



**ZUKUNFTS
AGENTUR
BAU**

Forschung | Digitalisierung

EXOSKELETTE AM BAU

zukunft-bau.at

Im Auftrag von:

ZAB Zukunftsagentur Bau GmbH
Digitalisierung & Innovation
Lachstatt 41
4221 Steyregg

In Kooperation mit:

JKU, awb, Haller Bau, AUVA

ZAB Zukunftsagentur Bau GmbH

Digitalisierung & Innovation

Lachstatt 41, 4221 Steyregg
T +43 732 / 24 59 28 - 29
E office-ooe@zukunft-bau.at

Forschung & Zukunftsthemen

Moosstraße 197, 5020 Salzburg
T +43 662 / 830 200 - 19
E office-sbg@zukunft-bau.at

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangssituation:.....	3
2. Projektziele	3
3. Fragestellungen.....	3
4. Ablauf	3
4.0 Einleitung	4
4.1 Eruiieren der betroffenen Tätigkeiten am Bau und Auswahl der dafür geeigneten Exoskelette .	5
4.2 Praxistest auf Baustellen.....	6
4.2.1 Ergebnisse aus Praxistest	6
4.3 Muskelaktivitätsanalyse und Belastungstest mittels Sensorik	9
4.3.1 Studienablauf & Methodik.....	9
4.3.2 Muskelaktivitätsmessung.....	11
4.3.3 Ablauf	14
4.3.4 Analyseverfahren	15
4.3.5 Ergebnisse aus der Muskelaktivitätsmessung	17
4.3.6 Diskussion	25
5. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	26
6. Handlungsempfehlungen.....	26

1. Ausgangssituation:

Die Baubranche ist bekannt für ihre anspruchsvollen Arbeitsbedingungen. In Österreich ist rund ein Fünftel aller Krankheitstage auf Muskel-Skelett-Erkrankungen zurückzuführen.

Rückenschmerzen zählen zu den häufigsten Beschwerden von Bauarbeitern. Der Bewegungs- und Stützapparat wird durch die teilweise sehr schweren Lasten am Bau immer noch sehr stark beansprucht.

2. Projektziele

- Wirksamkeit und Akzeptanz von Exoskeletten bei Bauarbeiten eruieren
- Einsatzmöglichkeiten und Praxistauglichkeit auf der Baustelle untersuchen
- Eventuelles Feedback an die Exoskelett Hersteller

3. Fragestellungen

- Kommt es durch das Tragen des Assistenzsystems zur allgemeinen Entlastung der Mitarbeiter?
- Wie werden Exoskelette allgemein von den Personen und deren Umfeld angenommen?
- Kommt es zu veränderten Rumpfhaltungen durch das Exoskelett?

4. Ablauf

- 4.0 Einleitung
- 4.1 Eruieren der betroffenen Tätigkeiten am Bau und Auswahl der dafür geeigneten Exoskelette
- 4.2 Praxistest auf Baustellen
- 4.3 Muskelaktivitätsanalyse und Belastungstest mittels Sensorik

4.0 Einleitung

In Österreich müssen Arbeitsplätze in Bezug auf physische Belastungen evaluiert werden. Dabei kommen oft verschiedene Screening Methoden zum Einsatz. Verbreitete Methoden wären beispielsweise die Leitmerkmalmethoden. Hier werden mittels Beurteilungsbögen die tatsächlich (objektiv) vorhandenen physischen Arbeitsbelastungen ermittelt.

Werden Exoskelette eingesetzt ist die Gefährdungsbeurteilung physischer Belastung allerdings auf diese Weise nicht mehr möglich.

Eine weitere und wissenschaftlichere Herangehensweise zur Gefährdungsbeurteilung wäre das sogenannte Motion Capturing. Dabei wird durch mehrere Inertialsensoren ein räumliches Bewegungsmuster der verrichteten Arbeit erstellt. Über Sensoren, die das elektrische Potenzial der Muskulatur erfassen (Elektromyographie) wird die Muskelaktivität erfasst und in weiterer Folge auf die Ermüdung und physische Beanspruchung zurückgeführt.

Dabei werden, um Unterschiede evaluieren zu können, diese Messungen idealerweise zuerst ohne und dann mit Exoskelett durchgeführt. Dies ermöglicht eine genaue Analyse und Interpretation der Beanspruchung bei den einzelnen Arbeitsschritten. Es werden bei Motion Capture-Analysen die Haltung und Bewegungen genau beschrieben und zusätzlich die Aktivität der Muskulatur aufgezeichnet.

Bevor der Einsatz von Exoskeletten in Betracht gezogen werden kann, müssen aber die entsprechenden Arbeitsplätze genau beurteilt werden. Dazu wird laut § 7 im österreichischen ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (ASchG) nach den Grundsätzen der Gefahrenverhütung vorgegangen.

Es gilt kollektiver vor individuellem Gefahrenschutz. Daher müssen gemäß S-T-O-P-Prinzip nach der Substitution von Gefahren zuerst technische und organisatorische Schutzmaßnahmen für die Arbeiter getroffen werden. Nur wenn keine entsprechende Anpassung des Arbeitsplatzes möglich ist, soll man sich mit der Implementierung von Exoskeletten im Unternehmen auseinandersetzen. Denn Exoskelette sind als letzte verfügbare Lösung der Maßnahmenhierarchie zu sehen. Erst dann und durch eine vorangegangene Tätigkeitsanalyse wird in der Regel über den möglichen Bedarf und potenzielle Exoskelett- Modelle entschieden.

Entscheidet man sich für dessen Einsatz, kommt es zu einer spezifischen Gefährdungsbeurteilung für die eingesetzten Exoskelette. Zur Beurteilung der physischen Belastungen ist neben Möglichkeiten zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung, wie etwa der BORG-Skala, messtechnische Bewegungsanalyse mit Fokus auf Erfassung der Muskelaktivität die einzige Wahl die neue physische Beanspruchung ausgelöst durch das Exoskelett objektiv zu untersuchen. Eine Gefährdungsbeurteilung mithilfe von Checklisten, der Leitmerkmalmethoden oder speziellen Screening-Methoden, wie sie ohne den Exoskelett- Einsatz üblich sind, kann nicht stattfinden.

Im Rahmen der Case Study wurde der Einsatz eines passiven Exoskeletts auf die physische Beanspruchung untersucht.

4.1 Eruien der betroffenen Tätigkeiten am Bau und Auswahl der dafür geeigneten Exoskelette

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden die Tätigkeiten von unterschiedlichen Baustellen (Neubau, Umbau und Sanierung) aufgelistet und die Bewegungsabläufe analysiert.

Für das Projekt wurden folgende Tätigkeiten ausgewählt:

- Montage einer Kellerdeckendämmung (Überkopfarbeit)
- Tragen von Material über mehrere Stockwerke bei Bestandsumbau (Hebearbeiten)
- Schalungsarbeiten (Hebe- und Überkopfarbeiten)
- Mauerungsarbeiten (Hebearbeiten)

Die dafür ausgewählten Exoskelette:

- ottobock Shoulder (armunterstützendes Exoskelett)
- Auxivo Liftsuit (rückenunterstützendes Exoskelett)



Ottobock Shoulder



Auxivo Liftsuit

4.2 Praxistest auf Baustellen

Das Exoskelett ottobock Shoulder kam bei der Montage der Kellerdeckendämmungen und bei Schalungsarbeiten im Überkopf-Bereich zum Einsatz, um den Schulter- und Nackenbereich zu entlasten. Für alle anderen in den Testungen umfassten Baustellenarbeiten (Tragen von Lasten, Schalungsarbeiten in Bodennähe und Maurertätigkeiten) kam das Soft-Exoskelett Auxivo Liftsuit zur Anwendung, das bei nach vorne gebeugten und von Boden- auf Hüfthöhe hebenden Tätigkeiten den Rücken entlasten soll.

Qualitative Begleiterhebung - Feedbackinterviews

Im Nachgang an die Exoskelett-Testungen wurden auf jeder der drei Test-Baustellen Feedbackgespräche mit insgesamt 7 (ausschließlich männlichen) Exoskelett-Testern geführt. Die Gespräche dauerten zwischen 8 und 20 Minuten und zielten darauf ab, die persönliche Nutzererfahrung der Träger zu reflektieren und auf die jeweiligen Gegebenheiten der Systemverwendung während verschiedener Baustellentätigkeiten einzugehen. Die Testdauer variierte zwischen den Teilnehmenden sehr stark und betrug in mehreren Fällen fünf Tage und mehr, wobei die kürzeste Testperiode zwei Tage umfasste.

