

# Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



## MODUL BIOMECHANIK GRUNDLAGEN

### Didaktische Einheit D: TECHNIKEN ZUR INSTRUMENTELLEN ANALYSE VON BEWEGUNGEN UND KRÄFTEN

D.2. Wie können Kräfte gemessen werden und welche Parameter können analysiert werden? Was sind ihre Hauptanwendungen?



## Index

1. EINLEITUNG UND ZIELE	2
2. REAKTIONSKRÄFTE	4
Dynamometrische Plattformen.....	4
Ac-Beschleunigungsmesser.....	7
3. PRES SICHER	11
Druckplattform s.....	12
Instrumentierte Einlagen.....	12
Andere Systeme.....	15
4. MUSKELKRAFT	17
Leistungsbremsen.....	17
5. HAUPTANWENDUNGSGEBIETE	24
Klinische Einstellung.....	24
Sport	25
Ergonomie.....	25
6. EXEMPLARE	26
7. WICHTIGE IDEEN	34
8. REFERENZEN	35

## 1. Einleitung und Ziele

Die Kenntnis der Kraft, die ein Körper auf einen anderen ausübt, oder der Last, die auf ein anderes Objekt einwirkt, ist in vielen biomechanischen Studien von größter Bedeutung. Die verwendeten Techniken basieren auf der Bewegungsanalyse, der Untersuchung von Materialien, der Entwicklung von Implantaten usw. Wie bei anderen Techniken auch, ist es wichtig, das zu messende Objekt zu kennen, um die am besten geeignete Ausrüstung auszuwählen, wobei Faktoren wie Amplitude und Frequenzbereich der Erfassung, Linearität, Präzision, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit berücksichtigt werden müssen [1].

Zu diesem Zweck wendet eine biomechanische Analyse normalerweise quantitative Techniken an, die einen elektromechanischen Sensor verwenden, der normalerweise aus einem Aufnehmer besteht, der eine Energieform in eine andere umwandelt. Im Fall der Kraftanalyse wandeln Kraftaufnehmer physikalische Größen wie Kraft, Druck oder Momente in eine quantifizierbare elektrische Größe um, die von einem Computer analysiert werden kann; das heißt, sie liefern ein elektrisches Signal, das proportional zur auf den Sensor ausgeübten Kraft ist [2]. Es gibt viele Arten von Sensoren mit eigenen mechanischen Merkmalen und Eigenschaften (Empfindlichkeit, Ansprechzeit, Messbereich, etc.) bezüglich der Kraftmessung wie z. B. piezoelektrische, piezoresistive, kapazitive, Dehnungsmessstreifen, etc.

Es gibt zwei verschiedene Hauptbereiche von Kraftsensoren auf dem Markt: solche mit Wägezellen und solche mit kleinen Kraftmesswiderstandssensoren (FSRs).

Wägezellen lassen sich in solche auf Basis von Dehnungsmessstreifen oder piezoelektrischen Sensoren unterteilen (Abbildung 1). Bei Dehnungsmessstreifen werden diese auf einen Balken oder ein Bauteil geklebt, das sich bei Krafteinwirkung sofort verbiegt. Piezoelektrische Aufnehmer basieren auf dem piezoelektrischen Effekt. Für diese Art von Sensoren werden Einkristalle verwendet, die bei einer mechanischen Belastung eine elektrische Ladung erzeugen [1].

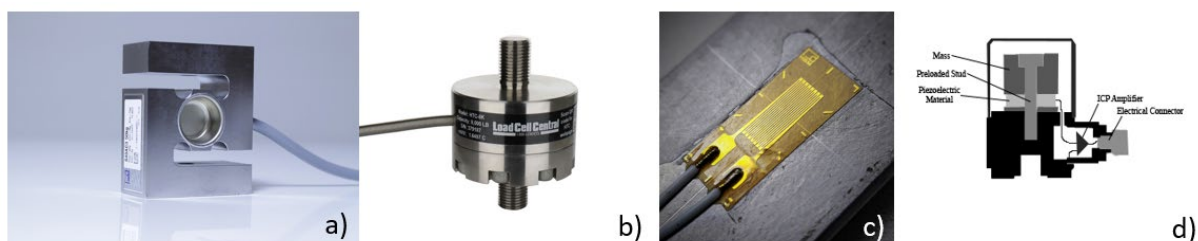


Abbildung 1 - Bilder verschiedener Wägezellen: a) und b); Dehnungsmessstreifen: c), und Diagramm eines piezoresistiven Sensors: d).

FSR-Sensoren (Abb. 2) sind sehr gebräuchliche Geräte bei biomechanischen Messungen, insbesondere bei solchen, die sich auf die Analyse der Druckverteilung in der Grenzfläche zwischen einem Körpersegment und einem Objekt beziehen. Diese Sensoren sind preiswert, schlank und die Signalaufbereitung ist einfach [3].

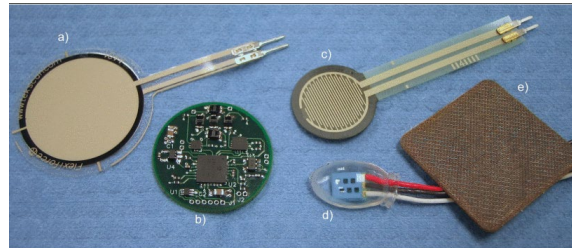


Abbildung 2 - Bild verschiedener kraftmessender Widerstandssensoren: a) Tekscan Flexiforce A401-25 FSR. b) Sandia Optical 3D Kraftsensor. c) Interlink 402 FSR. d) Sandia Bubble Sensor. e) Pressure Profiles C500 kapazitiver Sensor; entnommen aus Dabbling et al. [3].

Die **Ziele** dieser didaktischen Einheit konzentrieren sich auf:

- Die Hauptgruppen der Kraftanalyseverfahren.
- Wie diese Techniken funktionieren und welche Informationen diese Geräte liefern.
- Die wichtigsten Vor- und Nachteile ihrer Verwendung.
- Eine kurze Beschreibung der Bereiche, in denen dynamische instrumentelle Techniken der biomechanischen Analyse eingesetzt werden.
- Einige Anwendungsbeispiele und Systeme, die auf dieser Art von instrumentellen Techniken basieren.

Um ihre Untersuchung zu erleichtern, wird im Folgenden eine allgemeine Klassifizierung dieser Techniken auf der Grundlage des Ziels der Messung vorgeschlagen (Abbildung 3).

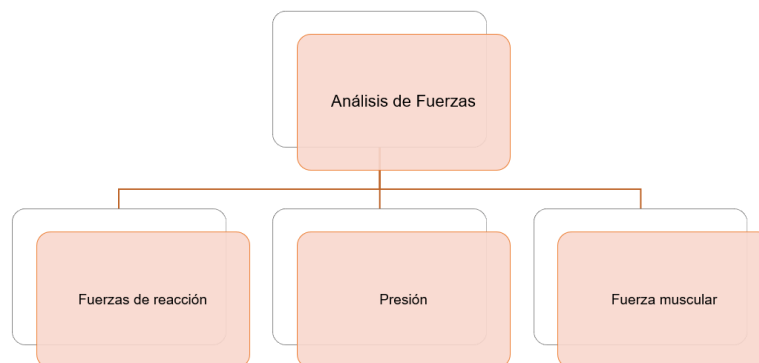


Abbildung 3 - Beispiel für eine allgemeine Klassifizierung von Kraftanalyse-Systemen.

## 2. Reaktionskräfte

Manchmal müssen die Kräfte bewertet werden, die der menschliche Körper bei gemeinsamen Bewegungen wie Gehen und Laufen in Kontakt mit dem Boden ausübt. Aus diesem Grund erzeugt die Verwendung von instrumentellen Techniken, wie dynamometrische Plattformen und Beschleunigungsmessung, numerische Ergebnisse der Messung von Stößen, Dämpfung und der Erfassung von Reaktionskräften.

### Dynamometrische Plattformen

Eine dynamometrische Plattform ist ein elektronisches Gerät, das es uns ermöglicht, die Belastung zu analysieren, die ein Proband auf einer ebenen Fläche, in der Regel auf Bodenhöhe, ausübt.

Die am häufigsten auf den Körper ausgeübte Kraft ist die Bodenreaktionskraft (GRF), die bei verschiedenen Bewegungen wie Stehen, Gehen oder Laufen auf den Fuß wirkt. Diese Kraft, die gleich groß ist, aber in die entgegengesetzte Richtung der von der Person ausgeübten Kraft wirkt, wird von der dynamometrischen Plattform aufgezeichnet und analysiert. Kräfte sind Vektorgrößen, da sie nicht nur durch ihren Wert bestimmt werden können: man muss auch ihre Richtung kennen. Daher werden sie als Vektoren dargestellt und behandelt. Der Reaktionskraftvektor ist dreidimensional und besteht aus einer vertikalen Komponente und zwei Scherkomponenten, die auf die Plattformoberfläche wirken [2].

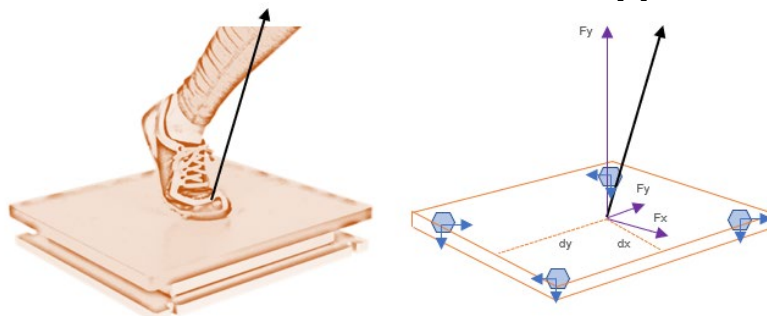


Abbildung 4 - Darstellung der Reaktionskraft beim Betreten der Kraftplattform mit vier Dehnungsmessstreifen; die Kraft wird in die drei Raumachsen sowie die Koordinaten des Applikationspunktes zerlegt.

Dynamometrische Plattformen bestehen in der Regel aus den folgenden Elementen:

- Eine starre, flache, statische Oberfläche, die sich auf Bodenhöhe befindet und je nach Verwendungszweck unterschiedliche Abmessungen aufweist.
- Sensoren oder Aufnehmer, die sich an der Unterseite der Plattform befinden, um Informationen über die aufgebrachte Last zu sammeln.
- Software, um das Signal dieser Sensoren zu analysieren und in numerische und grafische Ergebnisse umzuwandeln, die interpretiert werden können.

Im Allgemeinen verwenden aktuelle Plattformen vier triaxiale Aufnehmer, die als Kraftmessdosen bezeichnet werden, die auf einem Dehnungsmessstreifen oder piezoresistiven Sensoren montiert sind und sich an jeder der vier Ecken der Plattform befinden. Ein Berechnungsprozess, der die Informationen von jedem Sensor verwendet, liefert die drei Komponenten der Reaktionskraft ( $F_x$ ,  $F_y$  und  $F_z$ ), das Torsionsmoment auf der Plattform ( $M$ ) und die Koordinaten des Druckzentrums (CoP), bei dem angenommen wird, dass der Angriffspunkt der Last erfolgt (Abbildung 4).

Während des Herstellungsprozesses dieses Geräts wird der Sensorkoeffizient für die Umwandlung von Volt in Kraft vor der Verwendung berechnet, und dann wird das Gerät kalibriert, um den Messfehler zu quantifizieren. Dieser Prozess wird nach Angaben des Herstellers regelmäßig als vorbeugende Maßnahme durchgeführt, um die Gültigkeit der Messungen zu gewährleisten. Da Phänomene wie Ausdehnung, Kontraktion oder Reibung diese Sensoren aufgrund ihres mechanischen Aufbaus beeinflussen, wird in der Regel eine Erstartierung durchgeführt. Bei dieser Tara wird der von der Plattform erfasste Wert auf Null gesetzt, bevor die Kräfte der bewerteten Bewegung erfasst werden.

