

**Kunstuniversität zu Linz  
University of Arts zu Linz**

**Masterarbeit**

an der Studienrichtung Industrial Design,  
Universität für künstlerische und industrielle Gestaltung Linz,  
Institut für Raum und Design

**Gestaltung einer zwischen Fahrradtypen einfach  
wechselbaren Leistungswattmessung**

Verfasser

**Paul Schaden-Handstanger, BSc**

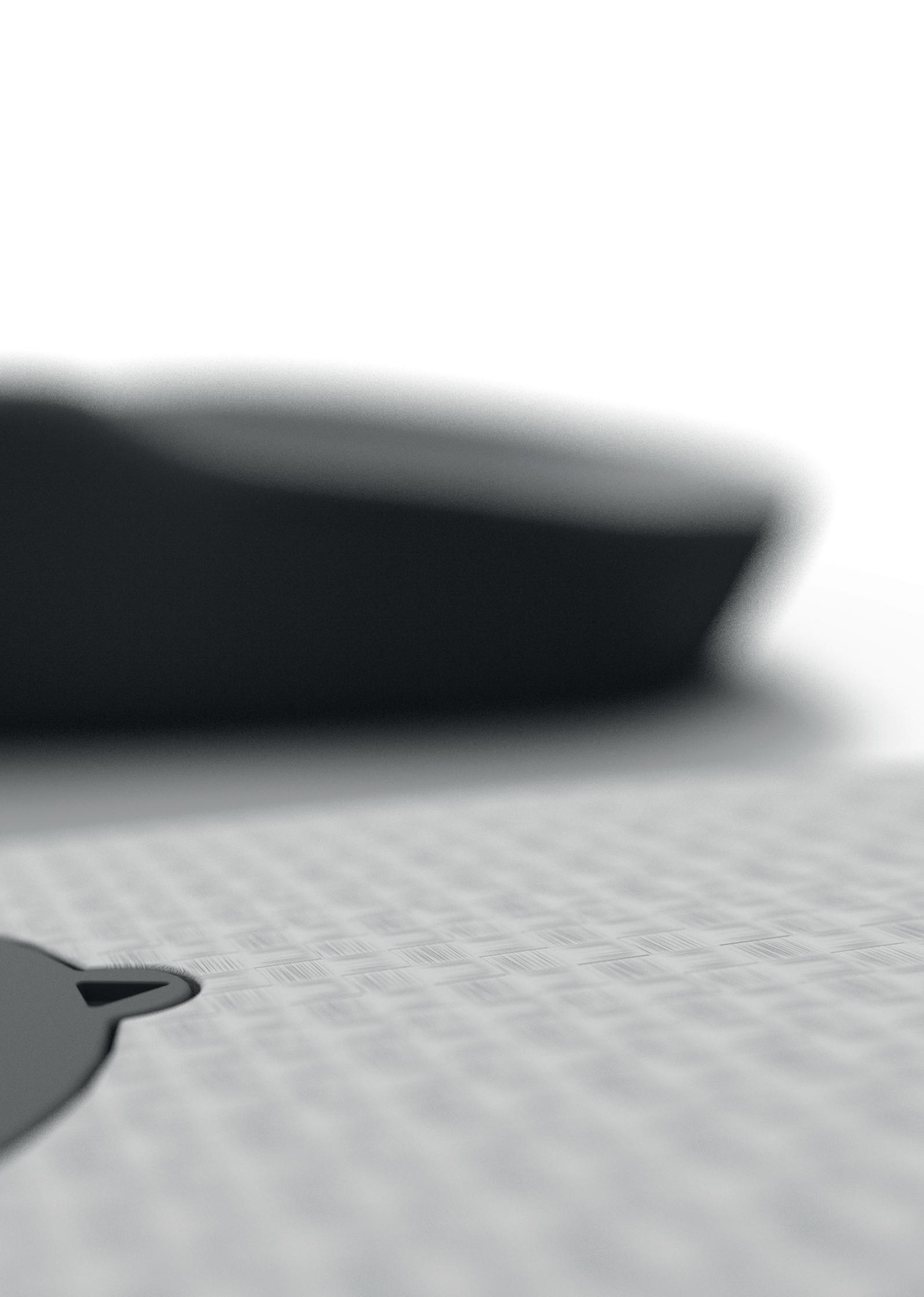
vorgelegt am 26.01.23

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Betreuer\*in:

Univ.-Prof. Mag.art. Mario Zeppetbauer  
Univ.-Prof.<sup>in</sup> Mag.art. Elke Bachlmair





**Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit mit dem Titel "Gestaltung einer zwischen Fahrradtypen einfach wechselbaren Leistungswattmessung" ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Teile die wörtlich oder sinngemäß einer Veröffentlichung entstammen sind gemäß wissenschaftlichen Zitierregeln nach bestem Wissen und Gewissen korrekt zitiert. Die Arbeit wurde bislang weder veröffentlicht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Datum, Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Abstract</b>	<b>11</b>
<b>2. Glossar</b>	<b>17</b>
<b>3. Einleitung</b>	<b>21</b>
3.1 Problemstellung und persönliches Interesse	22
3.2 Forschungsfragen	23
3.3 Zielsetzung	25
<b>4. Fakten zum Fahrrad</b>	<b>27</b>
4.1 Fahrradtypen	28
4.2 Fahrradmarkt in Zahlen	35
4.2.1 Marktanteil nach Fahrradtypen in Deutschland	36
4.2.2 Altersverteilung nach Fahrradtypen	37
4.3 Trendsport Rennradfahren	38
<b>5. Powermeter am Fahrrad</b>	<b>41</b>
5.1 Definition und Funktion eines Powermeters	43
5.2 Vorteile eines Powermeters	55
5.3 Fazit	61
<b>6. Marktanalyse der Leistungswattmessung am Fahrrad</b>	<b>63</b>
6.1 Kurbelpowermeter	66
6.1.1 Kurbelstern	66
6.1.2 Kettenblatt	69
6.1.3 Kurbelarm	70
6.2 Kurbelachs-Powermeter	76
6.2.1 Kombination aus Achs- und Kurbelarmmessung	78
6.3 Pedalpowermeter	79
6.3.1 Pedalsysteme	82
6.3.2 Modulare Pedalpowermeter	84
6.3.3 Vergleichsmessung zwischen Pedal- und Kurbelpowermeter	85
6.4 Hinterradnabenpowermeter	86
6.5 Gegenkraftmessung	87
6.6 Alternative Powermeter	89
6.6.1 unveröffentlichte/stornierte Powermeter	91
6.7 Leistungswattmessung ohne Powermeter	97
6.8 Kompatibilität der Systeme	98
6.9 Leistungswattmessung am Ergometer	99
6.10 Fazit Marktanalyse	100
<b>7. Leistungswattmessung im Laufsport</b>	<b>107</b>
7.1 Überblick gängiger Systeme	109
7.2 Fazit	113
<b>8. Physikalische Grundlagen</b>	<b>115</b>
8.1 Widerstände und Kräfte	116
8.1.1 Beschleunigungswiderstand	120

8.1.2	Steigungswiderstand	120
8.1.2.1	Berechnung der Steig- und Gesamtleistung	122
8.1.2.2	Berechnungsgrundlage App	124
8.1.2.3	Berechnungsgrundlage ohne App	124
8.1.3	Luftwiderstand	126
8.1.4	Rollwiderstand	127
8.1.4.1	Walkwiderstand	128
8.1.4.2	Abrollwiderstand	128
8.1.4.3	Fahrbahnwiderstand	129
8.1.5	Reibungswiderstand der drehenden Teile	130
8.1.6	Schwingungswiderstand	130
8.1.7	Widerstände in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit	131
8.1.8	Widerstände in Abhängigkeit zur Steigung	132
8.1.9	Kräfte und Drehmomente am Pedal	133
8.2	Arbeit und Leistung	136
8.2.1	Berechnung der Leistung	137
8.3	Tretablauf und Sitzposition	141
8.3.1	Der runde Tritt	141
8.3.1.1	Phasen des Tretzyklus	142
8.3.1.2	prozentuale Verteilung der Vortriebskräfte	144
8.3.2	Sitzposition	146
8.4	Fazit	149
<b>9.</b>	<b>Technologische Grundlagen/Sensorik</b>	<b>151</b>
9.1	Kraftsensoren	152
9.1.1	Folien-Dehnungsmessstreifen	152
9.1.2	Piezoelektrischer Sensor	153
9.1.3	FSR-Sensor	154
9.2	Inertialsensor (IMU-Einheit)	155
9.2.1	Beschleunigungssensor	155
9.2.2	Gyrosensor	156
9.2.3	Magnetometer	156
9.3	Funkstandards	157
9.3.1	ANT+ Protokoll	157
9.3.2	Bluetooth Low Energy (BLE)	158
9.4	Fazit	158
<b>10.</b>	<b>Umfrage, Exploration der Zielgruppe mittels Fragebogen</b>	<b>161</b>
10.1	Detailauswertung einzelner Personen	185
10.2	Fazit und Limitation der Umfrage	189
10.3	Personas	191
<b>11.</b>	<b>Synthese der Recherche und Analyse</b>	<b>197</b>
11.1	Hauptkriterien	198
11.2	zusätzliche Kriterien	200
<b>12.</b>	<b>Ideation</b>	<b>203</b>
12.1	Ideen	205
12.2	Fazit der Ideation	221

<b>13. Konzepte</b>	<b>223</b>
13.1 Konzept 1 Cleatplatte	224
13.1.1 Mockup Cleatplatte	226
13.2 Konzept 2 Pedalachse	228
13.2.1 Mockup Pedalachse	230
13.3 Konzept 3 Innensohle	232
13.3.1 Mockups Innensohle	234
13.4 Evaluierung des Konzepts Innensohle	236
<b>14. Entwurf</b>	<b>239</b>
14.1 Ideationphase	240
14.1.1 Aufbau/Konstruktion	240
14.1.2 Usability	243
14.1.3 Lademöglichkeit	244
14.2 Package	245
14.2.1 Messeinheit	246
14.2.2 Elektronikeinheit	246
14.3 Mockups	249
14.4 Entwurfsphase 1	250
14.4.1 3D-Druck Modelle	251
14.5 Entwurfsphase 2	254
14.5.1 DLP-Druck Modell	256
14.6 Finaler Entwurf	257
14.6.1 Entwurfsbeschreibung	258
14.7 Prototypentests	260
14.7.1 Testaufbau und Komponenten	260
14.7.2 Funktionsweise Software	262
14.7.3 Testablauf	263
14.7.4 Erkenntnisse und Ausblick	268
14.8 User Story	269
14.8.1 Bestellvorgang	270
14.8.2 Erstinstallation und Kalibrierung	272
14.8.3 Sohlenwechsel zwischen verschiedenen Schuhen	274
<b>15. Ergebnisse</b>	<b>277</b>
<b>16. Diskussion</b>	<b>287</b>
<b>17. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>291</b>
<b>18. Literaturverzeichnis</b>	<b>295</b>
<b>19. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>301</b>
<b>20. Danksagung</b>	<b>309</b>
<b>21. Anhang</b>	<b>313</b>
21.1 Fragebogen	314



# 1. Abstract



Die Erfassung der physiologischen Daten erfreut sich größter Beliebtheit, so auch im Radsport, der immer mehr Sportler\*innen begeistert. Nicht zuletzt auch aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Trackingapps, Sportuhren und Powermeter die einen Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des/der Sportler\*in geben und für ein effizientes und kontrolliertes Training angewendet werden können.

Ein Powermeter ist ein Leistungsmesssystem, welches die erbrachte Leistung beim Pedalieren erfasst und anschließend in Watt (Einheit der Leistung) auf einem externen Anzeigegerät (z.B. Fahrradcomputer) anzeigt. Wattmesssysteme sind hochpreisig und in den meisten Fällen an ein Fahrrad gebunden. Ein Wechsel von einem Fahrrad auf ein anderes Fahrrad ist lediglich mit hohem Arbeitsaufwand möglich (z.B. durch das Umschrauben der Pedale). Wattmesssysteme sind bislang im Bereich des Antriebs in Komponenten verbaut, zum Beispiel in der Kurbel oder dem Pedal, da in diesem Bereich die Kraftübertragung am besten erfasst werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es ein Leistungswattmesssystem zu gestalten, welches nicht an ein Fahrrad gebunden ist und gleichermaßen für das Rennrad, Mountainbike, etc. verwendet werden kann. Es wird sowohl der Frage nachgegangen, welche Stelle sich für ein fahrradunabhängiges System am besten eignen würde, als auch welche Sensorik dafür in Betracht gezogen werden kann. Des Weiteren soll geprüft werden, ob anhand des Bewegungsablaufes ("runder Tritt") der Powermeter in der Lage ist, Aussagen zur korrekten Sitzposition oder der Sattelhöhe zu treffen.

Im Rahmen einer schriftlichen Umfrage, welche im Zuge des Projekts durchgeführt wird, wird ersichtlich, dass die meisten Sportler\*innen mehr als ein Fahrrad besitzen, weshalb die Relevanz eines fahrradunabhängigen Leistungswattmesssystems gegeben ist.

Anhand der durchgeführten Marktanalyse wird ersichtlich, dass der Pedalpowermeter die derzeit beliebteste Option darstellt und viele Vorteile mit sich bringt. Nach der Ideation und der Verknüpfung mit der Marktanalyse fällt die Wahl in der anschließenden Synthese auf einen Powermeterentwurf in einer Innensohle für den Radschuh. Für die Sensorik werden Dehnungsmessstreifen herangezogen, da damit die Verformung (zur Berechnung der Wattleistung) am besten gemessen werden kann.

Zusammengefasst stellt der Powermeter in einer Innensohle eine gute Lösung dar, um das Wattmesssystem für verschiedene Fahrräder flexibel nutzbar anzuwenden.

