

1 Einleitung

1.1 Medizinisch-Wissenschaftliche Übersicht

Die Verbesserung alltagsmotorischer Fähigkeiten nach neuronalen Schädigungen gilt als primäre Zielstellung in der Rehabilitation von Patienten mit neurologischen Störungen wie spinalen Läsionen oder Schlaganfällen. Der Wiederherstellung der Gehfähigkeit kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu, der hohe Stellenwert dieser Fähigkeit für die berufliche wie private Reintegration ist offensichtlich. Aber auch bei anderen Patientengruppen, wie den orthopädischen oder geriatrischen Patienten, die über einen längeren Zeitraum immobil waren, besitzt die intensive Mobilisation eine zentrale therapeutische wie funktionelle Bedeutung [1]. Bei erhaltenen Restfunktionen wie im Falle einer inkompletten Querschnittlähmung kann durch ein intensives Gehtraining eine entscheidende Verbesserung des Gehvermögens erreicht werden [2]. Während der letzten 15 Jahre hat sich das Laufbandtraining unter Gewichtsentlastung als eine sehr effektive Methode herausgestellt, um die therapeutisch notwendige Anzahl von Schrittwiederholungen bei annähernd normaler Gehgeschwindigkeit aufbringen zu können. Aus einem Großteil der vorliegenden Lokomotionsstudien gehen umfangreiche positive Adaptionen im Hinblick auf physiologische wie auch motorische Funktionen hervor [3, 4]. Obwohl sich die Lokomotionstherapie inzwischen zum Standard in der Rehabilitation von neurologischen Patienten entwickelt hat, sind die zugrunde liegenden nervalen und biochemischen Funktionsmechanismen noch nicht endgültig geklärt. Weitgehend wird angenommen, dass es aufgrund der lebenslang vorhandenen Neuroplastizität zu einer Reorganisation nervaler Strukturen in Gehirn und Rückenmark kommt [2, 5–8]. Insbesondere ist die Reaktivierung eines spinalen Schrittmustergenerators (Central Pattern Generator, CPG) wahrscheinlich, welcher fundamental mit der Generation zyklischer Bewegungsabläufe verbunden ist [9]. Auf der Basis umfangreicher tierexperimenteller Studien konnten die groben Funktionsmechanismen dieses neuronalen Netzwerks beschrieben werden, wobei für die Reaktivierung des CPG die repetitive Erzeugung von physiologischen afferenten Reizen eine entscheidende Rolle spielt [7, 9]. Erst vor kurzem konnte erstmalig im Tiermodell mit einem dualen Läsionsparadigma die Bedeutung des spinalen Mustergenerators für die funktionelle Erholung von inkomplett Querschnittgelähmten nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass hauptsächlich Reorganisationsvorgänge im spinalen Schrittmustergenerator, ausgelöst durch entsprechenden sensorischen Input unterhalb der Verletzungsstelle, für die Erholung und Wiederausbildung von Lokomotionsmustern verantwortlich sind, obwohl erhaltene absteigende Rückenmarksbahnen zur zielgerichteten Fortbewegung nach einer inkompletten Querschnittlähmung beitragen [10]. Um bei Patienten die Fähigkeit zur Reorganisation von neuronalen Strukturen in einen Funktionsgewinn überführen zu können, muss also eine funktionsorientierte, zielgerichtete Therapie zur Erzeugung der adäquaten sensorischen Reize durchgeführt werden. In den letzten 10 Jahren wurden mit der Einführung von motorgetriebenen Gehorthesen [11] oder spezialisierten Lokomotionstrainingsmaschinen [12] erste Schritte in Richtung einer automatisierten Durchführung des Laufbandtrainings unternommen, um Therapeuten