Je nach Verwendungszweck dieser Plattformen sind die wichtigsten Eigenschaften, die berücksichtigt werden müssen:

- Messbereich. Je größer der Bereich ist, desto größer ist die Vielseitigkeit, da die Plattform bei Bewegungen mit großen Kräften (Sprünge, Sport) und kleinen Kräften (Gang, Stehen) eingesetzt werden kann; eine Erhöhung des Bereichs wirkt sich jedoch auf die Genauigkeit des Geräts aus.
- Überlast. Es wird die maximale Kraft betrachtet, die die Plattform aufnehmen kann, wobei diese größer als der Messbereich ist.
- Crosstalk. Es zeigt die Kraftmessung auf einer Achse an, die sich von der der eigentlichen Anwendung unterscheidet. Je geringer die Übersprechempfindlichkeit ist, desto geringer ist der Plattformfehler.
- Eigenfrequenz oder mechanische Resonanz. Je höher die Frequenz, desto größer ist die Empfindlichkeit gegenüber plötzlichen Kraftänderungen, wie sie bei Sprüngen oder schnellen Sportbewegungen auftreten. Eine Plattform mit einer hohen Eigenfrequenz misst jedoch möglicherweise nicht korrekt bei niedrigen Frequenzen. Es ist wichtig sicherzustellen, dass die Plattform konstante Kräfte misst, ab einer Frequenz von 0 Hz.

Diese Geräte können auch auf einem Laufband montiert werden, aber die Plattformen sind begrenzt, da die Art der Kraftmessplatte, die in das Laufband integriert werden kann, in der Regel nur die Kräfte in vertikaler Richtung misst, basierend auf dem Kontakt der Füße mit dem Boden [1]. Darüber hinaus gibt es auch tragbare Plattformen, die bewegt und in verschiedenen Umgebungen installiert werden können; es kann jedoch schwierig sein, einige Bewegungen zu untersuchen, da sie nicht in eine Grube eingebettet sind, um auf Bodenhöhe positioniert zu werden.

Derzeit sind dynamometrische Plattformsysteme in verschiedenen Bereichen wie dem klinischen Umfeld und im Sport sehr weit verbreitet. Einige Beispiele sind die *Kistler 3D Force Plate* (<https://www.kistler.com/en/product/type-9281e/>), eine dreidimensionale Kraftplattform, die auf piezoelektrischen Quarzaufnehmern basiert; das *AMTI Force Platform System* (<https://www.amti.biz/optima.aspx>), das eine Reihe von Plattformen anbietet, die auf Dehnungsmessstreifen basieren, um Kraft in drei Dimensionen zu messen; *Dinascan/IBV* (<http:// analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/dinascan-ibv.html>)

dreidimensionale dynamometrische Plattformen mit extensometrischen Kraftaufnehmern, die sich unter den vier Ecken der Plattform befinden und zu zweit in anteroposteriorer und mediolateraler Richtung ausgerichtet sind.

## Parameter

Die üblichen Parameter, die aus den Kraftplattformen extrahiert werden, sind der **Anwendungspunkt** in 2D-Koordinaten in Bezug auf die Messebene, der **Betrag** in Newton (N) oder Kilogramm (kg) des **Kraftvektors** in den Raumachsen (x,y,z) (Abbildung 5) und **das auf der Plattform erzeugte Torsionsmoment in X (x)**.

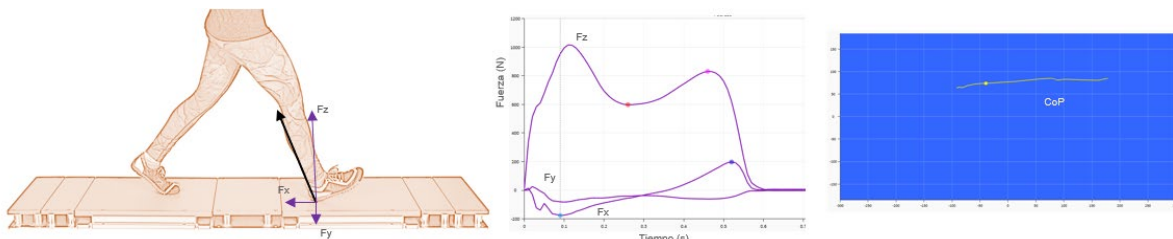


Abbildung 5 - Visualisierung der drei Komponenten der Reaktionskraft und Darstellung des Angriffspunkts (CoP) der Reaktionskraft auf der Plattform während des Gangs.

## Vorteile und Nachteile

Trotz aller Eigenschaften dieser Geräte kann eine Kraftplattform keine Informationen darüber liefern, wie sich die Reaktionskraft auf einer Oberfläche, wie z. B. dem Fuß, verteilt. Aus diesem Grund wurden andere Systeme zur Analyse der Kraftverteilung entwickelt, wie z. B. instrumentierte Einlegesohlen oder Druckplattformen, die später in dieser Einheit beschrieben werden.

In einigen Bereichen, wie z. B. im klinischen Umfeld, werden trotz ihrer Einschränkungen wirtschaftlichere und vielseitigere Lösungen eingesetzt, da diese Geräte mit hohen Kosten und komplexer Bedienung verbunden sind.

Eines dieser Geräte ist die Wii-Plattform von Nintendo® (Abbildung 6). Dieses System verwendet eine Kraftplattform (Nintendo® Wii Balance Board™), die Informationen über die Verschiebung des Druckzentrums (CoP) basierend auf dem Kontakt der Füße mit der Plattform liefert. Vier Sensoren, die sich in den Ecken der Plattform befinden, bewerten die Gewichtsverteilung und schätzen die Position des CoP auf der x-Achse und auf der y-Achse durch Aufzeichnung der vertikalen Reaktionskraft.



Abbildung 6 - Nintendo® Wii Balance Board™

Obwohl dieses System weniger Funktionen als eine herkömmliche dynamometrische Plattform bietet, vor allem in Bezug auf die Bewertung von schnellen Bewegungen, die große Kraft erfordern, wie Springen und Laufen, eröffnet es eine breite Palette von Einsatzmöglichkeiten, vor allem als Werkzeug für die Gleichgewichtsrehabilitation, das Informationen liefert, die für die Untersuchung verschiedener Populationen, Trainingsprogramme usw. von Interesse sind.

In den letzten Jahren wurden viele Arbeiten in Bezug auf seine klinischen Anwendungen veröffentlicht, wie z. B. die Überwachung der Verbesserung des Gleichgewichts nach Trainingsprogrammen in bestimmten Populationen, und über ihre Gültigkeit und Zuverlässigkeit bei der Bewertung der posturalen Kontrolle. In dieser Hinsicht bewerten verschiedene Studien die Grenzen und Funktionalitäten dieses Systems im klinischen Umfeld (Severini et al., 2017 "Use of Nintendo Wii Balance Board for posturographic analysis of Multiple Sclerosis patients with minimal balance impairment"; Weaver et al., 2017 "Use of the Nintendo Wii Balance Board for Studying Standing Static Balance Control: Technical Considerations, Force-Plate Congruency, and the Effect of Battery Life"; Clark et al., 2018 "Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review". )

## Ac-Beschleunigungsmesser

Beschleunigungssensoren sind Sensoren, die die Beschleunigung in ein elektrisches Signal umsetzen. Im Allgemeinen basiert ihr Betrieb auf der Trägheit einer Masse, die sich in einem Kraftsensor befindet, und folgt dem zweiten Newtonschen Gesetz ( $F = m \times a$ ), um die Beschleunigung zu erhalten.

Die Untersuchung der Beschleunigung, die in bestimmten Segmenten auftritt, ermöglicht es uns, die Übertragung (Aufprall, Dämpfung usw.) der Reaktionskräfte in bestimmten Körpersegmenten zu quantifizieren sowie Funktionen wie Gang und Gleichgewicht zu untersuchen und/oder bestimmte Aktivitäten oder Bewegungen und deren Anforderungsniveau zu analysieren und zu identifizieren. Abhängig von der Aktivität oder dem Ziel der Studie werden die Beschleunigungssensoren in dem zu bewertenden Objekt oder Segment platziert, indem sie an dem zu messenden Objekt oder an bestimmten Punkten oder anatomischen Regionen angebracht werden, die für die Untersuchung dieser Bewegung oder Funktion entscheidend sind.

Es gibt drei gängige Klassen von Beschleunigungsaufnehmern: piezoelektrische, piezoresistive und kapazitive [4]. Sie haben unterschiedliche Eigenschaften, abhängig von



der vorgesehenen Anwendung und den Bedingungen, unter denen sie arbeiten müssen. Diese Messgeräte bestehen in der Regel aus einem Sensor, der die Beschleunigungswerte der Schwingungen misst, die der Körper, an dem er angebracht ist, empfängt und den physikalischen Parameter (Beschleunigung) in ein elektrisches Signal umwandelt; einem Signalaufbereiter, der das Signal des Beschleunigungsmessers filtert und verstärkt; und einem Datenanalysesystem mit einer Erfassungskarte für die während der Messung erzeugten Daten und der Möglichkeit, diese Daten zu analysieren.

Es gibt Beschleunigungsaufnehmer, die die Beschleunigung in einer Richtung (monoaxial), zwei (biaxial) oder drei Richtungen (triaxial) messen. Die Auswahl dieser Sensoren hängt von der zu beurteilenden Bewegung ab, von den Achsen, aus denen die Informationen extrahiert werden sollen. Außerdem gibt es zwei wichtige Parameter bei der Auswahl des richtigen Sensors: den Beschleunigungs- und den Frequenzarbeitsbereich.

Im Hinblick auf die Beschleunigung werden piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer bei der Untersuchung des menschlichen Gangs verwendet, weil sie sich in dem für die Biomechanik nützlichen Beschleunigungsbereich (0 bis 100 m/s<sup>2</sup>) hervorragend verhalten und weil sie niedrige Frequenzen von 0 bis 100 Hz messen können. Diese Beschleunigungsaufnehmer können sehr leicht sein (5 g) und bieten eine hohe Genauigkeit. Ihr Einsatz ist auch für die Untersuchung der stoßdämpfenden Wirkung von Schuhen, Orthesen oder anderen Mechanismen, Ergänzungen oder Geräten unerlässlich (Abbildung 7).

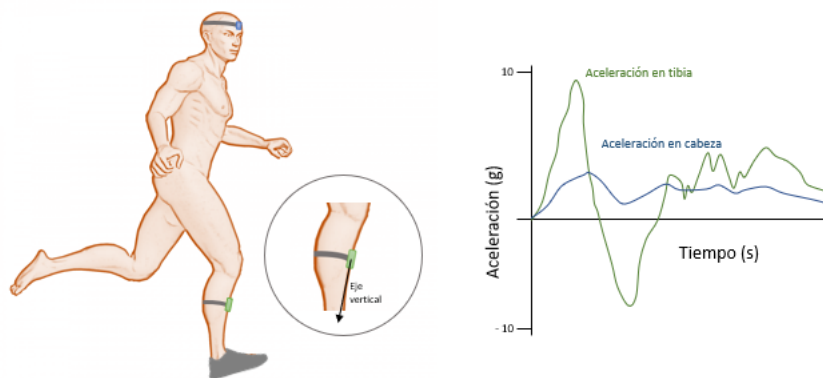


Abbildung 7 - Bewertung der Stoßdämpfung des Schuhs mit 2 Beschleunigungsmessern: einer befindet sich auf der Stirn (blau) und der andere auf dem Schienbein (grün). Vertikale Beschleunigungsspitzen werden in beiden Beschleunigungsmessern in der Aufprallzeit und beim Laufübergang beobachtet.

Hinsichtlich der Frequenz übersteigen die Beschleunigungen, die beim Springen oder Laufen auftreten, nicht 50 Gravitäten (g), daher ist es nicht ratsam, Beschleunigungsaufnehmer mit einem großen Bereich zu verwenden, z. B. 500 g. Außerdem hängt die Genauigkeit eines Beschleunigungsaufnehmers von dem zu messenden Frequenzbereich ab. Bei einem versehentlichen Stoß oder Schlag können jedoch 100 oder 200 g erreicht werden. Aus diesem Grund werden bei Auto-Crashtests mit Dummys Beschleunigungsaufnehmer bis zu 500 g verwendet.

Derzeit findet man diese Art von Sensoren in Verbindung mit anderen, wie z. B. in der Integration einer so genannten IMU (Inertial Measurement Unit) oder in einem GPS-Gerät (Global Positioning System), die wesentliche oder ergänzende Informationen zum Erhalt

bestimmter Variablen liefern, oder auf mobilen Geräten wie einem Telefon oder einem Aktigraphen.

## Parameter

Zu den Parametern, die normalerweise aus einem Beschleunigungsmesser extrahiert werden, gehören eine Trägheitskomponente wie die Beschleunigung, obwohl die Umrechnung in Kräfte mit der Formel  $F = m \times a$  einfach ist, wobei die Interpretation oder Analyse der Ergebnisse intuitiver ist; eine statische Komponente, wie die Schwerkraft; und Rauschen, entweder biologisch oder umweltbedingt. Die Untersuchung der Beschleunigung ermöglicht es uns, die Frequenz und Intensität der Bewegung des Körpers oder Objekts in den drei Raumebenen zu quantifizieren.