**Keywords:** Powermeter/Radsport/Wattmessung/Schuhsohle



The recording of physiological data enjoys great popularity, including in cycling, which inspires more and more athletes. Not least because of the variety of different tracking apps, sport watches and power meters that provide information about the performance of the athlete and can be used for an efficient and controlled training.

A powermeter is a power-measurement-system that records the power output during pedaling and then displays it in watts (unit of power) on an external display device (e.g. bike computer). Watt-measurement-systems are highly expensive and in most cases tied to a bicycle. Changing from one bike to another is only possible with a lot of work (e.g. by changing the pedals). Up to now, watt-measurement-systems have been installed in components in the area of the drive, for example in the crank or the pedal, since the power transmission can best be recorded in this area.

The aim of this work is to design a power-measurement-system that is not bound to a bicycle and can be used equally for the racing bike, mountain bike, etc.. The question of which location would be best suited for a bike-independent system will be addressed, as well as which sensor technology can be considered for this purpose. Furthermore, it is to be examined whether, on the basis of the movement sequence ("round pedaling"), the powermeter is able to make statements about the correct seating position or the saddle height.

In the context of a written survey, which is carried out in the course of the project, it becomes apparent that most athletes own more than one bicycle, which is why the relevance of a bicycle-independent power-measurement-system is given.

The market analysis shows that the pedal powermeter is currently the most popular option and offers many advantages. After ideation and linking with the market analysis, the choice in the subsequent synthesis falls on a powermeter design in an inner sole for the cycling shoe. Strain gauges are used for the sensor technology, as this is the best way to measure the deformation (for calculating the wattage).

In summary, the powermeter in an inner sole is a good solution to apply the watt-measurement-system for different bikes in a flexible way.

**Keywords:** powermeter/cycling/watt measurement/shoe sole



## **2. Glossar**

**aerobe Schwelle:** beschreibt den Bereich, in dem der Körper von der Energiegewinnung mit Sauerstoff in den Energiestoffwechsel ohne Sauerstoff umstellt

**anaerobe Schwelle:** beschreibt die höchste Belastungsintensität, die über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden kann, ohne dass sich Laktat im Blut ansammelt

**ANT+:** Funkstandard für Datenübertragung

**Aufzeichnungsrate:** einstellbare Rate für die Datenaufzeichnung am Fahrradcomputer nach Sekunden

**Anzeigenrate:** anzeigende gemittelte Aufzeichnungsrate am Fahrradcomputer

**Bluetooth Low Energy:** Funkstandard für Datenübertragung

**Cleat:** Platten am Fahrradschuh für die Verankerung im Klickpedal

**Dehnungsmessstreifen:** kleine Messstreifen aus Folie zur Erfassung von dehnen- und stauchenden Verformungen, anhand Änderungen des elektrischen Widerstandes

**Drehmomenteffektivität:** gibt an wie viel, der während eines Pedaltritts erzeugten Pedalkraft tatsächlich zum Vortrieb beim Radfahren beiträgt

**Ergometer:** Gerät zur Messung der körperlichen Leistungsfähigkeit eines Menschen

**E-Bike:** Fahrrad mit Hilfsantrieb, welches ohne Muskelkraft betrieben werden kann

**Extrapolieren:** Schätzungen anhand vorgegebener Werte

**Fahrradcomputer:** technisches Anzeigegerät für diverse Fahrdaten beim Radfahren

**Funktionsprototyp:** Prototyp zur Veranschaulichung der Funktionen des Endproduktes

**Gegenkraftmessung:** Leistungsberechnung anhand der auf den Fahrer einwirkenden Gegenkräfte wie Luftwiderstand und Rollwiderstand

**IMU-Einheit:** „inertial measurement unit“, um Beschleunigung, Drehbewegung und Lage eines Objekts zu bestimmen; besteht aus einem Gyrosensor, Beschleunigungssensor und Magnetometer

**Inertialsensor:** Sensor um jegliche dreidimensionale Bewegung zu bestimmen, meist als Kombination mehrerer Sensortypen (Gyrosensor, Beschleunigungssensor, etc.)

**Interoperabilität:** Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten

**Kniewinkel:** Winkel zwischen Oberschenkelrückseite und Unterschenkelrückseite

**Kreiszahl Pi:** gibt das Verhältnis zwischen Durchmesser und Umfang eines Kreises an

**Laktatschwelle:** Belastungsbereich in dem Sauerstoffbedarf und Sauerstoffverbrauch gerade noch ausgeglichen ist

**Leistungsbereich:** bestimmte Trainingsbereiche anhand der Wattleistung

**Leistungswattmesser:** Messeinheit zum Messen der erbrachten Leistung beim Treten am Fahrrad; auch Powermeter oder Wattmesser genannt

**Motion-Capture-System:** Bike Fitting System um reale Bewegungen mittels Kamera auf den Computer als 3D Animationsmodell zu übertragen

**Nullpunkt:** kalibrierter Nullwert eines techn. Gerätes

**Pace:** Geschwindigkeit beim Sport, Maßeinheit meist in Minuten pro Kilometer

**Pedalglätte:** gibt in Prozent an, wie gleichmäßig die Kraft bei einer vollen Pedalumdrehung verteilt ist; je näher bei 100% desto gleichmäßiger

**PCO:** der Platform Center Offset zeigt die Position auf dem Pedalkörper, an dem Kraft angewendet wird

**Pedalkraft:** Kraft die auf das Pedal beim Treten ausgeübt wird

**Pedelec:** Fahrrad mit unterstützendem Hilfsantrieb

**Powercontrol/unit:** Gerät zum verarbeiten verschiedenster Daten

**Powermeter:** Messeinheit zum Messen der erbrachten Leistung beim Treten am Fahrrad; auch Leistungswattmesser oder Wattmesser genannt

**Reedschalter:** in einem Glas eingeschmolzene Kontaktzungen zur Positionsbestimmung (Positionssensoren)

**RPE:** die Rating of perceived exertion ist eine Kennzahl für die gefühlte Erschöpfung

**SI-Einheit:** international festgelegte Maßeinheiten; es gibt sieben Basiseinheiten und 22 abgeleitete Einheiten

**Spider:** kreisförmige Stelle im Bereich der Kettenblätter an der Kurbel; auch Kurbelstern genannt

**Temperaturkompensation:** beschreibt eine Maßnahme, die einem unerwünschten Temperatureinfluss entgegenwirkt oder korrigiert

**Trittfrequenz:** Drehzahl mit der die Tretkurbel beim Radfahren betätigt wird

**Velodrom:** meist geschlossene ovale Rennbahn für Fahrräder

**Vorderfußwinkel:** Winkel zwischen Schienbein und Vorderfuß

**Wheatstone-Brücke:** Brückenschaltung für die Temperaturkompensation bei Messeinrichtungen

**Winkelgeschwindigkeit:** vektorielle Größe, die angibt, wie schnell sich ein Winkel mit der Zeit um eine Achse ändert



# **3. Einleitung**

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung und Gestaltung einer zwischen Fahrradtypen einfach wechselbaren, Leistungswattmessung. Bereits bestehende Wattmesssysteme werden analysiert und dienen als Grundlage für die Entwicklung einer neuartigen Lösung.

### **3.1 Problemstellung und persönliches Interesse**

Seit vielen Jahren gibt es nun schon diverse Leistungswattmesssysteme, sogenannte „Powermeter“ für den Fahrradsektor auf dem Markt. Vorwiegend sind diese Systeme für den Rennradsektor bestimmt und immer nur für ein einziges Fahrrad nutzbar. Die Leistungswattmessung bzw. die Überwachung der eigenen physiologischen Daten und auch das Radfahren an sich erfreuen sich immer größerer Beliebtheit unter den ambitionierten Radsportler\*innen, auch die "Covid-19 Pandemie" trug einen Beitrag dazu bei.

Das Radfahren hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen und das Aufzeichnen und Analysieren der eigenen Daten war noch nie so einfach wie mit den heutigen Radfahrapps, wie z.B. der App Strava. Im Jahr 2020 wurden so viele Räder verkauft wie in keinem anderen Jahr zuvor und auch das Fahren nach Wattzahlen boomt (vgl. Zweirad-Industrie-Verband, 2021).

Auch bei mir ist dieser Trend, „wie viele Watt trittst du so“, nicht spurlos vorbeigegangen und da ich selbst schon seit meinem achten Lebensjahr auf dem Rennrad unterwegs bin und dieser Sport meine große Leidenschaft ist, beschäftige ich mich in der vorliegenden Arbeit mit dem Thema. Bisher habe ich mir jedoch noch kein Wattmesssystem angeschafft, da es mir schlichtweg zu teuer ist und ich die fahrradübergreifende Kompatibilität der Systeme als ein Hindernis sehe.

Im Jahr 2021 ist die Leistungswattmessung schon fast zu einem „Muss“ für den/die Rennradfahrer\*in geworden. Auch große Radhersteller statten ihre Räder teilweise schon ab Werk mit solch teuren Systemen aus. In der Mountainbike-Branche stellen Systeme dieser Art jedoch noch eine Nische dar, auch aufgrund derzeit noch fehlender Auswahl an Systemen für den Bereich.

Leistungswattmesser, folgend in der Arbeit als Powermeter bezeichnet, sind in der Regel sehr teuer und immer an ein bestimmtes Fahrrad gebunden, das heißt, sie sind nicht so einfach auf ein anderes Rad übertragbar. Jedoch besitzen viele Sportler\*innen mehr als

ein Rennrad und meist auch noch ein Mountainbike. Die etablierten Systeme am Markt messen die Leistung vorwiegend im Antriebsbereich, das heißt entweder in der Kurbel am Kurbelarm oder in einem speziellem Klickpedal. Beim Klickpedal gibt es die Möglichkeit dieses relativ schnell auf einem anderen Rad zu montieren, jedoch unterscheiden sich die Klicksysteme von Rennrad und Mountainbike untereinander. Da der Standard unterschiedlich ist, ist ein Fahrrad übergreifendes Verwenden des gleichen Powermeters quasi nicht möglich.

So ist es naheliegend, einen durchdachten und kostengünstigen Powermeter zu gestalten, der für mehrere Fahrräder gleichermaßen schnell und einfach angewendet werden kann.

### **3.2 Forschungsfragen**

Die Hauptfrage, die es zu beantworten gilt, ist, auf welche Art und Weise Leistung beim Radfahren ermittelt werden kann und welche Messsensoren dafür am besten geeignet sind, um eine korrekte Leistungsmessung zu erhalten. Die korrekte Position der Messsensoren bzw. die des gesamten Powermeters ist ausschlaggebend, um eine exakte und vergleichbare Messung zu erhalten. Es gilt abzuwägen, an welchen Stellen die Leistung exakt ermittelt werden kann und wo genügend Bauraum für die Bauteile vorhanden ist. Aus Nutzersicht sollte es sich um ein möglichst variables und austauschbar designtes System handeln, welches für mehrere Fahrradtypen gleichermaßen gut verwendet werden kann. Neben der Messeinheit sind die Energieversorgung und die Datenübertragung die zweiten großen Bestandteile eines Powermeters. Die etablierten Systeme auf dem Markt verfolgen dabei den Ansatz der Energieversorgung entweder mittels eines Akkus oder einer aus-tauschbaren Batterie. Es könnte jedoch auch die Möglichkeit bestehen, die Messeinheit und die Energieeinheit voneinander zu trennen und an eine andere Position auszulagern.

Ein weiterer spannender Punkt wäre die Einstellung der exakten Sitzhöhe am Fahrrad. Da diese besonders wichtig ist, um die ideale Kraft möglichst verlustfrei auf das Pedal zu bringen, wäre es von Vorteil, wenn der Powermeter dies bestimmen könnte. Deshalb stellt sich mir die Frage, ob die optimale Sitzposition anhand meiner Sensoren/Messwerte ideal eingestellt werden kann und ich somit einen Powermeter mit „BikeFitting-Tool“ bekommen könnte. Einen Powermeter mit Bikefitting-Funktion bietet derzeit kein einziges System auf dem Markt und wäre eine kleine Revolution.

Aus meinen Ansätzen leiten sich nun folgende drei Forschungsfragen ab:

### ***Forschungsfragen***

**Welche Stelle (Schuh, Pedalplatte, etc.) ist am geeignetsten für ein „einfach wechselbares“ Leistungswattmesssystem?**

**Mit Hilfe welcher Sensorik kann die Leistung in meinem Forschungsvorhaben (Dehnungsmessstreifen, piezoelektrische Sensoren, etc.) adäquat gemessen werden?**

**Kann der Powermeter in der Lage sein, anhand des Bewegungsablaufs der Tretbewegung, die korrekte Sattelhöhe zu bestimmen?**

### 3.3 Zielsetzung

Im Zuge der Masterarbeit soll ein kostengünstiges und möglichst einfaches Powermeterkonzept entworfen werden, welches auf mehrere Räder anwendbar ist. Wie die Leistung berechnet wird, muss nicht neu erfunden werden, hier kann sich der bekannten Formeln aus der Physik bedient werden. Jedoch sollte die Position der Leistungswattmessung überdacht werden, um diese fahrradunabhängiger zu gestalten. Ein wichtiger Punkt in der Gestaltung stellt auch die Nutzerfreundlichkeit dar, hier sollte auf eine einfache Handhabung und Bedienung des Systems geachtet werden. Insbesondere die Installation, die Kalibrierung und das Aufladen sollten gut funktionieren.