4.2.1 Ergebnisse aus Praxistest

Montage Kellerdeckendämmung

Die Testperson verwendete für die Montage der Kellerdeckendämmung das Überkopf-Exoskelett ottobock Shoulder. Es wurde allgemein ein positiver Nutzen für Überkopf-Arbeiten erkannt, jedoch wurde die vom System gewährte Unterstützung als unzureichend beurteilt (d.h. Arme wurden bei Überkopf-Arbeit mit/ohne Werkzeug nicht ausreichend vom Exoskelett gestützt, wodurch ein zu geringer Entlastungseffekt wahrgenommen wurde). Da sich der Arbeitsalltag in dem untersuchten Bereich als sehr vielfältig darstellte und hauptsächlich am Boden stattfand, waren die Unterstützungsmöglichkeiten des Exoskeletts insgesamt stark eingeschränkt. Zudem wurden ein häufiges Hängenbleiben und Bewegungseinschränkungen in engen Räumen als wesentliche Nachteile des Exoskeletts genannt. Bei Bückbewegungen im Hüft- und Armbereich verrutschte das Exoskelett und erforderte eine Neuausrichtung.

Hinsichtlich Trage- und Nutzungskomfort wurde festgestellt, dass aufgrund der notwendigen Fixierung des Exoskeletts ein unangenehmer Druck am Bizeps auftrat. Durch Nachjustierung mit zusätzlichen Polsterungen konnte ein besseres Tragegefühl erzielt werden. Es wurde hervorgehoben, dass die richtige Einstellung und Passung des Exoskeletts von entscheidender Bedeutung sind. Obwohl das Exoskelett spürbar war, führte es ansonsten zu keinen Schmerzen. Ein Tragen im Sommer würde aber aufgrund thermischer Unannehmlichkeiten (d.h. Schwitzen) insbesondere bei hohen Temperaturen abgelehnt werden.

Zusammenfassend schätzt die Testperson die Forschung im Bereich der Exoskelette, erkennt jedoch bisher keinen praktischen Nutzen für die Verwendung bei Baustellenarbeiten. Die betonte mangelnde Praktikabilität weist auf notwendige Verbesserungen bei Design und Funktionalität hin.

Tragen von Lasten

Für dieses Tätigkeitsfeld wurde die Testperson mit dem Exoskelett Auxivo Liftsuit ausgestattet. Nach einer Eingewöhnungsphase berichtete die Testperson von einer merkbaren Entlastung im Kreuzbereich. Insbesondere bei schweren Hebe- und Tragearbeiten, wie beispielsweise ca. 40 kg Zementsäcken, wurde ein erheblicher praktischer Nutzen festgestellt. Eine Problematik stellte das Einstecken von Gegenständen dar, da die Testperson den Zahlstab nicht an der vorderen Hosentasche befestigen konnte. Zudem erwies sich der Auxivo Liftsuit in engen Räumen, wie etwa am Dachboden, als weniger hilfreich. Kritik wurden außerdem an den Bändern des Brustgeschirrs geäußert, da sich diese leicht in Maschinen, wie beispielsweise Kreissägen, verfangen könnten.

Hinsichtlich des Trage- und Nutzungskomforts wurde bemerkt, dass in den ersten Tagen eine zusätzliche Person beim Anziehprozess und Beseitigen von Verdrehungen benötigt wurde.

Insgesamt zeigte sich die Testperson sehr überzeugt vom Auxivo Liftsuit und würde es weiterhin verwenden, wenn es von der Firma zur Verfügung gestellt werden würde.

Schalungsarbeiten

Bei diesem Tätigkeitsbereich wurden die Exoskelette ottobock Shoulder (für Arbeiten im Überkopf-Bereich) und Auxivo Liftsuit (für Arbeiten in Bodennähe) von je einer Testperson verwendet:

Das ottobock Shoulder erwies sich bei Überkopf-Arbeiten, in diesem Fall beim Ausschalen von Gebäudedecken, als hilfreich. Es ließ vor allem bei Schleif- und Tragearbeiten eine körperliche Unterstützung bemerken. Die Anwendung des Exoskeletts führte während des Deckenschleifens zu einer Verringerung der Belastung in den Armen, woraus eine bessere Arbeitsleistung resultierte. Zusätzlich wurde eine erhöhte Entlastung der Muskulatur am Ende des Arbeitstages wahrgenommen. Von einer Testperson mit schwerwiegenden Schulterproblemen wurde festgestellt, dass die Unterstützung des Exoskeletts nicht ausreichend war, um die Tätigkeit trotz körperlicher Beschwerden ausführen zu können. Einschränkungen durch das Exoskelett ergaben sich aufgrund beengter räumlicher Verhältnisse bei Schalungsarbeiten im Bereich einer Stiege und durch die mangelnde Kompatibilität mit der Nageltasche. Hinsichtlich Trage- und Nutzungskomfort des Exoskeletts ottobock Shoulders wurde die Notwendigkeit der richtigen Einstellung angegeben. Um den Tragekomfort zu erhöhen, wurde die Integration einer zusätzlichen Polsterung als wünschenswert erachtet.

Die Verwendung des Auxivo Liftsuits führte zu einer Abnahme der Rückenschmerzen, vor allem im Lendenwirbelbereich. Dies wurde bei Hebearbeiten, in diesem Fall bei Unterzugschalungen mit einem Gewicht von maximal 30 kg, festgestellt. Die Testperson berichtete von einem

positiven Einfluss auf die Arbeit und bemerkte eine automatische Verbesserung der Körperhaltung. Beim Auxivo-Liftsuit wurde ebenfalls betont, dass eine korrekte Einstellung bedeutend ist, da das Exoskelett ansonst bei den Oberschenkeln störend werden kann. Das Tragen einer Winterjacke in Kombination mit dem Exoskelett wurde als beklemmend erlebt.

Zusammenfassend schienen die Testpersonen einen prinzipiell positiven Eindruck von den Systemen zu haben. Unter der Voraussetzung, dass die Systeme zukünftig besser auf die jeweiligen Mitarbeiter eingestellt sind (tlw. waren Einstellungen durch die Mitarbeiter nicht adäquat vorgenommen worden), würden diese die Exoskelette weiter testen bzw. verwenden. Die Bedeutung einer umfassenden Einschulung sowie Begleitung der Arbeiter durch geschultes Personal kann an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden.

Maurertätigkeiten

In diesem Tätigkeitsbereich wurde das Exoskelett Auxivo Liftsuit getestet. Es wurde von den Trägern festgestellt, dass das Exoskelett beim Bücken teilweise hinderlich war und zu einem beklemmenden Gefühl aufgrund eingeschränkter Bewegungsfreiheit beim Aufheben und Ablegen von Ziegeln führte. Für Maurertätigkeiten in Bodennähe wurde das Exoskelett als hilfreich empfunden, während es beim Tragen und Mauern ab Hüfthöhe als störend wahrgenommen wurde. Eine Testperson berichtet von einem angenehmen Rückhalt bei Bückbewegungen.

Der Trage- und Nutzungskomfort wurde von den Testpersonen insgesamt schlecht bewertet. Als problematische Stellen wurden die Schultern sowie der Schrittbereich angegeben und mit einer möglicherweise falschen Einstellung des Exoskeletts in Verbindung gebracht. Positiv hoben die Testpersonen das Ein- und Ausziehen hervor, welches reibungslos funktionierte.

Zusammenfassend wurde der praktische Nutzen für Maurertätigkeiten in Frage gestellt. Eine Testperson äußerte ihre Bereitschaft, das Exoskelett erneut zu probieren, sollten zukünftig Rückenprobleme auftreten.

Zusätzliche Anmerkungen

Von den Testpersonen wurde ergänzend angemerkt, dass direkt vor Ort auf den Baustellen andere Berufsgruppen (z.B. Elektriker*innen und Schlosser*innen) ein Interesse an den verwendeten Exoskeletten zeigten. Es wurde darauf hingewiesen, dass die effektive Nutzung von Werkzeugen in Kombination mit Exoskeletten stark mit der richtigen Länge und Größe des Werkzeugs zusammenhängt und die adäquate Einstellung der Arbeitsgeräte für eine optimale Systemwirkung essenziell ist (z.B. sollte bei Verwendung eines Exoskeletts zur Unterstützung von Überkopf-Arbeiten das Schleifgerät nicht zu kurz sein).

