Maastricht University

Robotics-assisted treadmill exercise for cardiovascular rehabilitation early after stroke

Citation for published version (APA):

Stoller, O. (2015). *Robotics-assisted treadmill exercise for cardiovascular rehabilitation early after stroke*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. https://doi.org/10.26481/dis.20150513os

Document status and date:
Published: 01/01/2015

DOI:
10.26481/dis.20150513os

Document Version:
Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

• A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
• The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
• The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

Link to publication

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the “Taverne” license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Download date: 18 Apr. 2024

Summary / Zusammenfassung

Summary

This dissertation addresses the implementation of cardiovascular exercise early after severe stroke. The aims were: (1) to review the knowledge about the effects of cardiovascular exercise early after stroke, (2) to implement a robotic-based strategy to accomplish recent standards for exercise testing and prescription for severely motor impaired stroke survivors, and (3) to systematically evaluate the concept within a clinical setting.

CHAPTER 1 provides an overview of the current knowledge on cardiovascular exercise and health, the state-of-the-art in the assessment of exercise capacity and its interpretation, the recent standards in stroke rehabilitation with a focus on cardiovascular health, and the role of rehabilitation robotics.

The human species is designed to perform prolonged physical exercise. Unsurprisingly, cardiovascular exercise might be responsible for several health-conserving factors. Evidence clearly indicates that individuals who are active tend to live longer and have lower risk for a variety of cardiovascular related diseases.

Each year about 16 million people worldwide experience a stroke. The primary rehabilitation goals are to reduce brain injury and promote maximal recovery. Once a stroke survivor is medically stable, the focus shifts to the prevention of secondary health complications, minimising impairments, and achieving functional goals that promote independence in activities of daily living. The majority of stroke survivors present with cardiovascular related health issues. This limits performance of physical activity and may contribute to a heightened risk for recurrent stroke and cardiovascular disease. Research has shown that the exercise capacity of stroke survivors is 25-60% lower than in age-matched, healthy individuals. As a consequence, the early and persistent decline in exercise capacity can delay or inhibit participation in exercise programmes, complicate the rehabilitation process and long-term post-stroke course of care, and limit the ability of the individual to perform functional activities independently.

While studies in chronic stroke (>6 month after the event) have shown efficacy for cardiovascular exercise to improve exercise capacity, the early rehabilitation period presents unique challenges due to severe motor impairments. Here, rehabilitation robotics might have large potential to implement appropriate cardiovascular stress to improve exercise capacity.

The main hypothesis driving this thesis is that the introduction of cardiovascular exercise early after stroke will positively influence cardiovascular health and exercise capacity, which might facilitate overall recovery. A potential methodology for assessment of cardiovascular fitness and exercise prescription for stroke survivors with severe motor limitations could enable further re-

search regarding the effects of early cardiovascular exercise administration on a variety of further key outcomes (i.e. neuroplasticity, quality of life).

CHAPTER 2 comprises a systematic review and meta-analysis regarding the current knowledge about the effects of cardiovascular exercise interventions early after stroke. The results indicated robust evidence that subacute stroke survivors benefit from cardiovascular exercise protocols to improve peak oxygen uptake and walking endurance. Further measures on motor recovery, functional ability and quality of life did not consistently improve, and large heterogeneity in the applied outcome measurements was found that restricted further synthesises of the results. Previously reported outcome variables in chronic stroke such as cerebral blood flow, neuroplasticity, and cognition, were not addressed in the included studies. As a result, the efficacy of cardiovascular exercise early after stroke on motor recovery, functional ability, quality of life, cerebral blood flow, neuroplasticity and cognition remains unknown.