Das System soll in der Lage sein, die erbrachte Leistung möglichst exakt zu messen und abzubilden. Ziel ist es, einen Funktionsprototypen zu entwerfen und umzusetzen. Mit Hilfe geeigneter Sensoren soll die Leistung gemessen und anschließend auf einem externen Display (Computer) dargestellt werden. Der Funktionsprototyp soll verwertbare Messergebnisse liefern, wobei hier im ersten Schritt noch mit größeren Messabweichungen zu den bestehenden Produkten gerechnet werden muss. Der Funktionsprototyp soll aufzeigen, dass das neue Konzept bis zu einer möglichen Serienreife umsetzbar sein wird. Dieser Prototyp wird schließlich an einem Smarttrainer, mittels Absolvierung eines Stufentests, erprobt. Daraufhin können die Leistungswerte miteinander verglichen und ausgewertet werden. Alle Tests werden im Anschluss dokumentiert und beschrieben.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit wird verstärkt auf einem Funktionsprototypen liegen, welcher sich in das entworfene Design und an der dafür geeigneten Stelle anbringen lässt. Infolgedessen sollen Design Mockups und ein 3D-Druckmodell entstehen und anschließend über Renderings dargestellt und beschrieben werden. Über User Storys soll zudem grafisch dargestellt werden, wie der Prozess der Anpassung an den/die Nutzer\*in, die Installation, der „Fahrradwechsel“ und die Kalibrierung des Powermeters vonstatten geht.



## **4. Fakten zum Fahrrad**

Fahrrad ist nicht gleich Fahrrad! Es gibt unzählige unterschiedliche Fahrradtypen für unterschiedliche Anwendungen, jedoch werden sie alle primär mit der eigenen Muskelkraft betrieben. Hilfsantriebe wie etwa E-Motoren kommen bereits flächendeckend in fast allen Fahrradtypen zum Einsatz.

## 4.1 Fahrradtypen

Grob können Fahrräder jedoch in fünf Haupttypen eingeordnet werden, zum einen in die Fahrräder mit Hilfsantrieb, Alltagsräder/Standardtypen, Sporträder, Spezialräder, und zum anderen in die Kinder- und Jugendfahrräder (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

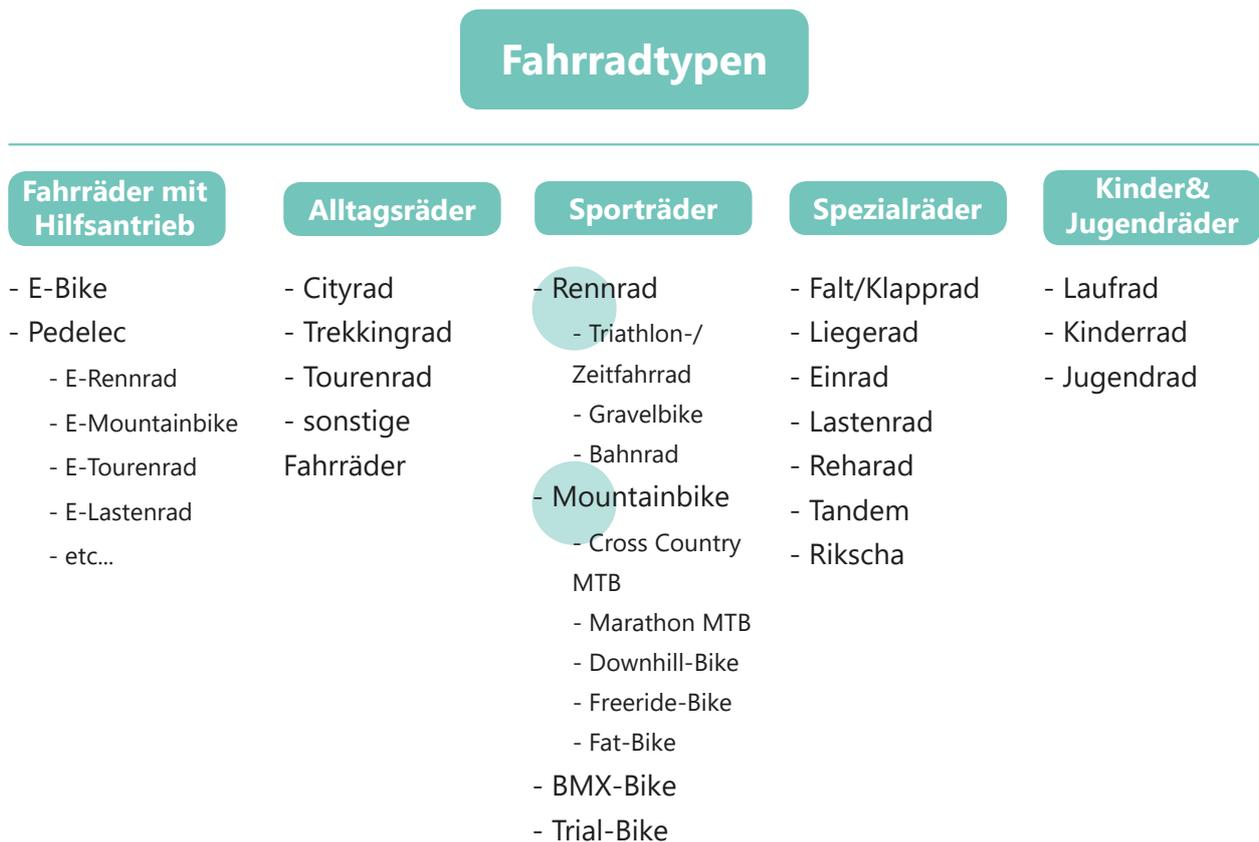


Abb. 1: Übersicht Fahrradtypen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Fahrräder mit Hilfsantrieb**

Fahrräder werden immer häufiger nicht nur mit der eigenen Muskelkraft betrieben, sondern mit einem Elektro-Antrieb zusätzlich unterstützt. Es zwischen E-Bike und Pedelec unterschieden. Bei einem E-Bike wird die Motorleistung wie bei einem Motorrad über einen manuellen Drehgriff oder Knopf auch ohne Treten aktiv. Ein E-Bike kann daher gänzlich ohne Muskelkraft betrieben werden.

Ein Pedelec hingegen ist ein Fahrrad mit einer elektrischen Unterstützung beim Treten. Anders als die E-Bikes können Pedelecs nicht ohne Treten gefahren werden. Fälschlicherweise werden Fahrräder mit E-Motor meist als E-Bike bezeichnet, obwohl die meisten davon Pedelecs sind.

Pedelecs erfreuen sich immer größerer Beliebtheit, dies führte zu einem regelrechten Boom in den letzten Jahren. Pedelecs gibt es in allen Preisklassen und Fahrradtypen. Vom E-Cityrad bis zum High-End E-Mountainbike mit Energierückgewinnung gibt es alle Varianten. Die Antriebe sind entweder in den Naben im Vorder-, Hinterrad oder im Tretlager verbaut. Auch bei Rennrädern gibt es bereits eine beachtliche Anzahl an Modellen mit Hilfsantrieb. Elektrofahrräder sind auf maximal 600 Watt Motorleistung gesetzlich beschränkt und dürfen bis 25km/h Geschwindigkeit durch den E-Motor unterstützt werden. Elektrofahrräder die über 25km/h unterstützen, werden S-Pedelecs genannt und gelten nicht mehr als Fahrrad, sondern als Kleinkraftrad und müssen deshalb entsprechend ausgestattet, typisiert und angemeldet sein. Das Benützen von Radwegen ist mit diesen Rädern dann nicht gestattet (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

## **\_ Alltagsräder**

Die Alltagsräder stellen die größere Gruppe dar und werden vorwiegend für kürzere Distanzen und Erledigungen des Alltags wie z.B. um Einkaufen zu fahren, in die Arbeit zu kommen etc., benützt. Zu dieser Gruppe zählen Cityräder, Trekkingräder, Tourenräder und sonstige Fahrräder. Die meisten Derivate sind mittlerweile auch mit E-Antrieb verfügbar. Das Cityrad ist für sehr kurze Distanzen konzipiert, ist meist relativ schwer und zeichnet sich durch eine aufrechte Sitzposition, einer leichten Aufstiegsmöglichkeit und einem niedrigen Einstieg aus. Merkmale sind ein geringer Wartungsaufwand, Komfort bei verschiedenen Wetterbedingungen und Tageszeiten, eine Lichtanlage und eventuell einem Gepäckträger. Der Raddurchmesser beträgt in der Regel 28 Zoll.

Das Trekking- und Touringrad sind für den etwas sportlicheren Einsatz als das Cityrad konzipiert und ähneln dem Cityrad sehr im Aufbau. Diese Fahrräder sind mit einer Gangschaltung, und meist einer Halterung für das Gepäck konzipiert. Der Raddurchmesser liegt ebenfalls bei 28 Zoll und die Sitzposition ist sehr aufrecht. Vorwiegend werden diese Räder als Reiserad z.B. für Touren auf Radwegen oder auch auf unbefestigten Wegen verwendet. Sie dienen daher auch vermehrt als sportliches Fortbewegungsmittel (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

### **\_ Spezialräder**

Zu dieser Gruppe zählen das Falt-/Klapprad, Liegerad, Einrad und Lasten oder Transportrad. Auch Mehrpersonenfahrräder wie Tandems und Rikschas können zu dieser Gruppe gezählt werden. Falträder oder auch Klappräder werden vorwiegend im städtischen Bereich verwendet. Durch einen Faltmechanismus kann das Fahrrad auf eine handliche Größe zusammengeklappt werden und leicht in öffentlichen Verkehrsmitteln oder Kraftfahrzeugen transportiert werden. Für Pendler und Pendlerinnen dient es meist als Zu- und Abbringer zu Haltestellen bzw. zur Arbeitsstätte. Das Faltrad sollte möglichst handlich und leicht sein, um es gut transportieren zu können. Falträder sind eine Weiterentwicklung der Klappräder, daher können beispielsweise die Pedale noch zusätzlich eingeklappt werden.

Beim Liegerad sitzt man zurückgelehnt auf einem dafür angepassten Lehnsitz. Es gibt unterschiedliche Typen für den Alltagsgebrauch und für Reise und Sport. Des Weiteren gibt es Varianten mit Tretlager vor und hinter dem Vorderrad.

Lastenräder sind sehr stabil konstruiert und besitzen einen Ständer zum sicheren Abstellen und einer Transportfläche, die für Lasten bis etwa 200kg ausgelegt ist. Lastenräder werden vorwiegend im urbanen Raum zum Transportieren von Waren, Lebensmitteln und Postsendungen verwendet und können entweder mit zwei oder drei Rädern ausgeführt sein. In den letzten Jahren wurden Lastenräder auch vermehrt mit E-Motor angeboten um das Fahren mit schweren Lasten zu vereinfachen (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

## **\_ Kinder- und Jugendfahräder**

Zu dieser Gruppe zählen das Laufrad, für die Kleinsten und Jüngsten unter uns, und das Kinder- bzw. Jugendfahrrad. Das Laufrad ist als ideales Einsteigerrad zum Üben vor dem ersten Kinderfahrrad gedacht. Es besitzt keine Pedale und wird ausschließlich mit den Beinen per Laufbewegung fortbewegt.

Jugendfahräder ähneln bereits den Fahrrädern für Erwachsene sehr, weisen jedoch meist einen geringeren Laufraddurchmesser und eine kleinere Rahmengröße auf (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

## **\_ Sporträder**

Die Gruppe der Sporträder stellen für diese Arbeit die bedeutende Gruppe dar. Sporträder werden zur reinen sportlichen Betätigung, um möglichst schnell und effizient von A nach B zu kommen, verwendet. Für viele ist das Fahren mit Sporträdern ein Hobby und eine große Leidenschaft. Zu der Gruppe der sportlichen Fahrräder zählen unter anderem, Rennräder, Triathlon-/Zeitfahräder, Bahnräder, Gravelbikes, MTB's, BMX-Räder und Trial Bikes. Auch diese Fahrradtypen sind bereits Großteils mit E-Antrieb verfügbar (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

Für die Masterarbeit sind hauptsächlich das Rennrad, das Zeitfahrrad und das Mountainbike von Bedeutung. Diese drei Fahrradtypen werden untenstehend genauer beschrieben.

Das Bahnrad ist ein reines Wettkampfrad und für Rennen im Velodrom konzipiert. Bahnräder sind ohne Gangschaltung und mit einem starren Lauf ausgestattet und rein auf aerodynamische Effizienz ausgelegt.

BMX-Räder besitzen kleine Rahmen und kleine 20 Zoll Laufräder und waren ursprünglich das unmotorisierte Pendant zum Moto-Cross. Diese Räder sind ideal für Halfpipes und enge Parcours geeignet (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

## **\_ Rennrad**

Das Rennrad zeichnet sich durch ein geringes Gewicht, den schmalen Reifen, eine sportliche flache Sitzposition und Laufrädern in 28 Zoll aus und ist für den Straßenradspport, den sportlichen Einsatz auf befestigten asphaltierten Straßen mit hohen Geschwindigkeiten, konzipiert. Je nach Sportart gibt es klassische Rennräder mit gebogenem Rennlenker, Rennräder fürs leichte Gelände mit breiteren Reifen (Gravelbike) oder luftwiderstandsoptimierte Zeit- und Triathlonräder (siehe weiter unten).

Aktuelle Modelle wiegen zwischen 6,5 und 9 Kilogramm. Bei den Rennrädern hat sich die klassische Diamantrahmen-Form durchgesetzt. Der Diamantrahmen moderner Rennräder ist fast ausschließlich aus Kohlefaser, Titan oder Aluminium gefertigt und mit einer mechanischen oder elektronischen 11fach oder 12fach Schaltung ausgerüstet. Karbon ist das Stichwort bei Rennrädern, diverse Komponenten wie Lenker, Sattelstütze, Sattel, Laufräder, Kurbel, Pedale, Bremshebel, etc. sind sehr häufig aus diesem Kohlenstofffasern gefertigt.