4.3 Muskelaktivitätsanalyse und Belastungstest mittels Sensorik

Ein spezieller Fokus der Studie lag auf der Untersuchung von potenziell niedrigeren muskulären Spannungen, die durch das Tragen des Liftsuits auftreten können, sowie auf veränderte Bewegungsabläufe und Haltungsveränderungen des Rumpfes wie Vorneigung, Rotation oder Seitneigung während der unterschiedlichen Hebetätigkeiten. Diese wurden mit dem System „Captiv“ erfasst, das aus IMUs (inertial measurement units, welche in dem Fall die Bewegungen des Rumpfes wie Vorneigung, Seitneigung und Rotation in Form von Winkelgraden, Winkelgeschwindigkeiten – und Beschleunigungen erfassen), sowie einer (Software-) synchronisierten Videoaufnahme besteht. Die Software erlaubt es, bestimmte Parameter wie Dauer, Häufigkeit oder Frequenz vakanter und auftretender Winkel zu berechnen. Die Daten wurden danach in ihren Grenzbereichen entsprechend interpretiert. Zusätzlich wurde das elektrische Aktivitätspotential der Muskulatur (im Sinne der Muskelaktivität, über die man auf die Beanspruchung rückschließen kann) mittels einem Oberflächen-EMG mit bipolarer Ableitung, erfasst.

Ziel dieser Studie war vor allem die mögliche Entlastung und folgende Auswirkung auf das muskuläre System zu betrachten.

4.3.1 Studienablauf & Methodik

Kurzübersicht Studiendesign

Als Studienart wurde eine Case Study mit 3 Probanden gewählt. Zum Einsatz kam das Exoskelett von Auxivo mit dem Namen „Liftsuit“. Untersucht wurden im Rahmen eines standardisierten Versuchsaufbaus zwei typische im normalen Arbeitsalltag vorkommende Tätigkeiten von Maurern.

Die Probanden mussten eine Mauer mit 6 Reihen vom Boden weg mit jeweils 4 Ziegeln pro Reihe belegen. Auf das Auftragen von Mörtel wurde verzichtet.

Proband 1 entnahm die Ziegel bodennahe von einer Palette und begann die Mauer aufzubauen.

Der Unterschied zu Proband 2 und 3 war, dass diese die jeweils bestehende Mauer abbauten und in weiterer Folge neu aufbauten. Die Hebetätigkeiten veränderten sich zwar von Proband 1 zu Proband 2 und 3, jedoch wurde ohnehin jeder Proband mit und ohne Exoskelett untersucht und nicht die Probanden miteinander verglichen.

Der erste Durchgang fand ohne Exoskelett statt, der zweite mit Exoskelett. Die Durchführung ohne ein Unterstützungssystem stellt dabei die „Kontrollgruppe“ dar, wobei an sich keine Unterteilung

der Probanden in Studiengruppe und Kontrollgruppe erfolgt. Jeder Proband führte alle Aufgaben mit Unterstützungssystem und einmal ohne System aus, um die Wirkung auf den Körper zu untersuchen. Aus diesem Grund wird das System nicht mit sich selbst verglichen, also kein Vorher-Nachher-Vergleich untersucht. Somit müssten die Messungen nicht einzeln je Proband ausgewertet werden (intrapersoneller Vergleich), sondern könnten die Ergebnisse aller Probanden gemittelt werden (interpersoneller Vergleich), um eine allgemeine Aussage über das Assistenzsystem treffen zu können und auch hier unerwünschte Nebeneffekte auszuschließen.



Exoskelett Liftsuit

Unabhängige Variablen

Dauer: Die Dauer der Aufgaben war durch den Versuchsaufbau festgelegt und hat zwischen 5 und 7 Minuten gedauert.

Kondition: Die Testpersonen mussten zwei Durchgänge absolvieren. Der erste fand ohne Exoskelett statt, der zweite mit.

Abhängige Variablen

Objektive Parameter: es wurden physiologische Messungen der muskulären Anspannung bzw. Muskelaktivität sowie der Körperhaltung in Form von Gelenkwinkeln vorgenommen. Für die Beschleunigungsmessung wurden 4 Sensoren (ein Sensor über Manschetten zwischen den Schulterblättern, einer an der Hüfte, und jeweils links und rechts am Oberarm lateral) angebracht. Zusätzlich wurden die Aktivitäten von 4 Muskeln bzw. Muskelgruppen (m. erector spinae in LWS und BWS, linke und rechte Seite) mittels EMG gemessen.

Stichprobe

3 Studienteilnehmer, Lehrlinge der Bauakademie OÖ, wurden für die Untersuchung rekrutiert. Die Anzahl der Männer und Frauen wurde dabei nicht ausbalanciert (3 Männer).

Bei der Untersuchung wurden nicht nur das Alter, die Größe, das Körpergewicht, und die Arbeitserfahrung, sondern auch die bisherige Erfahrung mit dem Exoskelett erfragt.

4.3.2 Muskelaktivitätsmessung

Elektromyographie

Die Elektromyographie (EMG) ist ein neurophysiologisches Diagnoseverfahren zur Analyse der ausgestrahlten elektrischen Signale von Muskeln. Die Kontraktion der Muskulatur wird mithilfe dieser elektrischen Signale gesteuert. Bei oberflächlich gelegenen Muskeln, d.h. Muskeln, die durch die Haut ertastbar sind, ist die Erfassung der Signale mit wenig technischem Aufwand möglich. Genutzt wird dafür die Methodik der Oberflächen-Elektromyographie, bei der ein Elektrodenpaar auf die Haut geklebt wird, um das Signal aufzuzeichnen. Da mit diesem Verfahren die Summenpotentiale vieler motorischer Einheiten an der Hautoberfläche erfasst und somit ein Überblick über die Aktivität des Muskels gewonnen werden kann, wird dieses Verfahren in den Bereichen (Arbeits-) Wissenschaft, Sportphysiologie, (Arbeits-) Medizin und Biomechanik bevorzugt eingesetzt. Neben dem geringen technischen Aufwand und der Erfassung vieler motorischer Einheiten ist besonders die geringe Beeinträchtigung der Probanden in Bewegungsabläufen ein großer Vorteil. Für die Signalerfassung tiefer gelegener Muskeln wird die invasive Nadel-Elektromyographie angewandt, welche mit feinen Nadeln, die direkt in den Muskel gestochen werden, arbeitet. Dieses Verfahren ist technisch aufwändiger und wird besonders im differentialdiagnostischen Bereich genutzt, um z.B. gezielt die Ursachen einer Funktionsstörung eines Muskels zu untersuchen. Durch die feinen Nadeln werden vor allem einzelne motorische Einheiten erfasst, was eine genaue Lokalisierung ermöglicht.

Im konkreten Fall wurde die Muskelaktivität von 4 ausgewählten Muskelgruppen (m. erector spinae) erfasst.

Für die Versuchsreihe waren die in die Messung einzubeziehenden Muskeln nach einer vorangehenden Literaturrecherche bereits vorgegeben.

Instrumentierung

Drahtlose Sensoren zur Messung der Oberflächen-Elektromyographie (TEA CAPTIV T-Sens EMG, TEAERGO, Frankreich) und Ag/AgCl-Oberflächenelektroden (Triode Electrodes T3402M, ThoughtTech, Kanada) wurden zur Aufzeichnung der Muskelaktivität verwendet. Zusätzlich wurden 4 Beschleunigungssensoren (TEA CAPTIV T-Sens Motion IMU, TEAERGO, Frankreich) am

oberen und unteren Rücken, sowie lateral an den Oberarmen zur Messung der Rumpfbewegungen wie Vorneigung, Seitneigung und Rotation, und für Innenrotation, Außenrotation, Anteversion, Retroversion, Adduktion und Abduktion der Arme angebracht. Die von den Sensoren erfassten Werte wurden drahtlos über Bluetooth an einen Datenlogger (T-Log Datalogger, TEAERGO, Frankreich) übertragen und mussten im Anschluss in die Software Captiv Motion (L7000 Premier, TEAERGO, Frankreich) importiert werden.

Captiv Motion

Synchronisationssoftware CAPTIV Motion L7000

CAPTIV Motion ist ein hochmodernes und flexibles System für die Aufzeichnung und Analyse physiologischer Messwerte.

Die Software der französischen Firma TEAERGO erlaubt auf einfache Art, Analysen, die mit einer Vielzahl von Sensoren, sogenannten „inertial measurement units“, kurz IMUs und einem Datenerfassungssystem gemacht wurden, mit einer Videoaufnahme zu synchronisieren und dann entweder nach der Messung auszuwerten oder sogar mittels Live-Receiver auch während der Tätigkeit mitzuverfolgen.

Inertialmesssensoren wie sie von TEAERGO hergestellt werden sind kabellos und werden auch als T-Sens-Sensoren bezeichnet.



Die Hardware bestand zum Zeitpunkt der vorgenommenen Analysen aus:

Bewegungssensoren, die jeweils ein 3-Achsen Gyroskop, einen 3-Achsen-Accelerometer und einen 3-Achsen-Magnetometer beinhalten und zusammen auch die Funktion von Gonio- und

Torsiometer übernehmen können. Mit diesen Inertialsensoren können Gelenkwinkel, Winkelgeschwindigkeiten sowie Winkelbeschleunigungen gemessen werden.