Ein gängiger Parameter bei der Berechnung der körperlichen Aktivität mit einem Beschleunigungsmesser sind Bouts oder Aktivitätsperioden. Bouts ermöglichen es, das metabolische Äquivalent oder MET basierend auf der Größe der Beschleunigung in den drei Achsen, die in einem bestimmten Zeitintervall während der Aufzeichnung aufgezeichnet wurde, zu kennen. Dies ermöglicht die Quantifizierung der Art der Aktivität in verschiedenen Kategorien, von sitzend bis kräftig.

Durch die Verarbeitung des Beschleunigungssignals ist es auch möglich, die Zeitereignisse zu erhalten, die eine bestimmte Bewegung charakterisieren (Abbildung 8), wie zum Beispiel den menschlichen Gang. In diesem Fall treten die maximalen Beschleunigungsspitzen beim Fersenauftritt auf den Boden auf. Abhängig von der Instrumentierung, ob sie in einem Fuß oder in beiden oder in einem anderen Segment wie dem Rumpf angebracht ist, können Parameter wie Kadenz, Schritt- und Schwankzeit, Doppelstützzeit usw. extrahiert werden.

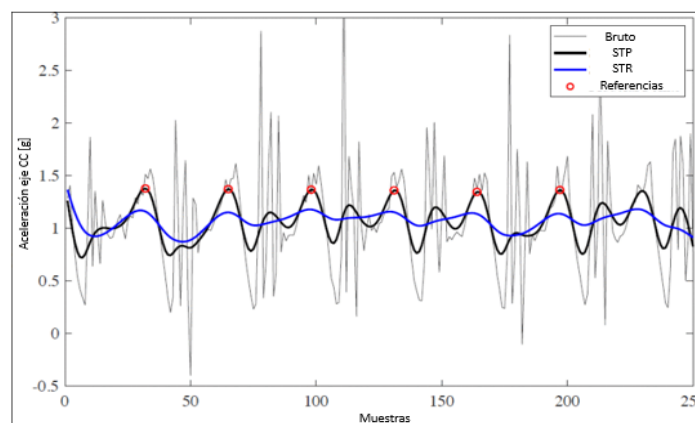


Abbildung 8 - Beispiel für Daten von verschiedenen Gangschritten, die von einem im Bein befindlichen Beschleunigungsmesser gewonnen wurden: Raw (Beschleunigung in der kraniokaudalen Achse), STP (Schrittfrequenz), STR (Schrittfrequenz); entnommen aus Gurchiek et al. [5].

## Vorteile und Nachteile

Die Fähigkeit dieser Sensoren, die Beschleunigung zu quantifizieren, zusammen mit ihrem geringen Energieverbrauch und ihrer geringen Größe, ermöglicht es uns, Bewegungen



### 3. Pres sicher

---

Wenn die Aufzeichnung von Reaktionskräften nicht ausreicht, um die Kraftverteilung einer bestimmten Körperoberfläche in Kontakt mit einem Objekt zu beurteilen, ist es notwendig, Geräte zur Druckmessung zu entwickeln und Informationen darüber zu liefern, wie die Drücke um alle Kontaktpunkte verteilt sind [2]. Die Messung der Schnittstelle zwischen Körperweichteilen und verschiedenen mechanischen Geräten ist sowohl für die Forschung als auch für die Entwicklung von klinischen Anwendungen sehr nützlich. Zum Beispiel, um die Druckverteilung auf den Innenflächen der Schäfte von Prothesen, Orthesen oder Korrektur einlagen zu untersuchen, um den Komfort, die Korrektur oder das Risiko von Komplikationen aufgrund von Druckspitzen, die potenziell Geschwüre oder Blasen verursachen können, zu beurteilen.

Die traditionellen Methoden zur Druckanalyse sind hauptsächlich **statische** Systeme, die die Form oder Belastung der Oberfläche während des Betriebs nicht bestimmen können. Sie basieren in der Regel auf Formen, die sich bei Belastung oder Gewicht verformen, oder auf Bildanalysen. Diese traditionellen Systeme sind hauptsächlich für die Analyse von Drücken an der Fußsohle gedacht. Sie umfassen:

- Traditionelles Pedoskop. Es ist ein Gerät zur Diagnose, Visualisierung und Untersuchung von Fußabdrücken und den verschiedenen Achsen der Füße. Es wird zur statischen Fußabdruckerfassung verwendet. Das traditionelle Modell besteht aus einer transparenten, kalibrierten Fläche, die die Auflage für das zu untersuchende Subjekt ist. Unter dieser Fläche befinden sich zwei Spiegel in einer festen Position im 45°-Winkel zur transparenten Fläche. Es hat eine Lichtquelle, die auf die Auflagefläche auf dem Glas gerichtet ist, was den Kontrast mit dem Bereich, der nicht in Kontakt mit dem Glas ist, erhöht.
- Computerisiertes Pedoskop. Dies ist ein Scanner unter einer Glasplatte, der die Form des Fußes in 2D genau erfasst, während er sich in eine Richtung bewegt. Die mit diesem System verbundene Software bietet eine digitale Analyse der erhaltenen Fingerabdruckmessungen.

In jüngster Zeit wurden dynamische Analysesysteme entwickelt, die auf modernen kraftmessenden Widerstandssensoren basieren, um die Druckverteilung während der Bewegung eines Körpersegments zu erfassen.

Die Grundkomponenten dieser Drucksysteme sind:

- Der **Drucksensor**, der die physikalische Größe misst und erfasst. Er wird in der Regel als das Element definiert, das in direkten Kontakt mit der zu beurteilenden Größe kommt. Der Sensor empfängt die physikalische Größe und leitet sie an den Messumformer weiter.
- Der **Messumformer**, der normalerweise im Sensor enthalten ist. Er wandelt das vom Sensor gesendete Signal in eine andere Art von Signal um, normalerweise ein elektrisches, sowohl Spannung als auch Strom, proportional zu dem vom Sensor erfassten Druck.
- Ein Datenerfassungssystem mit einer Erfassungskarte und einer angepassten Software, die die Daten berechnet und darstellt.

Die am häufigsten verwendeten Sensoren in dieser Art von Systemen sind kapazitive, piezoelektrische, resistive und piezoresistive Sensoren. Die Eigenschaften eines jeden von ihnen bestimmen ihre Verwendung je nach Ziel der Bewertung.

Die Spezifikationen, die berücksichtigt werden müssen, um die Eignung eines Drucksensors im Hinblick auf die Anforderungen und Grenzen seiner Anwendung zu bewerten, sind **Linearität**, die die lineare Beziehung zwischen Spannung und Strom ausdrückt; **Hysterese**, die sich auf die Differenz zwischen den Ausgangswerten desselben Eingangs bezieht, je nach dem Weg, den der Sensor verfolgt; **thermische Stabilität**, verstanden als das Verhalten des Sensors angesichts von Temperaturänderungen; **Genauigkeit**; **Reaktionsgeschwindigkeit**; **Wiederholbarkeit**; **Größe** und **Druckmessbereich**.

Die Anforderungen an den Drucksensor für eine bestimmte Anwendung sind geringe Hysterese, geeignete Linearität des Ausgangs und Druckbereich. Ein empfohlener Druckbereich für die Ganganalyse liegt bei ca. 1,00 kPa, für den Sport sollte der Druckbereich jedoch aufgrund der Art der Bewegungen größer sein [8].

Die in dieser Einheit gezeigten Geräte werden je nach Zielsetzung klassifiziert: die Untersuchung des nackten Fußes oder in Schuhen, und in Bezug auf die Untersuchung anderer Körpersegmente. Räumliche Auflösung, Erfassungsfrequenz, Empfindlichkeit, Genauigkeit und Kalibrierung sind Eigenschaften, die durch den Verwendungszweck bestimmt werden, der ihr Design beeinflusst.

## Druckplattform s

Die objektive Bestimmung der plantaren Drücke und ihrer genauen Position auf der Fußsohle während der Standphase des Gangzyklus ist für die diagnostische Bewertung und die Planung der Behandlung von Patienten mit schmerzhaften Störungen oder Empfindlichkeiten im Fuß unerlässlich.

Druckplattformen bestehen aus einer ebenen starren Fläche, auf der Sensoren gleichmäßig in Form einer Matrix so verteilt sind, dass sie über die gesamte Messfläche Drücke mit gleicher Genauigkeit erfassen können.

Diese Art von Plattformen wird normalerweise verwendet, um das Verhalten des Fußes während des Gehens zu analysieren. Um diesen Test durchzuführen, muss die Testperson barfuß in einer geraden Linie eine Mindeststrecke von 9 Metern zurücklegen und dabei eine Mindestanzahl von 3 bis 5 Schritten auf der Plattform machen. Dies bedeutet, dass die Datenerfassung mehrere Schritte auf der Plattform ohne Fehler erfordert.

## Instrumentierte Einlagen

Instrumentierte Einlegesohlen bestehen aus einer Reihe von Sensoren, die auf der Oberfläche einer flexiblen Einlegesohle, die sich im Schuh befindet, verteilt sind, um Drücke an der Schnittstelle zwischen Fuß und Schuh zu messen (Abbildung 10).

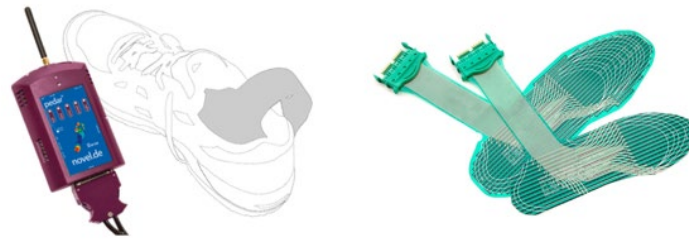


Abbildung 10 - Beispiele für Plantardruck-Analysesysteme mit einer instrumentierten Pedar®-Einlage von Novel <https://www.novel.de/products/pedar/> (links) und dem F-Scan System® von Tekscan <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system> (rechts).

Einlagen liefern quantitative und klinisch nützliche Daten für die funktionelle Bewertung des Gangs, Plantarschmerzen, die Verordnung und Validierung von Orthesen der unteren Gliedmaßen, sowohl bei muskuloskelettalen (traumatischen oder nicht traumatischen) als auch bei neurologischen Pathologien oder die Prävention und Überwachung von Geschwüren bei Neuropathien wie der diabetischen Neuropathie.

Dieses System besteht aus Sensoren, die in die Einlegesohlen eingebettet sind, die die Menge erfassen und in ein elektrisches Signal umwandeln; einem Signalverstärker, der das Signal auf die richtigen Pegel aufbereitet, so dass sie von der Erfassungsausrüstung erfasst werden können, die die Berechnungen durchführt und die Ergebnisse anzeigt. Aufgrund der Art der erfassten Bewegungen übertragen diese Systeme die Daten über Bluetooth/wi-fi oder integrieren Speichergeräte, die die Daten aufzeichnen, speichern und für die Analyse herunterladen können.



Abbildung 11- Beispiel des Moticon Sensor Foot Dynamics® Einlagensystems zur Druckanalyse bei verschiedenen Bewegungen und erhaltene grafische Informationen: Gangart (unten links), Laufen (oben rechts) und Absprung (unten links); entnommen aus <https://www.moticon.de/apps-overview/#outcomes>

Die Instrumentierung und die Portabilität dieser Systeme ermöglichen es, Messungen wie das menschliche Gehen und Laufen in verschiedenen Umgebungen und unter verschiedenen Bedingungen durchzuführen (Abbildung 11), oft auch außerhalb des Laborkontextes. Dies liefert relevante Informationen über das Verhalten der Materialien und des Schuhdesigns, der Oberflächen, der Sporttechnik, der orthopädischen Behandlungen oder der Auswirkungen verschiedener Eingriffe bei traumatischen oder neurologischen Pathologien.

## Parameter

Zu den üblichen Parametern im Zusammenhang mit der Druckanalyse, in diesem Fall im Zusammenhang mit der plantaren Abstützung, gehören die Darstellung der Druckkurven jedes Sensors während der Abstützzeit; der maximale Druck, der von einem Sensor aufgezeichnet wurde; der durchschnittliche Druck, der von einem Sensor oder einer Reihe von Sensoren in einem bestimmten Bereich aufgezeichnet wurde, der normalerweise mit einer anatomischen Region wie der Ferse oder dem Mittelfußbereich verbunden ist; die Berechnung der Position des Druckzentrums (CoP) und seiner Auslenkung während der gesamten Abstützung; die Berechnung der resultierenden vertikalen Kraft, als Ergebnis der Integration der Informationen von jedem Sensor in der Zeit; etc, sowie relevante Informationen wie Trittfrequenz, Stützzeit oder die Abschätzung von Winkeln wie dem Gangprogressionswinkel, etc.

