

## Abschlussbericht

### Kurzbericht

<b>Projekt:</b>	Verbundprojekt: workHEALTH Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen durch ein ganzheitliches Verständnis biomechanischer und psychosozialer Faktoren in der beruflichen und klinischen Praxis
<b>Einrichtung</b>	Universitätsklinikum Aachen
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Universitätsklinikum Aachen Klinik für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie Pauwelsstraße 30 52074 Aachen
<b>Förderkennzeichen:</b>	01EC1905A
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.08.2020 bis 31.12.2023

## Teil I: Kurzbericht

Das Projekt untersuchte umfassend die Auswirkungen arbeitsbedingter Belastungen auf das muskuloskelettale System mit dem Ziel, arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) zu verhindern und zu behandeln. Dabei lag der Fokus auf der Erfassung und Bewertung spezifischer Belastungssituationen am Arbeitsplatz sowie auf der Evaluierung der Wirksamkeit ergonomischer Maßnahmen. Belastungen, die bei verschiedenen Arbeitsaufgaben auftreten, wurden quantifiziert und deren Auswirkungen auf das muskuloskelettale System detailliert analysiert. Diese Analysen wurden vom Universitätsklinikum Aachen (UKA) hinsichtlich medizinischer Pathologien vertieft.

Ein zentrales Werkzeug für diese Analysen waren Finite-Elemente (FE)-Simulationen, die am RWTH Institut für Allgemeine Mechanik (IAM) durchgeführt wurden, zusätzlich wurden dort Kadaverstudie in-vitro-Experimente durchgeführt. Die Simulationen ermöglichten es, Anpassungen von Bewegungsabläufen zu bewerten. Parallel dazu wurden Mehrkörpersimulationen am UKA durchgeführt, welche auf Basis der in-vivo Experimente des RWTH Institut für Arbeitswissenschaften (IAW) durchgeführt wurden. Diese Ansätze wurden kombiniert, um die Belastungen im Arbeitsumfeld möglichst präzise auf verschiedenen Ebenen zu bewerten. Die Daten aus den in-vitro und in-vivo Experimenten dienten als Grundlage, um die FE-Simulationen realitätsnah zu gestalten. Ein besonderer Fokus lag auf der Lendenwirbelsäule, da in diesem Bereich eine hohe Prävalenz für arbeitsbedingte MSE besteht.

Es wurde untersucht, ob und wie die aktuellen Belastungen die Prävalenz von muskuloskelettalen Erkrankungen begünstigen und wie viele Wiederholungen von Bewegungen zu degenerativen Veränderungen oder Strukturausfällen führen könnten. Zudem wurden Arbeitsplatz- und Bewegungsmusteranpassungen analysiert, um festzustellen, welche signifikanten Veränderungen in den in-vitro Experimenten und FE-Simulationen zu beobachten waren.

Ein innovativer Multimethodenansatz, siehe Abbildung 1, der experimentelle Untersuchungen sowohl in-vivo als auch in-vitro mit Simulationen kombinierte, lieferte umfassende Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen arbeitsbedingten Belastungen und der resultierenden Beanspruchung des Körpers. In-vivo Studien am IAW und in-vitro Kadaverstudien am IAM generierten grundlegende Daten, die direkt in die FE-Simulationen einfließen. Dies ermöglichte eine detaillierte Bewertung der ergonomischen Maßnahmen und deren Wirksamkeit.

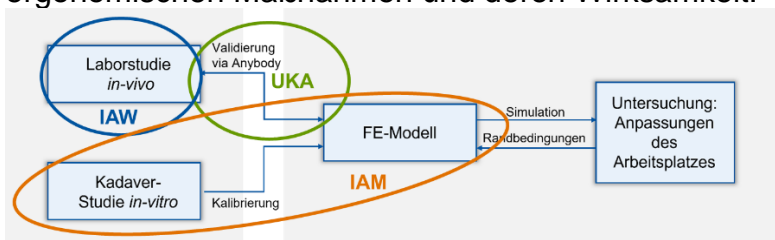


Abbildung 1 Multimethodenansatz mit Darstellung der Verbundpartner

Die Schädigungsmechanismen durch Belastungen können in Gelenken zu degenerativen Prozessen führen, was sich insbesondere als Osteoarthritis bemerkbar macht – eine der Hauptursachen für arbeitsbedingte MSE. Um diese Pathologie sowohl

makroskopisch als auch mikroskopisch zu untersuchen, wurde eine weitere Probandenstudie am UKA durchgeführt. Die erfassten Bewegungen wurden anschließend durch inverse-dynamische Simulationen analysiert, wodurch die entstehenden Gelenkkräfte bei arbeitsbedingten Belastungen ermittelt wurden. Diese Belastungszustände wurden für zellbasierte Untersuchungen mit Bioreaktoren genutzt. Dadurch konnten umfassende Erkenntnisse über die komplexen Wechselbeziehungen zwischen anatomischen und funktionellen Faktoren der Gelenkbiomechanik und der Entstehung pathologischer Strukturen gewonnen werden. Diese Untersuchungen lieferten wichtige Informationen über die Mechanismen, die zur Entstehung und Fortschreiten von Osteoarthritis beitragen, und halfen, präventive und therapeutische Maßnahmen besser zu gestalten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts war die Untersuchung von Motion Capture Systemen zur evidenzbasierten Unterstützung bei der Prävention und Behandlung von MSE. Diese Systeme ermöglichen eine kontinuierliche Berechnung der Belastungszustände im menschlichen Körper und bieten Echtzeit-Feedback zur Optimierung von Bewegungsabläufen. Es wurde untersucht, ob ergonomische Bewegungen, wie beispielsweise rückengerechte Hebetchniken, durch ein einfach zu bedienendes Bewegungserfassungssystem nachhaltig erlernt werden können. Zudem wurde der potenzielle Mehrwert solcher Systeme in der klinischen Praxis geprüft, insbesondere wie sie Ärzte und Therapeuten bei der Behandlung von Patienten unterstützen können.

Ein besonderer Fokus lag darauf, wie Echtzeit-Feedback-Systeme gestaltet werden können, um effektiv und effizient zur Prävention und Behandlung von MSE eingesetzt zu werden. Hierbei wurden die spezifischen Anforderungen von Ärzten und Therapeuten berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die belastungsrelevanten Daten zur Unterstützung der Behandlung geeignet sind. Dies umfasste auch die Untersuchung der Notwendigkeit einer Zertifizierung dieser Systeme als Medizinprodukte, je nach Anwendungsfall.