Die von den Sensoren erfassten Werte werden drahtlos über Bluetooth an einen Datenlogger übertragen, der die Hardware komplettiert. Alle Sensoren sind kabellos, haben die Größe einer Zündholzschachtel, werden lediglich mittels Manschetten über oder unter der Kleidung angebracht.

Neben dem Erfassen der physiologischen Daten wird zeitsynchron eine Videoaufzeichnung erstellt, deren Start- und Endpunkt ident sein muss, um die Daten im Anschluss synchronisieren zu können. Die Captiv-Software ermöglicht nicht nur das Einlesen eines einzelnen Videobildes, sondern gegebenenfalls auch mehrerer Videosequenzen (wenn notwendig auch die Messdaten von bis zu 12 Sensoren). Alle Bilder und Messwerte lassen sich beliebig einander zuordnen und

synchron darstellen, so dass der Nutzer in Echtzeit beliebige Messpunkte oder Videosequenzen ansteuern und nach Vakanz auswerten kann.

Aus den bestehenden Video- und Messreihen sind die relevanten Daten zur Bearbeitung zu extrahieren. Die Intervalle bzw. Zeitpunkte der Datenauswertung sollten an den Punkten der größten zu erwartenden Belastung erfolgen. Neben einer Langzeitauswertung über einen vollständigen Bewegungszyklus bietet sich auch eine schwerpunktmäßige Auswertung an.

Am Ende stehen mehrere Möglichkeiten zur Darstellung der benötigten Ergebnisse zur Verfügung (Grafiken, Tortendiagramme, Tabellen usw.). Für Statistiken und wissenschaftliches Arbeiten können die raw data (Rohdaten) auch als csv-files in der ursprünglich gemessenen Frequenz von 64 oder 32 Hz exportiert werden.

Elektrodenplatzierung

Die Elektroden wurden bilateral positioniert, in Übereinstimmung mit den SENIAM-Empfehlungen und früheren Studien mit standardmäßigem Elektrodenabstand von zwei Zentimetern zwischen den Elektroden (Hermens & Frekis 1999; Gao et al. 2020; Larochelle et al., 2009).

Folgende Abbildung zeigt die von der Literatur vorgegebene Platzierung der Elektroden:

Dorsale Ansicht

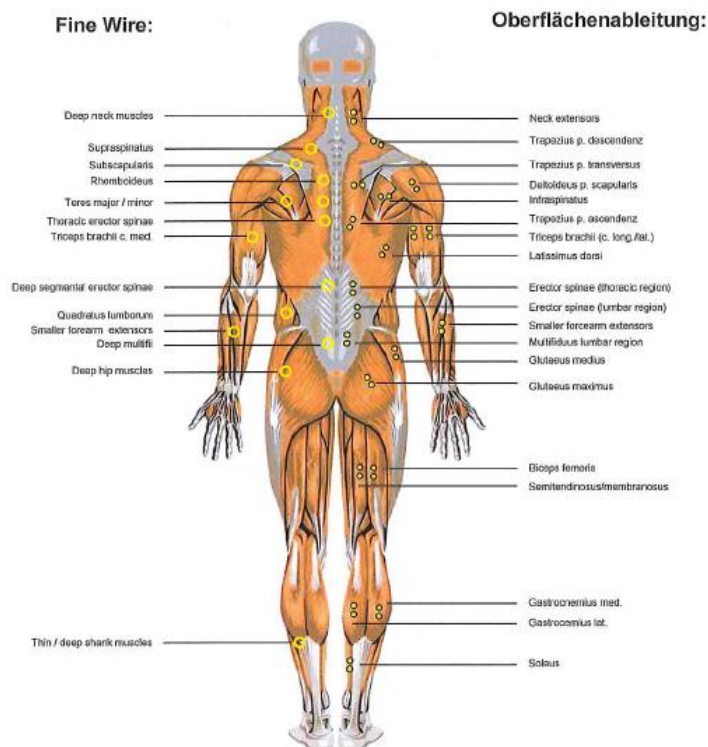


Abb. 28: Anatomische Positionen ausgewählter Elektrodenmesspunkte – Rückansicht. Die linken Messpunkte zeigen tiefliegende Muskeln und Positionen für Feinkabelableitungen an, auf der rechten Seite Oberflächenmuskeln und Messpunkte.

Die Haut wurde vorweg gereinigt und desinfiziert. Die Elektroden wurden in Faserrichtung angebracht.



Abbildung: bilaterale Elektrodenplatzierung über den m. erector spinae

4.3.3 Ablauf

Zuerst wurde der Versuchsaufbau festgelegt und die Reihenfolge der Durchführung definiert.

Bei ihrer Ankunft erhielten Studienteilnehmer Informationen zum Studienablauf. Vor dem Experiment wurden der Versuchsperson wie oben beschriebene Sensorik zur Messung der Muskelaktivitäten, Bewegungstrajektorien und Segmentbeschleunigungen angelegt und diese anschließend auf die jeweilige Versuchsperson geeicht. Diese Messinstrumente blieben während der Durchgänge der an der Testperson angebracht.

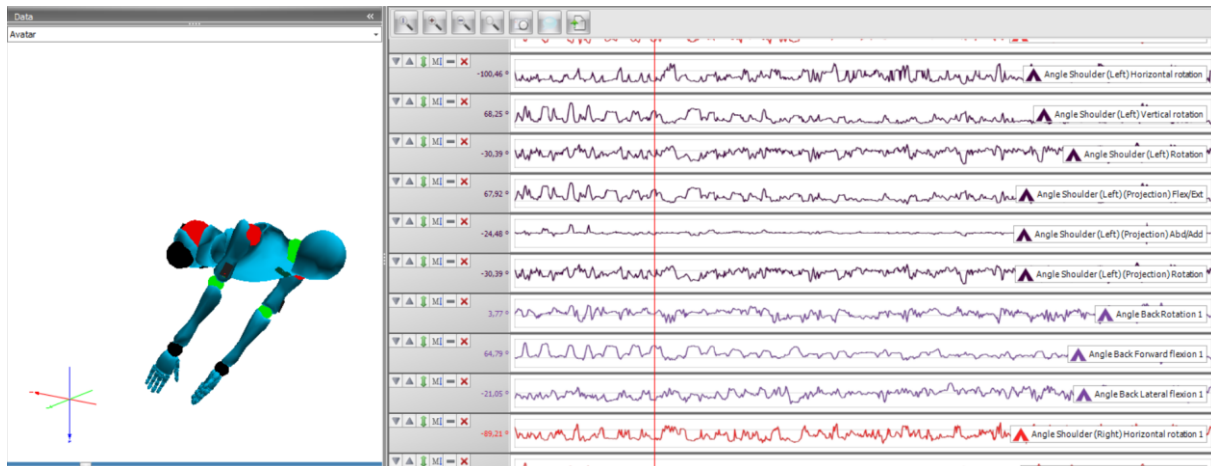
Wie beschrieben musste eine Mauer mit 6 Reihen mit jeweils 4 Ziegeln pro Reihe aufgemauert werden. Begonnen wurde jeweils ohne Exoskelett, nach dem ersten Durchgang hatte der Proband Pause, um sich zu erholen, die Sensorik wurde überprüft, das Exoskelett angelegt, und dann der 2. Durchgang absolviert.



Entnahme des Ziegels mit Exoskelett von der untersten Reihe

4.3.4 Analyseverfahren

Nach den Messungen wurden die Daten in die Captiv-Software eingelesen und mit den eingespielten Videos synchronisiert. Mittels Avatar konnten erste Grenzwertüberschreitungen veranschaulicht gemacht werden. Die Rohdaten der Beschleunigungssensoren wurden jedoch weiter als csv-files exportiert und in einem Statistikprogramm weiter interpretiert.



Ausschnitt aus der Captiv-Software – Avatar und farblich markierte Belastungsgrenzwerte

Die Roh-EMG Daten konnten bereits mithilfe der Software Captiv Motion gleichgerichtet werden. Die gleichgerichteten Datensätze wurden in MATLAB [The Mathworks, Natick, USA] eingelesen und zu Beginn erfolgte eine Sichtprüfung der EMG-Daten, um eventuelle fehlerhafte Daten gleich von Anfang an ausschließen zu können. Die Daten wurden mittels Root Mean Square (RMS) geglättet, dieser gilt derzeit als standardmäßig empfohlener Glättungsalgorithmus für EMG-Signale.

Für die Datenauswertung in MATLAB wurden folgende drei Auswertekriterien festgelegt: Mittlere Amplitude, Integral, Maximale Amplitude. Anhand dieser drei Parameter wurden die EMG-Daten von allen Testpersonen und allen Muskeln ausgewertet und verglichen.

