

White Paper Wie Exoskelette Unterstützung bieten

auxivo.com



Einleitung

Willkommen zum Auxivo White Paper zum Thema Exoskelett-Unterstützung. In diesem Whitepaper werden die wichtigsten mechanischen und biomechanischen Prinzipien der Funktionsweise tragbarer Exoskelette und deren Unterstützung für ihre Nutzer erläutert.

Exoskelette sind Geräte, die von menschlichen Nutzern getragen werden, um sie körperlich zu unterstützen. Sie werden heute in der Medizin eingesetzt, z. B. zur Unterstützung von Menschen mit Mobilitätseinschränkungen, und in der Arbeitswelt, wo sie Arbeiter und Arbeiterinnen unterstützen, in dem sie die Arbeitslast reduzieren, um Erschöpfung und Verletzungen durch Überlastung zu vermeiden.

Unser Ziel mit diesem White Paper ist es, der Leserschaft die notwendigen Informationen zu liefern, um zu verstehen, wie die Interaktion zwischen Mensch und Exoskelett funktioniert und wie Exoskelette die physische Belastung für den menschlichen Körper reduzieren können. Es behandelt gängige Konzepte der Exoskelettunterstützung auf einer konzeptionellen Ebene, um einen guten Überblick zu bieten. Technische und wissenschaftliche Details werden nur dort ergänzt, wo es für das Verständnis notwendig ist.

Als potenzieller Nutzer eines Exoskeletts möchten wir Ihnen die Informationen an die Hand geben, die Sie benötigen, um die Möglichkeiten und Grenzen von Exoskeletten zu verstehen und eine fundierte, sachliche Entscheidung zu treffen, ob Exoskelette die richtige Wahl für Sie sind.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß bei der Lektüre!
Bitte kontaktieren Sie uns, wenn Sie weitere Fragen haben.

Das Auxivo Team

Das Dokument ist in drei Abschnitte gegliedert

Abschnitt 1

In Abschnitt 1 werden die wichtigsten mechanischen und biomechanischen Prinzipien vorgestellt, die für das Verständnis der Funktionsweise von Exoskeletten erforderlich sind.

Abschnitt 2

In Abschnitt 2 werden die Mechanismen und Konzepte erörtert, wie tragbare Exoskelette ihre Benutzer unterstützen.

Abschnitt 3

Abschnitt 3 befasst sich mit einigen der gängigsten Missverständnisse im Zusammenhang mit der Funktion von Exoskeletten und baut dabei auf den in den Abschnitten 1 und 2 vorgestellten Informationen und Konzepten auf.

Abschnitt 1

Wichtige (bio)mechanische Grundlagen

Bevor wir diskutieren, wie Exoskelette Unterstützung bieten, müssen wir einige wichtige mechanische und biomechanische Prinzipien einführen. Dies wird uns helfen zu verstehen, wie körperliche Arbeit den menschlichen Körper belastet und wie ein mechanisches System dazu beitragen kann, diese Belastung zu reduzieren. Wenn wir diese Grundlagen verstanden haben, wird es leicht sein, die Entlastungsmechanismen von Exoskeletten zu verstehen, da sie auf diesen Prinzipien beruhen.

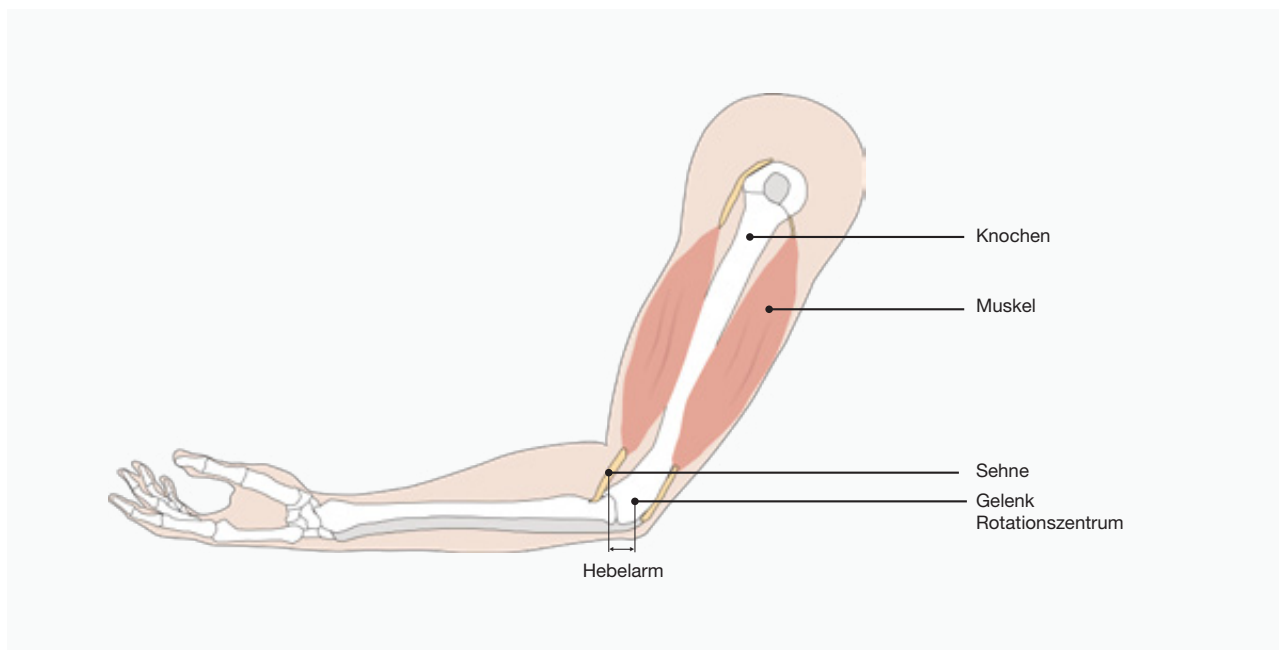
Der menschliche Bewegungsapparat

Lassen Sie uns zunächst kurz zusammenfassen, wie der menschliche Körper Gegenstände bewegen, halten und heben kann, indem wir uns den menschlichen Bewegungsapparat ansehen.

Die Knochen unseres (Endo-)Skeletts sind durch Gelenke verbunden, welche die Bewegung ermöglichen. Muskeln verbinden die verschiedenen Knochen über ein oder mehrere Gelenke durch Sehnen. Wenn sich die Muskeln zusammenziehen, üben sie eine Zugkraft auf die Knochen aus. Zwischen dem Muskelansatz und dem Drehpunkt des Gelenks liegt ein gewisser Abstand, den wir als Hebelarm bezeichnen. Aufgrund dieses Hebelarms führt die Muskelkraft zu einer Drehkraft (auch Drehmoment genannt) auf Gelenkebene, die bewirkt, dass sich die Knochen in einer Drehbewegung um das Gelenk bewegen.

Wenn eine externe Last (oder das Gewicht des menschlichen Körpers an sich) ein Drehmoment auf ein menschliches Gelenk ausübt, müssen die dazugehörigen Muskeln kontrahieren, um ein Gegendrehmoment um dieses Gelenk zu erzeugen. So kann der Mensch eine externe Last durch Muskelkraft halten oder bewegen. Menschliche Muskeln können nur eine Zugkraft erzeugen. Sie können nicht gegen einen Knochen drücken. Um eine Bewegung in zwei Richtungen zu erzeugen, brauchst du (mindestens) zwei Muskeln pro Gelenk, die der Kraft des jeweils anderen entgegenwirken können. Wir nennen einen Satz von gegenläufigen Muskeln Agonist und Antagonist.

Wenn man den Agonisten- und den Antagonistenmuskel eines Gelenks gleichzeitig aktiviert, wird das Gelenk sehr steif. Auf diese Weise verhindert man, dass es sich bewegt und schafft Stabilität. Dies wird auch als Ko-Kontraktion bezeichnet. Ko-Kontraktion kann auch genutzt werden, um eine Kette an Gelenken zu stabilisieren, wie zum Beispiel die Wirbelsäule. Im Alltag arbeiten zum Beispiel die Rücken- und Bauchmuskeln zusammen, um eine aufrechte Haltung zu erreichen.



