDVE⁺14] PAES, KOEN, WIM DEWULF, KAREL VANDER ELST, KAREL KELLENS und PETER SLAETS: *Energy efficient trajectories for an industrial ABB robot*. Procedia Cirp, 15:105–110, 2014.
- [Pet17] PETERSMANN, THOMAS: *Intelligente Bremsenansteuerung zur Reduktion des Energiebedarfs von Industrierobotern*. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [PT95] PIEGL, LES und WAYNE TILLER: *The NURBS Book*. Springer-Verlag, London, UK, UK, 1995.
- [PZ86] PAUL, RICHARD P. und HONG ZHANG: *Computationally Efficient Kinematics for Manipulators with Spherical Wrists Based on the Homogeneous Transformation Representation*. The International Journal of Robotics Research, 5(2):32–44, 1986.

- [RFdS15] RUIZ, ANDRÉS G, JOAO VC FONTES und MAÍRA M DA SILVA: *The influence of kinematic redundancies in the energy efficiency of planar parallel manipulators*. In: *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [RKO17] RAMIREZ, DANIEL, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Combined Structural-Dimensional Synthesis of Robot Manipulators for Minimal Energy Consumption*. In: *Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, Seiten 63–71. 2017.
- [RLH12] RACKL, W., R. LAMPARIELLO und G. HIRZINGER: *Robot excitation trajectories for dynamic parameter estimation using optimized B-splines*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2042–2047, 2012.
- [RT16] RICHIEDEI, DARIO und ALBERTO TREVISANI: *Analytical computation of the energy-efficient optimal planning in rest-to-rest motion of constant inertia systems*. *Mechatronics*, 39:147–159, 2016.
- [RWBL17] RIAZI, SARMA, OSKAR WIGSTRÖM, KRISTOFER BENGTSSON und BENGT LENNARTSON: *Energy and peak power optimization of time-bounded robot trajectories*. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(2):646–657, 2017.
- [Sai10] SAIDUR, R: *A review on electrical motors energy use and energy savings*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):877–898, 2010.
- [Spr64] SPRINGER, C.E.: *Geometry and analysis of projective spaces*. Series of books in mathematics. Freeman, 1964.
- [SSVO10] SICILIANO, BRUNO, LORENZO SCIAVICCO, LUIGI VILLANI und GIUSEPPE ORIOLO: *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [SVDS07] SWEVERS, JAN, WALTER VERDONCK und JORIS DE SCHUTTER: *Dynamic model identification for industrial robots*. *IEEE Control Systems*, 27(5):58–71, 2007.
- [Tho17] THOMSEN, JONAS: *Virtuelle Trainingswelten: Automatisierungstechnik verstehen durch Erleben in der VR*. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [URCCW09] UR-REHMAN, RAZA, STÉPHANE CARO, DAMIEN CHABLAT und PHILIPPE WENGER: *Path placement optimization of manipulators based on energy consumption: application to the orthoglide 3-axis*. *Transactions of the canadian society for mechanical engineering*, 33(3):523–541, 2009.
- [WJVS17] WITTEL, HERBERT, DIETER JANNASCH, JOACHIM VOSSIEK und CHRISTIAN SPURRA: *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Springer Vieweg, 2017.

- [WLVB13] WIGSTRÖM, OSKAR, BENGT LENNARTSON, ALBERTO VERGNANO und CLAES BREITHOLTZ: *High-level scheduling of energy optimal trajectories*. Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 10(1):57–64, 2013.
- [WRE04] WILSON, DAVID G, RUSH D ROBINETT und G RICHARD EISLER: *Discrete dynamic programming for optimized path planning of flexible robots*. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 2918–2923. IEEE, 2004.
- [YHHL16] YIN, HAIBIN, SHANSHENG HUANG, MINGCHANG HE und JUNFENG LI: *An overall structure optimization for a light-weight robotic arm*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Seiten 1765–1770, 2016.
- [YMA12] YAHYA, SAMER, MAHMOUD MOGHAVVEMI und HAIDER ABBAS F ALMURIB: *Joint torque reduction of a three dimensional redundant planar manipulator*. Sensors, 12(6):6869–6892, 2012.
- [Yok11] YOKOGAWA: *Datenblatt Leistungs-Präzisionsanalysator WT-3000*. <http://tmi.yokogawa.com/de/discontinued-products/digitale-leistungsanalysatoren/digitale-leistungsanalysatoren/wt3000-precision-power-analyzer>, 2011. (Abrufdatum 29.08.2017).
- [ZEKO17] ZIAUKAS, ZYGIMANTAS, KAI EGGERS, JENS KOTLARSKI und TOBIAS ORTMAIER: *Optimizing PTP Motions of Industrial Robots through Addition of Via-points*. In: *Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Seiten 527–538, 2017.
- [Zen16] ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E. V.: *Das Forschungsprojekt DC-Industrie*. <https://dc-industrie.zvei.org/>, 2016. (Abrufdatum 09.06.2018).

Lebenslauf

Zu meiner Person

Name, Vorname Eggers, Kai Benjamin
geboren am 11. April 1988 in Langenhagen
Familienstand ledig
Staatsangehörigkeit deutsch

Beruflicher Werdegang

seit Feb/18 Entwicklungsingenieur im Bereich Robotik bei der forward ttc GmbH
Jun/13 bis Dez/17 Ingenieur in Nebentätigkeit bei der forward ttc GmbH
Sep/12 bis Jan/18 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronische Systeme,
Leibniz Universität Hannover
Okt/11 bis Jul/12 Entwicklungsingenieur im Bereich Motion Control bei der Lenze
Automation GmbH

Studium

Okt/06 - Sep/11 Elektrotechnikstudium (Diplom) an der TU Braunschweig,
Vertiefung: Energie- und Antriebstechnik
Abschluss am 30. September 2011: Diplom (Note „gut“)
Apr/11 - Sep/11 Diplomarbeit „Parameteridentifikation einer Parallelkinematik mit Hilfe
von Beschleunigungssensoren“ (Note „sehr gut“)

Schulbildung

Aug/99 - Jun/06 Gymnasium Uetze
Abschluss am 26. Juni 2006: Abitur (Note „gut“)
Aug/97 - Jun/99 Orientierungsstufe Uetze
Aug/94 - Jun/97 Grundschule Uetze