Zudem wird bei Rennrädern nicht auf „normale“ Pedale, sondern auf Klickpedale gesetzt. Damit ist der Fahrer fest mit dem Pedal, bzw. der Antriebseinheit verbunden, was eine bessere Kraftübertragung ermöglicht.

Aktuelle Rennräder sind mittlerweile nicht mehr mit Felgenbremsen, sondern mit Discbremsen (Scheibenbremsen) ausgerüstet. Diese bieten ein besseres Bremsverhalten, vor allem auch bei nassen Verhältnissen (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).



Abb. 2: Rennrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Triathlon-/Zeitfahrrad**

Zeit- und Triathlonräder sind aerodynamisch optimierte Rennräder und besitzen spezielle Aerolenker und höhere Felgen. Zwischen den beiden Fahrradtypen gibt es geringe Unterschiede zwischen der Sitzposition, Sitzwinkel und Rahmenfläche, da bei reinen Zeitfahrrädern die Geometrie des Rades durch Vorschriften der UCI (Union Cycliste Internationale) stärker eingeschränkt sind. Die einzelnen Unterschiede werden jedoch nicht näher beschrieben.

Die Sitzposition ist bei diesen Rädern vollends auf Aerodynamik getrimmt und deshalb sehr flach und eher für kürzere Distanzen ausgelegt. Die Gesamtkonstruktion ist generell so ausgelegt, um möglichst wenig Luftwiderstand zu generieren. Der Rahmen ist ebenfalls aus Karbon gefertigt, aufgrund der massiveren Bauweise und den unterschiedlichen Komponenten ist das Triathlonrad jedoch etwas schwerer als ein klassisches Rennrad. Zudem unterscheidet sich die Rahmengenometrie von jener eines Rennrades. Bei Triathlonrädern ist die Sitzposition weiter vorne, bzw. die Oberrohrlänge meist kürzer und der Sitzrohrwinkel etwas steiler als beim Rennrad. Dies führt dazu, dass der/die Fahrer\*in zentraler über der Tretkurbel sitzt und so die Muskulatur für den anschließenden Lauf beim Triathlonbewerb weniger belastet.

Auch bei Triathlon- und Zeitfahrrädern wird mit Klickpedalen gefahren. Die Klicksysteme sind die gleichen wie beim Rennrad, nur die Radschuhe sind unterschiedlich konzipiert (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).



Abb. 3: Triathlonrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Mountainbike**

Das Mountainbike wurde in den USA erfunden und dient dem problemlosen Vorankommen auf losem Untergrund im unwegsamen Gelände und ist meist mit einer Federung ausgestattet. Anfänglich waren MTB's mit einer Laufradgröße von 26 Zoll ausgerüstet, in den letzten Jahren ging jedoch der Trend in Richtung 27,5 bzw. 29 Zoll. Man lernte die verbesserten Rolleigenschaften größerer Laufraddurchmesser zu schätzen. Je nach Bauart und Einsatzbereich werden Mountainbikes in Cross-Country-, Marathon-Downhill- und Freeridebikes unterteilt. Darunter gibt es wiederum Modelle mit starrer Gabel, Frontfedergabel (Hardtails) oder Vollfederung (Full Suspension).

Mountainbikes sind fast ausschließlich mit Discbremsen ausgestattet, um auch bei schmutzigen Bedingungen gute Bremsleistungen zu erzielen. Die Rahmen sind ebenfalls aus Karbon gefertigt und mittlerweile fast so leicht wie Rennradrahmen. Auch diverse Anbauteile sind aus Karbon oder leichtem Aluminium gefertigt. Mit großem Aufwand ist heutzutage dabei ein Fahrradgewicht von unter 8 Kilogramm realisierbar (vgl. Barzel, P. et al., 2008, S. 27ff).

Mountainbikes sind auch mit Klickpedalen ausgestattet. Diese unterscheiden sich jedoch von den Standards am Rennrad. Es ist daher nicht möglich einen Rennradschuh am Mountainbike zu verwenden. Eine genaue Übersicht der unterschiedlichen Klickpedale erfolgt im Kapitel „Pedalsysteme“.



Abb. 4: Mountainbike (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Da nun ein Überblick über die unterschiedlichen Fahrradmodelle erfolgt ist, wird im nächsten Kapitel der Fahrradmarkt behandelt. Es gibt eine Übersicht über die Verkaufszahlen und den Marktanteilen nach Fahrradtypen und dem Thema, „Trendsport Rennradfahren“.

## **4.2 Fahrradmarkt in Zahlen**

Die SARS-COV-2-Pandemie bestimmt seit 2020 große Bereiche des öffentlichen- und privaten Lebens in weiten Teilen Europas und beeinflusste auch die Fahrrad- und E-Bike-Industrie. Dies führte im Jahr 2020 trotz großer Lieferengpässe zu einem regelrechten Fahrradboom, jedoch auch die Jahre zuvor konnte sich die Fahrradbranche über ein signifikantes Wachstum freuen. Fahrräder, mit und ohne elektrischem Antrieb sind die Verkehrsmittel der Stunde und auch der Zukunft.

Der Umsatz in Euro mit Fahrrädern und E-Bikes in Deutschland erreichte im Jahr 2020 den Wert von 6,44 Mrd. Euro, ein Plus von 60,9% zum Jahr 2019. Dieser Umsatz führte zu einem Absatz an neuen Fahrrädern (inkl. Pedelecs) in Deutschland von 5,04 Mio. Einheiten, eine Steigerung um 16,9% über dem des Vorjahres. Der Anteil an verkauften E-Fahrrädern betrug bereits 1,95 Mio. Stück bzw. 38,7% Anteil des Gesamtmarktes. Die Stückzahlen wuchsen in allen Modellgruppen mit Ausnahme von nicht elektrisch angetriebenen MTB's und Tourenrädern. Der Gesamtumsatz in Deutschland, mit Fahrrädern und E-Bikes, belief sich 2020 auf den Wert von 6,44 Mrd. Euro, ein Plus von 60,9% zum Jahr 2019 (vgl. Zweirad-Industrie-Verband, 2021).

In Österreich wurden im Jahr 2020 knapp 878 Millionen Euro mit Fahrradverkäufen umgesetzt, ein Plus um 26% zum Vorjahr. Dieser Umsatzrekord führte zu einem Fahrradabsatz von 496 Tausend verkauften neuen Fahrrädern, ein Plus um 13% zum Jahr 2019. Zudem wurden erstmals mehr als 200.000 Elektro-Fahrräder verkauft, dies entspricht einem Marktanteil von bereits 41%. Mit den Elektro-Fahrrädern wurden 613 Millionen Euro umgesetzt, was in etwa 70% des Gesamtumsatzes beträgt (vgl. VSSÖ, 2022).



## 4.2.2 Altersverteilung nach Fahrradtypen

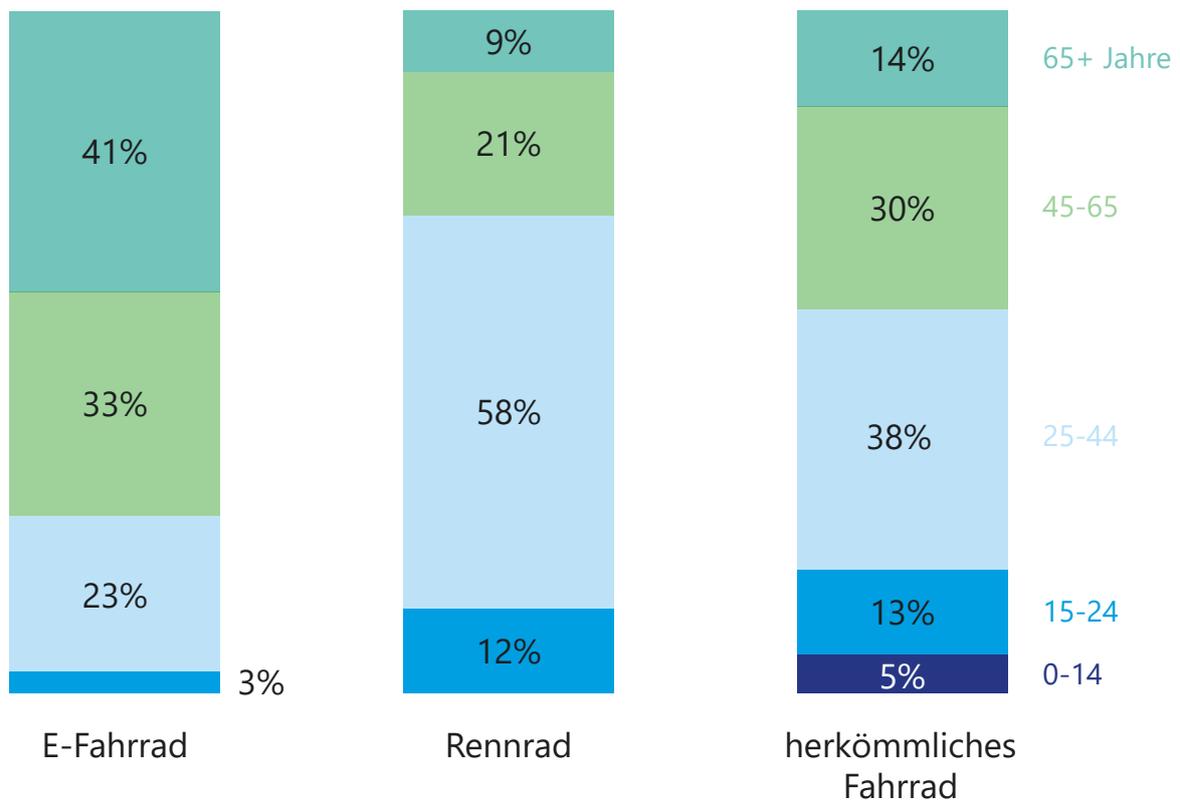


Abb. 6: Altersverteilung nach Fahrradtyp (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 254)

Aus einer Studie des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie aus dem Jahr 2013 geht hervor, dass 58% der Rennradbesitzer zwischen 25 und 44 Jahren alt sind. Die zweitgrößte Gruppe stellt jene der 45- bis 65-Jährigen dar, mit 21%. Bei den jüngeren unter 24 Jahren hingegen beträgt der Anteil lediglich 12%. Anhand dieser Grafik wird ersichtlich, dass das Rennrad die größte Altersverteilung bei Personen im mittleren Alter hat, im Vergleich zu den anderen Fahrradtypen (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 254).

### 4.3 Trendsport Rennradfahren

Rennradfahren begeistert viele Menschen und das nicht erst seit der Covid19-Pandemie. Das Rennrad ist in den letzten Jahren vom reinen Sportgerät zum Statussymbol aufgestiegen. Es unterstreicht das individuelle Lebensgefühl und dient dem Ausdruck der eigenen Persönlichkeit. Dabei gibt es nicht nur „den einen Typ“ Radfahrer, sondern viele unterschiedliche Typen und das spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Fahrrad-Modellen wider (vgl. Excelsior, 2022).

Speziell seit der Covid19-Pandemie erobern auch immer mehr Frauen den nach wie vor stark männlich dominierten Rennradsport. Es ist ein regelrechter Boom entstanden und Anna Kisenhofers Olympia-Goldmedaille hat bestimmt auch ihren Beitrag dazu geleistet. Auch die Fahrradindustrie sprang auf diesen Boom auf und bietet mittlerweile trendige Rahmenfarben wie Petroleum glänzend oder Violettmetallic und sogar eigens konstruierte Damenrennräder an, die speziell an die Anatomie der Frauen angepasst sind. Bestes Beispiel dafür ist die Marke Liv, diese wurde bereits 2008 von dem Radhersteller Giant gegründet und zielt nur auf Frauen ab (vgl. Rottenberg, T., 2021).



## ***Das RENNRAD - „sportlich und schnell“***

Rennerfahrer lieben die Geschwindigkeit und den Minimalismus und viele von ihnen sind echte Sch6nwitterfahrer. Es gilt: je leichter, desto besser! Daher haben Anbauteile, die Gewicht und Aerodynamik beeinflussen, wie Reflektoren, Schutzbleche, Klingel, etc. auf dem Renner nichts verloren. Stattdessen wird viel Geld f6r leichte Karbon-, Titan- oder Aluminiumkomponenten ausgegeben. Die Sitzposition ist relativ stark nach vorn gebeugt, um das Maximum an Effizienz herauszuholen, oft zu Lasten des Komforts. Ein beliebter Spruch unter den Rennerlern ist: „Karbon statt Kondition“ (vgl. Excelsior, 2022).

Radfahren ist eine 6u6erst gesunde Sportart, die immer und 6berall ausgef6hrt werden kann und nicht gro6artig erlernt werden muss. Hat man ein Fahrrad, kann die Ausfahrt auch schon beginnen und das nicht nur im Team, sondern auch alleine. Viele begeisterte Radsportler haben in der Woche einen fixen Tag f6r eine gemeinsame Radausfahrt und auch f6r den Fall, dass man keine Zeit hat, gibt es eine Art Facebook f6r Rennerfahrer. Die App Strava ist in der Szene sehr beliebt und das Jagen nach „Kronen“ hat Suchtpotenzial. Mit der App k6nnen sich die Radler an den unz6hligem Streckensegmenten, die hinterlegt sind, virtuell miteinander messen. Kurzum, man ist auf dem Renner niemals alleine, auch wenn man gerade alleine unterwegs ist. Zudem spielt das Alter beim Rennerfahren fast keine Rolle, es ist bis ins hohe Alter sehr beliebt. Daher kann es schon vorkommen, dass ein 6lterer, durchtrainierter Herr linkerhand auf der Passstra6e zum 6berholen ansetzt.