von den Anstrengungen der manuellen Unterstützung der Schreitbewegungen zu entlasten. Mit diesen Lokomotionsrobotern lässt sich eine höhere Trainingsintensität unter reproduzierbaren, physiologischen Bedingungen erreichen [13]. Neben ihrem therapeutischen Potential schaffen Lokomotionsmaschinen die Möglichkeit zur systematischen Variation von kinematischen und kinetischen Bewegungsgrößen, um einen detaillierteren Einblick in die grundlegende Organisation der motorischen Kontrolle des Menschen zu erhalten. So konnte unter Verwendung der aktiven Gangorthese *Lokomat*, siehe Abb. 1.3, an komplett Querschnittgelähmten gezeigt werden, dass vergleichbar zu den erwähnten tierexperimentellen Studien an Säugetieren eine physiologische Extension der Hüfte und eine schrittphasenbezogene Belastung der Fußsohle die entscheidenden Einflussgrößen für die Aktivierung des CPG auch beim Menschen sind [14]. Als klinische Konsequenz der tierexperimentellen Studien kann darüber hinaus die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass sich über jegliche Therapie, die auf die intensive Aktivierung des CPG abzielt, auch eine verbesserte funktionelle Erholung erreichen lässt [15].

1.2 Stand der außerklinischen Gerätetechnik

Aufgrund des Kostendrucks im Gesundheitswesen verkürzt sich die für die Primärrehabilitation zur Verfügung stehende Zeit stetig [16]. Ein Ende dieser Entwicklung ist bei weitem noch nicht absehbar. Während mit dem Einsatz der an das klinische Umfeld gebundenen Großgeräte (Abb. 1.1 - Abb. 1.4) die immer kürzere Zeitdauer zur Erstrehabilitation gerade noch kompensiert werden kann, ist nach dem stationären Aufenthalt eine Aufrechterhaltung der therapeutisch notwendigen Trainingsintensität zur Erhaltung oder dem Ausbau der antrainierten Fähigkeiten nur mit erheblichem Aufwand zu erreichen. Obwohl systematische Untersuchungen fehlen, kann doch aus einem Vergleich von verschiedenen klinischen Studien geschlossen werden, dass ein kontinuierliches Lokomotionstraining mit mittlerer Intensität über mehrere Monate wesentlich effektiver ist als ein Therapieprotokoll über nur wenige Wochen mit einer hohen Trainingsintensität [1, 17]. Allerdings existieren zu deren Aufrechterhaltung nur wenige Lokomotionstraininggeräte für die regelmäßige Anwendung zu Hause, obwohl deren Bedeutung für den Erhalt antrainierter Fähigkeiten bereits seit einigen Jahren bekannt ist [18]. Stand der Technik in der häuslichen Bewegungstherapie von neurologischen Patienten mit signifikanten Einschränkungen der Gehfunktion sind größtenteils Geräte, die Bewegungen der Beine ähnlich dem Rad fahren ermöglichen und die gegebenenfalls in Kombination mit der Funktionellen Elektrostimulation ein Muskeltraining vornehmen. Eine offensichtliche Einschränkung dieser Geräte besteht in der ungesicherten Bewegung der Beine und in der aufwändigen Handhabung der Funktionellen Elektrostimulation. Zudem verfolgen alle diese Geräte einen endeffektorbasierten Ansatz - d.h. die Beinbewegung wird ausschließlich durch die Führung der Füße erzeugt - mit dem unter keinen Umständen die wichtigen physiologischen Reize Hüftextension und standphasenbezogene Belastung der Fußsohle zur Anregung des spinalen Schrittmustergenerators aufgebracht werden kann. Zudem wird keine physiologische Gelenkbewegung durchgeführt, weshalb diese Ansätze nicht als funktionsorientiertes Lokomotionstraining bezeichnet werden können. Ein erster Ansatz, die funktionsorientierte Laufbandtherapie in den Heimbereich zu transferieren, ist das *LokoHome* System der Lokohelp Group ¹. Hierbei muss der Patient aber vertikalisiert werden, was ein wesentliches Sicherheitsproblem darstellen

¹<http://www.lokohelp.net>

kann. Zudem wird mit diesem System ebenfalls ein endeffektorbasierter Ansatz verfolgt, so dass eine sicher geführte Bewegung der Gliedmaßen nicht garantiert werden kann.