Insgesamt zielte das Projekt darauf ab, durch die Kombination verschiedener Methoden und Ansätze die Arbeitsbedingungen zu verbessern. Die enge Zusammenarbeit der Teilprojekte ermöglichte eine präzise Erfassung arbeitsbedingter Belastungen und die Entwicklung effektiver ergonomischer Maßnahmen zur Prävention und Behandlung von Muskel-Skelett-Erkrankungen. Diese integrative Herangehensweise stellt sicher, dass die entwickelten Maßnahmen nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch praktisch umsetzbar und wirksam sind.

Zusammengefasst kann man sagen, dass das Projekt einen umfassenden und interdisziplinären Ansatz verfolgte, um die gesundheitlichen Auswirkungen von arbeitsbedingten Belastungen zu verstehen und zu minimieren. Durch die Kombination von experimentellen Studien, Simulationen und praktischen Anwendungen wurden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die nicht nur zur Prävention von MSE beitragen, sondern auch zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen insgesamt. Die Ergebnisse dieses Projekts bieten eine solide Grundlage für die Entwicklung neuer ergonomischer Maßnahmen und Technologien, die langfristig die Gesundheit und das Wohlbefinden von Arbeitnehmern verbessern können.

## Abschlussbericht

### Eingehende Darstellung

<b>Projekt:</b>	Verbundprojekt: workHEALTH  Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen durch ein ganzheitliches Verständnis biomechanischer und psychosozialer Faktoren in der beruflichen und klinischen Praxis
<b>Einrichtung</b>	Universitätsklinikum Aachen
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Universitätsklinikum Aachen Klinik für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie Pauwelsstraße 30 52074 Aachen
<b>Förderkennzeichen:</b>	01EC1905A
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.08.2020 bis 31.12.2023

## Teil I: Eingehende Darstellung und Beteiligung am Teilprojekt I

In der Projektlaufzeit wurde durch eine umfassende Literaturübersicht ein deutlicher Zusammenhang zwischen berufsbedingten muskuloskelettalen Erkrankungen (MSE) im unteren Rückenbereich und Tätigkeiten der manuellen Lastenhandhabung aufgezeigt. Verschiedene Metaanalysen der letzten drei Jahrzehnte belegen eindeutig, dass das Auftreten von MSE stark mit physischen Risikofaktoren am Arbeitsplatz zusammenhängt, wie z.B. der Handhabung schwerer Lasten oder ungünstiger Körperhaltungen. Ein besonders relevanter Fall von Belastung, der durch diese spezifischen Risikofaktoren gekennzeichnet ist, betrifft die Flexion des Oberkörpers in Verbindung mit der manuellen Handhabung externer Lasten. Aus diesem Grund wurden manuelle Lastenhandhabungen als signifikante arbeitsbedingte Belastungen identifiziert, die das Auftreten von MSE begünstigen können, und sie wurden in den Fokus der Untersuchung auf arbeitsplatzrelevante Belastungsprofile gesetzt. Dies führte zur Formulierung der folgenden Forschungsfragen:

1. Begünstigen die momentanen Belastungen die Prävalenz muskuloskelettaler Erkrankungen? Wie viele Wiederholungen führen zu degenerativen Veränderungen bzw. Versagen von Strukturen?
2. Welche Anpassungen des Arbeitsplatzes bzw. der Bewegungsmuster führen zu signifikanten Veränderungen innerhalb von in-vitro Experimenten, Mehrkörpersimulationen und FE-Simulationen?

Entsprechend Forschungsfrage 1 wurde das übergeordnete Ziel verfolgt, dynamische physische Belastungen in Form einer Belastungshistorie objektiv zu bewerten. Dies sollte es ermöglichen, im Kontext von Forschungsfrage 2 folgende Fragen zu beantworten: (1) Welche Rolle spielen die bestehenden Arbeitsbedingungen bei der Entstehung von muskuloskelettalen Erkrankungen (MSE)? (2) Welche präventiven Maßnahmen im Bereich des Arbeitsschutzes führen zu einer signifikanten Verbesserung der Arbeitsbedingungen? Da sich der Bereich der Lendenwirbelsäule durch eine vergleichsweise deutlich höhere Prävalenz arbeitsbedingter Muskel-Skelett-Erkrankungen auszeichnet, lag hier der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten.

Das entwickelte Modell basierte auf umfassenden in-vitro- und in-vivo-Studien. Die Versuchsdesigns waren darauf ausgelegt, eine hohe Vergleichbarkeit der Belastungszustände zu gewährleisten und deren Auswirkungen sowohl in-vitro als auch in-vivo zu untersuchen. Diese Studien ermöglichten die Erfassung von Belastungsindikatoren am lebenden Menschen sowie die Berechnung biomechanischer Belastungsdaten, welche zur weiteren Validierung eines Finite-Elemente (FE)-Modells herangezogen wurden. Im Rahmen der in-vivo Studie sollte die Frage beantwortet werden, welche Belastungen in den späteren in-vitro Kadaversuchen aufgebracht werden sollten. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des in-vivo Versuches die Bewegungen mit Hilfe eines IMU-Systems aufgezeichnet. Dieses System basiert auf 17 Inertialsensoren und erlaubt es die Bewegungen digital zu erfassen, siehe hierfür Abbildung 1(links). Im folgenden wurden die kinematischen Daten genutzt, so dass diese im Rahmen einer Mehrkörpersimulation, siehe Abbildung 1(rechts), als Eingangsgrößen zur Berechnung der Gelenkreaktionskräfte dienen. Hierfür wurde ein invers-dynamischer Ansatz gewählt. Der invers-dynamische Ansatz in der Mehrkörpersimulation (MKS) stellt eine fundamentale Methode dar, um die Bewegungen und die innere Kräfteverteilung komplexer mechanischer Systeme zu analysieren. Dieser Ansatz wird angewendet, indem zunächst die externen Kräfte und Momente bekannt gegeben werden, die auf die Körper des Systems wirken. Diese können durch direkte Messungen oder Annahmen basierend auf physikalischen Lastannahmen ermittelt werden. Das Ziel besteht darin, durch eine Rückwärtsberechnung die internen Kräfte und Momente zu bestimmen, die notwendig sind, um die beobachteten Bewegungen, wie Beschleunigungen und Geschwindigkeiten, zu erklären. Der Ablauf der Berechnung beginnt mit der Aufzeichnung der Bewegungszustände der einzelnen Körper innerhalb des Systems. Anschließend werden die Bewegungsgleichungen des Systems unter Berücksichtigung der Massenverteilung, Trägheitsmomente der Körper, Steifigkeiten der Verbindungen sowie der bekannten externen Kräfte gelöst. Dies ermöglicht die präzise Bestimmung der internen Kräfte in den Gelenken und Strukturen des Systems. Der Fokus lag auf der Belastungsermittlung der Bandscheibenkräfte, welche in der Lendenwirbelsäule auftreten.

