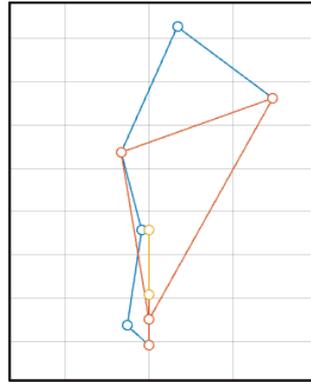


## Praktikum Biomechanik

Martinewski, V.

*Im Rahmen der neu eingeführten Studienfachrichtung Biomechanik im Fachbereich Maschinenbau wurde im zurückliegenden Jahr ein Praktikum konzipiert und durchgeführt, welches die Themen, die in dieser Studienfachrichtung im Rahmen der Vorlesungen theoretisch betrachtet werden, in einem praktischen Versuch zusammenfasst. Hierzu wurde ein eigenes, elektrisch verstellbares*

*Fahrradergometer entwickelt, mit dem es möglich ist, für verschiedene Sitzpositionen die physiologisch aufgebrachte Leistung des Probanden mit der mechanisch abgegebene Leistung zu vergleichen und unter Berücksichtigung weiterer gemessener Werte eine Aussage bzgl. Der ergonomischen bzw. leistungsoptimalen Sitzposition zu treffen. Neben den physiologischen und mechanischen Leistungsdaten werden Kräfte im Sattel und Lenker, sowie die Herzfrequenz aufgenommen. Als Prüfungsleistung werden die Studierenden Messschriebe verschiedener Positionen in Hinblick auf die biomechanische Übertragungsfähigkeit, sowie die physiologisch und mechanisch abgegebene Leistung aus.*



*During the past year, the practical course biomechanics was developed. This course, which complements the theoretical courses of the newly introduced biomechanics major is choosable by the mechanical engineers or the sports engineers. For this purpose, a specially built, electrically adjustable bicycle ergometer was developed. Measuring the physiological and mechanical output power, the performance of the test person for different seating positions can be evaluated and thus a statement regarding the ergonomics can be made. In addition to the physiological and mechanical power data, the forces in the saddle and handlebar as well as the heartrate of the test person are also recorded. All this data is provided to the participating students for analysis which represents the task to be evaluated. The course will be carried out each summer semester.*

## Einleitung

Im Wintersemester 2018/2019 wurde an der TU Clausthal im Fachbereich Maschinenbau die neue Studienfachrichtung Biomechanik eingeführt. Neben den etablierten Fachrichtungen „allgemeiner Maschinenbau“ Und „Mechatronik“ soll diese Fachrichtung den Studierenden die Möglichkeit bieten, in einem immer wichtiger werdenden Bereich eine Spezialisierung zu erfahren, die für ihre individuelle Berufswahl förderlich sein kann. Der Kontakt mit Industriepartnern hat gezeigt, dass es einen Bedarf an Ingenieuren mit grundlegend maschinenbaulicher Ausbildung und der Affinität zur Funktion des menschlichen Körpers gibt, die sowohl im Bereich der Prothetik, sowie in klassischeren Bereichen für die Entwicklung ergonomischer Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt werden können.

In den Vorlesungen *Biomechanik, Anatomie und Physiologie*, sowie *Bewegungswissenschaftliche Grundlagen* werden theoretische Grundlagen vermittelt. Bisher nicht angeboten war die Möglichkeit das erlangte, theoretische Wissen anhand eines praktischen Beispiels zu vertiefen und zu festigen. Diese Angebotslücke war der Anstoß für die Idee das Biomechanik-Praktikum ins Leben zu rufen.

## Das Praktikum

Die Zusammenhänge der theoretischen Grundlagen sollen anhand eines, mit Messtechnik ausgestatteten Prüfaufbaus verdeutlicht werden. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, ein Fahrradergometer zu konstruieren, mit dem es möglich ist, die während der Bewegung aufgebrauchte physiologische Leistung mit der mechanisch abgegebenen Leistung zu vergleichen und gleichzeitig die Bewegung auf dem Ergometer analysieren zu können. Am Beispiel des ergonomischen Fahrradfahrens werden verschiedene, mögliche Sitzpositionen in Hinblick auf oben genannte Effekte untersucht und bewertet.

