

MAIKE KLÖCKNER

**ENTWICKLUNG EINER KINEMATIK  
FÜR DIE AUTOMATISIERTE  
BEWEGUNGSTHERAPIE VON  
NEUROLOGISCHEN PATIENTEN  
AUF BASIS EINER BEWÄHRTEN  
MANUELLEN THERAPIEMETHODE**



**Entwicklung einer Kinematik für die automatisierte Bewegungstherapie von neurologischen Patienten auf Basis einer bewährten manuellen Therapiemethode**

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieurin

der

Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von

Maike Klöckner

aus Essen

Bochum 2018

Dissertation eingereicht am: 25.04.2018

Tag der mündlichen Prüfung: 15.06.2018

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Beate Bender

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 4/2018

**Maike Klöckner**

**Entwicklung einer Kinematik für die automatisierte  
Bewegungstherapie von neurologischen Patienten auf  
Basis einer bewährten manuellen Therapiemethode**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6114-7

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*“Ich habe keine besondere Begabung,  
sondern bin nur leidenschaftlich neugierig”*

Albert Einstein



## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum. Sie enthält die Forschungsergebnisse aus dem Forschungsprojekt „individuelle rhythmische Bewegungsbahnung“ („IRBAN“). Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms KMU-innovativ: Medizintechnik vom Bundesministerium für Bildung und Forschung aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

An dieser Stelle bedarf es einer Danksagung an all die lieben Menschen, durch deren Ratschläge, Hinweise und aufmunternde Worte es mir möglich wurde diese Arbeit entstehen zu lassen. Für die auf diesem Wege erfahrene Unterstützung bin ich vor allem folgenden Personen dankbar:

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung dieser Dissertation danken. Außerdem bedanke ich mich beim gesamten Team des Lehrstuhls für Produktionssysteme für die Unterstützung bei wissenschaftlichen und nicht wissenschaftlichen Fragestellungen und das angenehme Arbeitsklima. Dabei sind insbesondere Tobias Husmann und Lars Thyssen zu nennen, die fleißig motiviert haben und trotz des Arbeitsalltages die wesentlichen Aspekte nie aus den Augen verloren haben. Weiterer Dank geht an Sophie van de Sand für die hilfreichen Korrekturen. Auch meiner studentischen Hilfskraft Michael Krampe danke ich für seine geleistete Arbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie für die bedingungslose Unterstützung, das uneingeschränkte Vertrauen und die Förderung während meines gesamten Ausbildungsweges. Der größte Dank gebührt meinem Partner, Freund und Arbeitskollegen Denis Störkle für die kontinuierliche Diskussionsbereitschaft zu fachlichen Inhalten meiner Arbeit, für das ständige und unaufhörliche Motivieren, für seine Geduld, für den zweifellosen Glauben in meine Fähigkeiten und für die große Unternehmungsbereitschaft in der Freizeit.

Bochum , im Juli 2018





## Vorveröffentlichungsverzeichnis

---

- Klo18 Klöckner, M.; Leonhardt, S.; Meisterjahn, P.; Theuerkorn, B.; Kuhlenkötter, B.: "Automated assistive therapy device for patients with neurological diseases". International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics 26.08.–29.08.2018, Twente, Niederlande. Eingereicht. Angenommen.
- Klo17 Klöckner, M.; Kuhlenkötter, B.; Meisterjahn, P.; Leonhardt, S.; Theuerkorn, S.: „Automated use of individual rhythmic movement initiation in neurological rehabilitation". Proceedings of current directions in biomedical engineering, volume 3 (2017), Issue s1 (Mar 2017), de Gruyter, DOI: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2017-1001> , März 2017, Berlin, Deutschland.
- Klo16 Klöckner, M.; Kuhlenkötter, B.: "Automated Movement Therapy for Neurological Rehabilitation". Demove Symposium 09.06.–10.06.2016, Baiona, Spanien.
- Pol16 Polunin, K.; Klöckner, M.; Kuhlenkötter, B.; Plegge, C.: „Beschreibung bestehender Sicherheitsnormen und fachspezifischer Erkenntnisse bei der Entwicklung von Exoskeletten“. Zweite transdisziplinäre Konferenz zum Thema „Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“, 2016.
- Tho14 Thomas, C.; Klöckner, M.; Kuhlenkötter, B.: „Mensch-Roboter-Kollaboration - Von der industriellen Produktion bis zum Anwendungsgebiet Rehabilitation“. Erste transdisziplinäre Konferenz zum Thema "Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen", 2014 .