Zu guter Letzt: Rennerfahren macht s6chtig! Der Suchtfaktor ist enorm, viele gehen in der Geschwindigkeit auf, versinken in einem „Flow“ und verschmelzen mit der Rennermaschine und dem Untergrund (vgl. Foszczynski, M., 2019).



# **5. Powermeter am Fahrrad**

In den 70er Jahren war die Geburtsstunde der ersten Pulsuhren für den Radsport. Bereits zehn Jahre später verwendeten die ersten Radsportler diese Uhren zur besseren Überwachung des eigenen Pulses. Jedoch reagiert der Puls nur sehr langsam auf kurze Beschleunigungen beim Treten und durch Variablen wie Wetter, psychische Belastung und Ernährung wird der Puls stark beeinflusst. Dies führt zu einem nicht vergleichbaren Ergebnis und somit kam man knapp zehn Jahre später auf die Leistungswattmessung.

1986 wurde das erste mobile Wattmessgerät für den Radsport von dem deutschen Student Uli Schober erfunden; das Schober-Rad-Messtechnik-Trainingsystem, kurz SRM. SRM-Power gilt daher seither als Pionier auf diesem Gebiet und ist einer der führenden Hersteller, solcher Systeme. Im Jahr 1997 wurde das erste Profiradrennen mit solch einem System von SRM-Power am Fahrrad zur Leistungsmessung bestritten und auch im Zuge gleich damit gewonnen. In den 90er Jahren nutzten jedoch fast ausschließlich Profiradsportler dieses System, da es sehr teuer war und mehr als die meisten Rennräder kostete. Erst in den 2000er Jahren sanken die Preise für Wattmessgeräte und wurden so für die breite Masse zugänglich. Powermeter, gibt es in verschiedenen Bauformen und Preissegmenten und seit den 2000er Jahren sinken die Preise kontinuierlich, die Anzahl an verfügbaren Systemen steigt hingegen nahezu jährlich.

Die Technik hat sich so stark etabliert, so dass heute alle Fahrer\*innen im Profisport mit Leistungswattmessungen unterwegs sind (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 6).



Abb. 7: 3. Generation des SRM-Powermeter aus 1992

## **5.1 Definition und Funktion eines Powermeters**

Grundlegend muss dabei unterschieden werden, an welcher Stelle und auf welche Art und Weise gemessen wird. Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze der einzelnen Anbieter. Um das Thema Powermeter besser zu verstehen, folgt auf den folgenden Seiten die Definition, eine Beschreibung des Aufbaus bis zur Beschreibung einzelner Funktionsweisen.

### ***Was ist eine Leistungswattmessung?***

Unter einer Leistungswattmessung wird ein System, kurz Wattmesser oder Powermeter genannt, das zur Leistungsmessung in Watt für das Fahrrad verstanden wird. Bei jedem Pedaltritt misst dieses kleine technische Gerät die erbrachte Leistung des/der Radsportlers/ Radsportlerin in Watt und sendet anschließend den Wert auf ein externes Gerät, auf dem die Wattzahl angezeigt wird, beispielsweise auf einem Radcomputer oder einer App am Smartphone. Der/die Nutzer\*in bekommt die aktuellen Wattwerte von jedem Pedaltritt angezeigt und kann dadurch effizient trainieren (vgl. Tri It Fit, 2021).

### ***Für welche Fahrradtypen werden Powermeter derzeit angeboten?***

Derzeit werden Powermeter Systeme für Rennräder (auch Zeitfahrräder) und Mountainbikes angeboten. Die Gruppe der Powermeter für Rennräder stellt die größte Gruppe dar. Der Anteil an Powermetern für den Offroadbereich, welche sich für Mountainbikes eignen, ist hingegen sehr gering. Seit 2020 tut sich jedoch auch im Bereich Mountainbike mehr, sodass auch hier die Auswahl an Systemen stetig wächst (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

### ***Welche Anbieter gibt es derzeit am Markt?***

Derzeit gibt es mehr als zehn bekannte Hersteller, die solche Systeme anbieten, vorwiegend für den Rennradbereich. Als Pionier gilt der deutsche Hersteller SRM-Power, der als erster Hersteller die Leistungswattmessung für Rennräder, vor mehr als 25 Jahren, anbot. Neben den populären Systemen von SRM-Power, Garmin, Rotor, power2max und Sram gibt es noch unzählige weitere Anbieter wie beispielsweise StagesCycling, (kurz Stages genannt), 4iiii, Favero, Wahoo Speedplay, usw. Die unterschiedlichen Systeme unterscheiden sich vorwiegend von der Position an der gemessen wird und dem Preis. Die Preise pro System liegen zwischen 400€ und 2500€ (vgl. Sandig, D., 2015).

## Welche Komponenten werden für eine Wattmessung am Fahrrad benötigt?

Um ein Fahrrad mit einem Powermeter auszustatten, sind nicht viele Komponenten notwendig. Zum einen wird natürlich ein Fahrrad benötigt, an dem ein Powermeter montiert werden kann. Am geeignetsten sind Fahrräder, die für Trainingszwecke genutzt werden wie das Rennrad, Gravelbike, Zeitfahrrad oder Mountainbike. Um die Leistung messen zu können, muss ein geeigneter Powermeter für das ausgewählte Fahrrad montiert werden. Die meisten Modelle am Markt messen im Kurbel- oder Pedalbereich. Ist der Powermeter am Fahrrad angebracht, wird noch ein kompatibler Fahrradcomputer benötigt, um die Wattwerte anzuzeigen. Bekannte Marken sind Garmin, Wahoo, Hammerhead oder Polar. Zu guter Letzt kann die Wattmessung auch noch mit einem Herzfrequenzmesser zur Überwachung der Herzfrequenz, ergänzt werden. Powermeter und Herzfrequenzmesser sind zwei unabhängig voneinander benutzbare Komponenten und müssen nicht gemeinsam miteinander verwendet werden. Es zeigt sich jedoch, dass Trainieren mit Powermeter und Herzfrequenzmesser sinnvoller ist, da der Pulsschlag ein Indikator für die Fitness ist.

Kurz zusammengefasst werden also ein Fahrrad, ein Powermeter, ein Fahrradcomputer und eventuell ein Herzfrequenzmesser benötigt, um ein funktionierendes System zu erhalten (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 30-38).

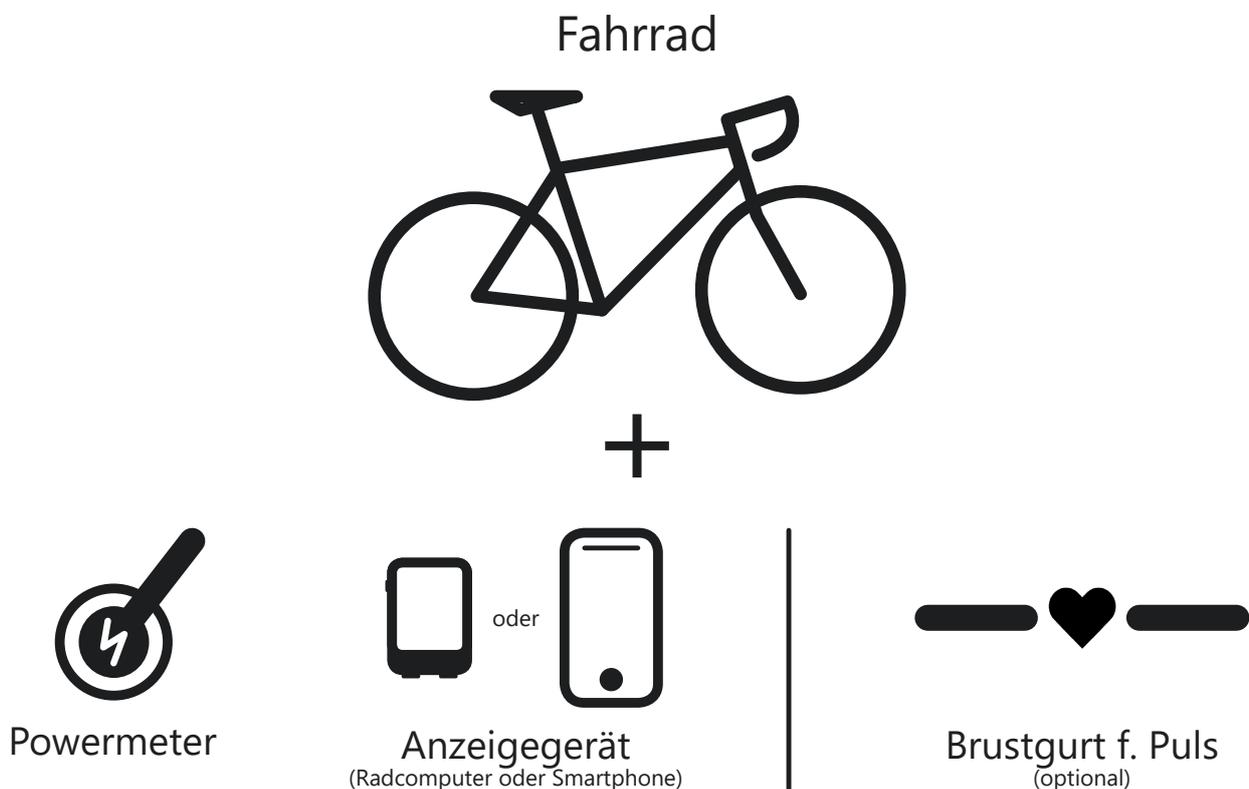


Abb. 8: Komponenten für Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### **Wo sind Powermeter platziert?**

Im Prinzip gibt es sieben unterschiedliche Bereiche am Fahrrad, um die Leistung zu messen. Es gibt integrierte Systeme an der Kurbel, dabei wird zwischen Kurbelstern/Kettenblatt und Kurbelarm unterschieden. Des Weiteren gibt es noch die Messung mit Sensoren in Pedalen und einige wenige Systeme messen beim Tretlager/Kurbelachse und in der Hinterradnabe. Die Messung in der Nabe ist hingegen sehr problematisch, da diese von der jeweiligen Übersetzung abhängig ist, weshalb diese Systeme mittlerweile vom Markt verschwunden sind (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

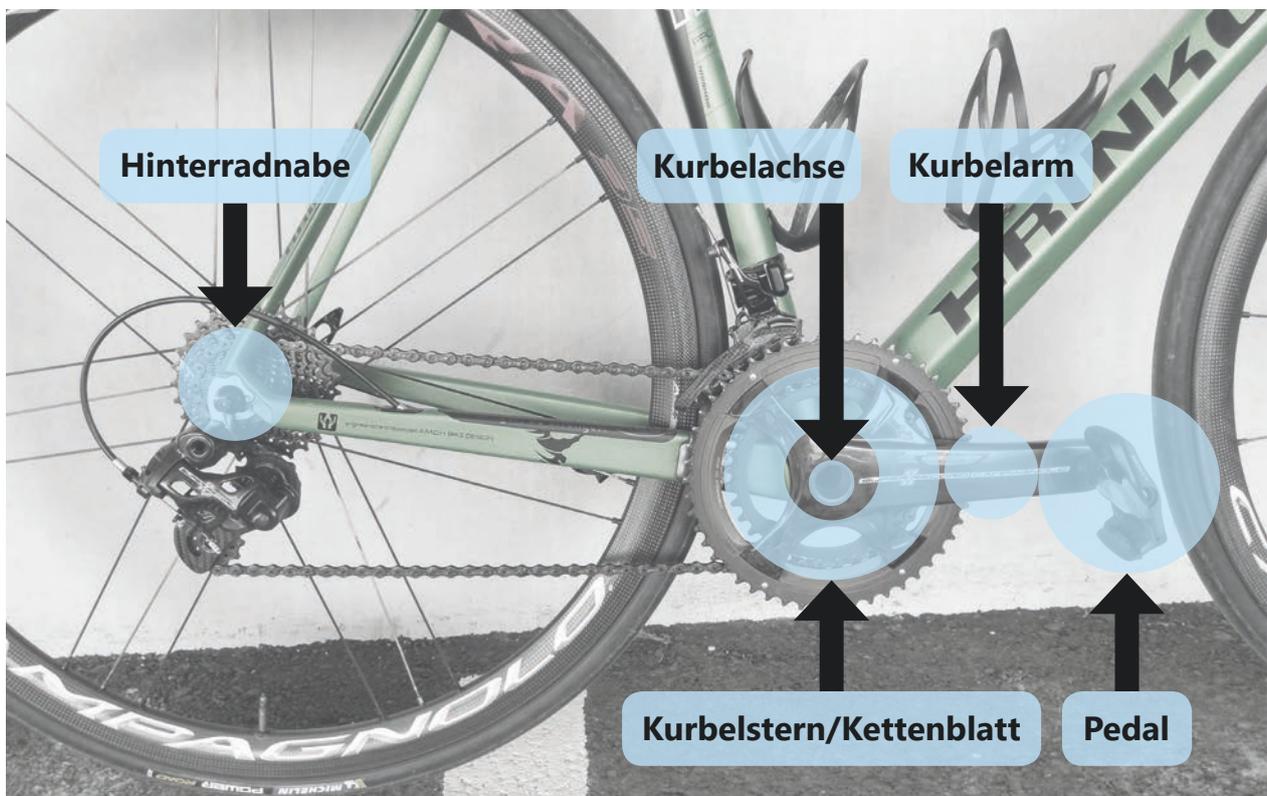


Abb. 9: Positionen für Powermeter am Fahrrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Seit einigen Jahren gibt es auch Systeme, die nicht direkt die aufgewendete Kraft messen, sondern indirekt messen, die sogenannte Gegenkraftmessung.

Zudem gab es zwischenzeitlich auch Konzepte, die im Schuhbereich Messungen durchführten, diese sind jedoch alle gänzlich vom Markt verschwunden (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 35).