Während des Fahrradfahrens oder der Nutzung eines Fahrradergometers können folgende Situationen eintreten, die jede für sich Besonderheiten in Bezug auf die übertragbare mechanische Leistung, den Bewegungsablauf sowie die erforderliche physiologische Leistung mit sich bringt und im Rahmen des Praktikums untersucht werden soll:

- Bewusst falsche bzw. unergonomische Sitzposition
- Wohlfühlposition
- Errechnete, optimale Sitzposition
- Einfluss der Trittfrequenz bei konstanter Leistung.
- Verwenden von Schlaufen- bzw. Klickpedalen

Eine falsche, unergonomische Sitzposition entsteht, wenn zum Beispiel ein Fahrrad ausgeliehen wird oder im Fitnessstudio die Einstellungen des Vornutzers nicht verändert werden. Hier kann bei zu kurzen Abständen des Lenkers und Sattels zur Tretkurbel eine suboptimale Kraftübertragung der Beine auf die Tretkurbel resultieren. Gleichzeitig entstehen überproportionale Belastungen auf die Kniegelenke und die Rückenmuskulatur durch eine zusammengekauerte Haltung. Sind die Abstände zu groß gewählt, ist die Kraftübertragung ebenfalls suboptimal und es kommt während der Bewegung zum Wanken und Rutschen auf dem Sattel.

Als Wohlühlposition wird die Sitzposition definiert, die sich der Nutzer selbst einstellt und mit der er zufrieden ist und das Gefühl hat gut zu sitzen. Kurze Strecken äußern sich dem Nutzer nicht in merklichen Fehlbelastungen.

Bei weiteren Strecken sind aber auch hier die Feinheiten zu erkennen. Eine vorzeitige Muskelermüdung oder Schmerzen beteiligter Körpergelenke können die Folge sein. Auf Basis dreier, grundlegender Randbedingungen kann mit einem, im Rahmen einer Masterarbeit /1/ entstandenen Berechnungsprogramm, durch Eingabe geometrischer Körperdaten eine theoretisch optimale Sitzposition definiert werden, welche im Rahmen des Praktikums ebenfalls auf Richtigkeit durch Analyse der Messdaten überprüft werden soll.

Neben der reinen Sitzposition kann die Art des Bewegungsablaufs ebenfalls einen enormen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers haben. Mit der Trittfrequenz als Beispiel soll überprüft werden, ob bei gleicher abgegebener Leistung ein Einfluss auf den physiologischen Leistungsbedarf zu erkennen ist. Speziell in diesem Bereich ist die Erfassung der Reaktionskräfte am Sattel und Lenker interessant, um zu analysieren, ob erhöhte Kräfteinleitungen im Lenker beim langsamen Treten und gleichzeitig hohen Drehmomenten zu verzeichnen sind, oder ob bei hohen Trittfrequenzen erhöhte Ausschläge im Sattelpbereich entstehen.

Im letzten Schritt werden verstärkt die biomechanischen Kenntnisse abgefragt. Normale Pedale haben den Nachteil, dass die Leistung nur durch das Treten nach vorn bzw. nach unten erzeugt werden kann. Hierzu wird nur ein Teil der verfügbaren Beinmuskulatur. Mit der Verwendung von Schlaufen- bzw. Klickpedalen können Agonisten und Antagonisten durch Treten und Ziehen des Pedals genutzt werden, wodurch die mechanisch übertragbare Leistung steigt, gleichzeitig aber auch die physiologische Leistung durch einen erhöhten Versorgungsbedarf der Muskulatur. In diesem letzten Schritt ist es interessant, zu analysieren, ob der Mehrgewinn der mechanischen Leistungsübertragung den Bedarf an physiologischer Leistung übersteigt und damit ein besserer Wirkungsgrad resultiert.

Die Messergebnisse der einzelnen Punkte wurden im Vorfeld des Praktikums aufgezeichnet und den Studierenden zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Das Praktikum findet in Kooperation mit dem Sportinstitut der TU Clausthal statt.