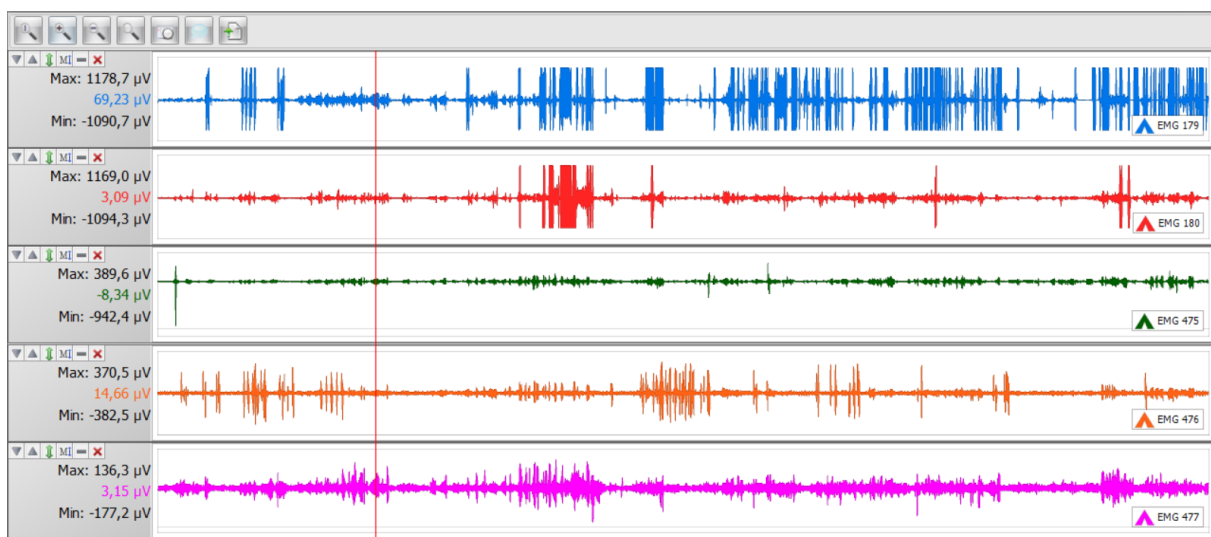


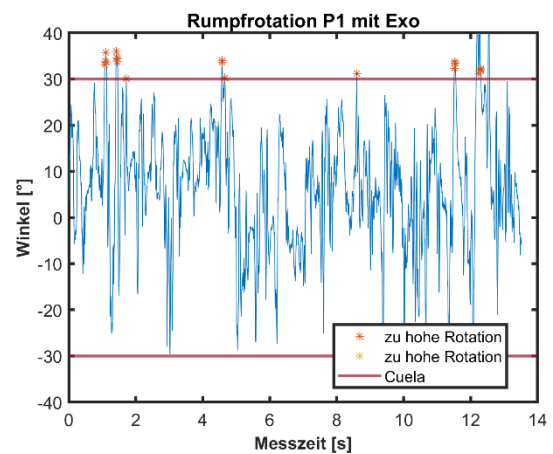
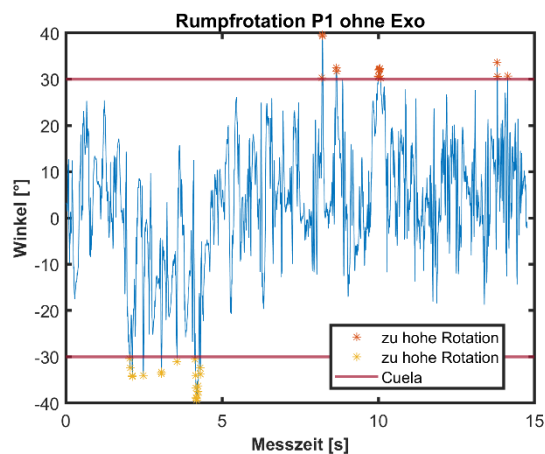
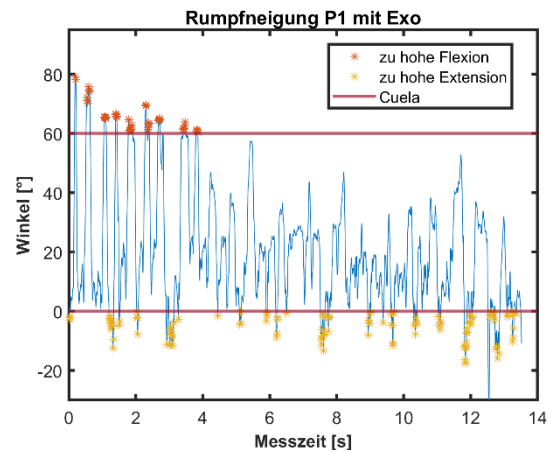
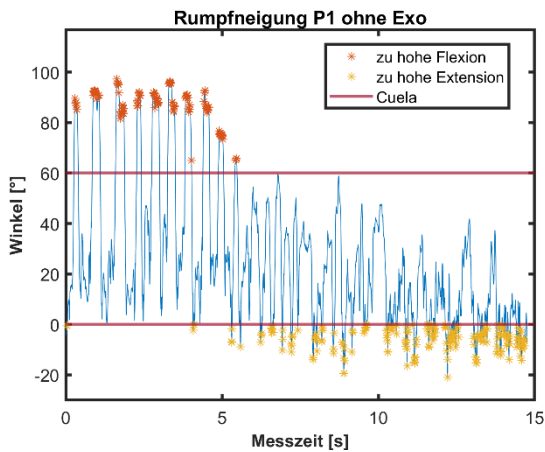
Abbildung: Ausschnitt aus der Captiv-Software – EMG-Rohdaten

4.3.5 Ergebnisse aus der Muskelaktivitätsmessung

Die Auswertung dieser Messungen besteht einerseits aus Daten zur Haltung und andererseits aus Messungen zur Muskelaktivität „Elektromyographie“. Zum Verständnis der analysierten Daten, werden in Anhang 1 die Auswerteschritte der Daten von Proband 1 erklärt.

Proband 1

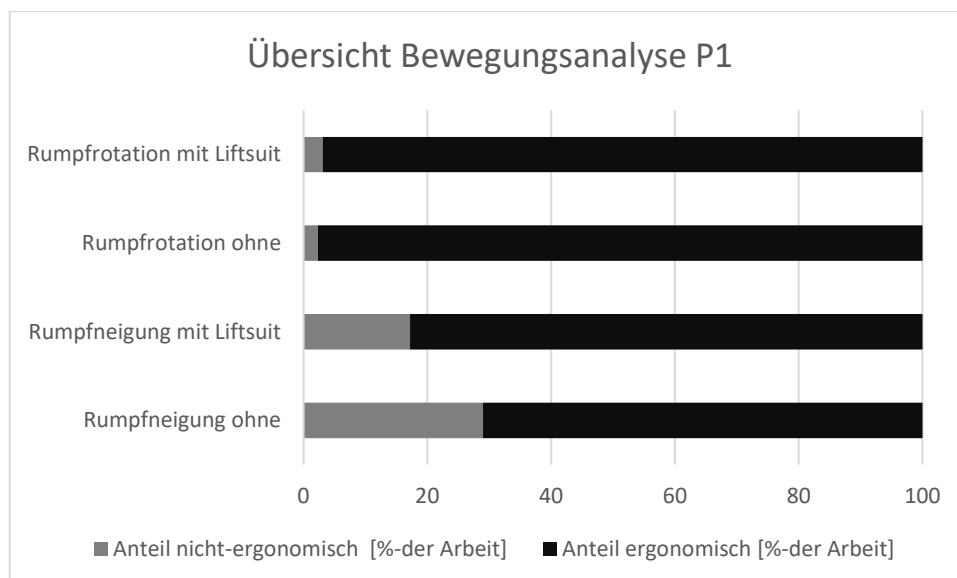
Die folgenden Graphen zeigen die Haltung des Arbeiters während der Arbeitsschritte im Detail. Dabei geben die roten Linien den Bereich der ergonomisch ist an („Cuela-Winkel“). Jedes Mal, wenn sich der Arbeiter außerhalb des Bereichs befunden hat, wurde gezählt. Zusätzlich sind die Spitzenwerte der Fehlhaltungen als farbiges Sternchen (*) direkt im Diagramm gekennzeichnet.