Abschnitt 1

Wichtige (bio)mechanische Grundlagen

Hebelarme - Warum dieselbe Last unterschiedliche Belastungen auf den Körper ausübt

Wie viel Kraft die menschlichen Muskeln aufbringen müssen, um eine externe Last zu bewegen, hängt von mehreren Faktoren ab. Ein Aspekt ist die absolute Masse der externen Last. Es ist natürlich ein Unterschied, ob man 5 kg oder 20 kg hält. Aber es gibt noch einen weiteren Aspekt, den man verstehen sollte.

Die Art und Weise, wie man die Last hält und handhabt, kann die Belastung, die sie auf Ihren Körper ausübt, wesentlich stärker beeinflussen als die Masse der Last selbst. Stellen Sie sich vor (oder versuchen Sie es), eine Tasche mit einem Gewicht von 10 kg zu halten. Wenn Sie die Tasche an der Seite Ihres Körpers tragen, können Sie sie lange Zeit ohne große Anstrengung halten. Aber sobald Sie sie vor Ihren Körper heben, spüren Sie sofort, wie die Belastung in Ihrer Schulter zunimmt und haben schnell Mühe, sie in dieser Position zu halten.

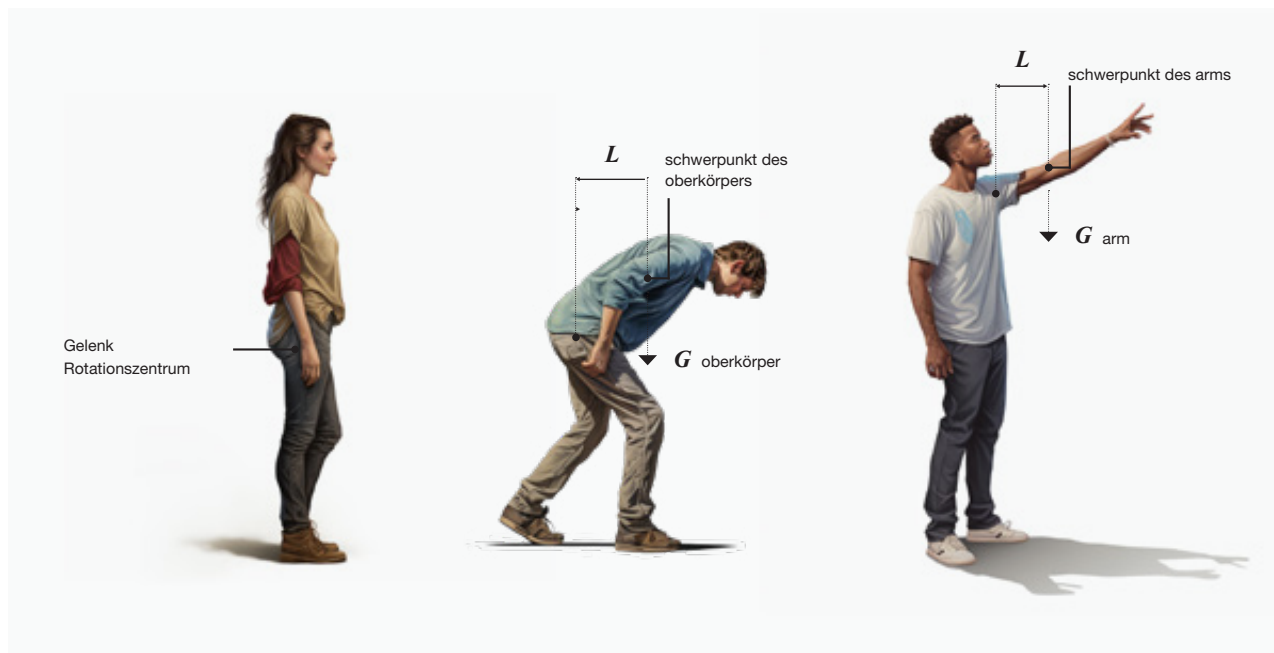
Der Grund für diesen Effekt ist, dass oft nicht die Kraft der kritische Aspekt ist, der die Hauptbelastung auf den Körper ausübt, sondern vielmehr das Drehmoment, das diese Kraft auf die Gelenke ausübt. Dieses Drehmoment ist die Kraft multipliziert mit dem horizontalen Abstand zwischen der Kraft und dem Drehpunkt des Gelenks (Hebelarm): $T = F \cdot L$, wobei T für das Drehmoment, F für die Kraft und L für den Hebelarm steht.

Folglich kann eine Vergrößerung des Hebelarms in horizontaler Richtung, indem Sie eine Last vor sich halten oder Ihren Körper nach vorne lehnen, das Gelenkdrehmoment schnell beträchtlich erhöhen, was dann zu einer Überlastung in den betroffenen Gelenken führen kann.



Die Wirkung des Hebelarms (d.h. des horizontalen Abstands zwischen dem menschlichen Gelenk und der externen Kraft) wird veranschaulicht. ◀Links: Die Person trägt eine Tasche an der Seite des Körpers. Die Tasche ist ungefähr horizontal mit dem Schultergelenk ausgerichtet. Daher verursacht das Gewicht der Tasche nur ein kleines Drehmoment im Schultergelenk, dem die Schultermuskeln entgegenwirken müssen. ▶Rechts: Die Person hält eine Tasche vor dem Körper. Dadurch ergibt sich ein beträchtlicher horizontaler Abstand (Hebelarm) zwischen dem Massenschwerpunkt der Tasche und der Drehachse des Schultergelenks, was zu einem höheren Drehmoment führt, das die Schultermuskeln ausgleichen müssen.

Abschnitt 1 Wichtige (bio)mechanische Grundlagen



Der Einfluss von Körpermasse und Körperhaltung im Gravitationsfeld auf die Gelenkbelastung

◀Links: Wenn sich der Körper in einer aufrechten Position befindet und die Arme senkrecht an der Seite hängen, ist die Belastung für Schulter, Rücken und Hüfte relativ gering. ▶Mitte: Wenn sich der Oberkörper mehr nach vorne lehnt, steigt die Belastung für Rücken und Hüfte.

▶Rechts: Wenn der Arm nach vorne gestreckt wird, hat der Massenschwerpunkt des Arms einen horizontalen Abstand zum Schultergelenk, was zu einem großen Hebelarm- und Schulterdrehmoment führt.

Schwerkraft und Masse des menschlichen Körpers

In direktem Zusammenhang mit dem vorangegangenen Abschnitt müssen wir die dominante Rolle hervorheben, die die Schwerkraft und die Masse des menschlichen Körpers spielen, wenn wir über Arbeitslast oder körperliche Belastung sprechen. Zwar spielen auch andere Aspekte eine Rolle, wie z.B. die dynamische Kraft, die durch Beschleunigungen und Bewegungen verursacht wird, aber die Schwerkraft ist unser größter Feind, wenn es um körperliche Belastung geht. Sie zieht alle Dinge permanent nach unten, inklusive aller Lasten, die wir tragen, und aller unserer Körperteile. Unsere Muskeln müssen ständig arbeiten, um dieser nach unten gerichteten Schwerkraft entgegenzuwirken.

Es ist dabei wichtig zu beachten, dass das oben beschriebene Hebelarmprinzip auch für die Masse und den Schwerpunkt unserer Körpersegmente gilt. Die Belastung, die auf unsere einzelnen Gelenke und Muskeln wirkt, hängt also stark von unserer Körperhaltung ab. Wenn wir gerade stehen, ist die Belastung für unsere Muskeln relativ gering. Sobald wir jedoch den Oberkörper nach vorne beugen oder die Arme heben, erhöht sich die Belastung der Gelenke erheblich und die Muskeln im Rücken oder in der Schulter müssen hart arbeiten, wie unten dargestellt.

Sehr oft ist die durch die eigene Körpermasse verursachte Belastung der Hauptfaktor für die Gesamtarbeitsbelastung. Um dies zu verdeutlichen, können wir uns unser obiges Beispiel des Vorwärtsbeugens noch einmal ansehen. Etwa 60 % des menschlichen Körpergewichts befinden sich typischerweise im Kopf, in den Armen und im Torso. Die Rücken- und Hüftmuskeln einer 80 kg schweren Person, die sich einfach nur nach vorne lehnt, müssen also bereits eine Last von etwa 50 kg stabilisieren. Das bedeutet, dass die Belastung des Körpers durch sein eigenes Gewicht oft höher ist als die zusätzliche Belastung durch das Heben eines 10 kg oder 15 kg schweren Gegenstandes. Aus diesem Grund kann die Verwendung eines Exoskeletts zur Kompensation des Körpergewichts die Belastung erheblich reduzieren.