Cardiovascular exercise training and the assessment of cardiovascular fitness using standardised cardiopulmonary exercise testing have demonstrated clinical safety. None of the reviewed studies reported major adverse events. To date, research included mildly to moderately impaired stroke survivors only. These individuals are able to perform on established methods such as semi-recumbent leg cycle ergometers, conventional leg cycle ergometers, or treadmills. The review identified a lack of evidence for the severely motor impaired stroke population due to unique challenges in motor control. Furthermore, new concepts for assessment and improvement of exercise capacity in severely disabled individuals are sought allowing to explore potential effects of early cardiovascular exercise administration.

CHAPTER 3 describes a potential approach to overcome severe motor limitations while facilitating cardiovascular stress using robotics-assisted treadmill exercise (RATE). Standardised cardiopulmonary exercise testing protocols (constant load testing, incremental exercise testing) were implemented to assess and guide exercise intensity during RATE. A first proof-of-concept study using a body weight support-based control strategy for constant load testing demonstrated the feasibility of provoking substantial cardiovascular stress; however, the step increases were not distinct enough to accurately calculate cardiopulmonary performance parameters. A further control strategy based on guidance force reduction was not appropriate to elicit peak cardiopulmonary responses for the assessment of exercise capacity during incremental exercise testing. These findings are in line with previous studies that have shown that conventional RATE is not passive, and the control of body weight support and guidance force has only a minor influence on cardiopulmonary performance parameters. The major issue of both strategies was to provide an appropriate chal-

lenge level while simultaneously supporting the severe motor impairments of the individuals. As a result, recommended intensity for assessment and improvement of exercise capacity in severely impaired individuals could not be achieved using these conventional control strategies.

CHAPTER 4 presents a novel assessment protocol that controls active participation during RATE by incorporating a biofeedback mechanism. This method allows individuals to maximise their voluntary effort and associated cardiovascular stress. The concept of feedback-controlled robotics-assisted treadmill exercise (FC-RATE) demonstrated feasibility for guidance of exercise intensity and assessment of exercise capacity in severely motor impaired individuals. Results yielded reasonable cardiopulmonary performance parameters compared to previous studies on conventional cardiopulmonary exercise testing. Individuals demonstrated high accuracy of work rate tracking, which means that subjects were able to follow the target work rate during walking on the robotics-assisted treadmill. As a result, the FC-RATE concept has been taken for further consideration as a potential method for assessment of exercise capacity and guidance of exercise intensity in severely motor impaired individuals early after stroke.

CHAPTER 5 investigates the reliability and the repeatability of FC-RATE-based cardiopulmonary exercise testing early. Peak cardiopulmonary performance parameters during incremental exercise testing were slightly higher compared to previous studies in mildly to moderately impaired stroke survivors using mostly leg-cycle ergometry. This finding might be based on the introduction of treadmill exercise that has previously confirmed higher peak values compared to leg cycle ergometry protocols. FC-RATE-based cardiopulmonary exercise testing confirmed good to excellent relative reliability and acceptable absolute reliability for the major peak cardiopulmonary performance parameters. The findings on reliability are in line with previous studies using conventional approaches. Although studies in healthy subjects and individuals with cardiac or respiratory disease have shown excellent repeatability, the present study yielded considerably higher variability for the major cardiopulmonary parameters. Cardiopulmonary exercise testing revealed high mean differences and insufficient test-retest reliability for all variables studied. Sudden onset of changes in body weight support, walking patterns, and target work rate values seem to have a strong impact on individual performance levels and provoke high variability in the measured parameters, which restricts acquisition of valid measures.

CHAPTER 6 defines a study protocol and presents the theoretical rationale for a randomised controlled pilot trial comparing FC-RATE with conventional RATE regarding cardiovascular rehabilitation. Subjects are recruited early after their first stroke ($<$20 weeks) and then randomly allocated to an inpatient cardiovascular exercise programme that uses FC-RATE (experimental)

or to conventional RATE (control). The training intensity of the experimental group is defined at 40-70% of heart rate reserve, whereas the control group receives low intensity exercise (<30% heart rate reserve). Outcome variables focus on exercise capacity and ambulatory function, and are conducted at baseline, after each 4-weeks intervention period, and before clinical discharge.