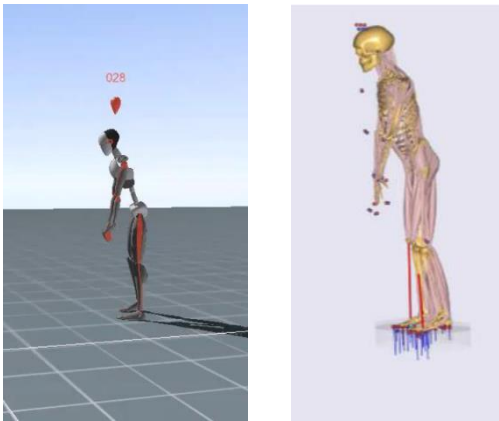


Abbildung 1 Links: Darstellung der Digitalen Zwillinge zur Erfassung der Bewegung  
Rechts: Darstellung des Mehrkörpersimulationsmodells zur Rückrechnung der Gelenkreaktionskräfte

Im Rahmen von diesem Teilprojekt, wurde deshalb eine multidisziplinäre Methodik von genutzt, an dieser Stelle, sei auf die Arbeiten des Instituts für Allgemeine Mechanik (IAM) und dem Institut für Arbeitswissenschaften (IAW) verwiesen. Der prinzipielle Ansatz zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen lässt sich in Abbildung 2 erkennen.

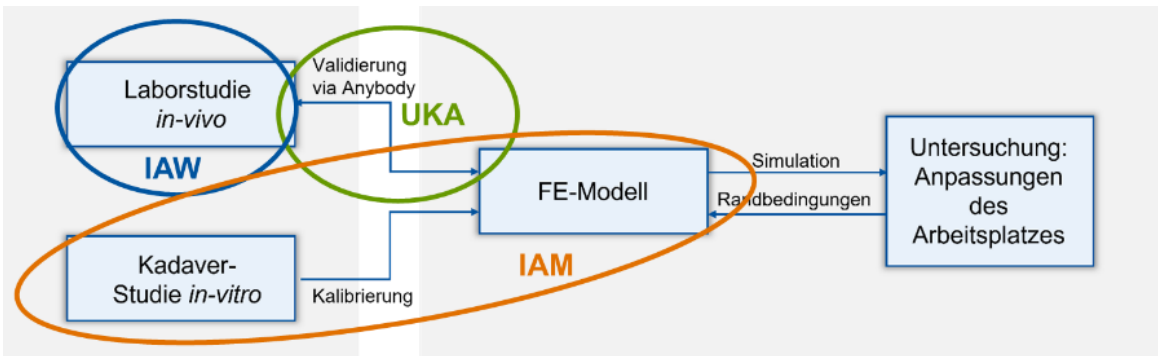


Abbildung 2 multidisziplinäre Methodik mit Darstellung der Verbundpartner

In einem ersten Schritt wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt: eine Laborstudie in-vivo (IAW) sowie eine Kadaverstudie in-vitro (IAM). Hierdurch wurden Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen arbeitsbedingter Belastung und resultierender Beanspruchung generiert. Direkt darauf aufbauend kann die Si-

mulation mittels FE-Modell stattfinden. Schließlich kann die Wirkung und Effektivität von ergonomischen Verbesserungsmaßnahmen zur Optimierung des Arbeitsalltags durch Miteinbeziehen der Belastungshistorie stattfinden.

## **I.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Fördermittel des TP 1 sind hauptsächlich für wissenschaftliches Personal für die Anpassungen des experimentellen Prüfstands sowie die Konzeption, Durchführung und Auswertung der in-vitro und in-vivo Studien. Darüber hinaus wurden für die Bewegungserfassungssoftware und Mehrkörpersimulationen Lizenzkosten entrichtet.

## **I.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit**

Obwohl das Wissen über Ergonomie und die Bemühungen der Öffentlichkeit immer mehr zunehmen, bleibt die Zahl der von arbeitsbedingten MSE betroffenen Personen seit 2008 auf einem ähnlichen Niveau. Der interdisziplinäre Ansatz des Forschungsverbunds workHEALTH, die Zusammenführung des kollektiven Ansatzes des Arbeitsschutzes mit dem individuellen Ansatz der Medizin, ist dabei wegweisend, um die Koordination zwischen den Disziplinen verbessern und eine bessere Prävention, Arbeitsplatzgestaltung, Diagnose, Behandlung und Wiedereingliederung ermöglichen. Die in TP 1 geleistete Projektarbeit der Partner Institut für Allgemeine Mechanik IAM der RWTH, Institut für Arbeitswissenschaft IAW der RWTH und Klinik für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des UK Aachen trägt dazu erheblich bei: Es wurde bereits gezeigt, dass die externe Belastung eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Rückenproblemen spielt. Durch die Interaktion von in-vivo, in-vitro und in-silico Untersuchungen konnte bereits ein besseres Verständnis von Erkrankungen des Bewegungsapparates erzielt werden. Allerdings ist in diesem Bereich, insbesondere im Hinblick auf Arbeitstätigkeiten weitere Forschung notwendig. Aus diesem Grund ist das Ziel unseres Forschungsvorhabens den Effekt von verschiedenen Belastungsparametern auf die Entwicklung von muskuloskelettalen Erkrankungen zu untersuchen. Dazu werden in diesem Teilprojekt in-vitro und in-vivo Experimente, Finite-Elemente-Simulationen und Mehrkörpersimulationen eingesetzt. Darüber hinaus werden Erkenntnisse aus

anderen Teilprojekten, insbesondere TP 2 genutzt, um weitere Informationen für die Simulationen und Experimente zu erhalten.