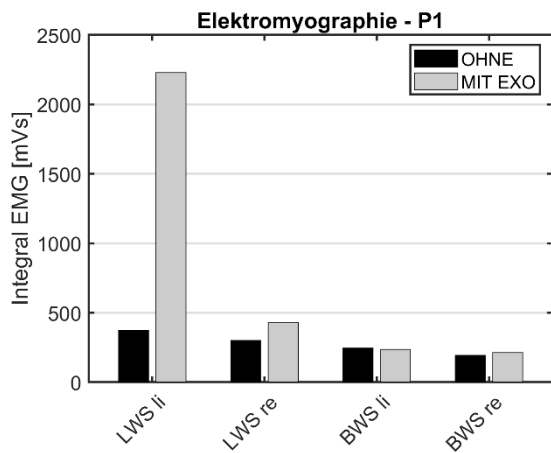
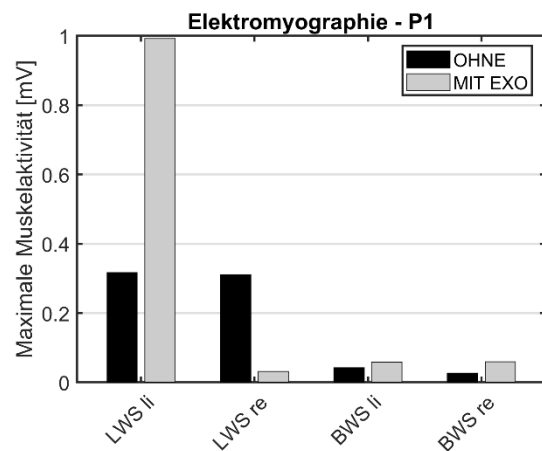
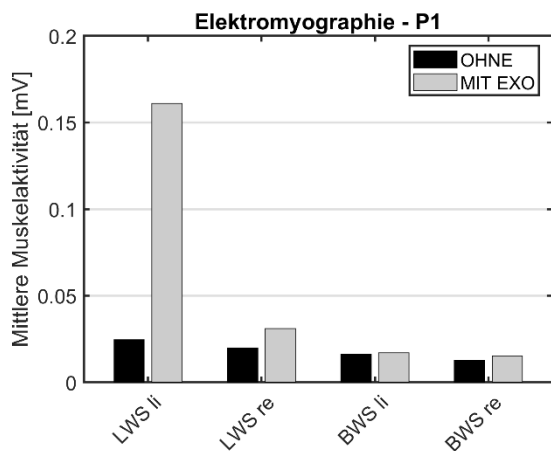
Die folgende Tabelle zeigt übersichtlich die einzelnen Bewegungen/Haltungen des Arbeiters. Dabei ist jeweils angeführt wie oft (prozentuell) er sich im nicht- bzw. im ergonomischen Bereich befunden hat. Dieser Arbeitsplatz zeigt im Bereich der Rumpfneigung, also der Vorbeugung des Oberkörpers, eine erhöhte Belastung (29% nicht-ergonomisch) für den Arbeiter.

Bewegung	Anteil nicht-ergonomisch [%-der Arbeit]	Anteil ergonomisch [%-der Arbeit]
Rumpfneigung ohne	29	71
Rumpfneigung mit Liftsuit	17,2	82,8
Rumpfrotation ohne	2,3	97,7
Rumpfrotation mit Liftsuit	3,1	96,9

Das folgende Diagramm zeigt nochmals graphisch vorherige Tabelle. Dabei sieht man deutlich, dass der Liftsuit in der Rumpfrotation keine Verbesserung der Haltung brachte, aber die nicht-ergonomischen Anteile der Rumpfneigung von 29 auf 17,2% reduzieren konnte.

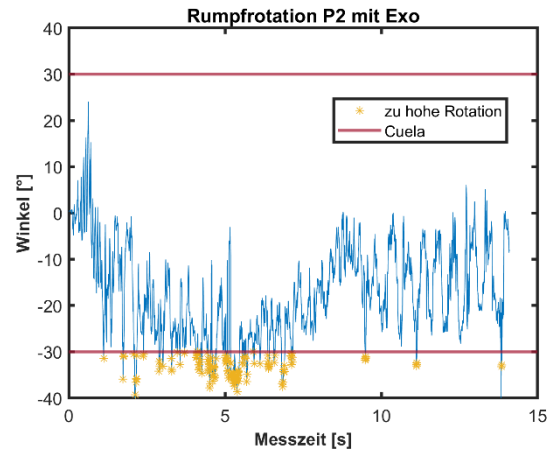
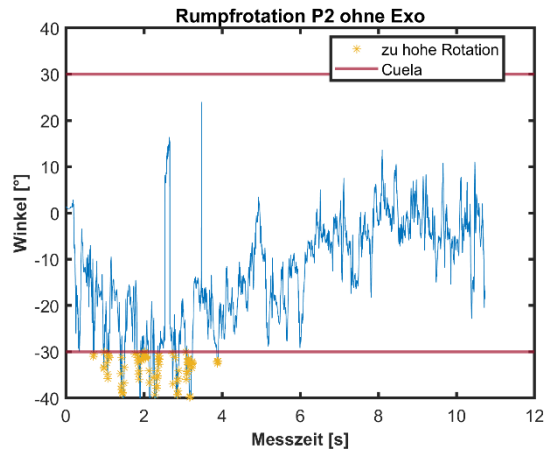
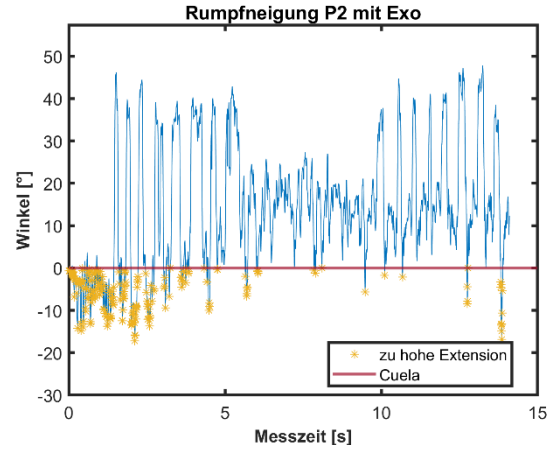
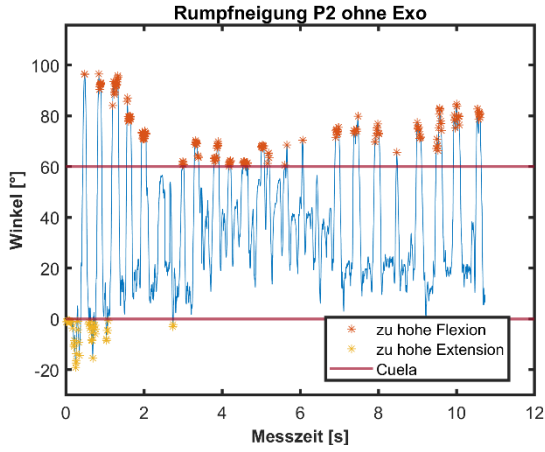


Die folgenden Diagramme zeigen die Messungen der sogenannten Elektromyographie (kurz: EMG) auf. Hierbei ist links die mittlere Muskelaktivität dargestellt und rechts der Maximalwert. Die mittlere Muskelaktivität zeigt an wie im Durchschnitt des Arbeitsschrittes der Muskel gearbeitet hat. Der Maximalwert ist der größte Signalwert der Messung. Darunter wird noch das Integral EMG angegeben. Das Integral EMG hat eine besonders starke Aussagekraft, da es die Amplitude (wie stark war der Muskel aktiv) und die Zeit (wie lange war der Muskel aktiv) in einem Messparameter zusammenfasst und gibt somit einen guten Überblick über Stärke und Länge der Muskelaktivierung.

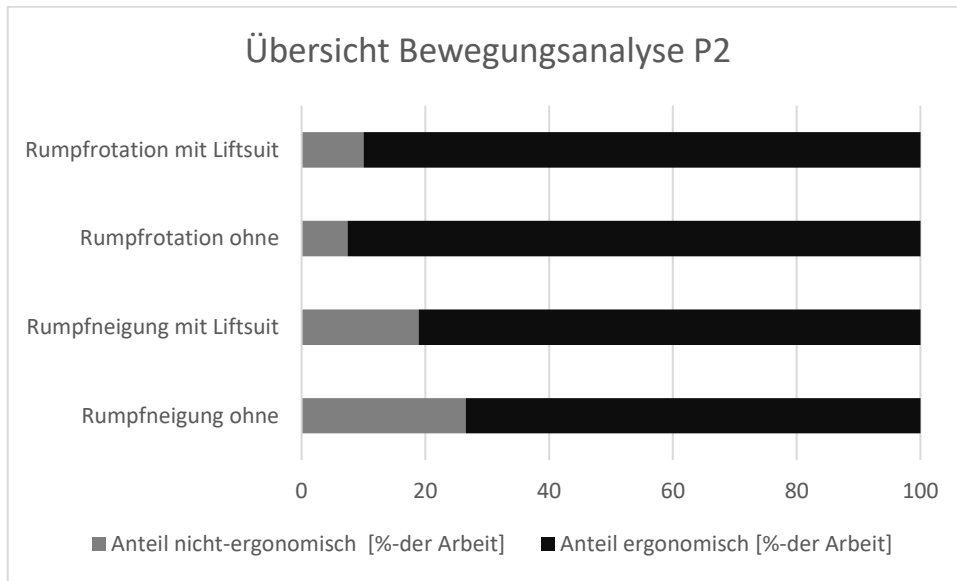


Die EMG-Werte von P1 sind alle in einem sehr kleinen Bereich (das sagt nichts über die tatsächliche körperliche Stärke eines Probanden aus, sondern nur wie aktiv der Muskel war). An der Lendenwirbelsäule (LWS) ist sowohl in der mittleren Muskelaktivität als auch im Integral durch das Exoskelett kein Vorteil zu erkennen. Die Aktivität ist in diesem Bereich stark erhöht und auch der Maximalwert auf der linken Seite mit 1mV sehr hoch. Das spricht dafür, dass der Proband teilweise in diesem Bereich gegen das Exoskelett gearbeitet hat, anstatt mit dem Exoskelett zu arbeiten. An der Brustwirbelsäule (BWS) ist kein Trend zu erkennen.