CHAPTER 7 presents the findings of the randomised controlled pilot trial described in CHAPTER 6. Results indicated that cardiovascular exercise intensity can be significantly increased using FC-RATE, but the method was not superior to conventional RATE to improve cardiovascular fitness within a 4-weeks intervention. It seems plausible that the difference in training intensity, duration, and frequency between the two groups was not high enough to express the superiority of FC-RATE over conventional RATE. The control group might have profited from regular moderate cardiovascular exercise, which has shown to be effective in deconditioned persons. We cannot distinguish the differences between spontaneous recovery and the real treatment effect due to the lack of a control group, which received usual care only. However, the spontaneous improvement in exercise capacity reported after 20 weeks post-stroke was achieved within 4-weeks of regular cardiovascular exercise in both groups. This is a promising finding regarding cardiovascular rehabilitation early after stroke.

CHAPTER 8 discusses the results, presents limitations and methodological considerations, provides recommendations for clinical practice and future research, and completes with the main original contributions of the thesis. The implementation of cardiovascular exercise early after stroke presents unique challenges. FC-RATE presents a methodology for assessment of exercise capacity and guidance of cardiovascular rehabilitation for severely motor impaired individuals. The method is able to recruit large parts of total body muscle mass, which enabled a reliable evaluation of cardiovascular fitness and a significant higher training intensity compared to conventional RATE. However, the heterogeneity of the study sample, issues based on the early rehabilitation phase after stroke, and the spontaneous recovery, affects the interpretation and the generalisation of the results. Although FC-RATE has shown to be successful in the guidance of work rate profiles, the approach was based on a position-controlled approach and did not consider the severe hemiplegia of the included subjects. Future research needs to focus on advanced robotic systems and on sophisticated algorithms to promote active participation during robotics-assisted exercise. This is expected to lead to an approximation on true maximal exercise capacity during cardiopulmonary exercise testing and to better control of cardiovascular exercise intensity.

In conclusion, we have shown that subacute stroke survivors benefit from cardiovascular exercise protocols to improve exercise capacity and proposed the implementation of RATE to overcome

severe motor limitations and facilitate task-specific training. FC-RATE-based cardiopulmonary exercise testing demonstrated clinical feasibility, good to excellent test-retest reliability, and acceptable repeatability for the major cardiopulmonary performance parameters. The method has shown to be able to significantly increase the exercise intensity compared to conventional RATE, and both approaches have led to a significant improvement in the main cardiopulmonary performance parameter within a 4-weeks intervention period. For the first time, we present a method for assessment and training of cardiovascular fitness in severely motor impaired stroke survivors. These findings are an important step towards the implementation and exploration of cardiovascular rehabilitation early after stroke.

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der Implementierung von kardiovaskulärem Training nach einem schweren Schlaganfall. Die Ziele waren: (1) die Aufarbeitung des Wissens bezüglich den Effekten von kardiovaskulärem Training in der Frühphase nach einem Schlaganfall, (2) die Implementierung einer roboterbasierten Strategie, um aktuelle Standards in der Leistungstestung und der Trainingssteuerung bei motorisch schwer betroffenen Schlaganfallpatienten zu erreichen und (3) die systematische Evaluation des Konzepts in einem klinischen Umfeld.

KAPITEL 1 liefert einen Überblick über den aktuellen Wissensstand im Bereich kardiovaskulärer Fitness und Gesundheit, über den aktuellen Stand betreffend der Evaluation der Leistungsfähigkeit und deren Interpretation, über den aktuellen Standard in der Rehabilitation nach einem Schlaganfall mit dem Fokus auf kardiovaskuläre Gesundheit und über die Rolle der Robotik in der Rehabilitation.