#### **I.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Das Projekt workHEALTH zielt auf die interdisziplinäre Untersuchung von Querschnittsthemen zur Ätiologie und Entwicklung arbeitsbedingter muskuloskelettaler Erkrankungen (MSE) ab, mit dem übergeordneten Ziel, Prävention und Behandlung dieser Erkrankungen zu verbessern. Um die Prävalenz arbeitsbedingter MSE zu reduzieren und sowohl wirtschaftliche Verluste als auch gesundheitliche Einschränkungen zu minimieren, ist eine umfassende Kenntnis über den individuellen Belastungszustand unerlässlich. Gelenk- oder Bandscheibenbelastungen sind jedoch weder für die betroffenen Patienten oder Arbeitspersonen direkt wahrnehmbar noch für Fachpersonal äußerlich erkennbar.

Im Rahmen von Teilprojekt 1 (TP 1) wurde daher der Einfluss verschiedener Belastungsparameter, wie beispielsweise die Wechselwirkung zwischen Belastungsintensität und Belastungsdauer, untersucht. Zudem wurde analysiert, wie diese Belastungsparameter die Entwicklung muskuloskelettaler Erkrankungen beeinflussen. Diese Untersuchungen in TP 1 tragen perspektivisch zur ergonomiegerechten Gestaltung von Arbeitsplätzen in der betrieblichen Praxis bei. Dadurch können sowohl die Effektivität möglicher arbeitsorganisatorischer Verbesserungsmaßnahmen als auch die Verteilung von Arbeitstätigkeiten zur kollektiven, belastungsoptimalen Gestaltung evidenzbasiert bewertet werden.

#### **I.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Der Fortschritt insbesondere anderer Forschungseinrichtungen im Bereich der in-vivo, in-vitro und in-silico Untersuchungen von Erkrankungen des Bewegungsapparates wurde verfolgt und bei der Bearbeitung des TP 1 berücksichtigt. In den Veröffentlichungen sind die kontinuierlichen Fortschritte auf dem Forschungsgebiet entsprechend dokumentiert.

## **I.6 Veröffentlichungen im Rahmen des TP I**

Praster M., Ditsche J., Hildebrand F., Ignasiak D. Biomechanical simulation of the upper body in different sitting positions (2023); 4th International Workshop on Spine Loading and Deformation, Berlin

Brenzel, K.; Johnen, L.; Praster, M.; Blomeyer, N.; Weiler, A.; Brandl, C.; Topol, H.; Stoffel, M.; Markert, B. (2023b): In vitro study design derived from an in vivo lifting task. In: Proc Appl Math and Mech 23 (4). DOI: 10.1002/pamm.202300208.

Brenzel, K.; Blomeyer, N.; Johnen, L.; Praster, M.; Röhrig, M.; Topol, H.; Brandl, C.; Markert, B.; Stoffel, M. (2023a): Extension of an In Vitro Spine Test Rig to Track Load-dependent Biomechanics of the Lumbar Spine under Physiological Conditions. In: Proc Appl Math and Mech 23 (1). DOI: 10.1002/pamm.202200078.

## **Teil II: Eingehende Darstellung und Beteiligung am Teilprojekt II**

In Teilprojekt 2 wird Osteoarthritis als Ursache für arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) sowohl auf makroskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene untersucht. Informationen für alle relevanten Ebenen werden mittels Bewegungsanalyse, biomechanischer Modellierung und Simulation sowie zellbasierten Untersuchungen mit Bioreaktoren zusammengeführt. So können wichtige Erkenntnisse über die komplexen Wechselbeziehungen anatomischer und funktioneller Faktoren der Gelenkbiomechanik und der Entstehung pathologischer Strukturen gewonnen werden.

Im Einzelnen werden die folgenden Forschungsfragen behandelt:

1. Welche Kräfte und Momente wirken bei unterschiedlichen Bewegungen auf das Gelenk? Wie können diese Informationen auf biomechanische Modellierungs- und Simulationsansätze übertragen werden?
2. Führt eine genaue Modellierung der Gelenkbewegung zur Reproduktion der komplexen Kombination von Gelenkbeugung/-streckung, Abduktion/Adduktion und Rotation im realen Gelenk? Welche therapeutischen/präventiven/rehabilitativen Ergebnisse können erzielt werden?
3. Welche Kräfte und Momente sind für die Untersuchung von zellbasierten Experimenten relevant? Wie können diese Informationen auf einen experimentellen Zellenversuchsaufbau übertragen werden?

In enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt 1 werden Mehrkörpersimulations-Modelle erstellt und weiterentwickelt, die durch Vergleiche zu FE-Simulationen, in-vitro und in-vivo Daten validiert werden. Um komplexe, physiologische Bewegungsmuster darstellen zu können, werden Daten aus mit Inertialsensoren aufgenommene Bewegungen verwendet. Die Analyse des Bewegungsverhaltens der Gelenke unter arbeitsspezifischer Belastungen und der Einfluss durch kinematische, kinetische und umgebungsbezogene (Temperatur, Interaktion mit Umgebung) Faktoren wird durch Mehrkörpersimulationen realisiert. Gelenkspezifische, anatomisch detaillierte FE-Simulationen werden basierend auf den daraus akquirierten Ergebnissen durchgeführt, um möglichst realitätsnahe Randbedingungen

für die Zellversuche zu bestimmen. Multiaxiale, im Gelenk auftretende Belastungszustände werden in einem dafür neu konzipierten Bio-Reaktor auf zelluläre Strukturen übertragen und die Materialantwort auf mikroskopischer Ebene untersucht. Hierfür werden bereits zwei etablierte, uniaxiale Bioreaktoren der Projektpartner (UKA und IAM) so weiterentwickelt. Der Fokus des UKAs liegt dabei auf der Entwicklung eines kombinierten Druck-Scher-Bioreaktors für das Verhalten von Wirbelkörpern. Um möglichst genaue Lastszenarien für die Gelenke zu definieren wurde deshalb zunächst eine Probandenstudie durchgeführt.

In dieser wissenschaftlichen Studie wurde die maximale subjektive Tragfähigkeit von Probanden beim Treppensteigen unter variierenden Gewichtsbelastungen untersucht. Jeder Teilnehmer wurde zu Beginn mittels eines psychophysikalischen Ansatzes individuell eingestuft, indem er eine Getränkekiste trug, deren Gewicht nach Bedarf angepasst wurde. Nachdem die Probanden drei Durchläufe einer siebenstufigen Treppe absolviert hatten, wurde das Gewicht schrittweise angepasst, bis sie das Maximum erreichten, das sie für zwölf aufeinanderfolgende Durchgänge als tragbar empfanden.