## Mechanischer Aufbau

Um eine möglichst breite Anpassbarkeit an die Probanden des Versuchsaufbaus und die Einstellmöglichkeiten für die durchzuführenden Untersuchungen zu gewährleisten, wurde ein eigenes Fahrrad-Ergometer entwickelt und aufgebaut (vgl. Abbildung 1).

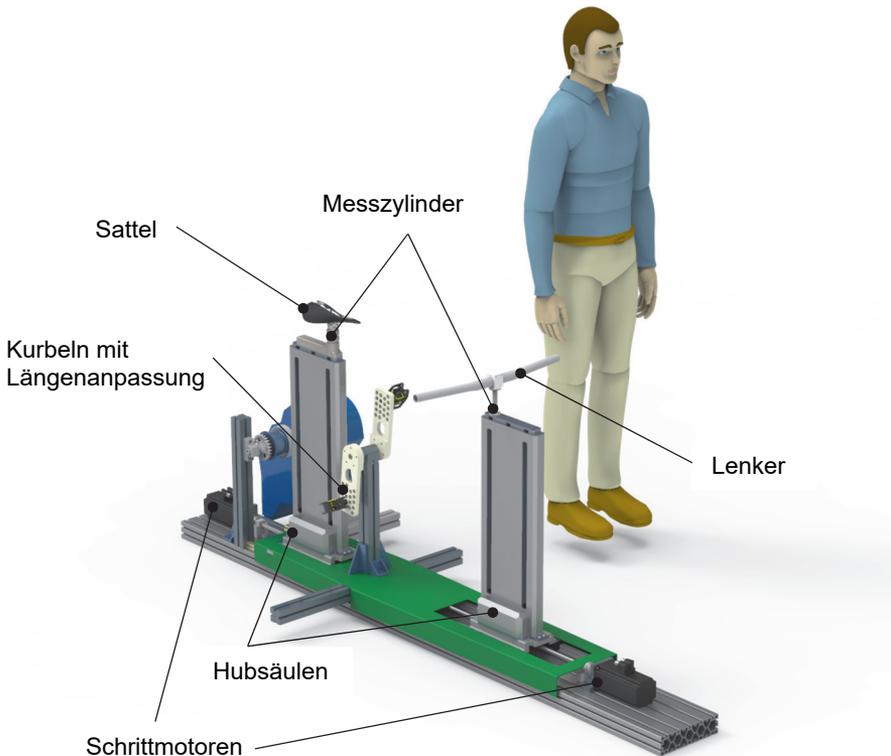


Abbildung 1: Prüfstands Aufbau Biomechanik-Fahrrad-Ergometer

Die Kurbel ist als zentraler Punkt mittig am Versuchsaufbau positioniert. Über einen Riementrieb erfolgt die mechanische Verbindung der Tretkurbel zum Abtrieb. Als Abtrieb wurde sich für einen gängigen Fahrradtrainer entschieden, welcher die Möglichkeit bietet, den Leistungswiderstand zu definieren und damit verschiedene Fahrsituationen zu ermöglichen.

Von der mittigen Position der Tretkurbel aus werden in X-Y-Koordinaten die Positionen von Lenker und Sattel vorgegeben. Sattel und Lenker sind für die vertikale Verstellung jeweils auf einer Hubsäule montiert. Zwischen Sattel/Lenker und Hubsäule befindet sich eine selbstgefertigte Mehrkomponenten-Messein-

richtung zur Erfassung und Visualisierung der Reaktionskräfte der Bewegung während eines Tretumlaufs. Für die horizontale Definition der Position werden zwei Schrittmotoren in Kombination mit einer Kugelumlauf-Linearführung verwendet. Alle Komponenten sind elektrisch verfahrbar, sodass eine Steuerung über den Messcomputer möglich ist.

Das grundlegende Konzept wurde im Rahmen einer Masterarbeit im Fachbereich Maschinenbau erstellt [2]. Die Dimensionierung, Feinkonstruktion, Beschaffung und Montage, inklusive elektrischer Einrichtung und Applikation der Messtechnik erfolgte in einem nachträglichen Schritt durch das IMW.