## Vorteile und Nachteile

Bei der Auswahl eines Systems wie z. B. einer Plattform oder Einlagen zur Durchführung der Messungen sind eine Reihe von Vor- und Nachteilen zu beachten. Einige davon sind im Folgenden aufgeführt:

- Anzahl der Sensoren, auch als räumliche Auflösung bezeichnet. Einer der Vorteile der Verwendung einer Druckplattform ist die große Anzahl von matrixverteilten Sensoren, die Informationen über alle Bereiche des Fußes liefern und die Berechnung der vertikalen Kraft erleichtern. Die Auflösung der Einlagen ist geringer als bei Druckplattformen, aber sie liefern Informationen über die Fuß-Schuh-Interaktion, die die Plattform nicht bietet und die von großer klinischer Relevanz sein können, zum Beispiel bei der Beurteilung der korrekten Leistung einer Orthese.
- Die Materialien der Einlegesohlen, wie z. B. Polymere oder Elastomere, die Möglichkeit, dass der Sensor verrutscht, und die Wärme- und Feuchtigkeitsbedingungen im Schuh können das Verhalten des Sensors verändern und die Wiederholbarkeit beeinflussen.
- Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, eine Mindestanzahl von Schritten zu sammeln, um die Berechnungen durchzuführen. Ein Problem, das mit Plattformmessungen verbunden ist, ist das "Anvisieren" der Plattform durch den untersuchten Patienten, was bedeutet, dass der Patient das Gehmuster ändert, um

seinen Fuß in Kontakt mit der Plattform zu bringen, und folglich werden auch die erhaltenen Ergebnisse verändert.

- Einlegesohlen ermöglichen es, den Gang und viele andere Bewegungen außerhalb einer kontrollierten Umgebung zu messen, was es uns ermöglicht, Probanden mit Veränderungen wie neurologischen Pathologien zu beurteilen, die eine natürliche Bewegung und Unterstützung auf der Plattform verhindern.
- Eine der Haupteinschränkungen beider Geräte und eine Quelle für Innovationen in dieser Technologie ist die Erlangung zuverlässiger Messungen von Tangentialdrücken aufgrund von Torsions- oder Scherbewegungen. Diese Art von Druck wird tangential zur Oberfläche ausgeübt und daher ist die Richtung seiner Anwendung parallel zur Oberfläche.

Da beide Messmethoden Vor- und Nachteile haben, sollte sich die Auswahl des idealen Messgeräts nach den Eigenschaften der Bewegung, der funktionellen Kapazität des Anwenders und dem zu beurteilenden Assistenzprodukt richten [9].

## Andere Systeme

Neben der Analyse der Fußdrücke gibt es weitere Druckanalysen, die sich auf andere Körperteile beziehen. Aus diesem Grund wurden Geräte entwickelt, die auf den gleichen Drucksensoren basieren, um sie an das Ziel der Studie anzupassen.

### Druckmatten

Mit Drucksensoren kann auch der Druck ermittelt werden, der von einem Segment oder dem gesamten Körper auf verschiedene Oberflächen ausgeübt wird. Bei der Beurteilung von großen Flächen mit unterschiedlichen Profilen oder Festigkeiten werden Druckmatten eingesetzt. Druckmatten bestehen aus textilähnlichen Materialien, die sich an diese Oberflächen anpassen, wobei die Drucksensoren in eine Matrix eingelegt werden.

Diese Matten werden z. B. zur Beurteilung von Rollstuhloberflächen (Abbildung 12) verwendet, um die Verringerung schädlicher Drücke zu bewerten, die im Laufe der Zeit aufrechterhalten werden und zu Ulkusproblemen führen können. In diesem Zusammenhang werden sie auch häufig zur Analyse von Bettflächen (Abbildung 12) bei bettlägerigen Patienten verwendet oder zur Bestimmung der Druckverteilung der Person auf verschiedenen Festigkeiten und Matratzenausführungen auf der Suche nach Haltungshygiene und Komfort.



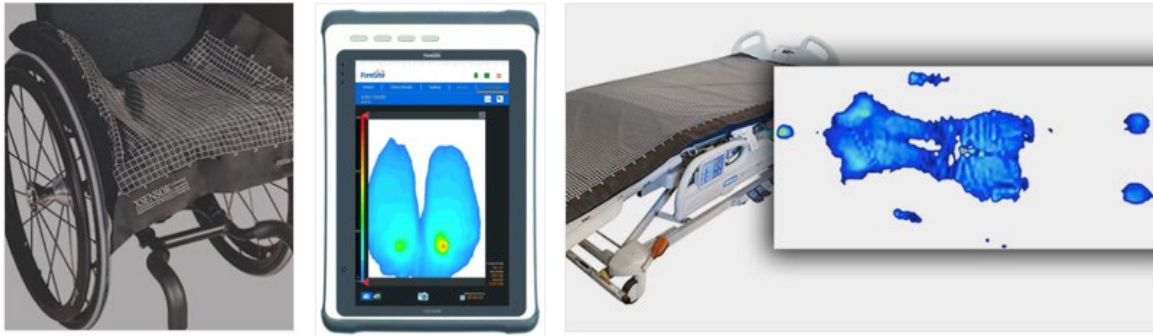


Abbildung 12 - Beispiele für Xsensor®-Druckmatten zur Beurteilung der Oberflächen von Rollstühlen und Betten, Bilder entnommen aus <https://xsensor.com/applications/wheelchair-seating/> und <https://xsensor.com/applications/mattress-design-rd/>

## Druckhandschuhe

In diesem Fall werden in Handschuhen eingebettete Sensoren verwendet, um die Druckverteilung in verschiedenen Bereichen der Hand bei verschiedenen Handlungen zu messen, die Aktivitäten des täglichen Lebens betreffen, wie z. B. Greifen, Fingerklemmen (Abbildung 13) oder während der Verwendung einiger Werkzeuge oder Geräte, im Bereich der Arbeitsergonomie (Abbildung 13).



Abbildung 13 - Beispiel für ein Druckanalysesystem im taktilen Handschuh - Handdruckmessung mit PPS®, Bilder entnommen aus <https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/tactile-glove>

Im sportlichen Bereich werden bei vielen Sportarten Geräte oder Werkzeuge wie Schläger, Stöcke, Ruder, Golfschläger usw. oder die Hände als Element zum Schießen, Schlagen oder Stoppen des Balls verwendet, wie beim Volleyball, Handball usw.

Diese Ausrüstung kann den Druck der Stöße, den Druck in jeder anatomischen Region und die Entwicklung des palmaren oder digitalen Drucks im Laufe der Zeit bewerten. Diese Art der Analyse bewertet die Funktionalität bei Aktivitäten mit Druck in der oberen Extremität und untersucht den Einfluss der durch das Sportgerät verursachten Vibrationen [10].

## 4. Muskelkraft

Wenn es notwendig ist, die Reaktion eines Muskels oder einer Muskelgruppe auf eine externe Anforderung zu quantifizieren, werden instrumentelle Techniken zur Aufzeichnung der von ihnen ausgeübten Kraft verwendet, wie z. B. **konventionelle Dynamometer** und **isokinetische** Geräte oder andere Systeme, die die während einer bestimmten Bewegung ausgeübte Kraft quantifizieren.

### Leistungsbremsen

Ein Dynamometer ist ein statisches Gerät, das zur Messung von Kräften oder zum Wiegen von Objekten verwendet wird. Das traditionelle Dynamometer, das von Isaac Newton erfunden wurde, basiert auf der Dehnung einer Feder, die dem Hooke'schen Elastizitätsgesetz folgt, das besagt, dass "die Verformung eines elastischen Materials direkt proportional zur aufgebrachten Kraft ist". Wenn man also die Federverformungskonstante und die Auslenkung kennt und dieses Gesetz anwendet, kann man die aufgebrachte Kraft kennen [11]. Diese Art von Dynamometer erlaubt es jedoch nicht, die Entwicklung der Kraft über die Zeit zu kennen.

Es gibt verschiedene Arten von Dynamometern: hydraulisch, pneumatisch, mechanisch, usw., die im klinischen oder sportlichen Bereich üblich geworden sind. Dies ist der Fall bei der Beurteilung der Handkraft, wo die Verwendung dieser Art von Dynamometern sehr weit verbreitet ist (Abbildung 14), aufgrund ihrer Tragbarkeit, einfachen Verwendung und geringen Kosten, obwohl ihre Auflösung und Genauigkeit in einigen Fällen und Studien nicht ausreichend sind.



Bild 14 - Beispiele für Dynamometer (von links nach rechts): mechanisch gefedert (Saehan Smedley Handdynamometer), pneumatisch (Saehan Handgriffdynamometer), hydraulisch, (Baseline® Hydraulische Handdynamometer) und digital hydraulisch (Jamar Plus+ Digitales Handdynamometer).

Die Konstruktionen wurden variiert und verbessert, je nach den Anforderungen und den zu messenden Segmenten oder Muskelgruppen. Derzeit werden elektronische Dynamometer verwendet, die Federn durch Elemente wie Kraftmesszellen oder Messgeräte ersetzt haben. Sie führen auch Kraft- und Deformationsmessungen durch, sowohl absolut als auch über die Zeit, nicht nur in statischer oder isometrischer Position, sondern auch in Bewegung oder auf isotonische Weise, wobei sowohl konzentrische als auch exzentrische Muskelleistungen analysiert werden.

Das Ziel dieser didaktischen Einheit ist es, einige dieser Dynamometer zu zeigen, klassifiziert danach, ob sie statisch oder dynamisch sind.

## Konventionelle Leistungsprüfstände

Diese Dynamometer können als statische Geräte definiert werden, da sie nur Kräfte oder andere Größen wie Druck oder Momente ohne Bewegung messen können. Sie liefern eine Messung mit dem zu beurteilenden Körpersegment in einer festen Position, indem sie das Ergebnis einer isometrischen Kontraktion der angeforderten Muskelgruppe(n) aufzeichnen.

## Handgehaltene Dynamometer

Diese Dynamometer sind nicht fixiert und benötigen die Mitwirkung des Untersuchers. Bei der manuellen Dynamometrie nimmt der Untersucher das Gerät in die Hand und setzt es direkt an dem zu beurteilenden Gelenksegment an, um der von dieser Muskelgruppe ausgeübten Kraft in der entsprechenden Richtung Widerstand entgegenzusetzen. In der Bibliographie werden verschiedene Protokolle für diese Art der Muskelbeurteilung beschrieben, sowohl für die oberen als auch für die unteren Gliedmaßen (Abbildung 15), die im Allgemeinen Positionen anstreben, die die Wirkung der Schwerkraft neutralisieren.



Abbildung 15 - Beispiel für ein manuelles digitales Dynamometer: microFET@2 von Hoggan Scientific©, Bilder entnommen aus <https://hogganscientific.com/product/microfet2-muscle-tester-digital-handheld-dynamometer/>

Sobald das Dynamometer richtig positioniert ist, üben die Patienten einige Sekunden lang eine progressive Kraft gegen das Gerät aus, bis sie ihre maximale Muskelkapazität erreichen, während der Untersucher dieser Kraft widersteht, ohne sich zu bewegen und ohne eine Kraft auszuüben, die größer ist als die vom Probanden erzeugte, um eine isometrische Kontraktion zu erhalten, das heißt, ohne Gelenkverschiebung.

Die Validität und Zuverlässigkeit dieser Messungen hängt in den meisten Fällen von der Reproduzierbarkeit des Messprotokolls und von der Fähigkeit des Untersuchers ab, der von der zu beurteilenden Person ausgeübten Kraft korrekt Widerstand entgegenzusetzen. Um diesen Aspekt zu verbessern, werden auch Systeme zur Stabilisierung der zu beurteilenden Segmente eingesetzt. Trotzdem finden sich in der Bibliographie Studien, die beschreiben, dass die mit dem manuellen Gerät erzielten Ergebnisse signifikant mit denen korrelieren, die

mit einem isokinetischen Dynamometer erzielt wurden, sowie mit der Durchführung verschiedener funktioneller Aktivitäten wie Sit-to-Stand (STS), Gehen und Treppensteigen [12].