Die Studie umfasste insgesamt vier Durchgänge: einen Leerzustand als Kontrolle, Belastungen mit 50% und 100% des ermittelten maximal tragbaren Gewichts sowie einen weiteren Leerzustand zur Erholung. Zwischen den Durchgängen waren ausreichend lange Pausen vorgesehen, beginnend mit einer Pause von 4 Minuten nach dem ersten Durchgang und 8-12 Minuten nach den nachfolgenden Durchgängen, wobei eine Verlängerung der Pausen möglich war.

Jeder Durchgang dauerte etwa 4 Minuten, was zu einer Gesamtversuchszeit von ungefähr 40 Minuten inklusive Pausen führte. Während der gesamten Messung war geschultes Personal anwesend, das die Probanden anleitete und für Fragen zur Verfügung stand, um die korrekte Durchführung der Studie sicherzustellen.

Das Hauptziel dieser Studie war es, die individuelle Belastungsgrenze beim Treppensteigen unter verschiedenen Lastbedingungen zu bestimmen und potenzielle Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Teilnehmer zu erforschen. Die Ergebnisse lieferten wichtige Einsichten darüber, wie unterschiedliche Gewichtsbelas-

tungen das subjektive Empfinden der Belastung und die Leistungsfähigkeit bei alltäglichen Aktivitäten beeinflussen könnten, die ähnliche Anforderungen stellen. Gemäß der Erläuterungen im ersten Teilvorhaben wurden nun die Bewegungsdaten genutzt um damit auf die Gelenkreaktionskräfte zurückzuschließen.

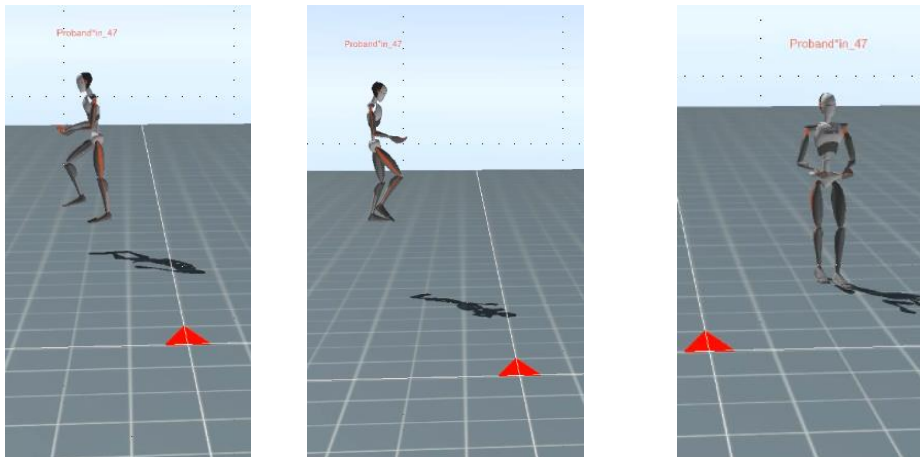


Abbildung 3 Virtuelle Darstellung der durchgeführten Bewegungen

Dies wurde durch einen invers-dynamischen Ansatz mit Hilfe einer Mehrkörpersimulation durchgeführt, siehe Abschnitt I. Exemplarisch seien die Ergebnisse für die Druckkraft zwischen L5 und dem Sakrum dargestellt.

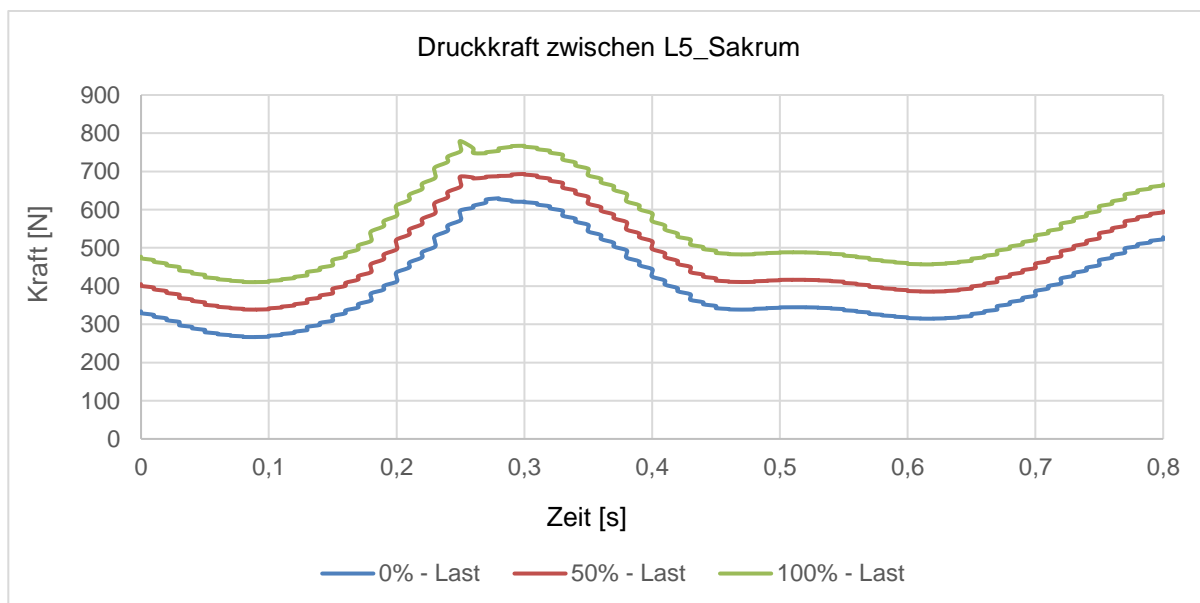


Abbildung 4 Darstellung der Druckkraft beim Aufstieg bei einer Treppenstufe

Die Ergebnisse der Simulationen lieferten nun die Kraftwerte für den Bioreaktor, auf den im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

Im Projekt wurde erfolgreich das Design für den neuen Bioreaktor fertiggestellt und dieser zusammengebaut. Die uniaxiale wurde auf eine biaxiale Steuerung erweitert und implementiert. Dies wurde mithilfe einer Kopplung von Arduino, Raspberry Pi und Schrittmotoren umgesetzt. Der Bioreaktor der Uniklinik besitzt dabei die folgenden möglichst in-vivo vorhandenen Randbedingungen. Der Kompressions-Bioreaktor kann als kompaktes System in einem Inkubator (Heracell™ 150i) verwendet werden wo eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 70% und 93% und eine Umgebungstemperatur zwischen 30°C und 50°C einstellbar sind. Zusätzlich ist eine Betriebsdauer bis zu 14 Tage möglich.