## Kurzfassung

---

Im Zuge des demographischen Wandels und einer bei steigender Lebenserwartung immer älter werdenden Bevölkerung, kommt es zu einem erhöhten Bedarf an medizinischer Versorgung. Bei neurologischen Erkrankungen, wie Schlaganfall, Parkinson und Multipler Sklerose ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Die steigende Anzahl an Patienten, die mit schweren neurologischen Erkrankungen und deren Symptomen umgehen müssen, erfordert eine Zunahme an therapeutischen Ressourcen und wirksameren Therapiemethoden. Dabei ist zu beachten, dass therapeutische Übungen mit hoher Intensität und zahlreichen Wiederholungen in die Praxis umgesetzt werden müssen. Zudem kann speziell in der frühen Phase der Rehabilitation die Regenerierung des physischen Zustands eines Patienten durch systematische und kontinuierliche Therapiedurchführung und die Nutzung der neuronalen Plastizität des Gehirns stark beeinflusst werden. Um die benötigten Therapieressourcen zu erzeugen, ist es notwendig, automatisierte Hilfsmittel für die Therapie zu entwickeln, die von Ärzten, Therapeuten und Patienten gleichermaßen akzeptiert werden.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation zunächst ein Bewertungssystem entwickelt, mit dem es möglich ist, bestehende manuelle Therapiemethoden in der neurologischen Rehabilitation hinsichtlich ihres Automatisierungspotentials zu untersuchen. Durch die Nutzung des entwickelten Automatisierungspotentialbewertungssystems war es möglich eine manuelle Therapiemethode zu identifizieren, die ein hohes Umsetzungspotential aufwies. Bei der identifizierten Therapiemethode handelt es sich um die manuelle Therapiemethode IRBAN (individuelle rhythmische Bewegungsanbahnung), bei der Bewegungsmuster, die dem menschlichen Gang entsprechen, auf den liegend positionierten Patienten übertragen werden. Somit kann sich das bestehende Gangbild bzw. die Beweglichkeit des Patienten verbessern. Für die Umsetzung der IRBAN-Methode konnte im Rahmen dieser Arbeit ein automatisiertes Funktionsmuster entwickelt werden, welches auf geringem Bauraum die Bewegungssequenzen der manuellen IRBAN-Methode adaptiert und auf den Patienten überträgt. Auf Basis dessen konnte ein nutzerfreundlicher und portabler Demonstrator für den Einsatz für schwerbetroffene und immobile neurologische Patienten entwickelt werden.

Schlagwörter: Entwicklung Kinematik, Automatisierungspotentialbewertung, Rehabilitation



## Abstract

---

As part of the demographic change, life expectancy is increasing and the population is growing older. This causes a higher need for medical care. The rise of neurological diseases (e.g. stroke, Parkinson's disease, multiple sclerosis) requires a higher capacity in the area of rehabilitation. The increasing number of persons who have to cope with severe neuronal diseases and their side effects (e.g. movement restrictions up to paralysis) needs extended therapeutic resources and more effective therapy methods. The exercises need to be put into practice with high intensity and numerous repetitions. It is to note that in the early phase of rehabilitation, especially after an acute stroke, it is possible for patients to quickly and considerably improve their physical conditions. This can be reached by systematic and continuous exercising and the use of the brain's neuronal plasticity. To generate the described therapy resources, it is essential to develop automated assistive devices for therapy which are accepted by physicians, therapists and patients likewise.

This thesis has developed an evaluation system which serves to identify the automation potential of existing manual therapy methods in neurological rehabilitation. By the use of the mentioned evaluation system it has been possible to identify a manual therapeutic method which is particularly suitable for automation. The identified method is the manual therapy method IRBAN (individual movement initiation) where movement patterns which are similar to the human walking pattern are transmitted to the patient who can stay in a lying position. It is, in fact, possible for the patient to improve his movement pattern and his mobility to a great extent. In order to transfer the manual method IRBAN onto an automated therapy device, this thesis has successfully developed a functional model which adapts the movement sequences of IRBAN in an automated device. This therapeutic device needs only little design space. Having successfully developed the functional model, the thesis has been able to convincingly transfer the results into a demonstrator which is user-friendly, portable and highly suitable for hardly injured and immobile neurological patients.