Section 1 Important (Bio)mechanical Principles

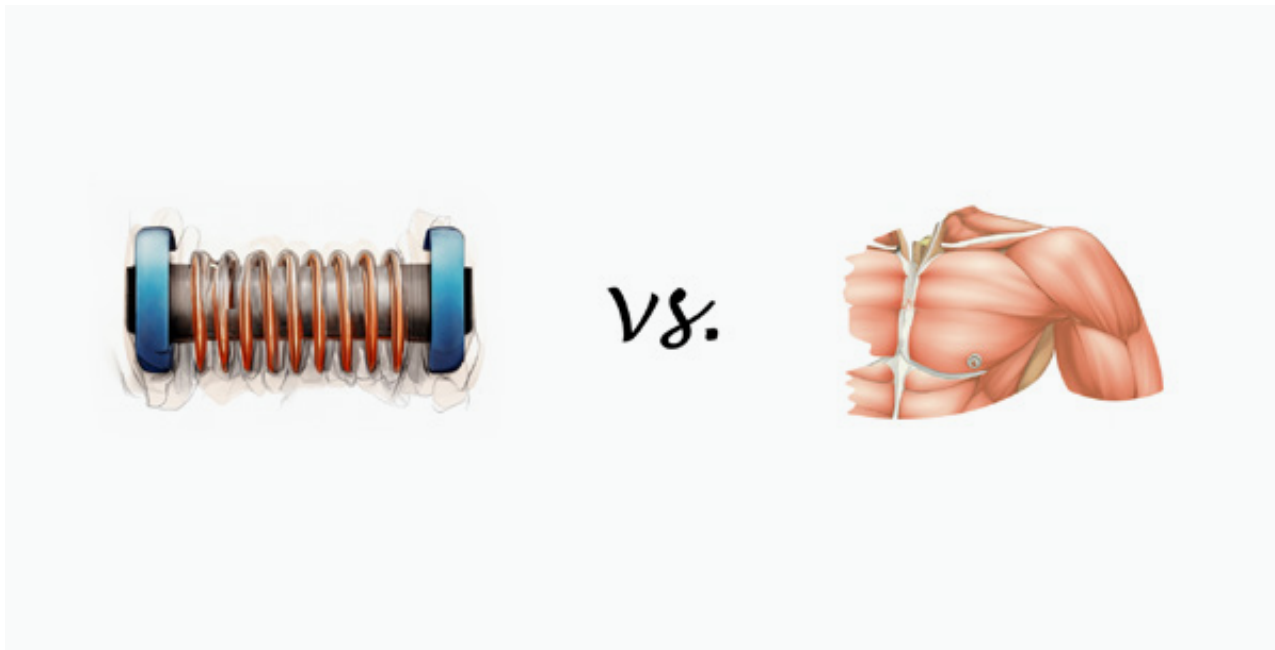
Wichtige Unterschiede zwischen technischer Mechanik und Biomechanik

Der menschliche Körper ist keine Maschine. Das mag zwar ziemlich offensichtlich klingen, aber es ist wichtig zu verstehen, was dies auf mechanischer und biomechanischer Ebene bedeutet. Obwohl viele Prinzipien der technischen Mechanik (die sich mit Kräften und Bewegungen in Maschinen befasst) und der Biomechanik (die sich mit Kräften und Bewegungen im menschlichen Körper befasst) ähnlich sind, gibt es auch Unterschiede. Wenn wir über Exoskelette sprechen, ist ein wichtiger Unterschied, wie menschliche Muskeln und mechanische Federn Kraft erzeugen.

Ein Muskel, der unter Spannung steht, unterscheidet sich aus energetischer Sicht sehr von einer mechanischen Feder, die unter Spannung steht. Das Dehnen einer mechanischen Feder erfordert Energie. Diese Energie wird freigesetzt, wenn die Feder entlastet wird. Während sie gedehnt wird, erzeugt die mechanische Feder permanent eine Kraft, ohne dass zusätzliche Energie benötigt wird. Diese Kraft kann zur Unterstützung einer Last entgegen der Schwerkraft verwendet werden.

Die menschlichen Muskeln hingegen erzeugen Kraft durch Kontraktion mit Hilfe von Proteinen, die chemische Energie in mechanische Energie umwandeln. Die Proteine im Muskel können ineinander gleiten, wodurch die Muskelfasern kürzer werden, was zu einer Zugkraft führt. Während der Muskel aktiv ist, benötigt er ständig Energie, die durch zelluläre Stoffwechselprozesse bereitgestellt wird. Dies kann zu einer Erschöpfung der Energiereserven, neuromuskulärer Ermüdung und anderen metabolischen und neuromuskulären Effekten führen, die Energie benötigen und die Fähigkeit des Muskels zur Kontraktion einschränken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine mechanische Feder, sobald sie ausgezogen ist, eine permanente Kraft ohne zusätzliche Energie erzeugen kann. Im Gegensatz dazu benötigt ein menschlicher Muskel eine konstante Energiezufuhr, um kontrahiert zu bleiben, was zu Ermüdung und Erschöpfung führt.



Es ist wichtig zu verstehen, dass mechanische Federn und menschliche Muskeln unterschiedlich Kraft erzeugen. Eine vorgespannte mechanische Feder benötigt keine Energie, um eine konstante Kraft zu erzeugen und kann eine Last unbegrenzt unterstützen. Im Gegensatz dazu benötigen die menschlichen Muskeln eine konstante Energiezufuhr und ermüden schnell.

Abschnitt 2

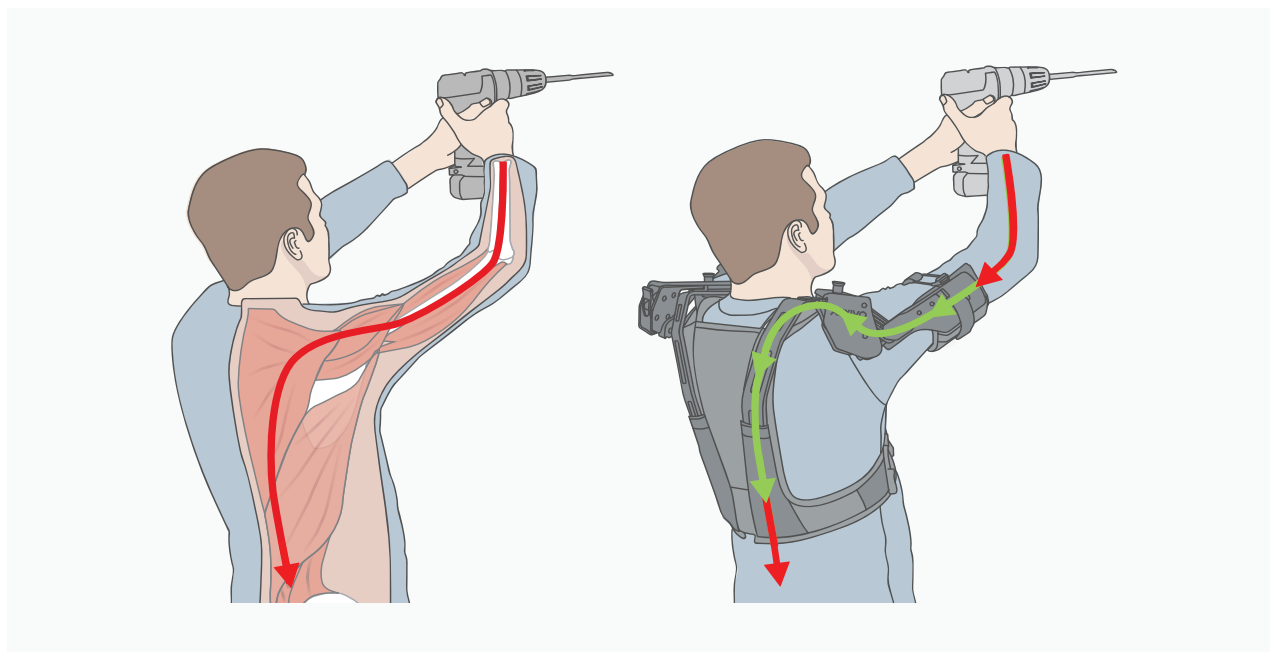
Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen

Nachdem wir nun die wichtigsten (bio)mechanischen Grundlagen behandelt haben, wollen wir nun untersuchen, wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen können. Die meisten Exoskelette kombinieren mehrere der folgenden Prinzipien, aber zum besseren Verständnis werden wir jedes separat besprechen.