### **Einseitige oder Beidseitige Messung?**

Bei den Systemen muss zudem unterschieden werden, ob einseitig oder beidseitig gemessen wird. Dafür gibt es drei unterschiedliche Ansätze unter den Systemen:



#### **einseitige Messung**

Pedal od. Kurbelarm



#### **beidseitig - getrennte Messung**

Pedal od. Kurbelarm



#### **gemeinsam - beidseitige Messung**

Kurbelstern od. Kurbelachse

Abb. 10: Übersicht der Messoptionen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

**\_ einseitige Leistungsmessung** (tatsächliche Leistung links)

Bei einer einseitigen Messung wird auf der linken Seite gemessen und die erbrachte Leistung auch auf der gegenüberliegenden Seite angenommen und somit einfach mit zwei multipliziert. Da die Beine selten gleich stark sind, leidet darunter die Messgenauigkeit solcher Systeme (vgl. Kühnen, R., 2021, S. 81).

**\_ beidseitig – getrennte Leistungsmessung** (tatsächliche Leistung links/rechts)

Bei beidseitig messenden Systemen wird sowohl für links als auch für rechts die jeweilige Trittkraft gemessen. Die Summe aus links und rechts ergibt die Gesamtleistung mit der getreten wird. Beidseitige Messsysteme kommen Bauart-bedingt bei Pedal-Powermeter und Kurbelarm-Powermeter zum Einsatz und liefern die genauesten Werte (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

**\_ gemeinsam – beidseitige Leistungsmessung** (geschätzte Leistung links/rechts)

Bauartbedingt erfolgt bei Powermetern, bei denen im Kurbelstern gemessen wird, eine geschätzte links/rechts Messung. Die Gesamtleistung mit der pedaliert wird, stimmt, jedoch ist eine genaue Aufteilung in links und rechts nicht möglich. Die etablierten Hersteller SRM und Quarq verfolgen dieses Prinzip bei ihren Systemen (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

Bei Erwachsenen unterscheidet sich die Beinkraft zwischen linken und rechten Bein um etwa fünf Prozent. Deshalb zeigen Systeme, welche tatsächlich beidseitig messen, ein realitätsgetreueres Abbild der eigenen Leistung und sind jenen, die einseitig messen, vorzuziehen (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 32).

## Wie ist ein Powermeter aufgebaut?

Ein Powermeter besteht aus zwei grundlegenden Bauteilen: einer Elektronikeinheit und einer Messeinheit. Die Elektronikeinheit besteht aus einer Platine mit Prozessor/Chip einer Einheit für die Stromversorgung (Akku oder Batterie), einem Gyrosensor, evtl. einem zusätzlichen Beschleunigungssensor und einer Sensoreinheit zur Übertragung der Daten. Der Gyrosensor wird benötigt, um die Trittfrequenz zu bestimmen, da diese für die Berechnung der Leistung benötigt wird.

Die Messeinheit besteht in der Regel aus mehreren Dehnungsmessstreifen, die in Form einer Brückenschaltung aufgebaut sind, um die Verformung zu bestimmen. Der Messeinheit ist zudem noch ein Analog-Digital-Umsetzer angeschlossen. Elektronikeinheit und Messeinheit müssen sich nicht an der gleichen Stelle bzw. in einer Einheit befinden, sondern können baulich voneinander getrennt platziert sein (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

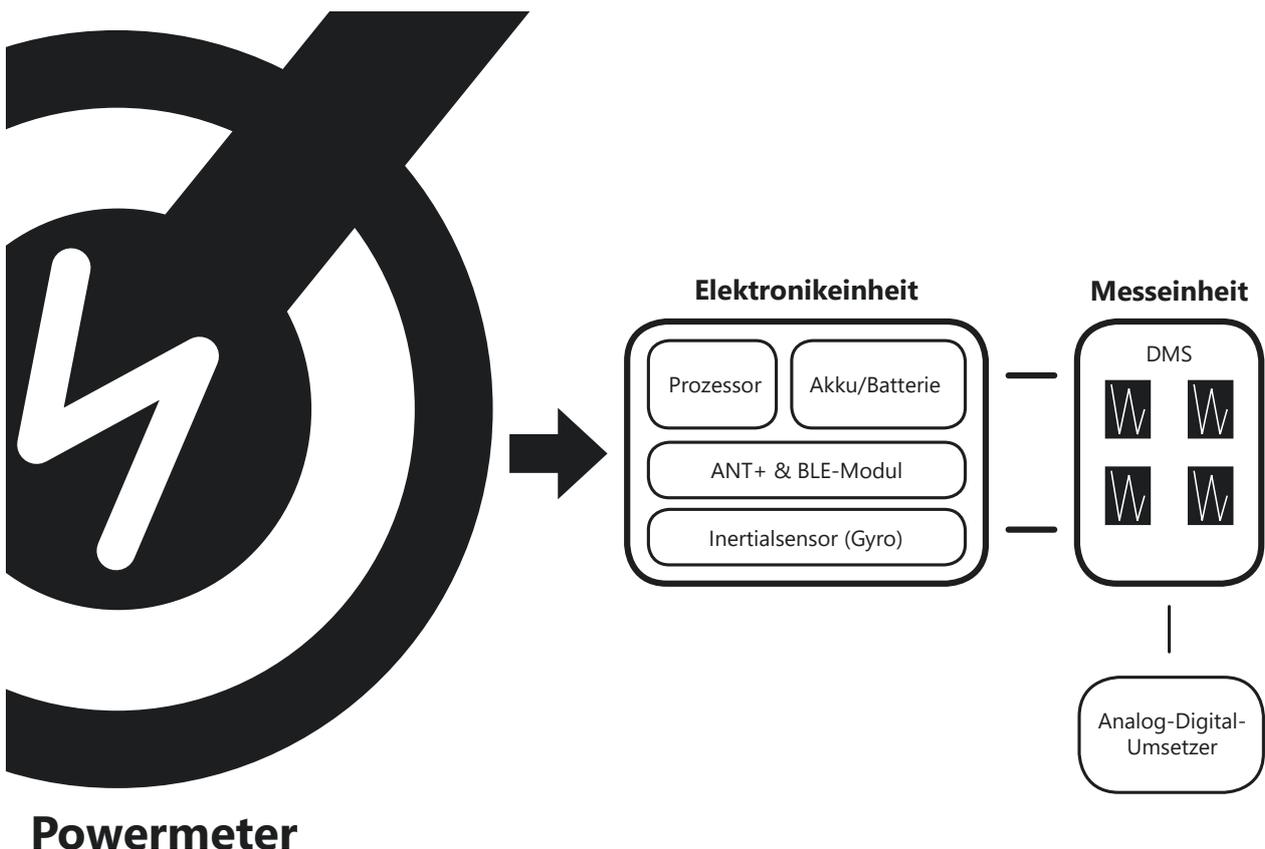


Abb. 11: Powermeter Aufbau (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### ***Was muss vor der ersten Inbetriebnahme beachtet werden?***

Um korrekte Daten zu generieren, müssen das Fahrrad und der Powermeter aufeinander abgestimmt werden. Jeder Powermeter muss daher vor der ersten Inbetriebnahme einen Kalibrierungsprozess am Fahrrad durchlaufen. In der Regel müssen das Rad und die Kurbel nach Herstellervorgaben ausgerichtet werden, um den sogenannten Nullpunkt einzustellen und in Folge korrekte Messdaten zu erhalten. Dazu verbindet sich die dazugehörige App des Herstellers mit dem Powermeter und konfiguriert diesen auf die Position. Meistens müssen mehrere Positionen durchgespielt werden, um die Kalibrierung erfolgreich abzuschließen. Die Kalibrierung dauert nur wenige Sekunden und sollte je nach Herstellerangaben vor jeder Fahrt oder nach einem vorgegebenen Kilometer Intervall erneut kalibriert bzw. "genullt" werden. Ebenso muss auch bei einem Fahrradwechsel der Powermeter auf dieses Rad erneut kalibriert werden.

Auch die Fahrradcomputer haben meist eine Funktion den Powermeter zu kalibrieren bzw. zu "nullen", empfohlen wird jedoch die App des dazugehörigen Herstellers des Powermeters (vgl. Sinner, M., 2021).

### ***Was wird gemessen?***

Von allen Systemen am Markt, mit Ausnahme jener, die indirekt messen (Gegenkraftmessung), wird eine Kraft bzw. das daraus resultierende Drehmoment und die Trittfrequenz erfasst. Daraus resultiert die Leistung, welche in Watt angegeben wird. Die aufgebrachte Kraft beim Pedalieren wird über eine Verformung des Materials (z.B. Kurbelarm oder Pedalachse) abgenommen. Anhand dieser Pedalkraft und der Trittfrequenz wird infolgedessen die Leistung berechnet (vgl. Friel, J., 2013, S. 34).

Bei den indirekt messenden Systemen wird anstelle der aufgewendeten Kräfte, die sogenannten Gegenkräfte gemessen, also jene Kräfte, die auf den/die Fahrer\*in einwirken (Schwerkraft, Luftwiderstand, Rollwiderstand etc.). Anhand der Geschwindigkeit, des eingegebenen Fahrergewichts, einem Rollwiderstandskoeffizient, einem aerodynamischen Koeffizienten und einem Algorithmus, wird die erbrachte Leistung berechnet (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 35).

Zudem gibt es noch einige Systeme, die auf alternative Art und Weise die Leistung ermitteln. Eine detaillierte Beschreibung dieser Powermeter und jener mit Gegenkraftmessung folgt im Kapitel 6 unter dem Punkt „Alternative Powermeter“ und „Gegenkraftmessung“.

Neben der Leistung in Watt, geben fast alle modernen Wattmessgeräte auch die Arbeit an, die in Joule geleistet wurde. Joule und Kilojoule ist die übliche Maßeinheit für den Energieverbrauch bzw. die geleistete Arbeit (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 27).

### ***Wie wird gemessen?***

Kraft und Trittfrequenz sind die Parameter, die ein Wattmessgerät für die Messung benötigt. Die Berechnung der Trittfrequenz ist relativ leicht. Die Powermeter messen, wie lange es dauert, bis die Kurbel eine Umdrehung absolviert hat. Früher wurde die Trittfrequenz mit einem magnetischen Sensor am Rahmen und einem Magneten auf dem Kurbelarm gemessen. Aktuelle Geräte messen elektronisch die erzeugte Sinuswelle, während sich die Kurbel dreht und bestimmen daraus die Wellenlänge, um die Trittfrequenz zu erhalten. Die meisten Systeme ermitteln die Trittfrequenz jedoch über einen eingebauten Gyrosensor. Zur Berechnung der Kraft verfügen die meisten Systeme über eingebaute Dehnungsmessstreifen. Je nach Bauart befinden sich die Dehnungsmessstreifen wie oben beschrieben in der Kurbel, dem Tretlager, der Hinterachse oder den Pedalen. Normalerweise sind mehrere Dehnungsmessstreifen (mindestens vier) eingebaut, um ein genaueres Messergebnis zu erhalten. Aktuelle Systeme erreichen eine Messgenauigkeit von +/- 1 Prozent. Verarbeitet werden all diese Daten in einer Powerunit/Powercontrol (vgl. Friel, J., 2013, S. 34).

### ***Wie funktioniert die Energieversorgung?***

Ohne Strom funktioniert bei den Powermetern nichts, deshalb werden interne Akkus oder auswechselbare Batterien verbaut. Die fest eingebauten Akkus haben den Vorteil einer höheren Zuverlässigkeit, einer einfachen wieder Aufladbarkeit und einer besseren Wasserdichtigkeit, gegenüber den batteriebetriebenen Systemen. Ist der Akku jedoch defekt, muss das Gerät an den Hersteller gesendet werden.

Bei den batteriebetriebenen Systemen sind die Batteriekontakte eine häufige Fehlerquelle und können zu Ausfällen führen.

Die batteriebetriebenen Systeme weisen generell mehr potenzielle Fehlerquellen auf, insbesondere Deckel und Verschraubungen sind oft davon betroffen (vgl. Kühnen, R., 2021, S. 81).

Bei fast allen batteriebetriebenen Geräten kommen Knopfzellen des Typs CR 2032 oder AAA-Batterien zum Einsatz. Meist haben diese eine Laufzeit von 200 bis 400 Stunden. Die eingebauten Akkus hingegen haben mittlerweile eine Lebensdauer von 1000 Ladezyklen (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

### ***Wie funktioniert die Datenübertragung?***

Um zu erfahren, wie viel Leistung erbracht wird, muss diese auf einem Gerät angezeigt werden. Die Watt-Daten werden vom Powermeter drahtlos zum Fahrradcomputer oder Smartphone übertragen. Die Übertragung erfolgt dabei entweder mit dem ANT+-Protokoll oder der Übertragungstechnologie „Bluetooth Low Energy“ (BLE). Aktuelle Powermeter haben meistens beide Technologien verbaut (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 38). Eine detaillierte Beschreibung zu den beiden Funkprotokollen folgt im Kapitel 9.

### ***Wie funktioniert die Datenaufzeichnung?***

Wie oben beschrieben werden die Daten drahtlos an den Radcomputer übertragen, jedoch gibt es Unterschiede darin, mit welcher Aufzeichnungsrate aufgezeichnet wird und welche Anzeigenrate am Radcomputer eingestellt ist. Die Aufzeichnungsrate ist jene Rate, mit der ein Radcomputer/Smartphone die Daten aufzeichnet. Empfohlen wird die Aufzeichnung mit der höchsten Aufzeichnungsrate. Dabei werden jede Sekunde Daten vom Powermeter aufgezeichnet, dies führt zu den genauesten Ergebnissen. Je schneller die Aufzeichnungsrate, desto mehr Daten und desto exakter die Messung!