## Handgriff-Dynamometer

Der Hauptunterschied zwischen diesen Dynamometern und den vorhergehenden liegt in ihrer Konstruktion und ihrem Zweck, der ausschließlich in der Beurteilung der Griffkraft der Hand und in einigen Fällen der Kneifkraft besteht.

Diese Instrumente können vom Probanden ohne die Hilfe des Untersuchers verwendet werden. In einigen Fällen erlaubt ihr Design die Anpassung an unterschiedliche Handanthropometrien und/oder die Beurteilung verschiedener Griffpositionen. Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, müssen jedoch, wie bei Handdynamometern, strenge Positionierungsprotokolle und die Anweisungen des Untersuchers befolgt werden.

Die meisten von ihnen messen die Werte der maximalen Griffkraft, wobei es nur einen Freiheitsgrad gibt und es an Vielseitigkeit bei der Bewertung verschiedener Aktivitäten im Zusammenhang mit der Handfunktion mangelt. Die Bewertung der maximalen Griffkraft ist jedoch ein heute weit verbreiteter Parameter, nicht nur um die muskuläre Kapazität der Hand zu bestimmen, sondern weil sie in vielen Studien mit verschiedenen klinischen, psychologischen und physiologischen Fähigkeiten in Verbindung gebracht wird, insbesondere bei älteren Menschen. Daher kann sie leicht als Indikator in Studien oder Prozessen im Zusammenhang mit dem Altern, der Überwachung von Verletzungen, der Rehabilitation oder therapeutischen Prozessen in verschiedenen Bereichen verwendet werden.

Einige von ihnen, die auf Dehnungsmessstreifen basieren und eine Signalverarbeitungssoftware beinhalten, stellen Kraftverläufe über die Zeit grafisch dar, was es uns ermöglicht, z. B. Kraft- und Muskelermüdungsneigungen zu beurteilen (Abbildung 16).



Abbildung 16 - Beispiel für elektronische Dynamometer auf Basis von Dehnungsmessstreifen zur Messung der Griff- und Kneifkraft sowie der Muskelermüdung: (oben) kabelgebundene und kabellose Dynamometer von Vernier®, Bilder aus <https://www.vernier.com/products/sensors/hand-dynamometers/>, (unten) Beispiel des NedVEP/IBV-Dynamometers in Verbindung mit der NedMano/IBV-Software, die Darstellungen der Wiederholungen der maximalen Griffkraft der rechten Hand (rot) und der linken Hand (blau) liefert.

## Isokinetische Dynamometer

Sie sind dynamische Geräte, da sie Kräfte oder andere Größen wie z. B. Drehmomente messen, wobei der Körper in Bewegung ist und Verschiebungen erzeugt. Diese Geräte bieten eine Messung solcher Größen in Abhängigkeit von der Zeit und der Art der Bewegung, da sich das Gerät mit dem Körper bewegt, an dem es befestigt oder fixiert ist.

Diese Dynamometer widerstehen der vom Probanden ausgeübten Muskelkraft in Form einer Drehung (Drehmoment), die die Leistungsgeschwindigkeit mit einer bestimmten Frequenz steuert. Um eine konstante Leistungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten, variiert der vom Gerät erzeugte Widerstand in Abhängigkeit von der vom Probanden aufgebrachten Kraft. Wenn die Versuchsperson beispielsweise eine Kraft ausübt, die eine höhere Geschwindigkeit als die gewählte erzeugen könnte, erhöht der Leistungsprüfstand den Widerstand, so dass er wie eine Bremse wirkt und die stabile Geschwindigkeit beibehalten wird. Wenn die entwickelte Kraft geringer ist als die Kraft, die notwendig ist, um die Bewegung bei der eingestellten Geschwindigkeit zu halten, verringert das Gerät den Widerstand, um die Geschwindigkeit beizubehalten. Diese Geräte liefern Informationen über die aufgebrachte Kraft über den gesamten Bewegungsbereich [13].

Die ersten isokinetischen Dynamometer aus den 1960er Jahren bestanden aus einer Konstruktion, die einen hydraulischen Kolben, ein steuerbares Ventil, einen Hebelarm und eine Kraftmesszelle enthielt, die über den gesamten Bereich der Gelenkbewegung einen passiven Widerstand aufbauten. Spätere Verbesserungen waren die so genannten aktiven isokinetischen Dynamometer, die eine größere aktive Energiequelle in Form eines Elektromotors und eines Computers enthielten. Zusätzlich enthalten sie ein an der Drehachse montiertes Potentiometer, das Informationen über den Winkel liefert, und in einigen Fällen einen separaten Tachometer, der die Winkelgeschwindigkeit misst [14].

Auf diese Weise können die Kapazitäten eines Muskels isometrisch, konzentrisch und exzentrisch unter verschiedenen Bedingungen gemessen werden, wobei Informationen über das Kraftsignal und die Momente in Echtzeit sowohl in numerischer als auch in grafischer Form erhalten werden [15].



Abbildung 17 - Beispiele für isokinetisch-dynamometrische Geräte (von links nach rechts): Ellenbogen- und Kniebeurteilung mit System 4 Pro™ von Biodex™, Bilder extrahiert von <https://www.biodex.com/physical-medicine/products/dynamometers/system-4-pro/>; und Halswirbelsäulenbeurteilung mit MCU Multi-Cervical Unit von BTETM, Bild extrahiert von <https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/mcu/>

Dieses Gerät wird zur Beurteilung der Gelenke der oberen und unteren Gliedmaßen sowie der Wirbelsäule verwendet (Abbildung 17), wobei das Knie eines der ersten Gelenke ist, das mit dieser Methodik untersucht wird. Ein üblicher isokinetischer Test zur Beurteilung der maximalen Muskelkapazität beinhaltet die Durchführung von drei oder vier aufeinanderfolgenden Kontraktionen nach einer Phase der Gewöhnung an das Gerät und einer vorherigen Aufwärmphase.

Bei der Verwendung dieser Messtechnik müssen einige Faktoren berücksichtigt werden, wie z. B. die Faktoren, die mit der Testperson (Alter, Geschlecht usw.), der verwendeten Ausrüstung und dem Messprotokoll zusammenhängen. Die Bewertung mit dieser Art von Dynamometer ist in hohem Maße protokolliert, da die Testperson richtig positioniert sein muss und die zu bewertenden Gelenke genau mit den Rotationsachsen des Dynamometers ausgerichtet sein müssen, um eine korrekte Bewertung zu erhalten; daher sollte die Fachkraft, die die Bewertung durchführt, geschult sein, um sie korrekt durchzuführen und die Ergebnisse zu interpretieren.

Da sie den Widerstand variieren und den höchsten Überlastungsreiz über den gesamten Bewegungsbereich des Gelenks aufnehmen, werden diese Dynamometer nicht nur als Messsysteme, sondern auch als Rehabilitations- und Trainingswerkzeuge zur Muskelkonditionierung eingesetzt.

In den letzten Jahren konzentrierte sich die Forschung im Zusammenhang mit der Anwendung der isokinetischen Dynamometrie auf methodische Fragen wie das Protokolldesign und die Reproduzierbarkeit der Testergebnisse, die Anwendung bei bestimmten Probanden- und/oder Patientengruppen und die Implementierung im medizinisch-rechtlichen Bereich [15].

## Parameter

Die Parameter, die in der Regel aus diesen Geräten extrahiert werden, sind diejenigen, die mit der Kraft zusammenhängen. Das Hauptergebnis, das von konventionellen dynamometrischen Geräten geliefert wird, ist der absolute Wert der maximalen Muskelkraft,

im Allgemeinen ausgedrückt in Newton. Aus diesem Wert kann man die **Durchschnittskraft** (Durchschnitt der maximalen Muskelkraft, die in verschiedenen Wiederholungen durchgeführt wurde), die Variabilität der Messungen, z. B. durch den **Variationskoeffizienten** (Standardabweichung der Maximalkräfte in Bezug auf die Durchschnittskraft, ausgedrückt in Prozent), oder den **Index des Kraftverlustes** in Bezug auf die bewertete Muskelgruppe der kontralateralen Extremität erhalten.

Isokinetische Geräte liefern Informationen über den Absolutwert der maximalen Muskelkraft (N), die an jedem Punkt des Gelenkbereichs ausgeübt wird, das **Torsionsmoment oder Drehmoment** (Nm) und die **Winkelgeschwindigkeit** (m/s), mit der der Test durchgeführt wurde. Der **Maximalwert des Moments/der Kraft** in der Kurve der Winkelposition in Bezug auf das Moment (MAP) (Abbildung 18) gilt als Standardmessung bei isokinetischen Tests.

Zusätzlich werden die Ergebnisse einer isokinetischen Beurteilung üblicherweise als Vergleich oder Prozentsatz ausgedrückt. Die üblicherweise berechneten Parameter sind **bilaterale Vergleiche** (Kraftunterschied zwischen der dominanten/kontralateralen Gliedmaße und/oder der gesunden/pathologischen Gliedmaße), **sequenzielle Vergleiche** (Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Zeiträumen oder Situationen), Vergleiche mit **Typkurven** des Drehmoments, Vergleiche zwischen **gegenüberliegenden Muskelgruppen**, Vergleiche zwischen der **konzentrischen und exzentrischen Arbeit** und Vergleiche der **bei verschiedenen Geschwindigkeiten** ausgeübten Kraft.

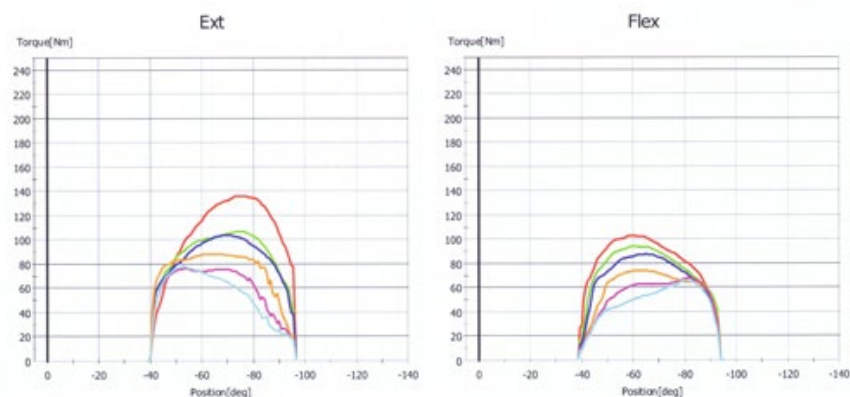


Abbildung 18 - Beispiel einer Darstellung der MAP-Kurve einer Streckbewegung (links) und einer Beugebewegung (rechts), Bild entnommen aus <https://www.isokinetics.net/index.php>

## Vorteile und Nachteile

Zu den Vorteilen der manuellen dynamometrischen Systeme gehören die Tragbarkeit, die geringen Kosten und die einfache Handhabung im Vergleich zu isokinetischen dynamometrischen Systemen.

Einer der Hauptnachteile bei der Verwendung von handgehaltenen Dynamometern ist der Einfluss des Prüfers auf die Zuverlässigkeit der Messungen. Für die Bewertung von geschwächten oder verletzten Muskelgruppen sind die Ergebnisse, die Validität und die Reproduzierbarkeit angemessen; dies kann jedoch in Abhängigkeit von der Stärke des Untersuchers, der Variabilität der Platzierung des Dynamometers senkrecht zur Krafrichtung und der bewerteten Muskelgruppe variieren; zum Beispiel sind die für die untere Extremität

erzielten Ergebnisse in der Regel weniger reproduzierbar als die der oberen Extremität, wo die größte erzeugte Kraft höher ist.

Isokinetische Systeme haben eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen handgehaltenen dynamometrischen Systemen, wie z.B. die Sicherheit des Probanden während der Durchführung der Bewegung gegen einen akkommodierenden Widerstand, strenge und genau definierte Protokolle, die Möglichkeit, den Widerstand zu akkommodieren, die Auswahl der Leistungsgeschwindigkeit und die Bewertung der Muskelkraft durch konzentrische und exzentrische sowie isometrische Arbeit.

Außerdem ermöglichen sie die Objektivierung der Kurven von Kraft/Bewegungsumfang und den Vergleich der verschiedenen Werte, die innerhalb einer Untersuchung erhalten wurden, sowie mit denen aus anderen Untersuchungen. Es ist ein genaues Gerät zur Bewertung der Muskelfunktion als Ganzes oder an verschiedenen Punkten des Gelenkbereichs.