Der Alternative Lastpfad

Dies ist ein vergleichsweise einfacher, aber effektiver Ansatz. Viele Exoskelette leiten die Last mechanisch um ein oder mehrere menschliche Gelenke herum. Für die Körperteile, die vom Exoskelett abgedeckt werden, wird die Last (oder ein Teil davon) vom Körper auf das Exoskelett übertragen. Die Last wird dann durch das Exoskelett geleitet und umgeht den Bewegungsapparat des Trägers. Am unteren Befestigungspunkt des Exoskeletts wird die Last wieder auf den Körper übertragen, wo sie auf den Boden übertragen wird, ähnlich dem Lastpfad ohne das Exoskelett.

Wenn Sie z.B. ein Gewicht von 5 kg in der Hand halten, wird diese Last durch Ihr Handgelenk, Ihren Ellbogen und Ihre Schulter, Ihre Wirbelsäule hinunter, durch die Hüfte in Ihre Beine, Knie und Knöchel und schließlich auf den Boden geleitet. Auf dem Weg dorthin belastet sie all diese Körperteile. Bei der Verwendung eines Schulterexoskeletts wie dem Auxivo DeltaSuit wird ein erheblicher Teil der Last direkt vom Oberarm auf den Rumpf übertragen und das vergleichsweise anfällige Schultergelenk umgangen.



Das Lastpfad-Prinzip wird anhand des Auxivo DeltaSuit veranschaulicht:

Der rote Pfeil zeigt den Weg der Last durch den Körper und der grüne Pfeil den Weg durch das Exoskelett. Die Verlagerung der Last auf das Exoskelett kann die Belastung der Muskeln, Sehnen und Gelenke entlang des umgangenen Abschnitts verringern.

Abschnitt 2

Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen

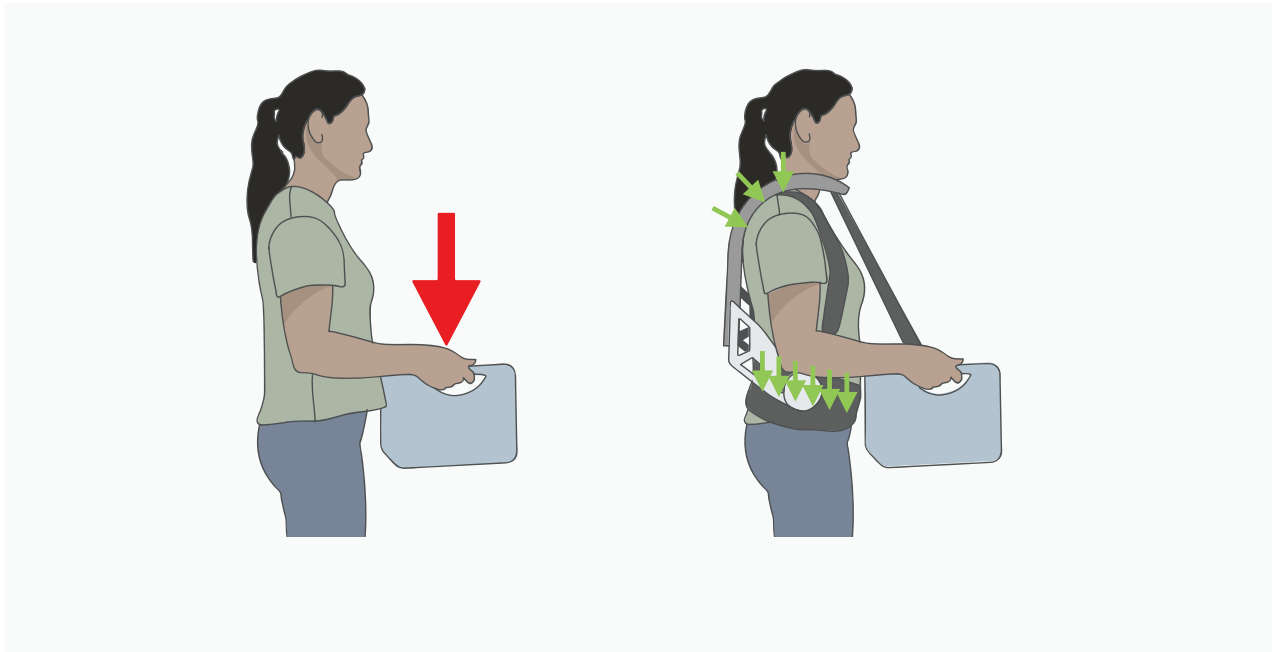


Illustration des Konzepts der Lastumverteilung.

◀Links: Die Last wird in den Händen getragen und wirkt von dort auf den Körper. ▶Rechts: Der CarrySuit verteilt die Lastbefestigung auf den gesamten Oberkörper und reduziert so lokale Belastungsspitzen.

Das Prinzip der Lastumverteilung

Wenn eine äußere Last lokal oder asymmetrisch auf Ihren Körper einwirkt, z.B. wenn Sie einen schweren Gegenstand mit einer Hand tragen, wird sie normalerweise nur einen Teil Ihres Körpers am stärksten belasten. Dies geschieht, weil die Last auf dem direktesten Weg durch Ihren Körper zum Boden geleitet wird. Das bedeutet auch, dass Sie ein hohes Risiko haben, bestimmte Gelenke lokal zu überlasten, während der Rest Ihres Körpers kaum von der Belastung betroffen ist.

Das können Exoskelette ändern, indem sie die Last umverteilen und gleichmäßiger auf größere Teile des Körpers und weg von den Körperteilen mit dem Risiko einer lokalen Überlastung verteilen. Ein Beispiel für ein Exoskelett mit Lastverteilung ist der Auxivo CarrySuit, der aus einem Rahmen um den Oberkörper besteht. Wenn eine Last daran befestigt wird, verteilt der Rahmen die Last automatisch gleichmäßiger auf den Körper des Benutzers und befestigt sie an Hüfte und Schulter auf beiden Körperseiten.

Die Anwendung dieses Prinzips bedeutet natürlich, dass das Exoskelett die Belastung anderer Körperteile, wie z.B. der Hüfte, erhöhen kann, was aus dem Zusammenhang gerissen vielleicht kontraproduktiv klingt. Es bedeutet aber auch, dass die Belastung gleichmäßiger über den Körper verteilt wird, wodurch lokale Belastungsspitzen vermieden werden, welche oft das Verletzungsrisiko erhöhen.

Abschnitt 2

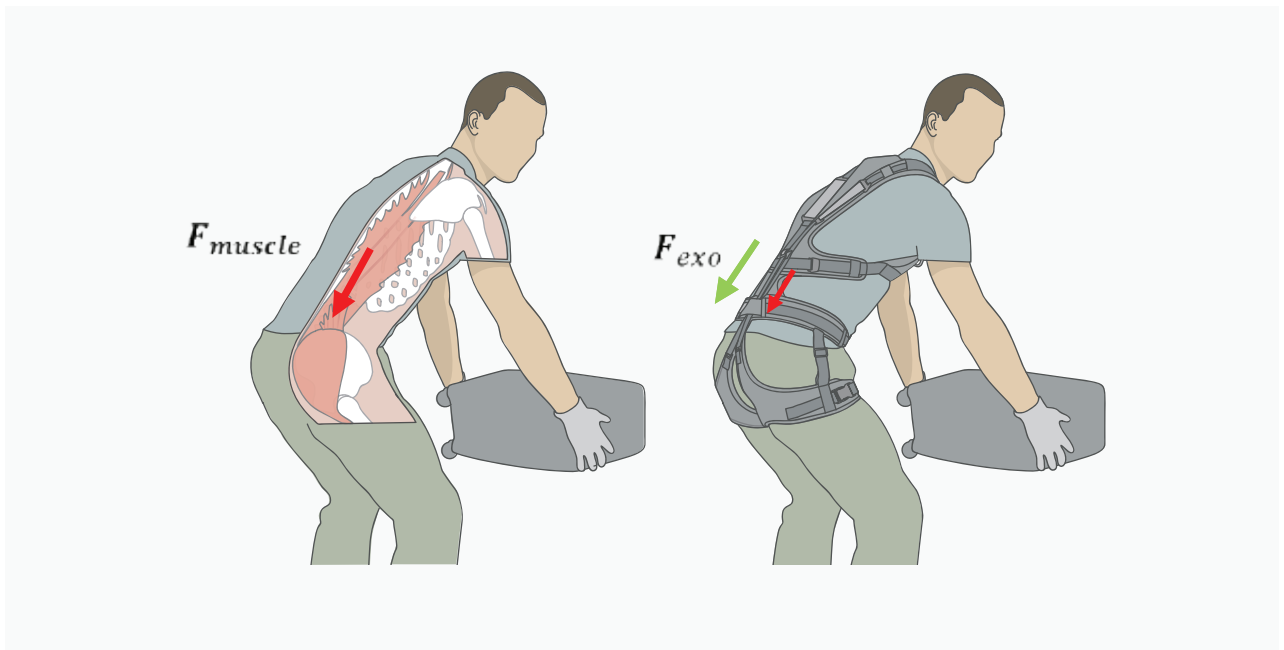
Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen

Unterstützung mit künstlichen Muskeln

Die Idee der künstlichen Muskelunterstützung ist einfach: Passive oder aktive Spannsysteme an der Außenseite des Körpers erzeugen eine unterstützende Kraft, die der von den menschlichen Muskeln erzeugten Kraft ähnelt. Exoskelette, die dieses Konzept verwenden, haben "künstliche Muskeln", die mit dem Körper verbunden sind, typischerweise über textile Schnittstellen, und die so angeordnet sind, dass sie eine Zugkraft parallel zum darunter liegenden menschlichen Muskel erzeugen und diesen dadurch entlasten. Diese künstlichen Muskeln können von einem Aktor angetrieben werden, der mit einem Kabel verbunden ist, oder durch Federn oder elastische Bänder realisiert werden, die sich während der Bewegung dehnen und eine mechanische Zugkraft erzeugen.

Dieses Konzept wird häufig von textilen Exoskeletten (auch als Exosuits bezeichnet) verwendet, da es ohne einen starren Rahmen auskommt. In diesem Fall sind die künstlichen Muskeln für die Stabilität auf das menschliche (Endo-)Skelett angewiesen.

Das Hauptziel der künstlichen Muskeln ist es, die Belastung der Muskeln und Sehnen des Benutzers zu verringern. Wenn die Muskeln des Benutzers weniger schwer arbeiten, ermüden sie langsamer. Wenn die Muskeln müde sind, wird es schwieriger, sie zu koordinieren. Wiederholte Belastung und Ermüdung sind Risikofaktoren für die Entwicklung von Muskel-Skelett-Erkrankungen. Die Hauptidee besteht also darin, die menschlichen Muskeln durch künstliche Muskeln zu unterstützen und die Ermüdung der Muskeln, die Erschöpfung, das Risiko von Verletzungen der Muskeln oder Sehnen und die Gesamtarbeitsbelastung zu verringern.



Illustration, wie die künstlichen Muskeln des Auxivo LiftSuit die Rückenmuskeln des Benutzers entlasten.

Wenn sich der Benutzer nach vorne lehnt, müssen die Rückenmuskeln kontrahieren und eine Kraft erzeugen, die den Körper in der nach vorne gelehnten Position hält. Mit dem Exoskelett an der Außenseite erzeugen die "künstlichen Muskeln" eine Kraft, die die darunter liegenden Rückenmuskeln direkt unterstützt und so die Muskelbelastung reduziert.

Abschnitt 2

Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen

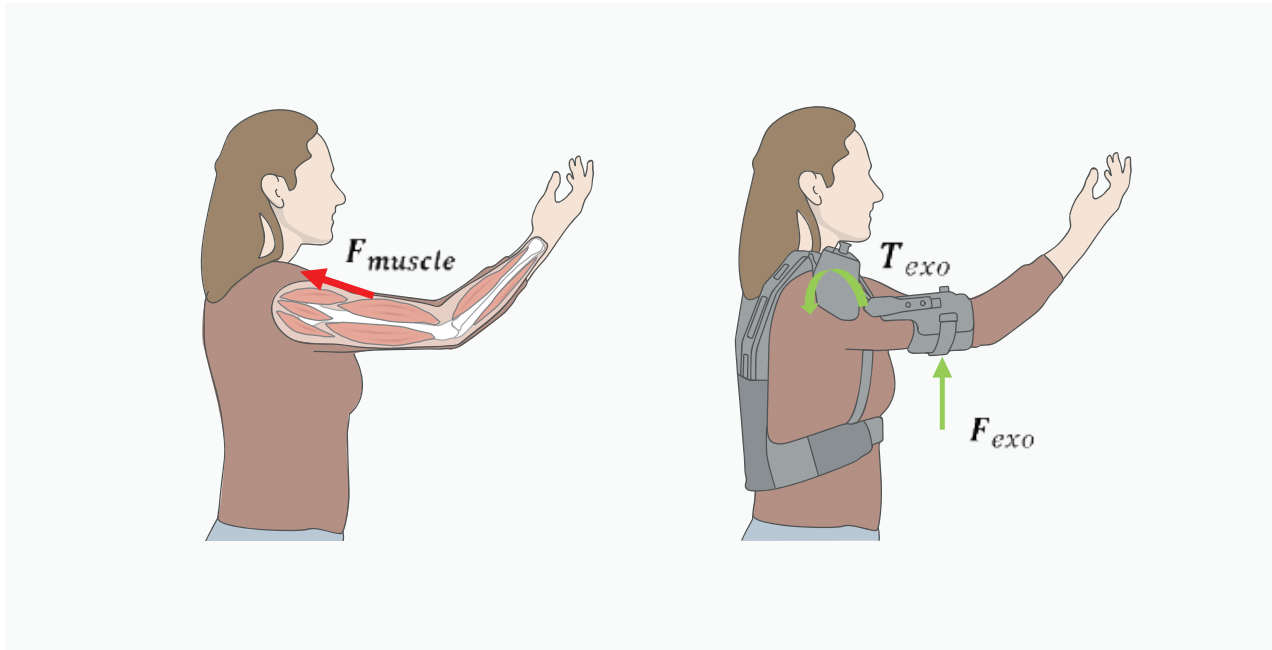


Illustration der Unterstützung durch das Exoskelett auf Gelenkebene.

◀Links: Wenn der Benutzer den Arm hebt, kontrahieren die entsprechenden Muskeln in der Schulter und erzeugen eine Zugkraft, die dann ein Drehmoment im Schultergelenk erzeugt, welches den Arm anhebt. ▶Rechts: Wenn das Gelenk vom Exoskelett unterstützt wird, erzeugt das Exoskelett ein Drehmoment am Gelenk, das eine nach oben gerichtete Kraft an der Schnittstelle zwischen Oberarm und Arm erzeugt, die das Anheben des Arms unterstützt.

Unterstützung des Gelenks mit einem Drehmoment

Eine weitere Möglichkeit, wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen können, ist die Erzeugung eines unterstützenden Drehmoments um ein bestimmtes Gelenk.

Exoskelette können auf unterschiedliche Weise ein Drehmoment auf ein Gelenk ausüben. Aktive Exoskelette beruhen in der Regel auf angetriebenen Aktuatoren und passive Exoskelette beruhen in der Regel auf Federn, die so angeordnet sind, dass sie ein Drehmoment auf Gelenkebene erzeugen. In beiden Fällen können sich die menschlichen Muskeln bis zu einem gewissen Grad entspannen, da zumindest ein Teil des erforderlichen Gelenkdrehmoments, z.B. zum Anheben des Arms, vom Exoskelett bereitgestellt wird.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass sie die Kompression der Gelenke verringern und möglicherweise Gelenkschäden wie Arthrose verhindern kann. Der Grund dafür ist, dass die Unterstützung der Gelenke auch zu einer Verringerung der Muskelkraft führt, ähnlich wie bei künstlichen Muskeln. Im Gegensatz zu einem künstlichen Muskel wird jedoch nicht eine Zugkraft einfach durch eine andere Zugkraft ersetzt. Das Exoskelett erzeugt ein Drehmoment um das Gelenk und überträgt dieses Drehmoment dann durch den starren Rahmen als Kraft senkrecht zum Körper. Dieser mechanische Unterschied kann zu einer insgesamt geringeren Kompressionskraft auf das Gelenk führen.