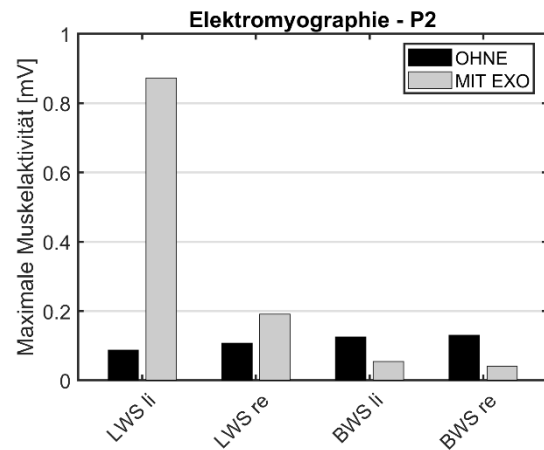
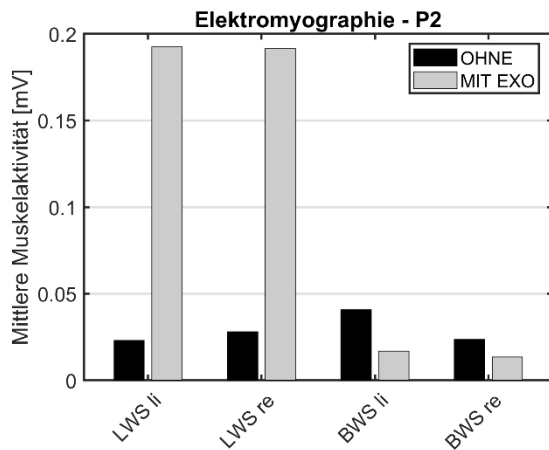
Proband 2

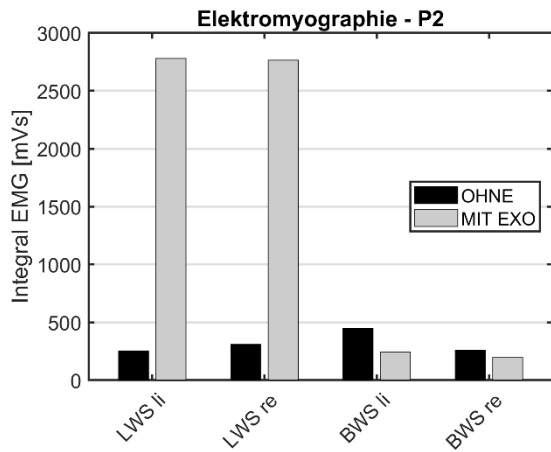


Bewegung	Anteil nicht-ergonomisch [%-der Arbeit]	Anteil ergonomisch [%-der Arbeit]
Rumpfneigung ohne	26,5	73,5
Rumpfneigung mit Liftsuit	18,9	81,1
Rumpfrotation ohne	7,4	92,6
Rumpfrotation mit Liftsuit	10	90



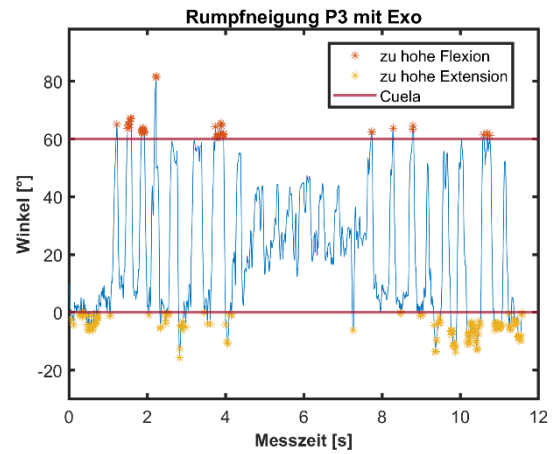
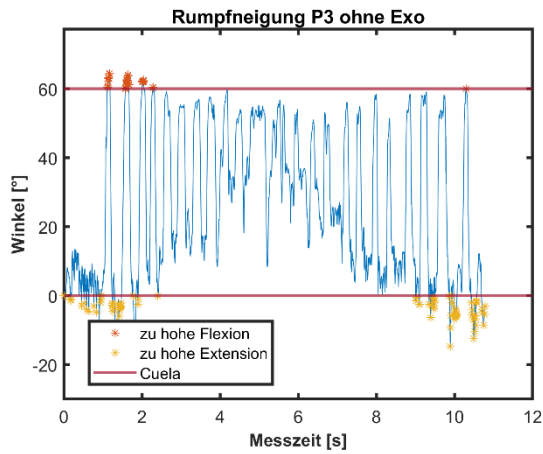
Die Daten der Bewegungsanalyse sind ähnlich zu Probanden 1 auch hier ist in der Rumpfneigung Verbesserung durch den Liftsuit gegeben. Die Werte ähneln sehr dem ersten Probanden und es ist eine Verbesserung von 26,5 auf 18,9% nicht-ergonomischer Anteile in der Rumpfneigung zu beobachten. Die Rumpfrotation ist ebenfalls wieder (vergleiche Proband 1) sowohl mit als auch ohne Liftsuit annähernd gleich.

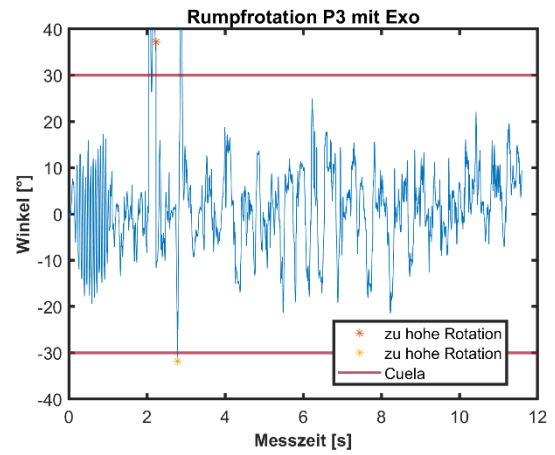
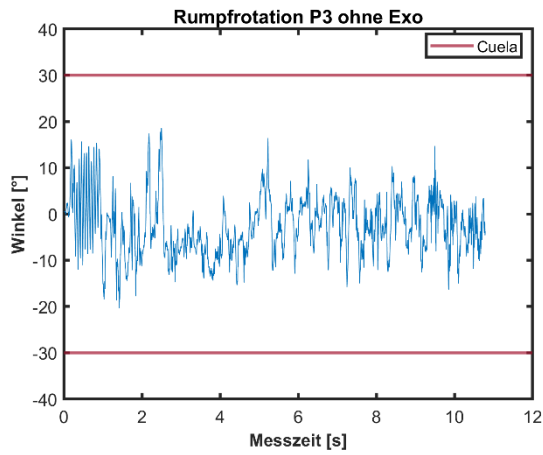




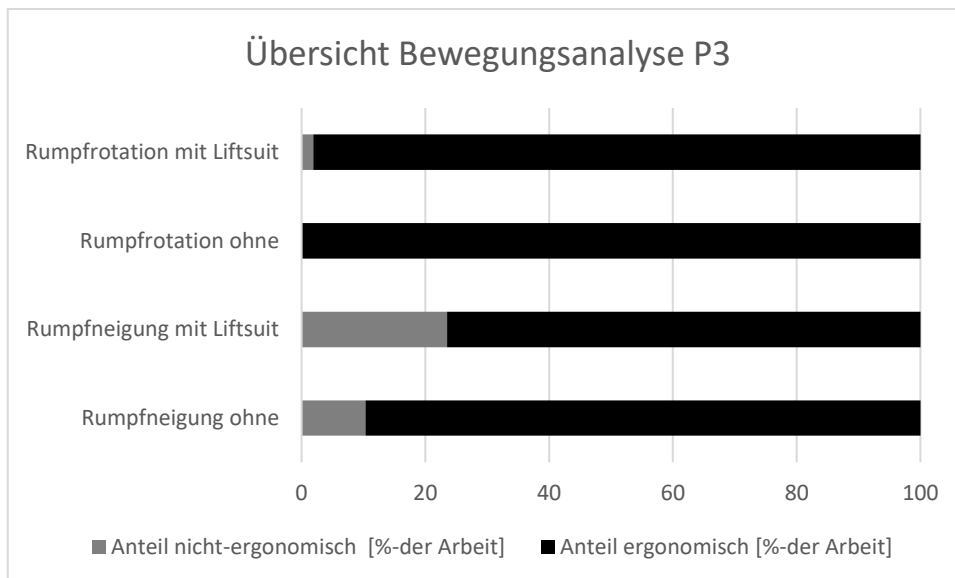
Sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite der Lendenwirbelsäule war während dieser Messung eine deutliche erhöhte Muskelaktivität mit, im Vergleich zu ohne, Exoskelett zu detektieren. Im Bereich der Brustwirbelsäule brachte der Liftsuit durchaus eine Verbesserung in allen ausgewerteten Parametern, wenn auch im eher kleinen Bereich.