Die Interpretation der mit isokinetischen Geräten gewonnenen Kraftergebnisse ist jedoch nicht unproblematisch; weitere Nachteile sind der Einfluss der Beschleunigungs-/Verzögerungszeiten, der Einfluss der Variabilität der Messungen auf die Berechnung bestimmter Parameter oder das Fehlen standardisierter Verfahren trotz intensiver Forschung und weit verbreiteter Bemühungen zur Optimierung der Tests.

Einige Studien argumentieren auch, dass die mit diesen Geräten gemessene dynamische Kraft wenig Bezug zum Funktionszustand des Patienten nach einem konservativen oder chirurgischen Eingriff hat.



## 5. Hauptanwendungsgebiete

---

Instrumentelle Techniken der Kraftanalyse ermöglichen es, durch die Analyse verschiedener Variablen zu wissen, wie menschliche Bewegungen ablaufen. Die Kraftanalyse liefert Informationen darüber, warum eine Bewegung stattfindet und ergänzt die deskriptive Analyse der Bewegung, die durch kinematische Informationen bereitgestellt wird. Die Untersuchungsvariablen werden in den ausgewählten Messverfahren bestimmt, um das Ziel der Studie zu charakterisieren.

Diese instrumentierten biomechanischen Analysemethoden werden in einigen Bereichen aufgrund der Verbesserungen dieser Technologien in Bezug auf Tragbarkeit, Einarbeitung in textile Materialien und Konnektivität mit mobilen Apps, wie im Fall von Druckanalyse-Systemen, tagtäglich eingesetzt. Es ist jedoch wichtig, die technischen Merkmale der Geräte, die Verfahren für die Verwendung, die Zuverlässigkeit und die Gültigkeit in Bezug auf die Anwendungen, für die sie bestimmt sind, korrekt zu spezifizieren, um eine unsachgemäße Verwendung durch Fachleute, Lehrer oder Endnutzer zu vermeiden.

Die häufigsten Anwendungsbereiche sind solche, die sich auf den klinischen Bereich, Sport und Ergonomie beziehen. Einige der häufigsten Anwendungsfälle in diesen Bereichen sind im Folgenden aufgeführt.

### Klinische Einstellung

Im klinischen Bereich sind die Hauptanwendungen und -einsätze dieser Techniken:

- Charakterisierung normaler Bewegungen und Bewegungen, die für bestimmte Pathologien charakteristisch sind, sowohl neurologische als auch muskuloskeletale, insbesondere in Bezug auf den Gang.
- Zur objektiven Quantifizierung der funktionellen Kapazität der Person zur Durchführung von Aktivitäten des täglichen Lebens und zur Bestimmung des Grades der Veränderung.
- Um die Rehabilitationsstrategien zu planen, ihren Fortschritt zu überwachen und sie anzupassen.
- Zur Unterstützung bei der Entscheidung, ob eine Behandlung fortgesetzt, modifiziert oder beendet werden soll.
- Zur Unterstützung bei der Implantation und Anpassung von Orthesen und/oder technischen Hilfsmitteln.
- Um Indikatoren für die Wirkung eines Verfahrens zu erhalten, um die Effizienz der laufenden Prozesse zu verbessern.
- Erstellung von Richtlinien und Überwachung mittels tragbarer Technologien, die die Adhärenz und Motivation von Menschen in bestimmten gesundheitsbezogenen Prozessen verbessern.

## Sport

Im Sportbereich sind die Hauptanwendungen und -einsätze dieser Techniken:

- Zur Überwachung der Sporttechnik und Verbesserung der Leistung durch quantitative Korrektur von Fehlern und Mängeln in den technischen Bewegungen.
- Unterstützung der Profis bei ihren Trainingstechniken durch Beurteilung der Assimilation des Trainings durch den Athleten.
- Ermittlung der Risikofaktoren für spezifische Verletzungen, die mit anatomischen Variablen, Techniken und den physikalischen Eigenschaften und dem Verhalten der in der Sportpraxis verwendeten Materialien zusammenhängen.
- Vermeidung von Verletzungen durch Beratung über die sichere Ausführung der Sporttechniken, basierend auf den Informationen, die diese Techniken liefern.
- Zur Überwachung des Fortschritts verschiedener interessanter Variablen im Sportrehabilitationsprozess, was die Erholung und Anpassung an die Sportpraxis unterstützt.

## Ergonomie

Die Hauptanwendungen der instrumentellen Techniken im Bereich der Ergonomie am Arbeitsplatz und der Produktgestaltung sind:

- Beurteilung/Beschreibung des mit einer Tätigkeit verbundenen Muskel-Skelett-Risikos.
- Charakterisierung von sich wiederholenden Positionen und Gelenkbewegungen, die bei einer bestimmten Tätigkeit auftreten.
- Identifizierung von Verhaltensmustern, die durch Muskelermüdung und -belastung bei arbeitsbezogenen Aufgaben verursacht werden.
- Hilfe bei der Neugestaltung und Validierung von Jobs und Produkten.
- Beurteilung von Geräten und externen Hilfsmitteln im Arbeitskontext.
- Produktentwicklung unter ergonomischen Gesichtspunkten.

## 6. Exemple

---

Dieser Abschnitt enthält einige Beispiele für Studien und Anwendungen, die für die Fach- oder Anwenderebene bestimmt sind und bei denen verschiedene instrumentelle Techniken zur Bewegungsanalyse im Einklang mit den oben beschriebenen Zielen eingesetzt werden.

In den letzten Jahren wurde eine signifikant steigende Anzahl von **klinischen** Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit der biomechanischen Analyse veröffentlicht, was ein zunehmendes Interesse an den differenzierten Informationen zeigt, die aus diesen Techniken gewonnen werden. Diese Informationen werden vor allem in Bereichen angewandt, die mit der funktionellen Bewertung der Kapazitäten von Menschen, der Charakterisierung verschiedener Pathologien, der Festlegung und Planung einer Rehabilitation usw. verbunden sind. Diese Informationen werden in erster Linie in Bereichen eingesetzt, die mit der funktionellen Bewertung der menschlichen Fähigkeiten, der Charakterisierung verschiedener Pathologien, der Erstellung und Planung einer Rehabilitation usw. verbunden sind, hauptsächlich im Zusammenhang mit den Reaktionskräften und Drücken, die beim menschlichen Gang und bei der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts erzeugt werden, sowie der Bewertung der verschiedenen Manifestationen der Muskelkraft.

### Rehabilitation

Der aktuelle Anstieg der Lebenserwartung führt dazu, dass ein höherer Prozentsatz der Bevölkerung altert. Diese Bevölkerung wird aufgrund des fortschreitenden Verlusts ihrer funktionellen Fähigkeiten, verbunden mit dem Risiko, ihre Funktionalität zu verringern oder neuromuskuläre Pathologien zu erleiden, mehr Gesundheitsversorgung benötigen. Dieser Funktionsverlust ist zum Beispiel mit dem Risiko verbunden, zu stürzen, was erhebliche Folgen für die Lebensqualität der Menschen hat. Dies wirkt sich auf die Gesundheitssysteme aus, da deren Versorgungskapazität erheblich reduziert werden kann.

In diesem Zusammenhang werden Lösungen durch neue, kostengünstige Technologien gesucht, die Alternativen zu Krankenhausbehandlungen bieten und eine Fernüberwachung und -steuerung ermöglichen. Die Systeme, die Bewegungen und Kräfte aufzeichnen, meist in einer Umgebung, die auf Videospiele basiert, ermöglichen die Durchführung von Trainings- und Rehabilitationsübungen sowie die Überwachung des Fortschritts. Die zunehmende Zahl dieser Initiativen im klinischen Umfeld ist ein Beweis für ihre Effektivität. Einer dieser Gründe ist die Fähigkeit, Adhärenz zu den Behandlungen zu schaffen, aufgrund der technologischen und freizeithlichen Komponente, die diese Werkzeuge bieten.

Als Beispiel ist die Verwendung des Nintendo® Wii Balance Boards (WBB) in der klinischen Gemeinschaft aufgrund seiner vielfältigen Vorteile wie Preis, Tragbarkeit und Leistung, die mit der von teureren Geräten vergleichbar ist, zunehmend verbreitet, insbesondere in der Rehabilitation. Die meisten Vorschläge für Leitlinien und Rehabilitationstraining mit dieser Plattform sind für Patienten mit neurologischen (Hemiplegie, Parkinson, Alzheimer,

Hirnschäden usw. ) oder vestibulären Pathologien gedacht. Die Arbeit von Llorens et al. [16] "Balance rehabilitation using custom-made Wii Balance Board exercises: clinical effectiveness and maintenance of gains in an acquired brain injury population" (Gleichgewichtsrehabilitation mit maßgeschneiderten Übungen auf dem Wii Balance Board: klinische Wirksamkeit und Aufrechterhaltung von Gewinnen in einer Population mit erworbener Hirnschädigung) untersucht, ob das Training mit maßgeschneiderten Rehabilitationsübungen unter Verwendung der Kraftplattform (Abbildung 19) das Gleichgewicht in einer Stichprobe von Probanden mit erworbener Hirnschädigung verbessert und ob dieser Effekt über die Zeit anhält, wenn dieses Training nicht stattfindet. Eine der Schlussfolgerungen deutet darauf hin, dass die Durchführung von Übungen mit diesem Gerät bei der untersuchten Stichprobe im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die konventionelle Behandlungen durchführt, dauerhaft positive Auswirkungen hat.



Abbildung 19- Patienten interagieren mit dem Prototyp des virtuellen Reha-Systems easy balance (eBaViR), Bilder entnommen aus Llorens et al. [16].

## Bewertung der Wirkung einer Intervention

Das Hauptziel von chirurgischen Eingriffen nach einer muskuloskelettalen Verletzung ist die Wiederherstellung des geschädigten Gelenks in den vorherigen Zustand oder mit größtmöglicher Funktionalität. Eine der Hauptvariablen zur Bewertung der Ergebnisse der verwendeten chirurgischen Techniken ist die Muskelkraft. Um die Effektivität eines chirurgischen Eingriffs zu beurteilen, liefert die isometrische Beurteilung einer bestimmten Muskelgruppe nicht die notwendigen Informationen, und es ist notwendig, die Kraft über den gesamten Gelenkbereich zu beurteilen.

Die Studie von The et al. [17] "Long-term functional results and isokinetic strength evaluation after arthroscopic tenotomy of the long head of biceps tendon" (Langfristige funktionelle Ergebnisse und isokinetische Kraftbewertung nach arthroskopischer Tenotomie des langen Kopfes der Bizepssehne) bewertet die biomechanische Funktion des Oberarms nach einer arthroskopischen Tenotomie des langen Kopfes des Bizeps (LHB) im Langzeit-Follow-up. Die instrumentelle Technik, die zur Kraftmessung verwendet wird, ist das Biodex®-System (Biodex Medical Systems, Shirley, NY, USA). Die isokinetische Kraft wird mit einer Geschwindigkeit von 120°/s über den gesamten Bereich der Ellenbogenflexion und -supination gemessen, sowohl im verletzten als auch im gesunden Arm. Die Untersuchungsvariablen, in diesem Fall das Drehmoment für eine nachfolgende Analyse,

sind die durchschnittlichen Spitzendrehmomentwerte und die Gesamtarbeit (die Fläche unter der Kurve nach der grafischen Darstellung der Drehmomentwerte während des Gelenkbereichs), die über den gesamten Gelenkbereich geleistet wurde (Abbildung 20). Eine der Schlussfolgerungen dieser Studie zeigt eine signifikante Verringerung der Kraftspitze sowohl in der Ellenbogenbeugung als auch in der Supination; die klinische Funktion bleibt jedoch gut, da die muskulären Kompensationen der oberen Extremität die über den gesamten Gelenkbereich geleistete Kraft und Arbeit erhalten.

Das Ziel dieser Studien ist es, die Ergebnisse einer chirurgischen Technik bei bestimmten Verletzungen, Populationen und Anforderungen zu bewerten. Dadurch ist es möglich, die korrekte Verschreibung sicherzustellen oder Änderungen vorzuschlagen, was zum Fortschritt der Behandlungen beiträgt.