Der Mensch ist konzipiert für langandauernde körperliche Aktivität. Es ist somit nicht überraschend, dass kardiovaskuläres Training für mehrere gesundheitserhaltende Faktoren verantwortlich sein könnte. Es ist erwiesen, dass aktive Menschen länger leben und ein geringeres Risiko für eine Vielzahl von Herz-Kreislauf-Erkrankungen aufweisen.

Jedes Jahr erleiden weltweit etwa 16 Millionen Menschen einen Schlaganfall. Das primäre Rehabilitationsziel ist eine Verringerung der Hirnverletzung, um eine maximale Erholung zu begünstigen. Sobald ein Schlaganfallpatient medizinisch stabil ist, steht die Prävention von sekundären Komplikationen, die Minimierung von Einschränkungen, das Erreichen von funktionellen Zielen und die Unabhängigkeit in Alltagsaktivitäten im Vordergrund. Die Mehrheit der Schlaganfallpatienten weist Herz-Kreislauf-Erkrankungen auf, was die körperliche Leistungsfähigkeit limitiert und das Risiko für einen Rückfall und weitere kardiovaskuläre Erkrankungen erhöht. Die Forschung zeigt, dass die körperliche Leistungsfähigkeit von Schlaganfallpatienten 25-60% niedriger ist als bei gleichaltrigen gesunden Personen. Diese frühe und anhaltende Verminderung der Leistungskapazität kann die Teilnahme an Trainingsprogrammen verzögern oder verhindern, den Rehabilitationsprozess und die weitere Betreuung erschweren und die Fähigkeit, funktionelle Alltagsaktivitäten auszuführen, limitieren.

Während Studien in der chronischen Phase nach einem Schlaganfall (>6 Monate nach dem Ereignis) die Wirksamkeit von kardiovaskulärem Training zur Steigerung der Leistungsfähigkeit gezeigt haben, steht die Frührehabilitation nach einem Schlaganfall aufgrund der schweren motorischen Beeinträchtigungen der Patienten vor besonderen Herausforderungen. Die Rehabilitati-

onsrobotik hat hier grosses Potenzial, angepasste kardiovaskuläre Belastungen einzuführen um die körperliche Leistungsfähigkeit in der Frühphase nach einem Schlaganfall zu verbessern.

Die folgende Arbeit basiert auf der Hypothese, dass die Einführung von kardiovaskulärem Training die kardiovaskuläre Gesundheit und die körperliche Leistungsfähigkeit steigern und somit die allgemeine Erholung positiv beeinflussen könnte. Eine geeignete Methode zur Beurteilung der kardiovaskulären Fitness und zur Verabreichung von Trainingsprogrammen für Schlaganfallpatienten mit schweren motorischen Einschränkungen könnte die weitere Forschung in Bezug auf die Effekte von frühem kardiovaskulärem Training auf wichtige Messparameter (z.B. Neuroplastizität, Lebensqualität) entscheidend vorantreiben.

KAPITEL 2 umfasst eine systematische Literaturübersicht und eine Meta-Analyse der Effekte von kardiovaskulärem Training nach einem Schlaganfall. Die Ergebnisse zeigen mit robuster Beweiskraft, dass subakute Schlaganfallpatienten von Ausdauertraining profitieren und dadurch die Leistungskapazität und die Gangausdauer steigern können. Weitere Messvariablen, wie motorische Erholung, Funktionsfähigkeit und Lebensqualität, haben sich nicht konsistent verbessert. Des Weiteren hat eine hohe Heterogenität der Messmethoden weitere Synthesen der Ergebnisse verhindert. Zuvor verwendete Messvariablen bei chronischen Schlaganfallpatienten wie zerebraler Blutfluss, Neuroplastizität und Kognition wurden in den eingeschlossenen Studien nicht berücksichtigt. Somit bleibt die Wirksamkeit von Ausdauertraining in der Frühphase nach einem Schlaganfall auf die motorische Erholung, die Funktionsfähigkeit, die Lebensqualität, den zerebralen Blutfluss, die Neuroplastizität und die Kognition unbekannt.