Es ist wichtig zu wissen, dass eine natürliche Gelenkkompression nichts Schlimmes ist. Sie trägt sogar dazu bei, das Gelenk unter Belastung zu stabilisieren. Wenn jedoch häufig hohe Kräfte auf ein Gelenk einwirken, kann dies zu Überlastungsschäden und Schmerzen führen, die durch Schäden an den Bändern und Knorpeln des Gelenks verursacht werden.

Abschnitt 2

Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen

Schwerkraft-Kompensation:

Da die Schwerkraft eine der Hauptursachen für eine hohe körperliche Belastung ist, ist die Kompensation der Auswirkungen der Schwerkraft durch ein Exoskelett ein wichtiger Ansatz.

Die Idee der Schwerkraftkompensation wird im Folgenden anhand des OmniSuit Exoskeletts erläutert, das sowohl Rücken- als auch Schulterunterstützung bietet. Die Schwerkraftkompensation durch das Rückenmodul beginnt zu wirken, sobald sich die Nutzerin nach vorne lehnt und die Schwerkraft beginnt, den Oberkörper nach unten zu ziehen. Ohne Unterstützung durch das Exoskelett müssen die Rücken- und Hüftmuskeln diese Schwerkraft kompensieren, indem sie sich zusammenziehen und den Oberkörper nach oben ziehen. Beim Tragen des OmniSuit werden die elastischen Federn am Rücken automatisch gedehnt, wenn sich der Oberkörper nach vorne beugt. So wird ein Teil dieser Belastung aufgefangen und die menschlichen Muskeln entlastet.

Ein weiteres Beispiel ist das die Schultermodul. Wenn es getragen wird, unterstützt es automatisch die Schulter, wenn der Arm angehoben wird. Die Federung des Schultergelenks ist so ausgelegt, dass sie die maximale Unterstützung bietet, wenn der Arm eine horizontale Position erreicht, wenn er also der Schwerkraft maximal "ausgesetzt" ist.

Ein wichtiges Detail dabei ist, dass die beiden Unterstützungsmodule des Exoskeletts die Schwerkraft nur dann ausgleichen, wenn die Schwerkraft aufgrund eines Hebelarms eine Last auf die entsprechenden Gelenke ausübt. In unseren Beispielen zieht das Modul zur Unterstützung des Rückens also nicht, wenn die Trägerin gerade steht, und das Modul zur Unterstützung der Schultern drückt nicht nach oben, wenn die Arme senkrecht an der Seite des Körpers hängen. Erst wenn die Nutzerin sich nach vorne lehnt oder die Arme hebt, beginnen die Exoskelette, sie zu unterstützen.

Normalerweise gleicht ein Exoskelett die Schwerkraft nicht vollständig aus. Es kompensiert lediglich einen bestimmten Prozentsatz (in der Regel ca. 20 bis 50 %) der auf dem Körper lastenden Schwerkraft und erleichtert so jede Wiederholung oder jede Sekunde, die Sie arbeiten. Diese teilweise Kompensation bedeutet auch, dass die menschlichen Muskeln die Federn eines passiven Exoskeletts nicht spannen müssen - das übernimmt die Schwerkraft.

Die Kompensation der Schwerkraft in Kombination mit der Tatsache, dass die menschlichen Muskeln eine konstante Energie benötigen, um eine Kraft aufrechtzuerhalten (siehe Abschnitt 1), sind die wichtigsten Prinzipien der Exoskelett-Unterstützung bei statischen Aufgaben, wie z.B. längeres Vorwärtslehnen oder Überkopparbeiten.

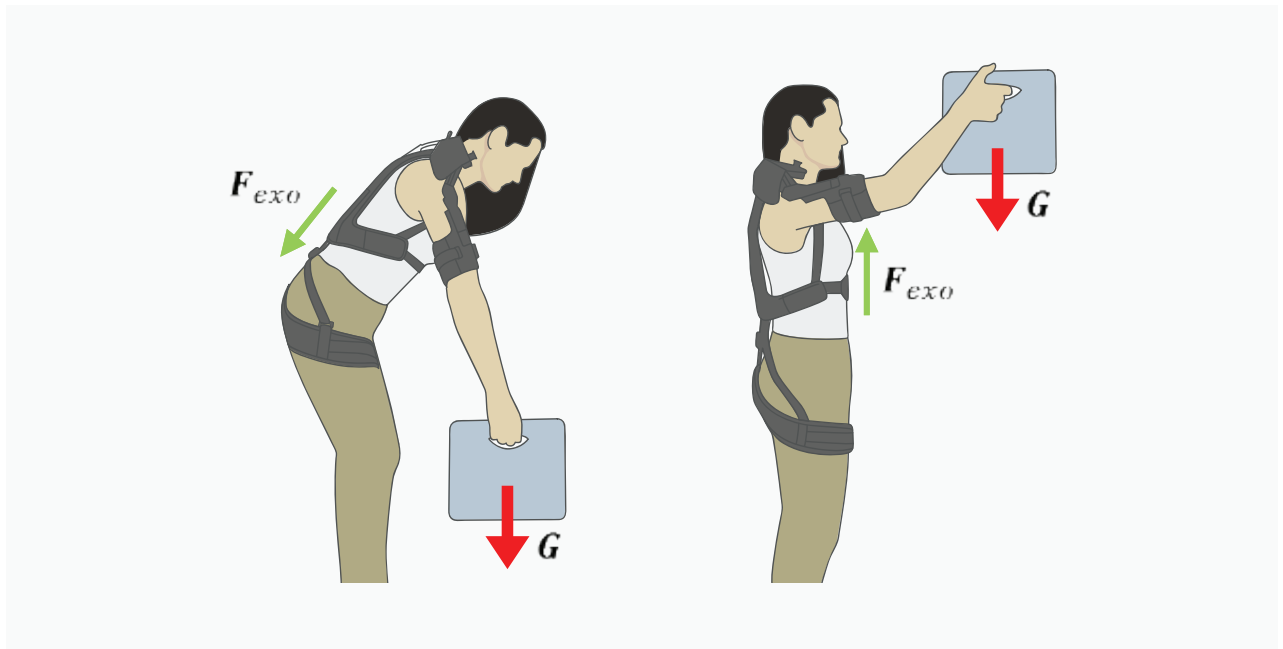
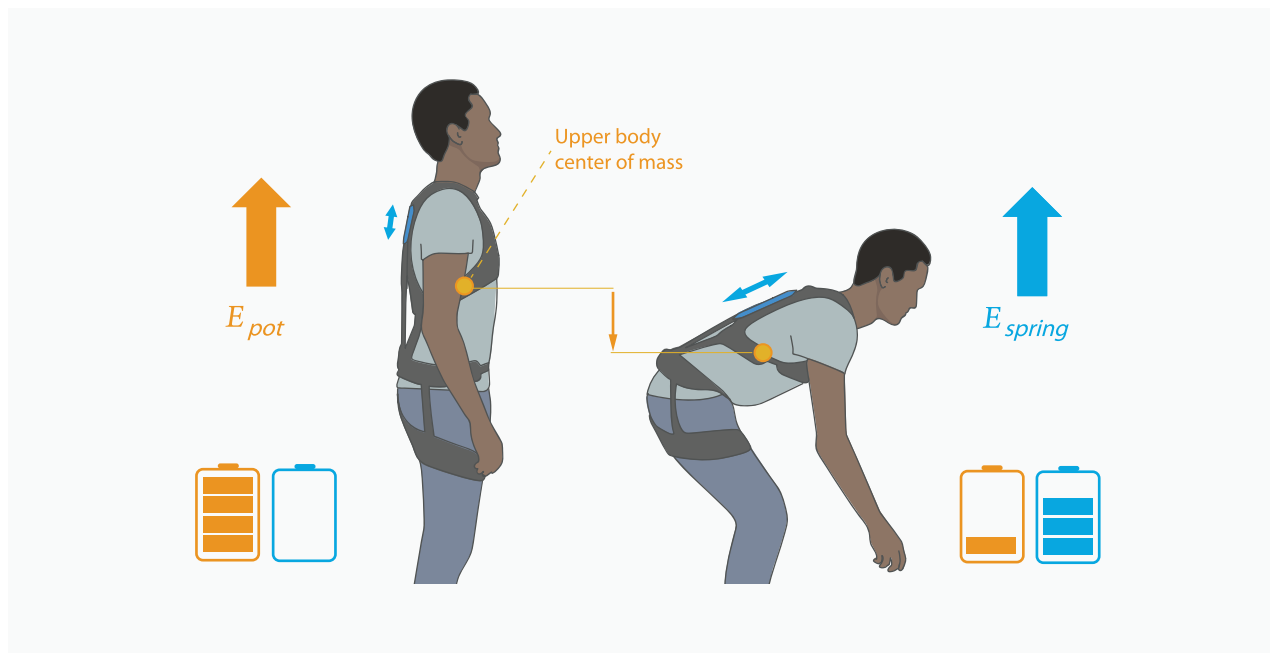