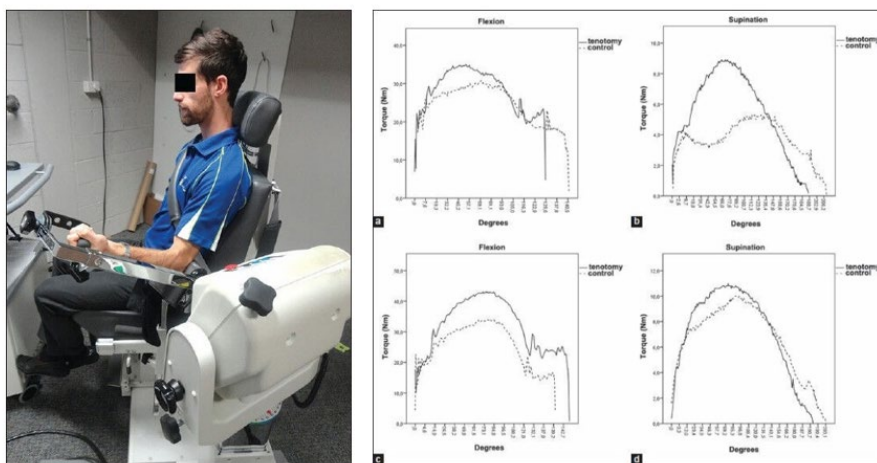


Abbildung 20 - Positionierung des Patienten im Biodex®-System (links) und Ergebnisse der Drehmomentkurven des gesunden Arms (gestrichelte Linie) und des verletzten Arms (durchgezogene Linie) zweier Patienten für Flexion und Supination (rechts), Bilder entnommen aus The et al. [17].

## Aktivitätsüberwachung

Diabetes verursacht Veränderungen auf der zirkulatorischen und peripheren neurologischen Ebene, die die Sensibilität und die propriozeptive Fähigkeit der unteren Gliedmaßen während des Gehens beeinträchtigen. Eines der mit dieser Pathologie verbundenen Probleme ist die Entwicklung von Fußgeschwüren, die eine der Hauptursachen für Krankenhausaufenthalte bei Menschen mit Diabetes sind. Wenn Faktoren wie ein übermäßiger Anstieg des Drucks, der Temperatur und/oder der Feuchtigkeit nicht kontrolliert werden, können ernsthafte Durchblutungsstörungen auftreten und zu schweren Hauterkrankungen wie Geschwüren oder sogar Amputationen führen.

Initiativen wie das Orpyx® SI-System können dank einer sensorisierten Einlegesohle plantare Drücke und Temperaturen aufzeichnen. Diese Aufzeichnung analysiert die Fußabdrücke im täglichen Leben und informiert die Nutzer über eine mobile App über die Entwicklung ihres Fußabdrucks; außerdem sammelt sie die Daten und sendet sie an den Mediziner, um mögliche Komplikationen zu vermeiden (Abbildung 21).

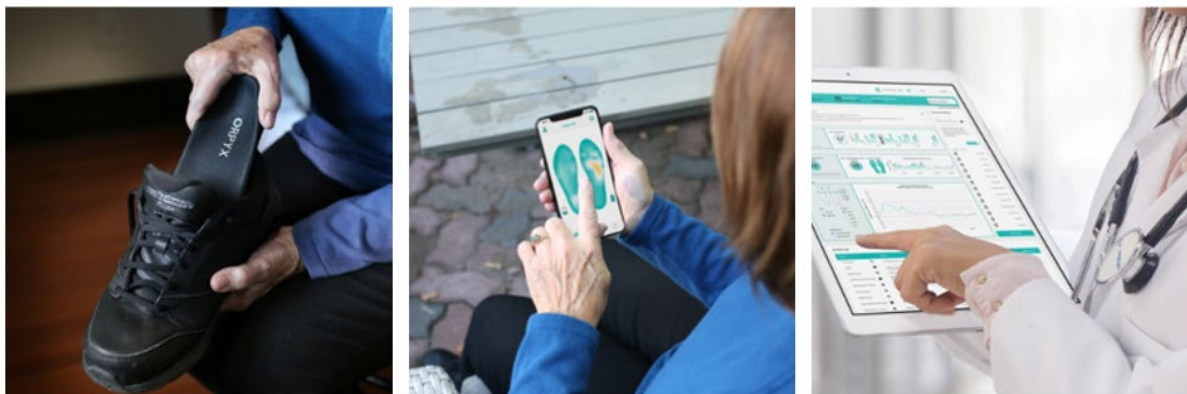


Abbildung 21 - Orpyx® SI, sensorisierte Einlegesohle, mobile App mit grafischen Informationen und Aufzeichnung der täglichen Aktivität des Probanden, Bilder extrahiert von <https://www.orpyx.com/>.

Die Anwendungen im Bereich des **Sports** sind in Bezug auf Wirkung und Nachfrage beliebter, vor allem aufgrund der steigenden Anzahl von Menschen, die Sport treiben und an verschiedenen Disziplinen teilnehmen, die mit Maßnahmen zur Gesundheitsförderung durch körperliche Aktivität zusammenhängen.

Der Einsatz instrumenteller Techniken der biomechanischen Analyse ermöglicht die Gewinnung quantitativer Informationen in Bezug auf Trainingstechniken, die Auswahl von Trainingsmaterial oder die Überwachung von Variablen, die mit der Leistung und dem Gesundheitsschutz zusammenhängen [2]. Die Hauptanwendungen der Analyse von Reaktionskräften und -drücken konzentrieren sich auf die Analyse der Lauftechnik, die Interaktion mit dem Schuhwerk oder verschiedenen Materialien in Bezug auf Stoßdämpfung und Reibungskoeffizienten, die Fähigkeit, das Gleichgewicht zu kontrollieren, sowie die Untersuchung der Muskelkraft und ihrer Hauptmanifestationen im Sport, wie die maximale dynamische Kraft, maximale Explosivkraft usw.

### Risikofaktoren bei der Prävention von Sportverletzungen

Verletzungen ziehen Perioden der sportlichen Inaktivität nach sich und verhindern in einigen Fällen sogar die Rückkehr zum normalen Training mit einem bestimmten Anforderungsniveau. Aus diesem Grund ist die Identifizierung von Faktoren, die das Verletzungsrisiko erhöhen können, eines der Hauptziele im Sport, insbesondere auf professionellem Niveau. Es gibt viele klinische, radiologische oder physiologische Tests, die verschiedene Faktoren untersuchen, die zu Verletzungen beitragen. In diesem Zusammenhang gibt es auch Faktoren, die mit der Biomechanik der Sportbewegung zusammenhängen, die es uns ermöglichen, mit diesen biomechanischen Analysetechniken spezifische Variablen der Sportbewegung zu analysieren, die mit dem Auftreten von Verletzungen in Verbindung stehen.

Die Kraftanalyse ist eine der Methoden, mit denen dieses Ziel erreicht werden kann. Im Folgenden werden einige Beispiele aufgeführt, um das Potenzial dieser Kraftanalyzesysteme bei der Untersuchung und Prävention von Sportverletzungen zu verdeutlichen.

Verletzungen des vorderen Kreuzbandes (VKB) sind eines der wichtigsten Knieprobleme im Sport. Eine VKB-Verletzung und die anschließende Rehabilitation nehmen viel Zeit in Anspruch und verhindern in einigen Fällen die Rückkehr zu einer hochrangigen und anspruchsvollen Sportpraxis. Es ist wichtig, die Mechanismen zu kennen, die diese Art von Verletzung verursachen, die für die Genesung notwendigen Faktoren zu objektivieren und die ideale Genesungszeit festzulegen. Es gibt mehrere interne (anatomische, physiologische, etc.) und externe (Schuhwerk, Oberfläche, etc.) Faktoren, die diese Verletzung beeinflussen, von denen einige mit der Biomechanik der unteren Extremität zusammenhängen. Einer der am meisten untersuchten Aspekte ist der Einfluss der Biomechanik der Gelenke der unteren Gliedmaßen auf die Sprunglandungsaktionen, wie z. B. die Auswirkung auf spezifische Risikofaktoren für Verletzungen wie den dynamischen Knievalgus. Als Beispiel untersucht die Arbeit von Tran et al. [18] "The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury" den Einfluss der Fußposition auf die Sprunglandung (Abbildung 22). Für die Aufzeichnung der Reaktionskräfte werden Bertec-Kraftmessplatten verwendet (Bertec Corporation, Columbus, OH, USA), die mit optischen Bewegungsanalysegeräten synchronisiert sind, um die Studienvariablen zu erhalten.

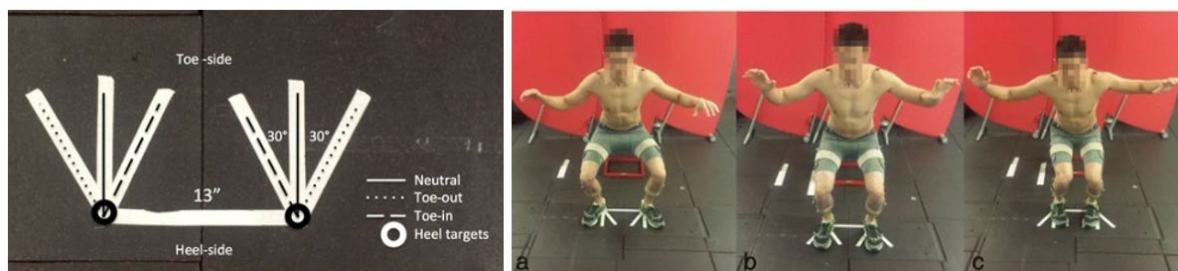


Abb. 22 - Schablone auf der Plattform, die die drei Fußpositionen bei der Landung (links) und ein Beispiel für die Sprungaufnahme in diesen drei Positionen zeigt: Zehe-aus, neutral und Zehe-ein; Bilder entnommen aus Tran et al.[18].

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Zehenlandeposition die Anzahl der Risikofaktoren im Zusammenhang mit einer VKB-Verletzung erhöht. Die Veränderung der Fußposition auf dem Boden scheint die Biomechanik der unteren Gliedmaßen sowohl bei Männern als auch bei Frauen während eines beidbeinigen Sprungs signifikant zu verändern und kann ein Ziel für die Modifikation des Bewegungsmusters sein [18].

Im Falle des Laufens gibt es verschiedene Systeme zur Analyse des Plantardrucks, um den Fußabdruck des Sportlers zu charakterisieren und wie im folgenden Beispiel die Veränderungen des Fußabdrucks während des Laufens zu überwachen und zu analysieren, zusätzlich zur Aufzeichnung verschiedener mit dem Training verbundener Variablen. Das SensoriaFitness® -System besteht aus einer Socke mit Drucksensoren in bestimmten Bereichen des Fußes, die die während des Laufens auftretenden Veränderungen der Auflage messen und die Informationen in Echtzeit an eine mobile App übertragen (Abbildung 23). So können die Benutzer die Informationen über die Veränderungen sehen, die bei ihrem Training auftreten und mit einem möglichen Verletzungsrisiko in Verbindung stehen könnten.



Abbildung 23 - Drucksensordrucksystem, eingebettet in die Sensoria© Smart Sock, den Sensoria© Core und die Sensoria© Run App, Bilder entnommen aus <https://www.sensoriafitness.com/>

## Sporttechnische Bewertung

Laufen ist eine der am meisten ausgeübten Sportarten weltweit. Immer mehr Menschen üben das Laufen auf Amateurebene aus. Einer der Gründe dafür ist die Tatsache, dass man nur ein Paar Schuhe und verfügbare Zeit braucht, um Laufen zu üben. Wie in anderen Disziplinen auch, sind jedoch die Sporttechnik und das verwendete Material wichtige Elemente für eine effiziente Leistung und die Vermeidung von Verletzungen. Viele Arbeiten befassen sich mit der Untersuchung verschiedener Variablen, wie z. B. den Reaktionskräften beim Fußauftritt, genauer gesagt mit der Reaktionskraft in der Auftretphase.

Für diese Art von Studie werden dynamometrische Plattformen verwendet, um die vertikale Reaktionskraft des Fußaufschlags zu analysieren. Als Beispiel zeigt Abbildung 24 die unterschiedlichen Morphologien der Aufprallkraft je nach Art des Fußaufschlags beim Barfußlaufen oder in Schuhen. Neben der Charakterisierung der Art der Lauftechnik (Vorfuß-, Mittelfuß- und Rückfußlauf) erlauben sie uns, die Beziehung zwischen der Technik, der Effizienz und dem oben erwähnten Verletzungsrisiko zu untersuchen.