Die klinische Sicherheit des kardiovaskulären Trainings und der kardiopulmonalen Leistungstestung konnte für die Frühphase nach einem Schlaganfall gezeigt werden. Keine der eingeschlossenen Studien musste schwerwiegende Ereignisse berichten. Bisher durchgeführte Studien haben lediglich leicht bis mässig beeinträchtigte Schlaganfallpatienten einschlossen, welche motorisch in der Lage waren, auf etablierten Geräten, wie z.B. einem Liege-Fahrrad-Ergometer oder einem konventionellen Fahrradergometer, zu treten oder auf einem Laufband zu gehen. Es mangelt an Evidenz im Bereich der schwer betroffenen Schlaganfallpatienten aufgrund von Limitierungen der motorischen Kontrolle. Neue Konzepte zur Evaluation und Verbesserung der körperlichen Leistungsfähigkeit bei motorisch schwerbehinderten Personen sind nötig, um mögliche Auswirkungen einer frühen kardiovaskulären Trainingsaufnahme zu evaluieren.

KAPITEL 3 beschreibt eine potentielle Methode, die mit Hilfe eines robotergestützten Laufbands schwere motorische Einschränkungen überwindet um gleichzeitig das Herzkreislaufsystem zu belasten. Es wurden standardisierte kardiopulmonale Leistungstestprotokolle implementiert (kon-

stante Stufentests, inkrementelle Rampentests), um die Trainingsintensität zu evaluieren und zu steuern. Eine erste Machbarkeitsstudie, welche die Reduktion der Körpergewichtsentlastung zur Implementierung von konstanten Stufentests nutzte, zeigte eine erhebliche Steigerung der Herzkreislaufbelastung. Die kardiovaskuläre Antwort auf die Erhöhungen der Stufen war jedoch nicht ausgeprägt genug, um kardiopulmonale Messparameter berechnen zu können. Eine weitere Steuerungsstrategie, welche auf der Reduktion der Führungskraft der robotergesteuerten Orthese basierte, war ebenfalls nicht geeignet, um submaximale kardiopulmonale Messparameter zur Evaluation der Leistungsfähigkeit während inkrementeller Rampentests zu provozieren. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit früheren Studien, welche bestätigt haben, dass herkömmliches robotergestütztes Laufbandtraining zwar nicht passiv ist, die Kontrolle der Körpergewichtsentlastung und der Führungskraft jedoch nur einen geringen Einfluss auf die kardiovaskulären Leistungsparameter haben. Das Hauptproblem beider Strategien war die Schwierigkeit, gleichzeitig eine geeignete motorische Herausforderung und eine optimale Unterstützung der schweren motorischen Beeinträchtigungen zu bieten. Die Resultate haben gezeigt, dass die empfohlene Intensität für die Evaluation und die Verbesserung der körperlichen Leistungsfähigkeit bei motorisch stark eingeschränkten Personen mit diesen herkömmlichen Regelungsstrategien nicht erreicht werden konnte.

KAPITEL 4 stellt ein neuartiges Evaluationsprotokoll vor, welches die aktive Teilnahme anhand eines Biofeedback-Mechanismus steuert. Diese Methode ermöglicht es, den aktiven Einsatz zu maximieren und somit die Herzkreislaufbelastung zu steigern. Feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining hat die Machbarkeit in Bezug auf die Steuerung der Trainingsintensität und der Evaluation der Leistungskapazität in einer weiteren Machbarkeitsstudie mit motorisch schwer betroffenen Schlaganfallpatienten gezeigt. Die Ergebnisse waren vergleichbar mit den Resultaten vorangegangener Studien, welche konventionelle Methoden zur kardiopulmonalen Leistungstestung in der Frühphase nach einem Schlaganfall angewendet haben. Die Probanden zeigten eine hohe Genauigkeit im Erreichen der Leistungsvorgabe. Feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining wurde somit als potentielles Verfahren zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit und Steuerung der Trainingsintensität bei schwer betroffenen Patienten akzeptiert und sollte weiter überprüft werden.