Proband 3



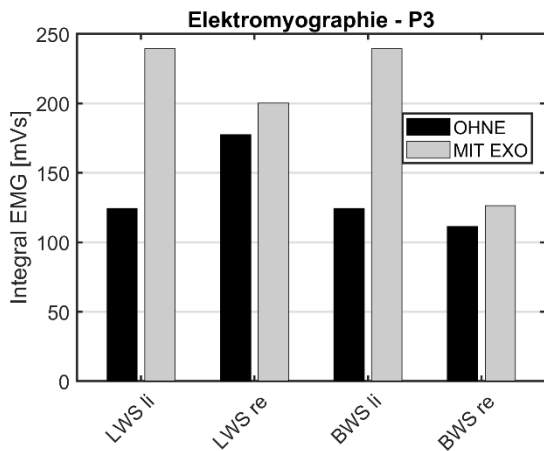
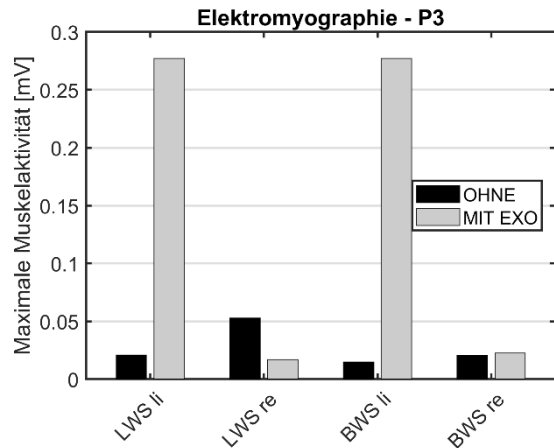
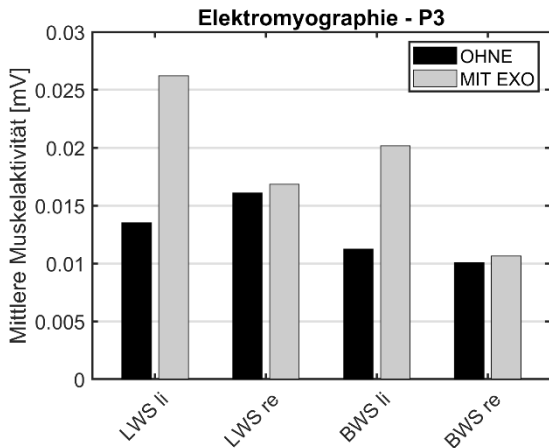


Bewegung	Anteil nicht-ergonomisch [%-der Arbeit]	Anteil ergonomisch [%-der Arbeit]
Rumpfneigung ohne	10,3	89,7
Rumpfneigung mit Liftsuit	23,5	76,5
Rumpfrotation ohne	0	100
Rumpfrotation mit Liftsuit	1,9	98,1



Proband 3 zeigt ein anderes Verhalten als Proband 1 und 2 hier wurde die Rumpffneigung nicht durch Einsatz des Liftsuits verbessert. Die Daten zeigen über doppelt so viele nicht-ergonomische Haltungen mit dem Exoskelett (23,5%) als ohne (10,3%).

In der Rumpfrotation wurde ohne Liftsuit der Idealwert von 100% ergonomischer Haltungen erreicht, daher bringt für diese Bewegung das Exoskelett keinerlei ergonomischen Vorteil.



In den zusammenfassenden Werten des Mittelwerts und des Integrals ist im Bereich der Lendenwirbelsäule wieder eine erhöhte Aktivität mit Liftsuit zu erkennen. Im Besonderen auf der linken Seite. Dort ist auch im Brustwirbelsäulenbereich eine deutlich erhöhte Aktivität zu erkennen, während es auf der rechten Seite annähernd zu einer gleichen Aktivität kommt.

4.3.6 Diskussion

Das Ziel des Liftsuits die Haltungen zu verbessern kann nur im Bereich der Rumpfneigung für Probanden 1 und 2 bestätigt werden, Proband 3 zeigte sogar eine Verschlechterung. Die Rumpfrotation wurde durch den Einsatz des Exoskeletts bei keinem der drei Probanden verbessert. Hier waren sowohl mit als auch ohne Liftsuit die Haltungen allesamt in einem passenden Bereich.

Die Daten zeigten bei allen Probanden im Bereich der Lendenwirbelsäule eine erhöhte Muskelaktivität beim Tragen des Exoskeletts, obwohl das Ziel ja wäre die Muskelaktivität zu minimieren. Das EMG-Integral, das Auskunft über Länge und Stärke der Anspannung gibt war bei allen drei Probanden mit Liftsuit erhöht. Besonders auf der linken Seite war der Einfluss drastisch. Dies spricht dafür, dass womöglich Kräfte auf den Lendenwirbelsäulenbereich umgeleitet wurden oder die Muskeln der Probanden aktiv gegen anstatt mit dem Exoskelett gearbeitet haben.

Eine Verbesserung sowohl bei der Haltung als auch der Muskelaktivität wurde durch diese Messungen nicht aufgezeigt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich um eine sogenannte „Pilot-Studie“ handelt, dh. um wissenschaftlich fundiertere Aussagen treffen zu können, wären weitere Messungen mit verschiedenen Probanden anzudenken.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Je nach Tätigkeit haben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse gezeigt. Bei richtigem Einsatz können die Exoskelette gute Unterstützungsmöglichkeiten und Entlastungen bieten. Am Bau ist aber durch die teilweise sehr kurzen und unterschiedlichen Tätigkeiten und Körperhaltungen die Unterstützungsdauer der betreffenden Bewegung oft zu gering um als Erleichterung wahrgenommen zu werden.

Es sind Anpassungen an den Exoskeletten notwendig, um die sehr speziellen Anforderungen auf den Baustellen gerecht zu werden (Winterjacke bei kalten Temperaturen, Befestigung Nageltasche, Tasche für Bleistift und Maßstab wird bedeckt).

6. Handlungsempfehlungen

- Es müssen unbedingt gesonderte, auf die Tätigkeiten abgestimmte, Tests durchgeführt werden, um die Exoskelette richtig einzusetzen.
- Die Exoskelette müssen auf den Nutzer genau angepasst sein, um die volle Unterstützung und Usability zu gewährleisten.
- Diverse Anpassung für den Bau ist an den Exoskeletten notwendig (Befestigung Nageltasche, Nutzbarkeit der Taschen für den Maßstab, usw.)
- Aufgrund der veränderten Bewegungsfreiheit und ev. vorstehenden Teilen bei manchen Exoskeletten muss im Zuge der Sicherheitsevaluierung geprüft werden, ob die Nutzer nicht zusätzlichen Gefahren ausgesetzt sind.
- Es muss immer vorab geprüft werden, ob der Arbeitsplatz nicht so angepasst oder die Bewegungsabläufe der Person nicht so optimiert werden können, damit ein Exoskelett nicht notwendig ist.

Anhang 1

Eine EMG-Datenanalyse besteht im Prinzip aus vier Schritten (siehe folgende Abbildung).

Einlesen von Rohdaten

Wie im ersten Bild in blau zu sehen, ist ein EMG-Signal ein sogenanntes „stochastisches Signal“ und es ist ähnlich einem Rauschen, durch das ständige Schwanken, nicht direkt auswertbar.

Gleichrichten der Daten

Negative Anteile werden „nach oben geklappt“ und so zum Filtern vorbereitet.

Digitales Filtern

Durch digitale Filtermethoden wird aus dem nicht-auswertbaren Signal eine kontinuierliche Linie die mit gängiger Mathematik (Mittelwerte, Integral etc.) ausgewertet werden kann.

Statistische Auswertung