Die Auswahl der Systeme erfolgte auf der Basis, dass alle Komponenten in einem noch zu entwickelnden Steuerprogramm zusammengefasst werden können und damit die Bedienung vereinfacht wird. Auch ist hier die Realisierung von automatisiert ablaufenden Prüfprogrammen möglich.

Die weitere Bearbeitung erfolgt im engen Kontakt mit den Studierenden der Schwerpunkt-Studienfachrichtung Biomechanik durch Ausschreibung von Studien- und Abschlussarbeiten, sowie Möglichkeiten der Betätigung als wissenschaftliche Hilfskraft.

## Messtechnische Ausstattung

Die messtechnische Ausstattung des Biomechanik-Praktikums besteht aus:

- Bluetooth Elektro-Kardiogramm (EKG) zur Herzfrequenzmessung
- Ergospirometrie-Einheit für die Atemgasanalyse
- Mehrkomponenten-Messsystem mit Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Kraftmessung an Sattel und Lenker

## Ergospirometrie und EKG

Ziel des Praktikums ist der Vergleich der physiologischen Leistung zur mechanischen Leistung unter verschiedensten Belastungssituationen. Die Bestimmung der mechanischen Leistung erfolgt über Drehzahl- und Drehmomentmessung in der Antriebseinheit und ist damit bereits über die Kauflösung abgedeckt.

Zur Bestimmung der vom Probanden aufgebrachten physiologischen Leistung wurde ein Bluetooth-EKG, sowie eine Ergospirometrie-Einheit beschafft. Mit diesen Systemen ist es möglich, lastspezifische Kenndaten zu generieren, die auf den physiologischen Belastungszustand schließen lassen. Mit dem EKG werden die Herzfrequenz bzw. Herzfrequenz-Anstiegskurven ausgelesen und in den Vergleich mit einbezogen. Die Atemgasanalyse Ergospirometrie-Einheit misst aufgenommene und abgegebene Sauerstoff- und Kohlendioxidmengen und gibt die Menge verbrauchten Sauerstoffs als Kenngröße aus. Weiterhin ist es hiermit möglich anhand einer Eingangsmessung für einen Belastungszustand zu überprüfen, wie

viel Lungenvolumen bzw. Atemfrequenz noch zur Verfügung steht, um damit einen prozentualen Beanspruchungszustand zu definieren. Anhand von Anstiegskurven und den Zeitpunkten des Beginns einer Sättigung lassen sich verschiedene Belastungszustände auf die Höhe der Beanspruchung des Körpers vergleichen.

### Dehnungsmessstreifen (DMS)

Zur Aufnahme der Kräfte die am Sattel bzw. Lenker in Folge der Bewegung während des Pedalierens auftreten werden DMS verwendet. Diese sind auf einem rohrförmigen Mess-Hohlzylinder zwischen Sattel/Lenker und den Hubsäulen angebracht und lassen über entsprechende Verschaltung das Messen von Kräften in allen sechs Freiheitsgraden zu (vgl. Abbildung 2).

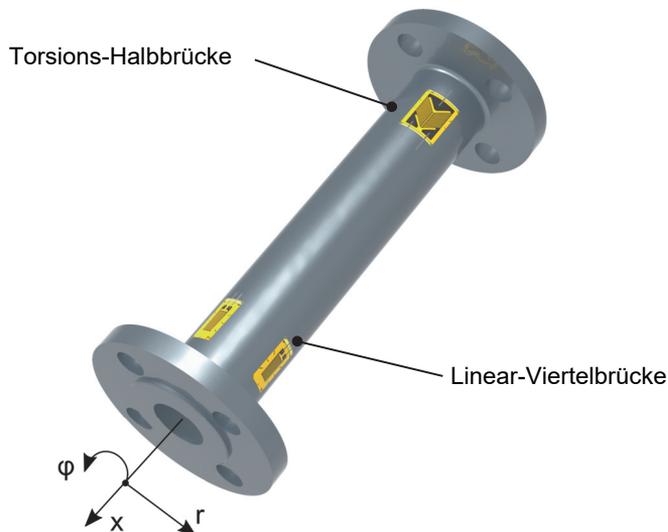


Abbildung 2: Applikationsschema der DMS für Mehrkomponenten-Messzylinder

Pro Messzylinder werden insgesamt sechs DMS appliziert: 4 Linear-Viertelbrücken um jeweils  $90^\circ$  versetzt angebracht und 2 Torsions-Halbbrücken um  $180^\circ$  versetzt.