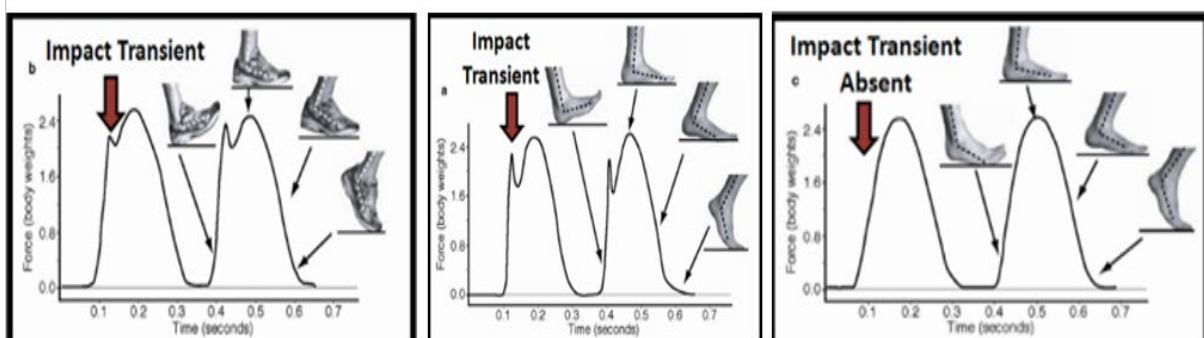


Abbildung 24 - Morphologien der vertikalen Reaktionskräfte beim Laufen mit anfänglichem Rückfußaufprall in Schuhen (links), barfuß (Mitte) und mit Mittelfußstütze barfuß (rechts), Bilder extrahiert aus <http://barefootrunning.fas.harvard.edu/4BiomechanicsofFootStrike.html>

Im Bereich der **Ergonomie** werden instrumentelle Techniken im beruflichen Umfeld eingesetzt, um die Muskelbelastung und -kapazität während der Ausführung verschiedener Aufgaben zu erfassen. Dies ermöglicht die Erforschung, Untersuchung und Entwicklung von



Methoden für die korrekte Anpassung der Umgebungen und Produkte sowie die Bestimmung beispielsweise des Risikos von Muskel-Skelett-Erkrankungen. Diese Techniken ermöglichen es uns auch, verschiedene Produkte oder Umgebungen aus ergonomischer Sicht zu entwerfen und zu validieren, d. h. unter Berücksichtigung der Bedürfnisse und Eigenschaften des Probanden.

## Simulation von Arbeitsplätzen und Arbeitsaufgaben

Es gibt einige Geräte, die z. B. die Muskelkraft während der Ausführung bestimmter Aufgaben, die den Arbeitsaufgaben ähneln, beurteilen können. Dies ermöglicht es uns, die Muskelkapazität bestimmter Muskelgruppen des Individuums bei der Ausführung von Aufgaben, die mit den Anforderungen des Arbeitsplatzes verbunden sind, zu kennen und ihre Leistung zu untersuchen. Außerdem kann dies auch für Rehabilitationsmaßnahmen genutzt werden.

Ein Beispiel ist das HdO© Simulator II® -Gerät (Abbildung 25). Dieses Gerät kann mehrere Aktivitäten der oberen Gliedmaßen im Zusammenhang mit der Arbeit oder Aufgaben des täglichen Lebens reproduzieren, einschließlich der Möglichkeit, die Muskelkraft auf isometrische oder konzentrisch-isotonische Weise zu bewerten und Bewertungs- und Rehabilitationsprotokolle zu erstellen.

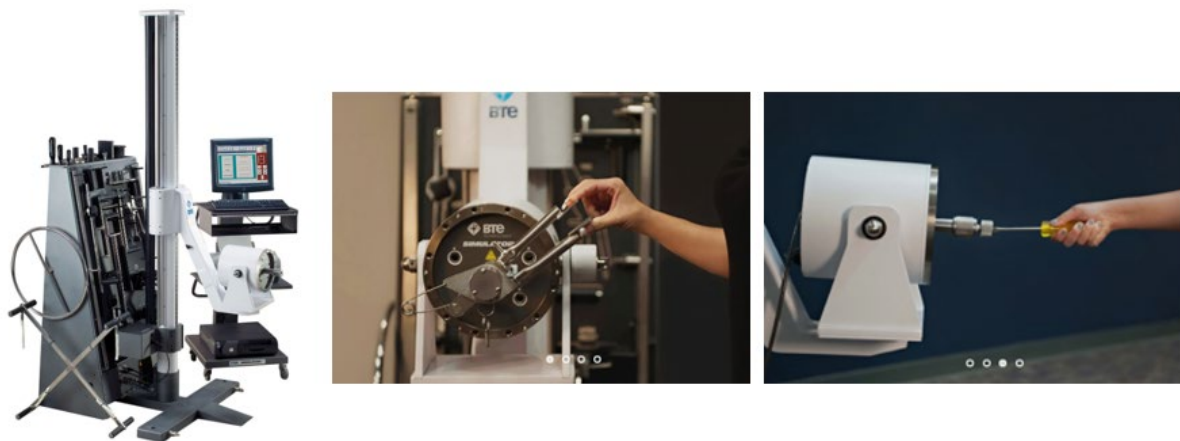


Abbildung 25 - Der HdO©-Simulator II® und ein Beispiel für die Bewertung der Muskelkraft bei alltäglichen Aktivitäten (digitales Zwicken) und/oder Arbeitstätigkeiten (Schrauben), Bilder entnommen aus <https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/simulator-ii/>

## Produktbewertung

Diese Geräte können auch bei der Konstruktion oder Bewertung von Produkten nach ergonomischen Kriterien eingesetzt werden. Diese Bewertung ermöglicht es, die erzielten Ergebnisse mit Referenzkriterien zu vergleichen.

Ein Beispiel hierfür ist die Aufzeichnung von Drücken, um die Interaktion zwischen Proband und Produkt zu analysieren. So besteht das System Tactilus Bodyfitter® von Sensor Products Inc. (USA) besteht aus einer Druckmatte, die die Druckverteilung und die Größe zwischen Proband und Liegefläche analysiert. Diese Informationen werden aufgezeichnet und durch Druckkarten grafisch dargestellt (Abbildung 26).

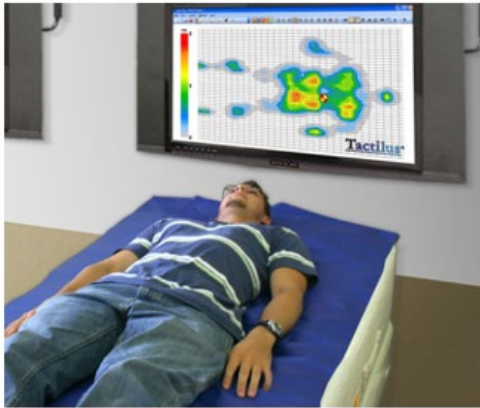


Abbildung 26 - Beispiel einer Analyse der Druckverteilung zwischen Person - Matratze mit dem Tactilus Bodyfitter®-System und Druckkarte (rechts), Bilder aus <https://www.sensorprod.com/dynamic/mattress.php>

## 7. Wichtige Ideen

---

Die wichtigsten Schlüsselideen dieser didaktischen Einheit sind:

- Es gibt verschiedene Arten von Sensoren mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Analyse der Kraft in biomechanischen Studien.
- Die wichtigsten Kraftparameter, die aus diesen Techniken extrahiert werden, beziehen sich auf die Erfassung der Reaktionskräfte in den drei Raumachsen, Drücke, Beschleunigungen und Muskelkraft.
- Diese Sensoren sind je nach Messobjekt und deren Eigenschaften in unterschiedlichen Geräten enthalten.
- Um einen Sensor entsprechend dem zu messenden Objekt auszuwählen, ist es notwendig, die technischen Merkmale und Spezifikationen der verschiedenen Sensoren sowie deren Messverfahren zu kennen.
- Spezifische instrumentelle Techniken der biomechanischen Analyse werden in Bereichen wie dem klinischen Umfeld, Sport und Ergonomie mit vielfältigen Anwendungen eingesetzt.
- Die fortschreitende technologische Entwicklung, wie z. B. tragbare Aufzeichnungssysteme und die Anbindung an mobile Apps, wird neue Anwendungen für die biomechanische Beurteilung ermöglichen und deren Einsatzbereiche erweitern.

## 8. Referenzen

---

- [1] Aritan S. (2014) Biomechanical Measurement Methods to Analyze the Mechanisms of Sport Injuries. In: Doral M., Karlsson J. (eds) Sports Injuries. Springer, Berlin, Heidelberg
- [2] Winter, David A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Fourth Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [3] Dabling, J. G., Filatov A. and Wheeler, J. W. Static and cyclic performance evaluation of sensors for human interface pressure measurement. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, 2012, pp. 162-165. [DOI: 10.1109/EMBC.2012.6345896](https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6345896)
- [4] Wong, Wai Yin & Wong, M. S. & Lo, Kam. (2007). Clinical Applications of Sensors for Human Posture and Movement Analysis: A Review. Prosthetics and orthotics international. 31. 62-75. [DOI: 10.1080/03093640600983949](https://doi.org/10.1080/03093640600983949).
- [5] Gurchiek, R.D. et al. Remote Gait Analysis Using Wearable Sensors Detects Asymmetric Gait Patterns in Patients Recovering from ACL Reconstruction, 2019 IEEE 16th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 1-4. [doi: 10.1109/BSN.2019.8771038](https://doi.org/10.1109/BSN.2019.8771038).
- [6] Pimentel do Rosario, J.L. Biomechanical assessment of human posture: A literature review. Journal of Bodywork and Movement Therapies. Volume 18, Issue 3, July 2014, Pages 368-373. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2013.11.018>.
- [7] Kavanagh, J. J., Menz, H.B. Accelerometry: A technique for quantifying movement patterns during walking. Gait & Posture. Volume 28, Issue 1, July 2008, Pages 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.10.010>.
- [8] Razak, A.H.A., Zayegh, A., Begg, R.K., Wahab, Y. Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. Sensors 2012, 12(7), 9884-9912. <https://doi.org/10.3390/s120709884>.
- [9] Orlin, M.N., McPoil, T.G. Plantar Pressure Assessment, Physical Therapy, Volume 80, Issue 4, 1 April 2000, Pages 399-409, <https://doi.org/10.1093/ptj/80.4.399>.
- [10] Gámez, J., Garrido, D., Montaner, C., Alcántara, E. "Aplicaciones tecnológicas para el análisis de la actividad física para el rendimiento y la salud" en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M. Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, pp. 173 – 197.
- [11] Christenson, Jeff. Sensors and Transducers. In: Handbook of Biomechatronics, Jacob Segil, Ed. London : Academic Press, is an imprint of Elsevier 2019, Pages 61-93.

- [12] Bohannon, R.W. Considerations and Practical Options for Measuring Muscle Strength: A Narrative Review. *BioMed Research International*, vol. 2019, Article ID 8194537, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8194537>.
- [13] Osterning, L.R. Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. *Exercise and sport sciences reviews*, 1986, vol. 14, p. 45-80.
- [14] D. Gordon E. Robertson, Graham E. Caldwell, Joseph Hamill, Gary Kamen, Saunders N. *Research methods in biomechanics*. Second Edition, Ed. Human Kinetics, Inc., 2013.
- [15] Dvir, Z. Isokinetic Muscle Testing: Reflections on Future Venues. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, Volume 18, Issue 2, August 2000, Pages 41-46. [https://doi.org/10.1016/S1013-7025\(00\)18002-9](https://doi.org/10.1016/S1013-7025(00)18002-9)
- [16] Llorens, Roberto & Albiol, Sergio & Gil-Gomez, Jose-Antonio & Alcañiz Raya, Mariano & Colomer, Carolina & Noé, Enrique. Balance rehabilitation using custom-made Wii Balance Board exercises: Clinical effectiveness and maintenance of gains in an acquired brain injury population. *International Journal on Disability and Human Development*, 2014;13(3): 327 – 332. [doi: 10.1515/ijdh-2014-0323](https://doi.org/10.1515/ijdh-2014-0323).
- [17] The, B., Bratty, M., Wang, A., Campbell, P. T., Halliday, M. J., & Ackland, T. R. Long-term functional results and isokinetic strength evaluation after arthroscopic tenotomy of the long head of biceps tendon. *International journal of shoulder surgery*, 2014; 8(3): 76–80. [doi:10.4103/0973-6042.140114](https://doi.org/10.4103/0973-6042.140114).
- [18] Tran, A.A., Gatewood, C., Harris, A.H.S. et al. The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. *J EXP ORTOP* 3, 13 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40634-016-0049-1>.



Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, welcher nur die Ansichten der Verfasser wiedergibt, und die Kommission kann nicht für eine etwaige Verwendung der darin enthaltenen Informationen haftbar gemacht werden.