Illustration des Schwerkraftkompensationskonzepts mit dem Auxivo OmniSuit

◀Links: Wenn die Trägerin sich nach vorne lehnt oder eine Last vor den Körper hält, beginnt die Schwerkraft, den Oberkörper nach unten zu ziehen. Wenn sie den OmniSuit trägt, werden durch das Vorwärtslehnen automatisch auch die Federn auf der Rückseite des Exoskeletts gedehnt. Die daraus resultierende Federkraft zieht die Trägerin zurück und gleicht einen Teil der nach vorne ziehenden Schwerkraft aus. ▶Rechts: Die OmniSuit Schulterunterstützung ist abgebildet. Wenn die Benutzerin beginnt, einen Arm zu heben, spürt sie die Schwerkraft, die den Arm nach unten zieht. Wenn sie den OmniSuit trägt, unterstützt das Exoskelett die Schulter zunehmend, je höher der Arm gehoben wird, und gleicht die nach unten gerichtete Schwerkraft aus, indem es den Arm nach oben drückt.

Abschnitt 2

Wie Exoskelette ihre Benutzer unterstützen



Veranschaulichung des Konzepts der Energiespeicherung und -rückgewinnung:

Wenn der Mensch in einer aufrechten Position steht, speichert die Masse des Oberkörpers potenzielle Energie, während in den Federn des Exoskeletts keine Energie gespeichert wird. Wenn sich der Benutzer nach vorne beugt und den Schwerpunkt des Oberkörpers senkt, wird die potenzielle Energie freigesetzt und auf die Federn des Exoskeletts übertragen, wo sie gespeichert wird. Wenn sich der Benutzer wieder in eine aufrechte Position beugt, wird die Energie wieder in potenzielle Energie umgewandelt und unterstützt so die Bewegung.

Energie-Rückgewinnung: Die Arbeit nur einmal machen

Ein sehr wichtiges Konzept der passiven, federbasierten Exoskelette ist die Energierückgewinnung. Eine häufig gestellte Frage ist, woher die Energie kommt, die zum Spannen der Federn benötigt wird. Die Antwort lautet: Die Energie ist bereits vorhanden, gespeichert in Ihrem Körper, wenn Sie aufrecht stehen. Um dies zu erklären, müssen wir etwas Physik einführen: Jedes Objekt mit einer Masse in einem Gravitationsfeld hat so genannte potenzielle Energie gespeichert. Die Menge der gespeicherten Energie ist $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$, also die Masse m des Objekts multipliziert mit seiner Höhe h multipliziert mit der Erdbeschleunigung g . Diese potenzielle Energie ändert sich, wenn wir die Höhe des Objekts vergrößern (zusätzliche Energie wird benötigt) oder die Höhe verringern (Energie wird freigesetzt). Bei einem Hebeunterstützungs-Exoskelett wie dem Auxivo LiftSuit ist die Energie, von der wir sprechen, die potenzielle Energie der Masse des menschlichen Oberkörpers.

Wenn eine Person aufrecht steht, befindet sich der Oberkörper am höchsten Punkt, und die Masse des Körpers trägt potenzielle Energie in sich. Wenn sich die Person nach vorne beugt, verlagert sich der Schwerpunkt nach unten, und wird potenzielle Energie freigesetzt. Der größte Teil dieser Energie geht durch Energiedissipation verloren. Wenn wir uns wieder aufrichten wollen, müssen unsere Muskeln zusätzliche Energie aufwenden, um die potenzielle Energie wiederherzustellen.

Wenn wir den LiftSuit mit seinen mechanischen Federn am Rücken der Person anbringen, wird diese Feder beim Vorwärtsbeugen gedehnt. Zumindest ein Teil der potenziellen Energie, die vom Körper freigesetzt wird, wird auf die Feder übertragen und bleibt im System gespeichert. Die Energie einer Feder wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt: $E_{feder} = 1/2 \cdot k \cdot x^2$, wobei k die Steifigkeit der Feder und x die Auslenkung der Feder aus ihrer Gleichgewichtslage ist. Wenn sich der Oberkörper wieder in die aufrechte Position bewegt, wird die in der Feder gespeicherte mechanische Energie wieder in potenzielle Energie des Körpers umgewandelt. So wird die gespeicherte Energie zwischen dem menschlichen Körper und dem Exoskelett hin und her übertragen und umgewandelt.

Natürlich kann die Feder nicht die gesamte potenzielle Energie speichern, und der Prozess ist auch nicht 100% effizient, z.B. aufgrund von Reibung. Andernfalls würden wir die gesamte Energie bei jedem Heben in einer Nullsummen-Energiebilanz zurückgewinnen und könnten dies im Grunde ewig tun. Aber selbst wenn nur ein Prozentsatz der potenziellen Energie gespeichert und nach jedem Heben wiedergewonnen wird, reduziert dieser Prozess die Arbeitsbelastung erheblich.

Das Prinzip der Energierückgewinnung ist der Grund, warum federbasierte Exoskelette so energieeffizient sind und ein gutes Maß an Unterstützung bieten können, während sie gleichzeitig klein, leicht und kostengünstig sind.

Abschnitt 3

Häufige Missverständnisse

In diesem letzten Abschnitt möchten wir einige verbreitete Missverständnisse ansprechen, die wir häufig hören und die oft für Verwirrung sorgen. Wenn Sie die vorherigen Abschnitte gelesen haben, werden Sie die falschen Annahmen, auf denen diese Missverständnisse beruhen, schnell erkennen können.

Missverständnis Eins: Nur aktive Exoskelette bieten echte Unterstützung, denn bei passiven Systemen müssen Sie zunächst Energie aufwenden.

Das größte Missverständnis ist, dass bei einem passiven Exoskelett Ihre Muskeln die Kraft aufbringen müssen, um die Federn des Exoskeletts zu spannen. Sie müssen also zunächst die Energie aufbringen, die Sie später unterstützt. Es handelt sich also nicht um eine "echte" Unterstützung, da Sie die ganze Arbeit erst einmal selbst machen müssen. Aktive Systeme hingegen liefern zusätzliche Kraft und Energie. Daher ist es folgerichtig, dass nur aktive Systeme Sie unterstützen können.

Dieses Missverständnis beruht auf mehreren falschen Annahmen, die schnell ausgeräumt werden können, wenn Sie die Konzepte der Schwerkraftkompensation, der Energierückgewinnung anwenden und die Unterschiede zwischen technischer Mechanik und Biomechanik berücksichtigen.

Die erste falsche Annahme bezieht sich auf die Kräfte.

Es wird angenommen, dass die menschlichen Muskeln aktiv die Federn des passiven Exoskeletts spannen müssen. Wie wir wissen, müssen Sie, solange die passiven Federn nur die Schwerkraft auf Ihren Körper ausgleichen, keine zusätzliche Kraft aufwenden, um die Feder vorzuspannen, denn das erledigt die Schwerkraft für Sie. Wenn die Federunterstützung gut konstruiert ist, wird sie Ihr Körpergewicht in keiner Position überkompensieren, und Sie müssen nie Ihre Muskeln einsetzen, um die Feder zu spannen.

Die zweite falsche Annahme bezieht sich auf die Energiebilanz.

Sie geht davon aus, dass Sie bei einem passiven System immer Energie investieren müssen und, wenn Sie Glück haben, einen Teil davon zurückbekommen. Infolgedessen handelt es sich bestenfalls um eine Nullsummen-Energiebilanz, was bedeutet, dass es keine wirkliche Unterstützung oder Entlastung gibt.