1.3 Therapeutische Bedeutung der poststationären Behandlung



Abb. 1.1: Aktives Stehbrett *Erigo*
(<http://www.hocoma.ch>)



Abb. 1.2: Robotergestützter Laufsimulator
HapticWalker des Fraunhofer IPK
(<http://www.hapticwalker.de>)

Im stationären Umfeld stehen mittlerweile einige technische Lösungen für eine effektive Lokomotionstherapie bei neurologischen Erkrankungen zur Verfügung. Dazu zählen vornehmlich das Laufbandtraining unter partieller Gewichtsentslastung, gegebenenfalls in Verbindung mit motorgetriebenen Unterstützungssystemen (*Lokomat*, Abb. 1.3; *Gangtrainer GT I* Abb. 1.4; *Haptic Walker*, Abb. 1.2) oder ein aktives Stehbrett (*Erigo*, Abb. 1.1) zur Frührehabilitation von Patienten mit Kreislaufinstabilitäten. Im Rahmen der Erstrehabilitation konnte in vielen Studien nachgewiesen werden, dass das Lokomotionstraining zu einer entscheidenden Verbesserung der Gehfunktion führen kann. Allerdings beschreiben einige Langzeitstudien, dass die während des Aufenthaltes in der Klinik mittels intensiver Therapie erreichten Erfolge innerhalb des ersten Jahres nach Beendigung des Trainings zum Teil wieder verloren gehen. Im Gegensatz hierzu scheint bei Fortführung einer intensiven Therapie ein weiterer Ausbau der Lokomotionsfähigkeiten zu erreichen zu sein. Als Beispiel sei der direkte Vergleich zweier Studien genannt: Über ein 8-wöchiges Lokomattraining (4x pro Woche) konnte bei chronischen motorisch inkomplett Querschnittgelähmten eine Verbesserung der Gehgeschwindigkeit und -strecke von etwa 50% erreicht werden [19], während sich ein vergleichbares Kollektiv durch ein 15-monatiges Training (3x pro Woche) über 110% hinsichtlich der Geschwindigkeit und über 300% in der Ausdauer verbesserte [17]. Im ambulanten Umfeld findet nur in den seltensten Fällen eine aufwändig durchzuführende Lokomotionstherapie statt. Im Regelfall bestehen die 3x pro



Abb. 1.3: Robotergestützte Gangorthese *Lokomat* (<http://www.hocoma.ch>)



Abb. 1.4: *Gangtrainer GT I* (<http://www.reha-stim.de>)

Woche auf 30 Minuten begrenzten Physiotherapieeinheiten aus einem passiven Durchbewegen einzelner Gelenke. Nun ist aus dem Bereich des motorischen Lernens bekannt, dass die repetitive Durchführung einer Bewegung besonders effektiv für das Wiedererlernen dieser Funktion ist, so dass beim aktuellen Stand der Technik die poststationäre Behandlung von Gehstörungen bei neurologischen Erkrankungen als unzureichend zu bezeichnen ist. Jegliche Bewegungstherapie, die einfach im häuslichen Umfeld wiederholt eingesetzt werden kann, stellt eine wesentliche Erweiterung des Behandlungsspektrums dar. Idealerweise findet bereits in der Klinik eine Einführung der Patienten in die Therapiedurchführung statt, da so die Akzeptanz für den anschließenden Transfer der Methode bzw. des Geräts in die häusliche Umgebung wesentlich erhöht werden kann.

1.4 Sozioökonomische Tragweite der außerklinischen Therapie

Lokomotionstrainingsmaschinen für den Heimbereich lassen sich für die Gehfunktionsverbesserung bei einer Vielzahl von neurologischen Patienten einsetzen. Dazu zählen Patienten mit einer inkompletten Querschnittlähmung (1.500-1.800² neue Betroffene in Deutschland pro Jahr, 50.000-60.000 Patienten gesamt) und einer zentralen Lähmung aufgrund eines Schlaganfalls. Von den ca. 165.000 Patienten, die jährlich in Deutschland einen Schlaganfall erleiden, überleben etwa 60% das erste Jahr, etwa ein Drittel davon mit einer

²Die Zahlenangaben variieren quellenabhängig stark. In den westlichen Industriestaaten kann aber von 20 bis 40 Neuerkrankungen pro 1 Million Einwohner ausgegangen werden.