Keywords: Development kinematics, automation potential evaluation, rehabilitation



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft</b>	<b>4</b>
2.1	Rehabilitationsrobotik – Daten & Fakten	4
2.1.1	<i>Rehabilitation</i>	5
2.1.2	<i>Zeitliche Entwicklung</i>	8
2.1.3	<i>Nutzen von Robotern in der Rehabilitation</i>	12
2.2	Rehabilitationsbezogene – naturwissenschaftliche Grundlagen	16
2.2.1	<i>Anatomie des menschlichen Körpers</i>	16
2.2.2	<i>Biomechanik des menschlichen Körpers</i>	20
2.2.3	<i>Grundlagen neurologischer Zusammenhänge</i>	26
2.2.4	<i>Neurologische Erkrankungsbilder</i>	28
2.2.5	<i>Therapiemöglichkeiten in der neurologischen Rehabilitation</i>	32
2.3	Fazit	37
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b>	<b>38</b>
3.1	Rehabilitationsrobotik – technische Grundlagen	38
3.1.1	<i>Anforderungen an Rehabilitationsroboter</i>	38
3.1.2	<i>Interaktionsstrategien von Mensch &amp; Medizingerät</i>	44
3.2	Rehabilitationsroboter – Markt und Entwicklungsübersicht	46
3.2.1	<i>Stand der Technik – DACH – EU – weltweit</i>	47
3.2.2	<i>Klassifizierung bestehender Rehabilitationsroboter</i>	55
3.3	Fazit	58
<b>4</b>	<b>Handlungsbedarf und Forschungsfragen</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Automatisierungspotentialanalyse manueller Therapiemethoden</b>	<b>62</b>
5.1	Analyse Automatisierungspotentialsysteme	62
5.1.1	<i>Automatisierungspotentiale in der Rehabilitation</i>	62
5.2	Entwicklung Automatisierungspotentialbewertungssystem	66
5.2.1	<i>Entwicklung Kriterien im Kontext der automatisierten Rehabilitation</i>	66
5.2.2	<i>Entwicklung Bewertungsmethodik – Theorie</i>	74
5.3	Durchführung Automatisierungspotentialbewertung	81
5.3.1	<i>Betrachtete manuelle Methoden</i>	81
5.3.2	<i>Durchführung der Bewertung</i>	83
5.3.3	<i>Analyse Ergebnisse und Auswahl umzusetzender Therapiemethode</i>	89
5.3.4	<i>Implementierung Bewertungsmethodik in Softwaretool</i>	91
5.4	Fazit	94

<b>6</b>	<b>Entwicklung Kinematik für automatisierte Bewegungstherapie.....</b>	<b>95</b>
6.1	Analysephase .....	96
6.1.1	<i>Manuelle Therapiemethode .....</i>	96
6.1.2	<i>Nachzubildende Bewegungsmuster .....</i>	98
6.1.3	<i>Definition Anforderungen.....</i>	101
6.2	Konzept- und Entwurfsphase .....	103
6.2.1	<i>Erstellung Konzept für Mechanik &amp; Auswahl Komponenten.....</i>	103
6.2.2	<i>Validierung Konzept für Mechanik durch Simulation.....</i>	107
6.2.3	<i>Modellbildung und Bahnplanung.....</i>	109
6.3	Realisierungsphase .....	117
6.3.1	<i>Aufbau Funktionsmuster .....</i>	117
6.3.2	<i>Programmierung der Bewegungsbahnen .....</i>	120
6.4	Fazit .....	125
<b>7</b>	<b>Verifizierung, Ermittlung und Umsetzung Anpassungsbedarfe .....</b>	<b>127</b>
7.1	Verifizierung Funktionsmuster und Ermittlung Anpassungsbedarfe .....	127
7.2	Umsetzung der Anpassungsbedarfe in Demonstrator .....	132
7.3	Erprobung mit Probanden .....	137
7.4	Fazit .....	140
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>142</b>
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	142
8.2	Ausblick und zukünftige Potentiale .....	143
<b>Anhang A</b>	<b>Erweiterte Übersicht Therapiemethoden &amp; Konzepte.....</b>	<b>146</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Ausprägungen von Anforderungen nach Pahl/Beitz .....</b>	<b>147</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Anforderungen nach Volere .....</b>	<b>149</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Anforderungen nach DIN 66272.....</b>	<b>150</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Marktübersicht gesamt.....</b>	<b>151</b>
<b>Anhang F</b>	<b>Herleitung Gewichtungsfaktoren .....</b>	<b>156</b>
<b>Anhang G</b>	<b>Lastenheft.....</b>	<b>164</b>
<b>Anhang H</b>	<b>Der lange Weg eines Medizinproduktes .....</b>	<b>177</b>
<b>Anhang I</b>	<b>Matlab Code – Erzeugung Gelenkwinkel Sitzplatte .....</b>	<b>178</b>
<b>Anhang J</b>	<b>Matlab Code – Berechnung Motorwinkel .....</b>	<b>179</b>
<b>Anhang K</b>	<b>Fertigungszeichnungen .....</b>	<b>186</b>
<b>Anhang L</b>	<b>3D-Plots der Bewegungssequenzen.....</b>	<b>191</b>

<b>Anhang M Automatisierte Bewegungen Sitzplatte Schleifenmodus.....</b>	<b>197</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>198</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>223</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>227</b>
<b>Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme .....</b>	<b>230</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>241</b>