Ein Aspekt dieses Energie-Fehlverständnisses ist, dass eine Nullsummen-Energiebilanz etwas Schlechtes und Ineffizientes ist. In Wirklichkeit wäre eine Nullsummen-Energiebilanz ein erstaunliches Ergebnis. Es würde bedeuten, dass wir endlose Kniebeugen machen könnten, ohne ins Schwitzen zu kommen, weil wir bei jeder Wiederholung unsere gesamte Energie durch Energierückgewinnung zurückbekommen.

Die Realität beim Heben und Vorwärtslehnen ist jedoch viel schlimmer. Unser Körper verbrennt in jeder Sekunde, in der wir uns nach vorne lehnen, Energie. Jedes Mal, wenn wir in die Knie gehen, geht die potenzielle Energie unseres Körpers fast vollständig verloren und muss mit Muskelkraft wieder aufgebaut werden.

Daher kann ein passives, federbasiertes Exoskelett, das durch Energierückgewinnung auch nur einen kleinen Prozentsatz bei jedem Heben wiederherstellt, einen bedeutenden Unterschied ausmachen. Es stimmt zwar, dass dieses Exoskelett dem System keine zusätzliche Energie zuführt. Dennoch verhindert es, dass wir während der Arbeit Energie verlieren und verschwenden, was eine wesentlich effizientere Art der Unterstützung ist.

Ein weiterer Aspekt dieser falschen Energieannahme ist, dass die Unterschiede zwischen einem mechanischen und einem biomechanischen System nicht beachtet werden. Der Mensch kann viel mehr Energie einsparen, als in der mechanischen Feder gespeichert ist, einfach weil, wie oben beschrieben, eine permanente Unterstützung durch eine vorgespannte mechanische Feder dem menschlichen Benutzer aufgrund des menschlichen Muskelstoffwechsels jede Sekunde zusätzliche Energie spart.

Abschnitt 3

Häufige Missverständnisse

Missverständnis Zwei: Exoskelette reduzieren die Belastung eines Körperteils, indem sie sie auf einen anderen übertragen und dort erhöhen, was sogar gefährlich sein kann.

Lassen Sie uns zunächst anerkennen, dass Teile dieser Aussage nicht kategorisch falsch sind. Wie bereits erwähnt, können Exoskelette die Lastumverteilung auf unterschiedliche Weise nutzen. Aber die oben zitierte Aussage impliziert, dass eine Lastumverteilung immer notwendig ist und zu einer erhöhten Belastung von Körperteilen führt, die zuvor nicht belastet waren. Sie impliziert auch, dass eine Lastumverteilung von einem Körperteil auf einen anderen per se etwas Schlechtes und Ungesundes ist, und das sind genau die Missverständnisse, die wir ansprechen wollen:

Erstens kann die lokale Belastung reduziert werden, ohne die Belastung an anderer Stelle zu erhöhen:

Unter Verwendung des oben beschriebenen Konzepts des alternativen Lastpfades ist es möglich, die Belastung des menschlichen Körpers und einzelner Körperteile zu verringern, ohne sie notwendigerweise an anderer Stelle zu erhöhen. Das externe Exoskelett bietet einfach einen alternativen Lastpfad zum Boden, wo letztendlich die gesamte durch die Schwerkraft verursachte Belastung des Körpers ankommt. Warum also nicht die Teile des Körpers auslassen, bei denen die Gefahr einer Überlastung besteht?

Zweitens kann es hilfreich sein, eine Last auf eine größere Körperregion zu verteilen:

Die Umverteilung der Belastung, bei der Sie eine Erhöhung der Belastung in anderen Teilen des Körpers in Kauf nehmen, ist ein Ansatz, der bewusst eingesetzt werden kann. Das bedeutet zwar, dass die Belastung in einigen Körperteilen erhöht wird, aber wenn sie richtig eingesetzt wird, ist die Lastverteilung nicht zwangsläufig etwas Schlechtes. Die Belastung kann gleichmäßiger auf einen größeren Teil des Körpers verteilt werden. Lastumverteilung kann auch einen besseren Lastausgleich bedeuten, so dass z.B. eine asymmetrische Last gleichmäßiger auf die linke und rechte Körperhälfte verteilt werden kann. Eine Belastung von 120% und 50% maximaler Kapazität auf der linken und rechten Seite des Körpers ist ungesünder als eine Aufteilung von 90% - 80%.

Zusammenfassung und Schlusswort

Wir hoffen, dass Ihnen dieses White Paper gefallen hat und dass es Ihnen geholfen hat zu verstehen, wie moderne Exoskelette funktionieren und welche Konzepte zur Unterstützung eingesetzt werden.

Es wurde wahrscheinlich deutlich, dass es viele Konzepte gibt, aus denen man bei der Entwicklung eines Exosketts wählen kann, und dass ein gutes Verständnis der mechanischen und biomechanischen Prinzipien unerlässlich ist, um sicherzustellen, dass das resultierende Design die bestmögliche Leistung und den maximalen Nutzen für seine Benutzer bietet.

Die meisten der besprochenen Prinzipien können von allen Arten von Exoskeletten genutzt werden und sind in gewisser Weise universell. Egal, ob Sie ein aktives oder passives, starres oder weiches Exoskelett haben, sie alle werden auf die eine oder andere Weise einige der oben beschriebenen Konzepte anwenden. Das ist auch der Grund, warum keine dieser Kategorien von Exoskeletten von vornherein besser oder schlechter ist als die anderen. Sie beruhen alle auf denselben Grundideen, die nur mit unterschiedlichen Technologien umgesetzt werden.

Wenn Sie mehr über Exoskelette erfahren möchten, empfehlen wir Ihnen einen Besuch auf unserer Website. Dort können Sie unser Angebot an professionellen Exoskeletten für verschiedene Branchen erkunden. Wenn Sie mehr über die Technik von Exoskeletten erfahren möchten, können Ihnen unsere Lern-Exoskelette der EduExo-Serie dabei helfen, zu lernen, wie Sie Ihr eigenes Exoskelett entwickeln und bauen.

Über die Autoren



Volker Bartenbach
Volker ist Mitbegründer und CEO von Auxivo. Mit einem Dokortitel in Exoskelett-Robotik und mehr als 12 Jahren Erfahrung in der Entwicklung, Erforschung und Vermarktung von Exoskeletten ist es sein Ziel, leistungsfähige Exoskelette zu entwickeln und sie für mehr Menschen zugänglich zu machen.



Rachel van Sluijs
Rachel ist Leiterin der Forschung bei Auxivo. Mit einem Dokortitel in Neurowissenschaften und einem Master in Bewegungswissenschaften zielt ihre Arbeit darauf ab, die Interaktion zwischen tragbaren Exoskeletten und dem Benutzer zu verstehen und zu optimieren, um sicherzustellen, dass der menschliche Körper die Unterstützung durch das Exoskelett voll ausnutzen kann.



Roger Gassert
Roger ist Mitbegründer und wissenschaftlicher Berater bei Auxivo. Er ist zudem ordentlicher Professor für Rehabilitationstechnik an der ETH Zürich. Seine Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung und klinische Validierung von tragbaren und tragbaren Rehabilitationstechnologien wie Exoskeletten.

Über Auxivo

Auxivo AG ist ein führender Entwickler und Hersteller von Exoskeletten und wurde 2019 als Spin-off der ETH Zürich gegründet. Das Unternehmen hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Sicherheit und das Wohlbefinden von Arbeitnehmern zu verbessern, indem es innovative und zugängliche Lösungen anbietet, die die körperliche Arbeitsbelastung und das Verletzungsrisiko reduzieren. Das schnell wachsende Exoskelett-Portfolio des Unternehmens bietet praktische Lösungen für Branchen wie Logistik, Fertigung, Bauwesen oder Gesundheitswesen.

Copyright

Ausgabe: Januar 2024 © Auxivo AG
Der Inhalt dieses Dokuments
ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte vorbehalten.

Auxivo®, LiftSuit®, CarrySuit®, DeltaSuit®
und OmniSuit® sind eingetragene
Markenzeichen der Auxivo AG.

Unabhängig vom
Verwendungszweck sind die
Verwendungen dieser Marken
ohne schriftliche Genehmigung
der Auxivo AG untersagt.

Technische Änderungen, Irrtümer
und Auslassungen ohne vorherige
Ankündigung vorbehalten.

Auxivo AG
Sonnenbergstrasse 74
8603 Schwerzenbach
Switzerland

info@auxivo.com
+41 77 250 35 31

auxivo.com

AUXIVO