Hemiplegie. Die demographische Entwicklung in Deutschland wird zu einer Zunahme der Schlaganfälle um rund 2% pro Jahr beitragen. Da es sich zunehmend um Patienten unter 65 Jahren handelt, hat die Verbesserung der Gehfunktion einen entscheidenden Einfluss auf die generelle Mobilität und unterstützt damit die berufliche wie private Wiedereingliederung und erhöht nicht zuletzt die Lebensqualität der Betroffenen beträchtlich. Aber auch bei älteren Patienten kann eine intensive Lokomotionstherapie aufgrund des nachgewiesenen therapeutischen Nutzens zu einer Reduzierung der Pflegekosten führen. Momentan besteht die einzige Möglichkeit, diesen Patienten ein effektives Bewegungstraining anzubieten, in der stationären Aufnahme und der Therapiedurchführung in der Klinik. Im häuslichen Umfeld gibt es außer der physiotherapeutischen Behandlung keine Alternativen. Neue geräteunterstützte Trainingsmethoden auf der Basis des therapeutischen Einsatzes von Spielekonsolen sind nur für Patienten mit geringen Funktionsausfällen und vollständig erhaltenen kognitiven Fähigkeiten geeignet.

1.5 Zielsetzung der Arbeit

Mit entsprechenden Großgeräten in Spezialkliniken wurden in den letzten Jahren beachtliche Erfolge im Bereich Lokomotionstraining und Mobilisierung von Patienten erzielt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass ein anhaltender Therapieerfolg nur mit kontinuierlichem Training zu erreichen ist. Mit der aktuellen, teuren Großgerätetechnik ist regelmäßiges Training über langfristige Zeiträume wirtschaftlich und logistisch aufwendig. Deshalb ist es wichtig, ein kostengünstiges Patientengerät zur Hand zu haben, das es ermöglicht, die an den Großgeräten antrainierten Fähigkeiten im häuslichen Bereich zu erhalten und weiter zu verbessern. Die derzeit existierenden Großgeräte *Lokomat* (Abb. 1.3) und *Haptic Walker* (Abb. 1.2) verfolgen die konsequente Umsetzung der manuellen Lokomotionstherapie auf dem Laufband, bei der die Patientengliedmaßen unter Gewichtsentlastung manuell durch Therapeuten geführt werden. Durch diesen Top-Down-Ansatz und den Anspruch, physiologisch exakte Gangmuster nachzustellen, sind die Geräte *Lokomat* und *Haptic Walker* sehr aufwändige und teure Großgeräte, die für die ersten Therapieschritte der Patienten unabdingbar sind. Neueste Forschungsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass abgesehen von der physiologischen Schreitbewegung die schrittphasenbezogene, zyklische Belastung bzw. Reizung der Fußsohle eines der für den Therapieerfolg entscheidenden Merkmale darstellt. Darauf aufbauend soll in dieser Arbeit ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt werden, der die Problemstellungen des regelmäßigen Trainings zu Hause löst und dadurch ein Höchstmaß an dauerhaftem Behandlungserfolg erzielt. Hieraus lässt sich unmittelbar die Zielsetzung dieser Arbeit formulieren.

Mit einer auf ein technisches Minimum reduzierten Bewegungstherapie unter Einbeziehung intensiver sensorischer Reizgebung sollen während des stationären Aufenthalts antrainierte Gehfähigkeiten von Patienten mit Hilfe eines automatisierten aktiven bzw. assistiven Bewegungstrainers für den häuslichen Bereich dauerhaft gefestigt und verbessert werden. Hierzu soll für die Bewegungstherapie im Heimbereich ein sicheres, modulares, flexibles, ergonomisches, biokompatibles und kostengünstiges Konzept erarbeitet und umgesetzt, ein Funktionsmuster und fünf Labormuster aufgebaut und dessen Anwendbarkeit im Heimbereich sowie dessen therapeutischer Nutzen in Zusammenarbeit mit der Stiftung Orthopädische Universitätsklinik Heidelberg, Forschung Abteilung II, Labor für Translational Research in SCI unter Leitung von Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Rupp evaluiert werden. Zudem soll es möglich sein, einzelne Module individuell an die Bedürfnisse des Patienten anzupassen.