*Abbildung 5 Links: Darstellung des Bioreaktors und der dazugehörigen Regelung bzw. Steuerung  
Rechts: Einbringung des Bioreaktors in den Inkubator*

Die Abmessungen der Proben (Scaffolds) wurde zunächst auf folgende Werte festgelegt:

Dicke der Scaffolds:  $t=5$  mm

Durchmesser der Scaffolds:  $d=6$  mm

Eine nachträgliche Anpassung der Probengeometrie ist möglich, dennoch sollten obige Werte als Anhaltswert dienen. Die Außenabmessungen der Well-Plates betragen, unabhängig von der Wellanzahl, nach ANSI-Standard:  $127,76 \times 85,48 \times 14,35$  mm, siehe Abbildung 6. Zur Kultivierung der Proben sollen 24er Well-Plates verwendet werden.

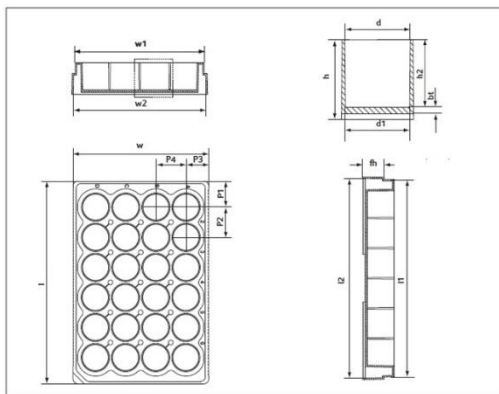


Plate dimensions [mm]							
Length		Width				Height	
I	I1	I2	w	w1	w2	h	fh
127.8	124.4	125.3	85.5	81.0	81.9	20.0	13.3
Well dimensions [mm]							
Diameter		Thickness	Depth	Positions of well center [mm]			
d	d1	bt	h2	P1	P2	P3	P4
16.5	16.2	1.4	17.0	16.4	19.0	14.2	19.0

Abbildung 6 Schematische Darstellung einer 24er Well-Plate

Der Bioreaktor wurde erfolgreich entwickelt und ist nun in der Lage, 24 Proben (Scaffolds), die sich auf dem Boden eines jeden Nöpfchens (Well) einer Well-Plate befinden, simultan und mit gleichem Druck- und Schubbetrag zu belasten. Die Proben können dabei entweder statisch oder dynamisch-schwellend belastet werden. Um ein Abheben oder eine Verschiebung der Proben in den Nöpfchen der Well-Plate zu verhindern, wird eine vertikale „Tara-Dehnung“ von 1 bis 4 % auf die Proben appliziert. Die Dehnungsamplitude pro Probe beträgt unter statischer bzw. dynamischer Belastung 10 bis 20 %, entsprechend einem Hub von 0,5 bis 1 mm bei einer Probenhöhe von 5 mm. Um bei der Versuchsdurchführung und bei der Probengeometrie Flexibilität zu gewährleisten, ist der Hub idealerweise zwischen 0,5 mm und 2 mm einstellbar. Die Frequenz der dynamischen Belastung kann im Bereich von 0,1 bis 1 Hz variieren.

Damit lassen sich nun folgende Experimente durchführen:

#### Systematische Untersuchung von Zellreaktionen:

- Der Bioreaktor ermöglicht die systematische Untersuchung der Zellreaktionen unter kontrollierten mechanischen Belastungsbedingungen, sowohl statisch als auch dynamisch-schwellend.

- Dies kann zu neuen Erkenntnissen über die Mechanobiologie und die Anpassungsmechanismen von Zellen an mechanische Stimuli führen.

#### Optimierung von Scaffold-Designs:

- Mit der Möglichkeit, die Belastungsparameter präzise einzustellen, können unterschiedliche Scaffold-Designs unter variierenden mechanischen Bedingungen getestet und optimiert werden.
- Dies könnte die Entwicklung von Scaffolds fördern, die optimale mechanische Eigenschaften für Gewebeengineering-Anwendungen aufweisen.

#### Evaluierung von Materialeigenschaften:

- Die einstellbaren Belastungsamplituden und -frequenzen erlauben die Evaluierung der Materialeigenschaften und der mechanischen Integrität von Scaffolds über einen breiten Bereich von Belastungsbedingungen.
- Dies ist besonders wichtig für die Entwicklung von langlebigen und belastbaren Biomaterialien.

#### Langzeitstudien:

- Der Bioreaktor ermöglicht Langzeitstudien, bei denen die Auswirkungen von mechanischen Belastungen über längere Zeiträume untersucht werden können.
- Dies ist entscheidend für das Verständnis der langfristigen mechanischen Belastbarkeit und Funktionalität von Scaffolds und Geweben.

Für die geplanten Versuche auf zellulärer Ebene wurden materialtechnische Vorversuche an unterschiedlichen Hydrogelzusammensetzungen durchgeführt. Die Ergebnisse der dynamischen Belastung wurden mit einer unbelasteten Kontrollprobe verglichen. Der Zellmigrationseffekt wurde für verschiedene Kollagenkonzentrationen bestimmt, wodurch die Beziehung zwischen dem Kollagengehalt und der Zellaktivität beobachtet werden konnte. Die vorliegenden Ergebnisse wurden mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. So konnte ein vielversprechendes Konzept für die Umsetzung multiaxialer Belastung an zellbesiedeltem Material entwickelt werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen des Projektes lassen sich weitere Analyse auf makro- und mikroskopischer Ebene durchführen.

## **II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Fördermittel des TP 2 sind hauptsächlich für wissenschaftliches Personal und für die beschriebenen Experimente verausgabt worden. Dies betraf auch die Anschaffung von Materialien für den Bau -und Betrieb des zu entwickelnden Bioreaktors.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit**