Die Anzeigenrate hingegen ist jene Rate, mit der die Aufzeichnungsdaten gemittelt und auf dem Display des Radcomputers dargestellt werden. Üblicherweise kann die Anzeigenrate auf dem Radcomputer auf drei, zehn, 20 Sekunden usw. eingestellt werden. Es ist sinnvoll die Anzeigenrate auf drei oder fünf Sekunden zu stellen, um die Daten zu glätten und weniger volatile Werte anzuzeigen. Es macht wenig Sinn die Anzeigenrate auf eine Sekunde zu stellen, da sich die Wattmessdaten sehr schnell ändern. Für das Zeitfahren auf ebenen Strecken kann sogar ein Wert von zehn Sekunden besser geeignet sein (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 39-40).

## **Welche Werte können von einem Powermeter erfasst und am Radcomputer angezeigt werden?**

Bei allen Radcomputern kann die Arbeit in Joule, die aktuelle Leistung in Watt, die Durchschnittsleistung und die maximal erzeugte Leistung angezeigt werden. Ist ein beidseitiges Messsystem verbaut kann zudem auch ein eventuell auftretender Leistungsunterschied von linkem und rechtem Bein angezeigt werden.

Welche Werte am Radcomputer tatsächlich angezeigt werden kann individuell eingestellt werden. Die Datenfelder am Radcomputer sind immer frei konfigurierbar und können herstellerabhängig noch diverse andere Werte anzeigen. Hinzu kommen noch herstellerspezifische Grafiken für die Kraftverteilung während der Tretbewegung. Jeder Powermeter ist in der Lage, die oben beschriebenen Messwerte zu liefern (vgl. Friel, J., 2013, S. 51-52).

Bei den Pedalpowermetern sieht es ein wenig anders aus. Vor allem wenn ein beidseitig messender Pedal-Powermeter verbaut ist, wird bei den Radcomputern auch die Kraftverteilung in linkes und rechtes Pedal sowie in Zug- und Druckkräfte aufgeschlüsselt. In diesem Beispiel erbringt der Fahrer während des Tretzyklus am linken Pedal eine derzeitige Wattleistung von 80 Watt und am rechten Pedal 106 Watt. Es kann auch angezeigt werden, um wie viel Watt bzw. Prozentpunkte, rechte und linke Beinkraft voneinander abweichen. In diesem Beispiel wird mit dem linken Bein mit etwa 20 weniger Watt getreten als mit dem rechten Bein. Die 186 Watt geben die aktuelle Gesamtleistung an mit der getreten wird. Zusätzlich kann noch der „Platform Center Offset“ (PCO) angezeigt bzw. ermittelt werden. Der PCO zeigt die Position auf dem Pedalkörper, an dem die Kraft angewendet wird. In diesem Beispiel wird auf beiden Seiten eher rechtslastig Druck auf das Pedal ausgeübt (vgl. Garmin Support, 2022a).

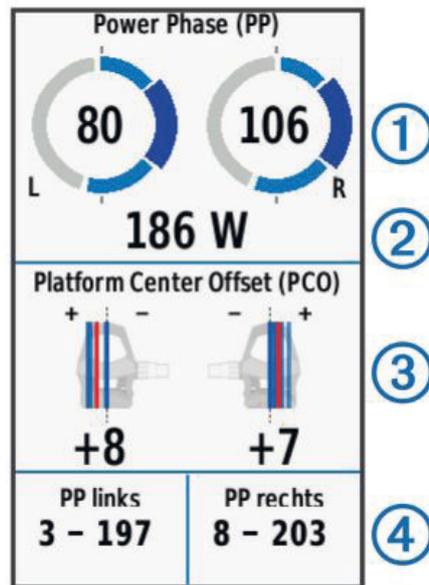


Abb. 12: Darstellung am Fahrradcomputer bei Garmin

Bei anderen Herstellern wie Pioneer, heute Shimano, werden die Kräfte mit Kraftvektoren illustriert, bildhaft dargestellt und eine Effizienz-Kennzahl berechnet. Als „Effizienz“ definiert der Hersteller Pioneer das Verhältnis der tangential einwirkenden Kräfte zur Gesamtkraft und bewertet einen hohen Anteil an tangentialen Kräften als positiv. Folglich verbessert sich die Effizienz-Kennzahl, wenn man das Bein aktiv nach vorne und nach unten drückt, bzw. in der Aufwärtsbewegung aktiv hochzieht. Manche Systeme können auch feststellen ob derzeit im Sitzen oder im Stehen getreten wird. Zudem können meist auch die Drehmomenteffektivität und „Pedalglätte“ analysiert und angezeigt werden. Solche Messsysteme helfen, den Tretstil zu analysieren und aktiv zu verbessern (vgl. Tour Magazin, 2015).

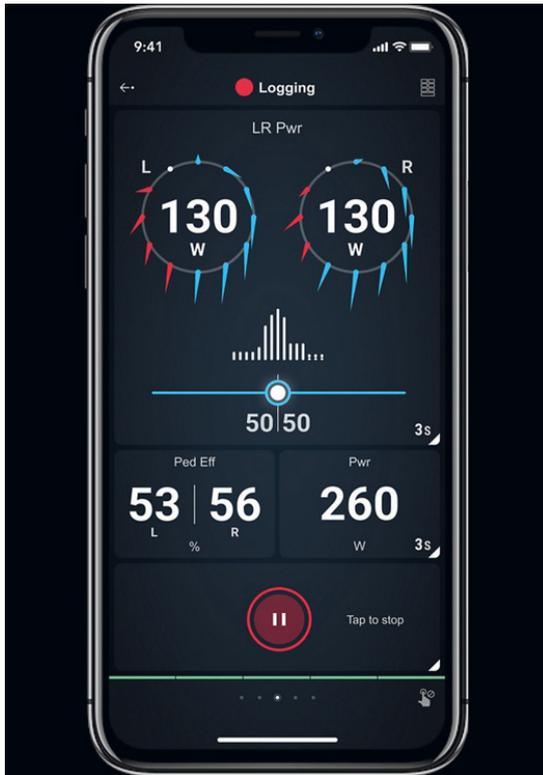


Abb. 13: Darstellung bei Shimano

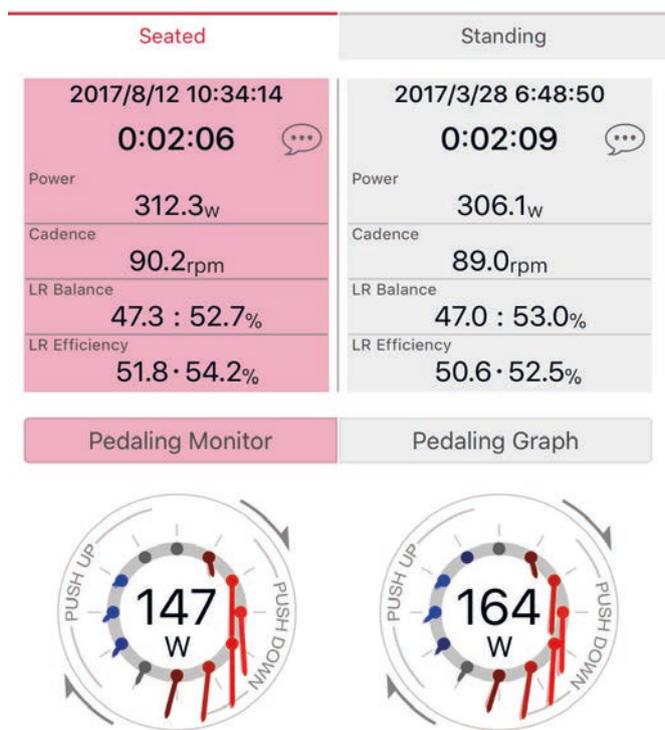


Abb. 14: Darstellung bei Cyclo-Sphere

Zusammenfassung der Werte, welche Powermeter liefern können:

- *momentane & durchschnittliche Leistung*
- *Links/Rechts Verteilung*
- *Trittfrequenz*
- *Drehmomenteffektivität*
- *Pedalglätte (Runder Tritt)*
- *PCO (Platform Center Offset)*
- *Effizienzkennzahl*

Es gibt noch unzählige weitere Darstellungsoptionen der unterschiedlichen Hersteller, aber grundsätzlich sind sich alle sehr ähnlich und unterscheiden sich meist nur grafisch voneinander.

Doch welche Vorteile bringt ein Powermeter mit sich? Diese Frage wird im nächsten Punkt beschrieben:

## 5.2 Vorteile eines Powermeters

Für ambitionierte Radsportler\*innen ist ein Powermeter ein sehr wertvolles Instrument, um effizient zu trainieren und Trainingsfortschritte messbar zu machen. Die Leistung und die Herzfrequenz sind die ausschlaggebenden Parameter in der Trainingslehre für Ausdauersport. Die Wattmessung hilft einem, seine verborgenen Schwächen aufzudecken und vergleichbarer trainieren zu können, als nur mit Pulsuhr oder der Geschwindigkeitsanzeige. Mit Wattmessgeräte hat man zudem die Möglichkeit, persönliche Leistungsdaten sekundengenau zu speichern und später auszuwerten (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 11-12).

Da die Systeme die erbrachte Leistung genau im Moment bzw. bei jedem Pedaltritt messen, wird ein aktuelles und exaktes Abbild der Leistungsfähigkeit abgebildet. Im Gegensatz zur Wattleistung ist die Durchschnittsgeschwindigkeit und der Puls beim Radfahren kein aussagekräftiger Wert, da dieser von vielen anderen Faktoren wie Wind, Steigung oder Bodenbelag abhängig sind. Deshalb kann gesagt werden, dass die Wattleistung viel weniger von äußeren Faktoren abhängig ist und sie deshalb viel vergleichbarer macht. Die Leistungswattmessung ist somit die bestmögliche Art, seine Trainingsleistungen zu überwachen und zu verbessern. Dies erkannten auch Hobbysportler\*innen, so dass das Trainieren nach Wattwerten in der breiten Masse immer beliebter wurde und in den letzten Jahren einen regelrechten Boom erfahren hat. Ein großer Wermutstropfen dabei ist aber nach wie vor der relativ hohe Anschaffungspreis solcher Messsysteme und die Gebundenheit an ein Fahrrad (vgl. Preß, W., 2016).

Um die Vorteile des wattgesteuerten Trainings noch besser zu verstehen, folgt im ersten Punkt eine Gegenüberstellung zwischen der Wattleistung und den anderen beiden wichtigen Fahrdaten; Geschwindigkeit und Herzfrequenz.

## \_ Zusammenhang zwischen Wattleistung, Geschwindigkeit und Herzfrequenz

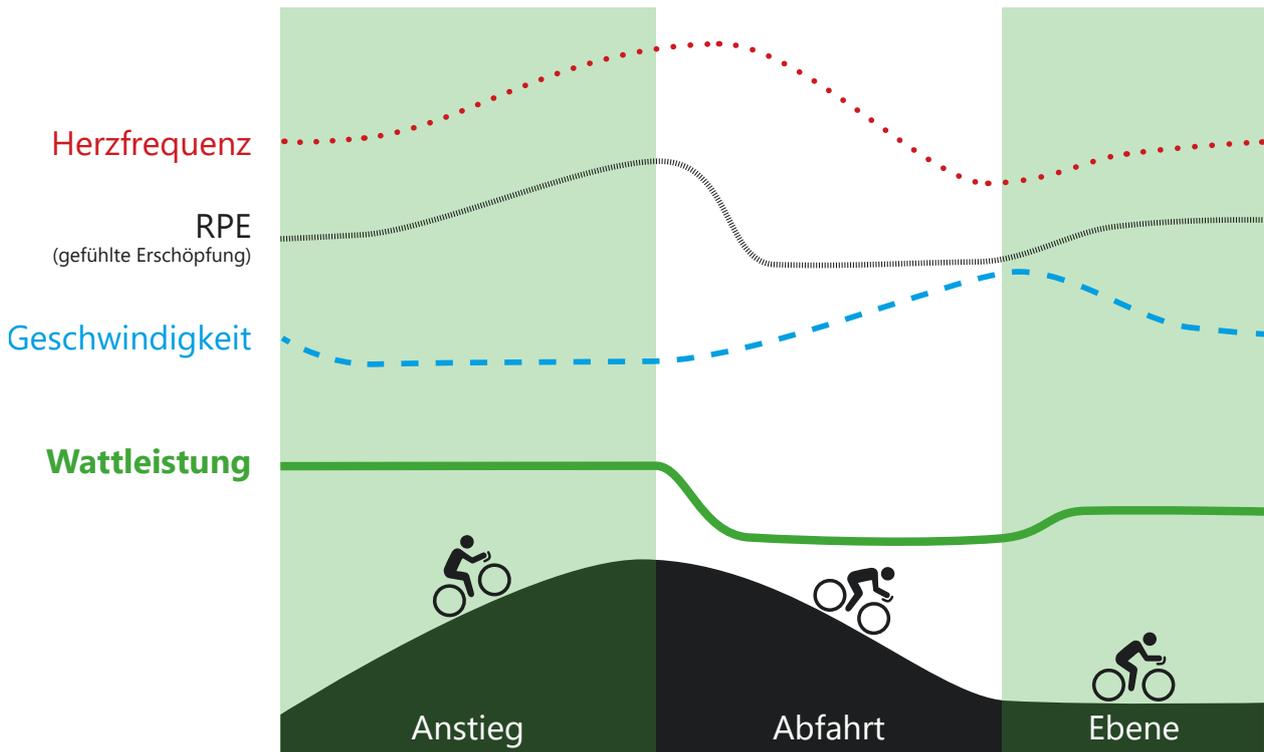


Abb. 15: Zusammenhang von Wattleistung und anderen Parametern (vgl. Friel, J., 2013, S. 23)

In dieser Grafik wird der Zusammenhang zwischen Wattleistung, Geschwindigkeit, RPE und Herzfrequenz aufgezeigt. RPE steht dabei für „Rating of perceived exertion“, die sogenannte gefühlte Erschöpfung. Im Beispiel fährt der/die Radfahrer\*in mit gleichmäßiger Geschwindigkeit den Anstieg hoch, rollt auf der anderen Seite, ohne zu treten hinunter und tritt anschließend auf dem Flachstück wieder in die Pedale. Die Herzfrequenz und die RPE steigen während des Anstiegs, hingegen die Geschwindigkeit und Wattleistung bleiben relativ konstant. Beim Bergab-Stück steigt die Geschwindigkeit bei fallender Herzfrequenz, RPE und die Wattleistung sinkt gegen Null. Zu beachten ist jedoch, dass die Herzfrequenz nur langsam auf den Anstieg reagiert und auch in der Anfangsphase der Abfahrt zunächst noch kurz weiter steigt, während die Wattleistung bereits gegen Null klettert. Aufgrund einsetzender Müdigkeit steigt beim Anstieg auch die RPE, welche bei der Bergabfahrt dann wieder recht schnell sinkt. Auch die Kurve der Wattleistung widerspiegeln die Veränderungen der anderen Parameter, jedoch reagiert diese viel schneller. Die Wattleistungskurve reagiert sofort auf den Anstieg, die darauffolgende Abfahrt und das Flachstück. Da bei der Wattleistung direkt gemessen wird, zeigt diese genau jene Leistung, die der/die Fahrer\*in aktuell auf die Pedale bringt.