KAPITEL 5 untersucht die Reliabilität und die Wiederholbarkeit von kardiopulmonaler Leistungstestung mittels eines feedback-kontrollierten, robotergestützten Laufbandes in der Frühphase nach einem Schlaganfall. Kardiopulmonale Leistungsparameter während inkrementeller Rampentests waren etwas höher im Vergleich zu früheren Studien mit leicht bis mässig motorisch limitierten Patienten, wobei die Tests vorwiegend auf Fahrrad-Ergometern durchgeführt wurden. Diese

Resultate könnten auf der Einführung des Laufbandtrainings basieren, welches höhere Spitzenwerte im Vergleich zur Fahrrad-Ergometrie gezeigt hat. Die neue Methode erreichte eine gute bis ausgezeichnete relative Reliabilität und eine akzeptable absolute Reliabilität in den wesentlichen kardiopulmonalen Leistungsparametern. Diese Resultate bestätigen die Ergebnisse von vorhergehenden Studien, welche konventionelle Methoden zur Leistungstestung verwendeten. Obwohl Studien mit gesunden Probanden und Patienten mit Herzkreislauf- oder Atemwegserkrankungen eine sehr gute Wiederholbarkeit zeigten, fand die vorliegende Studie eine deutlich höhere Variabilität in den wichtigsten Leistungsparametern. Die konstanten Stufentests zeigten hohe Differenzen der Mittelwerte und eine unzureichende Reliabilität. Plötzliche Veränderungen der Körpergewichtsentlastung, des Gangmusters und der Leistungsvorgabe scheinen die individuelle Leistungsfähigkeit stark zu beeinflussen und eine hohe Variabilität der Messparameter zu provozieren, was zuverlässige Messungen verhindert.

KAPITEL 6 definiert ein Studienprotokoll einer randomisierten, kontrollierten Pilotstudie mit dem Ziel, feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining mit konventionellem, robotergestütztem Laufbandtraining hinsichtlich der Wirksamkeit zu prüfen. Die Patienten werden frühzeitig nach einem Schlaganfall (<20 Wochen) rekrutiert und zufällig einem stationären, feedback-kontrollierten, robotergestützten Laufbandtraining (Experimental-Gruppe) oder einem herkömmlichen, robotergestützten Laufbandtraining (Kontroll-Gruppe) zugeordnet. Die Trainingsintensität der Experimentalgruppe wird bei 40-70% der Herzfrequenzreserve festgesetzt, während die Kontrollgruppe herkömmliches, robotergestütztes Laufbandtraining mit einer niedrigen Intensität erhält (<30% Herzfrequenzreserve). Die Messvariablen konzentrieren sich auf die kardiovaskuläre Kapazität und die Gehfähigkeit und werden zu Beginn der Studie, nach jeder 4-wöchigen Interventionsperiode und vor der klinischen Entlassung aufgenommen.

KAPITEL 7 präsentiert die Ergebnisse der in KAPITEL 6 beschrieben randomisierten, kontrollierten Pilotstudie. Die Resultate zeigten, dass feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining die Trainingsintensität bei motorisch schwer beeinträchtigten Schlaganfallpatienten signifikant erhöhen kann. Die Methode war jedoch betreffend der Steigerung der kardiovaskulären Fitness nach einer 4-wöchigen Intervention nicht besser als herkömmliches, robotergestütztes Laufbandtraining. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen bezüglich Trainingsintensität, -dauer und -frequenz war vermutlich nicht hoch genug, um die Überlegenheit von feedback-kontrolliertem, robotergestütztem Laufbandtraining gegenüber herkömmlichem, robotergestütztem Laufbandtraining zu beweisen. Die Kontrollgruppe hat möglicherweise von moderatem Herzkreislauftraining profitiert, welches vor allem bei dekonditionierten Individuen zu einer Steigerung der kardiovas-