Der interdisziplinäre Ansatz des workHEALTH Projektes hat den Zugang zu mechanobiologischen Lösungsansätzen ermöglicht, der bei arbeitsbedingten Muskelskeletterkrankungen eine wesentliche Rolle spielt. Dadurch war es in den o.b. Untersuchungen möglich, einen wissenschaftlichen Rahmen für die Wechselwirkung zwischen mechanischem Stress in Gelenken und dem biologischem Gewebeumbau zu erzielen. Die dargestellten Resultate sind als wissenschaftlicher Rahmen zu verstehen, in denen sich weitere Studien einpflegen können, um die Mechanobiologie in diesem Gebiet weiter auszubauen. Insbesondere sei erwähnt, dass es möglich und erforderlich ist, biologische Untersuchungen mit mechanischen Simulationen zu verbinden. Insbesondere die Ermittlung der realen Belastungszustände aus Mehrkörpersimulationen zeigt einen innovativen Ansatz auf. Dies kann einen Beitrag zur Prävention, Arbeitsplatzgestaltung, Diagnose, Behandlung und Wiedereingliederung ermöglichen. Hierzu trägt die in TP 2 geleistete Projektarbeit am Institut für Allgemeine Mechanik IAM der RWTH erheblich bei und der Klinik für Orthopädie, Unfall -und Wiederherstellungschirurgie bei. In vorangegangenen wurde bereits gezeigt, dass die mechanische Belastung in Gelenkknorpel wesentlich die Entwicklung von Knorpel- und Knorpelersatz prägen kann. Diese Resultate wurden hier bestätigt und weiter ergänzt durch interdisziplinäre Studien aus der Mechanik, dennoch sind weitere Studien sind erforderlich, um ein umfangreicheres Bild der Mechanobiologie in diesem Bereich zu erhalten.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Da das Teilprojekt TP2 aus den o.g. interdisziplinären Themen bestand, ist eine weitere Fortführung und Verwertung der Ergebnisse in den klinischen Bereich

möglich und wünschenswert. Der beschriebene wissenschaftliche Rahmen mit Anteilen aus der Mechanik, KI-Programmierung, Simulation und Biologie kann durch klinische Fragestellungen sowie arbeitsrelevante Fragen weiter vervollständigt werden. Wichtig ist es, die Fallzahlen von Patienten und Versuchsdaten zu erhöhen, um eine noch höhere Genauigkeit der Auswertemöglichkeiten zu erzielen und eine patientenspezifische Untersuchung arbeitsrelevanter Aspekte zu erreichen. Das Projekt workHEALTH hat dadurch eine sinnvolle Grundlage gelegt.

## **II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Der Fortschritt insbesondere anderer Forschungseinrichtungen im Bereich der Mechanobiologie und KI-Forschung sowie der mechanischen Simulation wurde während des workHEALTH Projektes verfolgt und sollen in Publikationen diskutiert werden.

## **I.6 Veröffentlichungen im Rahmen des TP II**

Praster M., et al. Investigation of the influence of fatigue on the carrying of loads during the ascent and descent of stairs, geplant (2024)

### **Teil III: Eingehende Darstellung und Beteiligung am Teilprojekt VI**

Der Fokus in Teilprojekt 6 (TP 6) lag auf der Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten MSE in der betrieblichen und medizinischen Praxis. Konkret wurde hierzu ein Bewegungserfassungssystem mit Echtzeit-Datenerfassung und -feedback auf Basis von Motion Capture untersucht. Dem liegt der Gedanke zu Grunde, dass falsch ausgeführte Bewegungen zu Schäden im muskuloskelettalen System führen können, ein typisches Beispiel, ist das „Heben aus dem Rücken“. Grundsätzlich wurde im Projektverlauf herausgearbeitet, dass sowohl ein Einsatz solcher Systeme im medizinisch-therapeutischen Bereich als auch in der industriellen, betrieblichen Praxis denkbar ist. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Gegebenheiten und Anforderungen beider Bereiche werden in der folgenden detaillierten Darstellung nach Arbeitspaketen die Projektaktivitäten und -ergebnisse meist getrennt nach beiden Bereichen vorgestellt.

Als Beispiel sei hier die Druckbelastung auf die, im Hinblick auf arbeitsbedingte Rückenschmerzen besonders relevante, Bandscheibe L5-S1 genannt. Gekoppelt mit einem Feedbacksystem erlaubt Echtzeit-Feedback über wirkende körperliche Belastung ebenfalls die Echtzeit-Optimierung. Konkret standen die folgenden übergeordneten Forschungsfragen im Fokus:

1. Können ergonomische Bewegungen für die betriebliche Praxis (z.B. rücken-gerechte Hebetekniken) mit einem einfach zu bedienenden Bewegungserfassungssystem nachhaltig erlernt werden, um ungünstige Lastverhältnisse als Risiko für arbeitsbedingte MSE zu vermeiden? Welchen Mehrwert kann das System in der klinischen Praxis bei der Unterstützung von Ärzten und Therapeuten bieten?
2. Wie kann das Echtzeit-Feedback eines einfach zu bedienenden Bewegungserfassungssystems so gestaltet werden, dass es als effektive und effiziente evidenzbasierte Unterstützung bei der Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten MSE eingesetzt werden kann?
3. Welche belastungsrelevanten Daten benötigen Ärzt:innen oder Therapeut:innen zur Unterstützung ihrer Behandlung (z.B. postoperative Begrenzung

der Gelenkteilbelastungen) und bei welchen Anwendungen ist eine Zertifizierung als Medizinprodukt erforderlich?

Das wesentliche Ergebnis des TP 6 ist folglich die Weiterentwicklung und Evaluation von Bewegungserfassungssystemen zur evidenzbasierten Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten MSE aus Sicht der klinischen Anwendung des UKAs, der von den Projektpartner erstellte Leitfaden wurde genutzt um herauszufinden, welche belastungsrelevanten Daten Ärzte oder Physiotherapeuten zur Unterstützung ihrer Behandlung benötigen. Bezugnehmend auf Forschungsfrage 3 („Bei welchen Anwendungen ist eine Zertifizierung als Medizinprodukt erforderlich?“) wurde das Motion Capture System regulatorisch untersucht. Zunächst wurde festgestellt, ob die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten einen „medizinischen Zweck“ gemäß der Medical Device Regulation (MDR) erfüllen, was eine Grundvoraussetzung für die Einordnung als Medizinprodukt darstellt. Entsprechende Definitionen aus der MDR wurden auf das Motion Capture System angewendet, und eine Zweckbestimmung wurde erstellt. Diese Zweckbestimmung definiert neben dem medizinischen Zweck auch Indikationen, Kontraindikationen und Leistungsparameter des Produkts und bildet den Ausgangspunkt für den regulatorischen Entwicklungsprozess von Medizinprodukten. Sie dient als Grundlage für die Klassifizierung, Risiko- und Usability-Analyse des zu entwickelnden Systems und spielt eine wichtige Rolle bei der Auswahl der anzuwendenden Normen und der Anforderungsanalyse.