Die Torsionshalbbrücken werden zu einer Vollbrücke zusammengeschaltet und messen die am Lenker und Sattel angebrachten Torsionsmomente in der  $x$ -Achse. Die Kenntnis dieser Messgröße lässt in dem Fall eines zu hoch eingestellten Sattels z.B. auf eine zu starke Hüftrotation schließen. Über Hebelbeziehungen können weiterhin die Absolutwerte der am Lenker einwirkenden Kräfte zurückgerechnet werden. Diese sind ein Indiz dafür, dass das abverlangte Drehmoment ggf. zu hoch ist und sich der Proband am Lenker ziehend abstützt.

Die vier Linear-Viertelbrücken werden einzeln am Messverstärker angeschlossen und im Messprogramm verrechnet, sodass zwei Biege-Halbbrücken und eine quasi-Zug-Druck-Vollbrücke resultieren.

Würden die vier Linear-DMS bereits elektrisch zu einer Vollbrücke verschaltet werden, würde die Funktion der Wheatstone-Brückenschaltung (vgl. Formel 1) dazu führen, dass sich die zu erwartenden, identischen Dehnungsanteile eliminieren, die Messbrücke wäre demnach Axialkraftkompensiert.

$$\frac{U_{\text{Mess}}}{U_{\text{Speise}}} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad 1$$

Eine reine Addition der Dehnungswerte im nachgeschalteten Verrechnungsschritt führt jedoch dazu, dass die Axialkraft - kompensiert um die Biegeanteile - um den Faktor vier verstärkt gemessen werden kann.

Zur Realisierung der Biege-Halbbrücken werden je zwei gegenüberliegende DMS so verrechnet, dass die während des Bewegungsablaufs resultierenden Biegemomente in beiden Raumrichtungen gemessen werden können. Werden auch hier entsprechende Hebelwirkungen berücksichtigt und die Ergebnisse der Torsionsmessung mit einbezogen, kann ein Raumvektor errechnet werden, der zu jedem Zeitpunkt die resultierende Belastung auf den Lenker bzw. den Sattel ausgibt.

Dieses so entstandene Mehrkörper-Messsystem wird hinzugezogen um Unterschiede der Bewegung auf Sattel und Lenker bei verschiedenen Lasten oder Ermüdungszuständen zu ermitteln. Hiermit sollen unter anderem Fragestellungen wie „Wann ist die Sattellast am größten“ oder „Ab welchem Abstand des Sattels zur Kurbel fängt der Proband das Wanken an“ beantwortet werden.

## Zusammenfassung

Am Institut für Maschinenwesen wird ein, seit dem Sommersemester 2019 jährlich stattfindendes Praktikum angeboten. Dieses bietet eine Ergänzung zu der derzeit theoriebasierten Studienfachrichtung Biomechanik des Fachbereichs Maschinenbau, sowie den neu eingeführten Studiengang Sportingenieurwesen.

Mit Hilfe eines eigens konstruierten, elektrisch adaptiven Fahrradergometers ist die Definition verschiedener ergonomischer und nicht ergonomischer Sitzpositionen möglich. Unter Nutzung der umfangreichen messtechnischen Ausstattung können die Studierenden ihr theoretisch erlangtes Wissen anhand des praktischen Versuchs zum Bewegungsablauf beim Fahrradfahren festigen und weiter ausbauen.

## Literatur

- /1/ Traufetter, T.: Bewegungsanalyse und Parameterstudie zur Fahrradergonomie mittels CAD; Masterarbeit, Clausthal-Zellerfeld, 2019
  
- /2/ Kuckella, S.: Konstruktion eines individuell einstellbaren Ergometers; Masterarbeit, Clausthal-Zellerfeld, 2019