kulären Fitness führt. Es konnte aufgrund des Fehlens einer Kontrollgruppe, welche ausschliesslich eine konventionelle Therapie bekommen hat, nicht zwischen Spontanerholung und dem Behandlungseffekt unterschieden werden. Jedoch wurde die in Studien beschriebene Spontanerholung innerhalb von 20 Wochen nach einem Schlaganfall mit zusätzlichem regelmässigem kardiovaskulärem Training bereits nach 4 Wochen erreicht. Dies ist ein vielversprechendes Resultat im Bereich der kardiovaskulären Rehabilitation nach einem Schlaganfall.

KAPITEL 8 diskutiert die wichtigsten Forschungsergebnisse, präsentiert Einschränkungen und methodische Überlegungen, gibt Empfehlungen für die klinische Praxis und zukünftige Forschung und schliesst mit den wichtigsten Originalbeiträgen der vorliegenden Arbeit ab. Die Implementierung von kardiovaskulärem Training in der Frühphase nach einem Schlaganfall stellt die Rehabilitation vor einzigartige Herausforderungen. Feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining bietet eine Möglichkeit zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit und zur Einführung von kardiovaskulärer Rehabilitation bei motorisch schwer limitierten Patienten. Das Verfahren fordert grosse Anteile der Körpermuskelmasse, was zu einer zuverlässigen Bewertung der kardiovaskulären Fitness und zu einer signifikant höheren Trainingsintensität im Vergleich zu herkömmlichem, robotergestütztem Laufbandtraining führt. Jedoch wirken sich die Heterogenität der Studienpopulation, allgemeine Probleme in der frühen Rehabilitationsphase und die spontane Erholung negativ auf die Interpretation und die Verallgemeinerung der Ergebnisse aus. Obwohl feedback-kontrolliertes, robotergestütztes Laufbandtraining die Leistungsvorgabe erfolgreich umsetzen konnte, hat das positions-kontrollierte Konzept die schwere Hemiplegie der Probanden nicht berücksichtigt. Weitere Forschung muss sich auf erweiterte Robotersysteme und hoch entwickelte Algorithmen konzentrieren, um die aktive Teilnahme während robotergestützter Aktivität zu fördern. Dies würde zu einer Annäherung an die effektive maximale Leistungsfähigkeit während der kardiopulmonalen Leistungstestung und zur einer besseren Kontrolle der kardiovaskulären Trainingsintensität führen.

Zusammenfassend wird gezeigt, dass subakute Schlaganfallpatienten von kardiovaskulärem Training profitieren und so ihre körperliche Leistungsfähigkeit verbessern. Die Implementierung von robotergestütztem Laufbandtraining wird vorgeschlagen, um die schweren motorischen Einschränkungen zu überwinden und gleichzeitig ein aufgabenspezifisches Training zu fördern. Kardiopulmonale Leistungstestung mittels eines feedback-kontrollierten, robotergestützten Laufbandes zeigte klinische Machbarkeit, gute bis sehr gute Reliabilität und eine akzeptable Wiederholbarkeit, was die wichtigsten kardiopulmonalen Leistungsparameter betrifft. Die Methode ist in der Lage, die Trainingsintensität im Vergleich zu herkömmlichem, robotergestütztem Laufbandtraining deutlich

zu erhöhen. Beide Ansätze haben in einer 4-wöchigen Interventionsperiode zu einer signifikanten Verbesserung der wichtigsten kardiopulmonalen Leistungsparameter geführt. Erstmals kann eine Methode zur Beurteilung und zum Training der kardiovaskulären Fitness bei motorisch schwer betroffenen Schlaganfallpatienten vorgelegt werden. Diese Erkenntnisse sind ein wichtiger Schritt hin zur Umsetzung und Erforschung der kardiovaskulären Rehabilitation in der Frühphase nach einem Schlaganfall.