Auf Basis dieser Informationen wurden verschiedene Anwendungsszenarien, die daraus resultierenden Klassifizierungen und die damit verbundenen regulatorischen Auflagen analysiert. Für das Motion Capture System ist sowohl ein Einsatz als Medizinprodukt als auch als Nicht-Medizinprodukt denkbar. Eine weitere „Sonderklasse“ im Medizinproduktebereich ist der Einsatz als Digitale Gesundheitsanwendung (DIGA), die direkt von Patient

genutzt wird. Im Zuge der Bewertung der regulatorischen Anforderungen wurde das Ziel des Produkts als Erfassung und Dokumentation des Range of Motion (RoM) in muskuloskelettalen Versorgungsprozessen festgelegt. Basierend auf den

Untersuchungsergebnissen ließ sich ableiten, dass dies einen Mehrwert für die klinische und orthopädische Praxis darstellt. Die Anwendbarkeit in der klinischen Praxis wurde im weiteren Verlauf untersucht. Mit Blick auf die Translation in die klinische Praxis wurde der Anwendungsbereich Physiotherapie gewählt: Fachkräftemangel und knappe Behandlungszeiten gehören zu den Herausforderungen in der Physiotherapie. Die Digitalisierung könnte diese Herausforderungen mildern, indem sie Prozesse vereinfacht und das Arbeiten wissenschaftlicher und praxisorientierter gestaltet. Ein vielversprechender Ansatz ist die digitale Erfassung der Bewegungsausmaße (Range of Motion, ROM) oder die digitale Unterstützung bei der Ganganalyse mittels Motion Capture-Technologie. Markerlose Systeme bieten dabei klare Vorteile in Bezug auf Vorbereitungszeiten und Genauigkeit. Damit kann sich unter anderem das Berufsbild der Physiotherapeuten ändern, so dass die Verrichtung körperlicher Arbeit derer verringert wird und dadurch der Beruf an Attraktivität gewinnen kann.. Die standardisierte Dokumentation der Bewegungen könnte die Effizienz steigern durch Objektivierung der Analyse und Standardisierung der Dokumentation. Zur Überführung in die Praxis wurde eine iterative Anpassung und Evaluierung durchgeführt. Ziel war es, die Bedingungen und Funktionalitäten des Echtzeit-Systems für den Einsatz in der klinischen Praxis zu formulieren und damit perspektivisch eine praktische Anwendung durch das UKA zu ermöglichen.

### **III.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Fördermittel des TP 6 sind hauptsächlich für wissenschaftliches und technisches Personal für die Untersuchungen der Motion Capture Systeme angefallen.

### **IV.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit**

Obwohl das Wissen über Ergonomie und die Bemühungen der Öffentlichkeit immer mehr zunehmen, bleibt die Zahl der von arbeitsbedingten MSE betroffenen Personen seit 2008 auf einem ähnlichen Niveau. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass Muskel- und Skeletterkrankungen in erheblichem Maße mit unerwünschten Arbeitsanforderungen zusammenhängen. Der interdisziplinäre Ansatz des Forschungsverbunds workHEALTH, die Zusammenführung des kollektiven Ansatzes des Arbeitsschutzes mit dem individuellen Ansatz der Medizin, ist dabei wegweisend, um die Koordination

zwischen den Disziplinen verbessern und eine bessere Prävention, Arbeitsplatzgestaltung, Diagnose, Behandlung und Wiedereingliederung ermöglichen. Die in TP 6 geleistete Projektarbeit der Partner Institut für Arbeitswissenschaft IAW der RWTH, Klinik für Orthopädie, Unfall -und Wiederherstellungschirurgie des UK Aachen sowie Institut für Arbeitsschutz IFA der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung trägt dazu erheblich bei:

Im Rahmen des TP 6 wurden Motion Capture Systeme zur evidenzbasierten Unterstützung von Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten MSE untersucht. Die Anforderungen an ein solches System für sowohl den medizinisch-therapeutischen als auch industriell-betrieblichen Bereich wurden im Rahmen der Projektarbeit durch Interviews und Workshops gesammelt und in ein Pflichtenheft übersetzt. Das konzipierte und validierte System ermöglicht eine kontinuierliche Datenerfassung und Rückmeldung in Echtzeit über menschliche Gelenke und berechenbare (Belastungs-)Zustände wie Gelenkwinkel, Gelenkbelastung, Körperhaltung und Bewegungsgeschwindigkeit. Die Einhaltung und Eignung bestimmter ergonomischer Bewegungen (z.B. rücken-schonende Hebetchnik) und therapeutischer Ansätze (z.B. postoperative Begrenzung gelenkiger Teillasten) wurde in Labor- und Feldstudien bewertet, z.B. durch Vergleich von Ist- und Soll-Zustand. Die in TP 6 durchgeführte Weiterentwicklung und Evaluation des Bewegungserfassungssystems leistet damit perspektivisch einen wichtigen Beitrag zur evidenzbasierten Prävention und Behandlung von arbeitsbedingten MSE.

#### **IV.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Das Projekt workHEALTH zielt auf die interdisziplinäre Untersuchung von Querschnittsthemen zur Ätiologie und Entwicklung von arbeitsbedingten MSE ab, mit dem Ziel der Verbesserung von Prävention und Behandlung. Um die Prävalenz von arbeitsbedingten MSE zu reduzieren und sowohl wirtschaftliche Verluste als auch gesundheitliche Einschränkungen zu begrenzen, ist eine umfassende Kenntnis über den Belastungszustand einer Person essenziell. Gelenk- oder Bandscheibenbelastungen sind jedoch weder für Patienten oder Arbeitspersonen direkt wahrnehmbar noch für Fachpersonal direkt äußerlich sichtbar. Im Rahmen von TP 6 wurden daher Bewegungserfassungssysteme mit Echtzeit-Datenerfassung und -

feedback auf Basis von Motion Capture untersucht, die Belastungszustände erfassen, auswerten und darstellen. Zur Darstellung werden die Informationen über vorliegende Belastungssituationen optisch, akustisch sowie haptisch für Nutzende erfahrbar gemacht. Damit stellen die entwickelten Methoden eine praktikable und niederschwellige Unterstützung für die Prävention und Behandlung von MSE dar.

#### **IV.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Der Fortschritt insbesondere anderer Forschungseinrichtungen zur Erfassung, Auswertung und Darstellung wirkender Belastungszustände insbesondere mit Blick auf die Anwendungsfelder medizinisch-therapeutischer sowie industriell-betrieblicher Bereich wurde verfolgt und bei der Bearbeitung des TP 6 berücksichtigt.

#### **I.6 Veröffentlichungen im Rahmen des TP VI**

Keine