Die Wattleistung ist daher immer ohne Zeitverzögerung messbar, während die Herzfrequenz immer eine zeitliche Verzögerung mit sich bringt. Je höher die Wattleistung desto höher ist auch die Leistung des Fahrers. Dies gilt ebenso für die Geschwindigkeit. Herzfrequenz und RPE hingegen widerspiegeln nur, was der/die Fahrer\*in fühlt. Sieht man sich jedoch die Wattleistung und die Herzfrequenz in Kombination an, ist das ein aussagekräftiger Wert über die Fitness eines Fahrers. Ist die Wattleistung bergauf sehr hoch und die Herzfrequenz relativ gering, im Vergleich mit früheren Fahrten an diesem Berg, ist der/die Fahrer\*in schneller und fitter geworden. Deshalb ist es sinnvoll mit Herzfrequenzmesser und Powermeter zu trainieren (vgl. Friel, J., 2013, S. 22-24).

Da die Wattleistung den aussagekräftigsten Wert beim Radfahren über den/die Fahrer\*in und deren Leistungsfähigkeit darstellt, kann dieser effektiv im Training eingesetzt werden. Das Fahren nach Wattzahlen bietet folgende Vorteile:

- *genaue Selbsteinschätzung*
- *zielgerichtetes Training*
- *FTP bestimmen*
- *bessere Vergleichbarkeit*
- *bessere Zusammenarbeit*

## **1. Selbsteinschätzung**

Der Powermeter liefert viele Informationen zur Radfahrt, anhand derer die eigenen Stärken und Schwächen identifiziert werden können. Der Powermeter zeigt eindeutig auf, wie stark eine Person wirklich ist, wenn diese einen Anstieg hochfährt. Geht einem die Puste nach 50 Kilometern Fahrt aus, hätte man vermutlich mehr Essen oder Trinken oder eine leichtere Übersetzung einlegen sollen. Man erkennt daher, welche Anforderungen dringender trainiert werden müssen, beispielsweise Intervalle, Anstiege oder Sprints. Der Powermeter zeichnet zudem die Leistung aus muskulärer Sicht auf, die Herzfrequenz hingegen ist die Antwort des Körpers auf die erbrachte Wattleistung. Deshalb kann das Trainieren nur mit Herzfrequenz, leicht falsche Schlüsse nach sich ziehen, da es von vielen Faktoren beeinflusst wird.

Die Wattmessung ist daher ein signifikanter Schlüssel, um aufzuzeigen, wie leistungsstark ich tatsächlich am Rad bin. Zur weiteren Optimierung muss das Training dementsprechend gestaltet werden, man spricht vom zielgerichteten Training (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 17-18).

## **2. Zielgerichtetes Training**

Powermeter können effektive Motivationshilfen sein, um zielgerichteter zu trainieren. Setzt man sich realistische Ziele kann die Anzeige des Powermeter helfen, noch ein Quäntchen mehr Leistung zu erbringen. Legt man z.B. einen zwei-Minütigen-Sprint hin, und erkennt, wie die durchschnittliche Wattleistung gegen Ende der zwei Minuten abnimmt, muss wieder ein Zahn zugelegt werden, um die angestrebte Wattleistung über zwei Minuten zu erreichen. Doch nicht nur für kurze Sprints und Intervalle eignet sich der Powermeter ausgezeichnet, sondern auch um die ideale Geschwindigkeit zu finden. Der Powermeter hilft, den richtigen Belastungsbereich zu finden, um auch auf langen Touren nicht einzubrechen bzw. das Leistungsziel zu erreichen - Stichwort: Funktionsleistungsschwelle. Zudem kann mit einem Powermeter schneller eine bessere Form erreicht werden, da durch die Kombination aus Powermeter und Trainingspläne Kilometer- und Zeitsparender trainiert werden kann. Die eigene Körperform kann regelmäßig überprüft und Verbesserungspotenziale festgestellt werden (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 23-24).

### **3. Funktionsleistungsschwelle (FTP)**

Powermeter eignen sich hervorragend, um seine eigenen Leistungsbereiche zu bestimmen. Die FTP ist die höchste Dauerleistung, die ein Fahrer über eine Stunde durchgängig halten kann, ohne zu ermüden. Wird der eigene FTP-Wert überschritten, führt dies zu einer wesentlich schnelleren Ermüdung. Deshalb ist es wichtig seine eigene FTP zu kennen bzw. mit geeigneten FTP-Tests auf einem Ergometer zu bestimmen. Ist der eigene FTP-Wert bekannt, können daraus die anaerobe Schwelle, aerobe Schwelle, Laktatschwelle, usw. und die dazugehörigen Leistungsbereiche ermittelt werden. Bei einer Radausfahrt kann somit beispielsweise im aeroben Bereich gefahren werden, um die Grundlagenausdauer zu verbessern. Besonders beim Zeitfahren ist die Überwachung des Leistungsbereichs essenziell, um zu erkennen, wie weit gegangen werden kann oder ob bereits eine Überanstrengung stattgefunden hat. Ohne Powermeter können diese Bereiche nur anhand der Herzfrequenzbereiche ermittelt werden. Die Herzfrequenz stellt jedoch einen nicht so aussagekräftigen Wert dar wie die Wattleistung. Möchte man auf Nummer sicher gehen, verwendet man für das zielgerichtete Training deshalb immer eine Kombination aus Herzfrequenzmesser und Powermeter (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 44-45).

Die untenstehende Grafik zeigt die Spitzen- und Dauerleistung über eine Stunde (FTP) von Testpersonen am Fahrrad nach unterschiedlichen Trainingszuständen. Ein Profifahrer erbringt eine kurzzeitige Spitzenleistung von mehr als 800 Watt und eine Dauerleistung von knapp über 400 Watt auf eine Stunde. Trainierte Personen schaffen hingegen nur noch eine Dauerleistung von ca. 200 Watt (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 260).

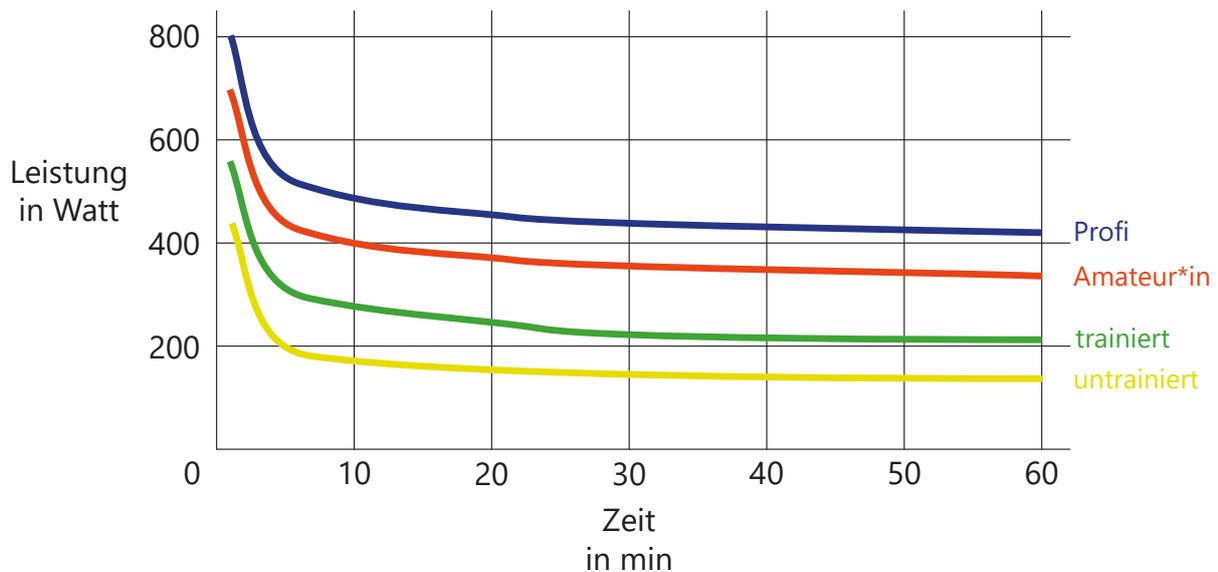


Abb. 16: Dauerleistung am Fahrrad/Ergometer (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 260)

#### 4. Vergleichbarkeit

Die Nachvollziehbarkeit von Leistungsveränderungen ist eine der interessantesten Möglichkeiten, die ein Powermeter mit sich bringt. Er gibt Aufschluss darüber, ob sich die körperliche Fitness im Laufe der Zeit verbessert oder verschlechtert. Es ist einfach zu erkennen, wie sich die Leistung der aktuellen Woche im Vergleich zur Fahrt der letzten und vorletzten Woche verändert hat. Werden die Leistungsdaten schlechter, muss der Trainingsbedarf dementsprechend angepasst werden.

Der Powermeter gibt immer Rückschluss darüber, wieviel Watt getreten werden können, egal ob bei Gegenwind oder Rückenwind. Ist man gleich fit, erbringt man sowohl bei Rückenwind als auch bei Gegenwind die gleiche Leistung, nur ist man bei Rückenwind

wesentlich schneller oder anders gesagt, benötigt man weniger Zeit für dieselbe Strecke. Die Vergleichbarkeit ist daher so interessant, da genau aufgezeigt wird, ob man stärker oder schwächer geworden ist. Diese Daten sind daher auch für die Trainer\*innen sehr bedeutend, um eine ideale Zusammenarbeit zum/zur Sportler\*in zu ermöglichen (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 18-19).

## **5. Zusammenarbeit**

Trainer\*innen lieben Powermeter und die detaillierten Informationen über die Leistungsfähigkeit des/der Sportlers/Sportlerin. Die Powermeter liefern klare, präzise und objektive Daten auf dem Computerbildschirm zum jeweiligen Athleten. Anhand der Daten kann ein Trainer die Dosis der Belastung bestimmen und zum richtigen Zeitpunkt eingreifen und gegebenenfalls Anpassungen vornehmen. Es können zielgerichtete Trainingspläne erstellt werden, um diverse Schwächen auszumerzen. Mit Wattmessgeräten sind daher keine Diskussionen mehr über die Form nötig, da die Daten absolut valide und vergleichbar sind. Stattdessen ist klar ersichtlich, wo man mit dem Training steht und ob der Trainingsplan dementsprechend ausgeführt wird.

Des Weiteren fühlt man sich durch einen Powermeter dem Training mehr verpflichtet, da genau ersichtlich ist, ob eine Übung z.B. ein Intervall nur fünfmal anstelle von zehnmal gemacht wurde. Der Powermeter lügt nie (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 21-22)!

### **5.3 Fazit**

Zusammengefasst bedeutet dies, dass es sich bei einem Powermeter um das einzige Gerät handelt, das den aktuellen Leistungsstand zeigt und dabei hilft, das Training zu überwachen. Es ist daher die bestmögliche und aussagekräftigste Art, das Training zu fokussieren und die Leistungen zu verbessern. Im Laufe der Zeit wird man nicht nur ein cleverer Fahrer, sondern auch schneller, effizienter, vergleichbarer und fitter, vorausgesetzt man weiß, wie man es richtig benutzt (vgl. Friel, J., 2013, S. 15).

Da nun klar ist, was ein Powermeter ist und welche Vorteile dieser bietet, folgt im nächsten Kapitel ein detaillierter Marktüberblick über die unterschiedlichsten Powermeter.



## **6. Marktanalyse der Leistungswattmessung am Fahrrad**

Wie im Kapitel 5 beschrieben, gibt es unzählige Anbieter von Powermetern und je nachdem wie die Hersteller die Technologie einsetzen, derzeit acht verschiedene Positionen am Fahrrad, um die erbrachte Leistung zu messen. In diesem Kapitel erfolgt ein Überblick der unterschiedlichen Powermeter und eine Beschreibung von Funktionsweise, Kompatibilität, Preis, usw. Es wird nicht auf jedes einzelne Produkt jedes Herstellers eingegangen, da die Funktionsprinzipien und der Aufbau der Systeme an der jeweiligen Messposition sich sehr ähnlich sind.

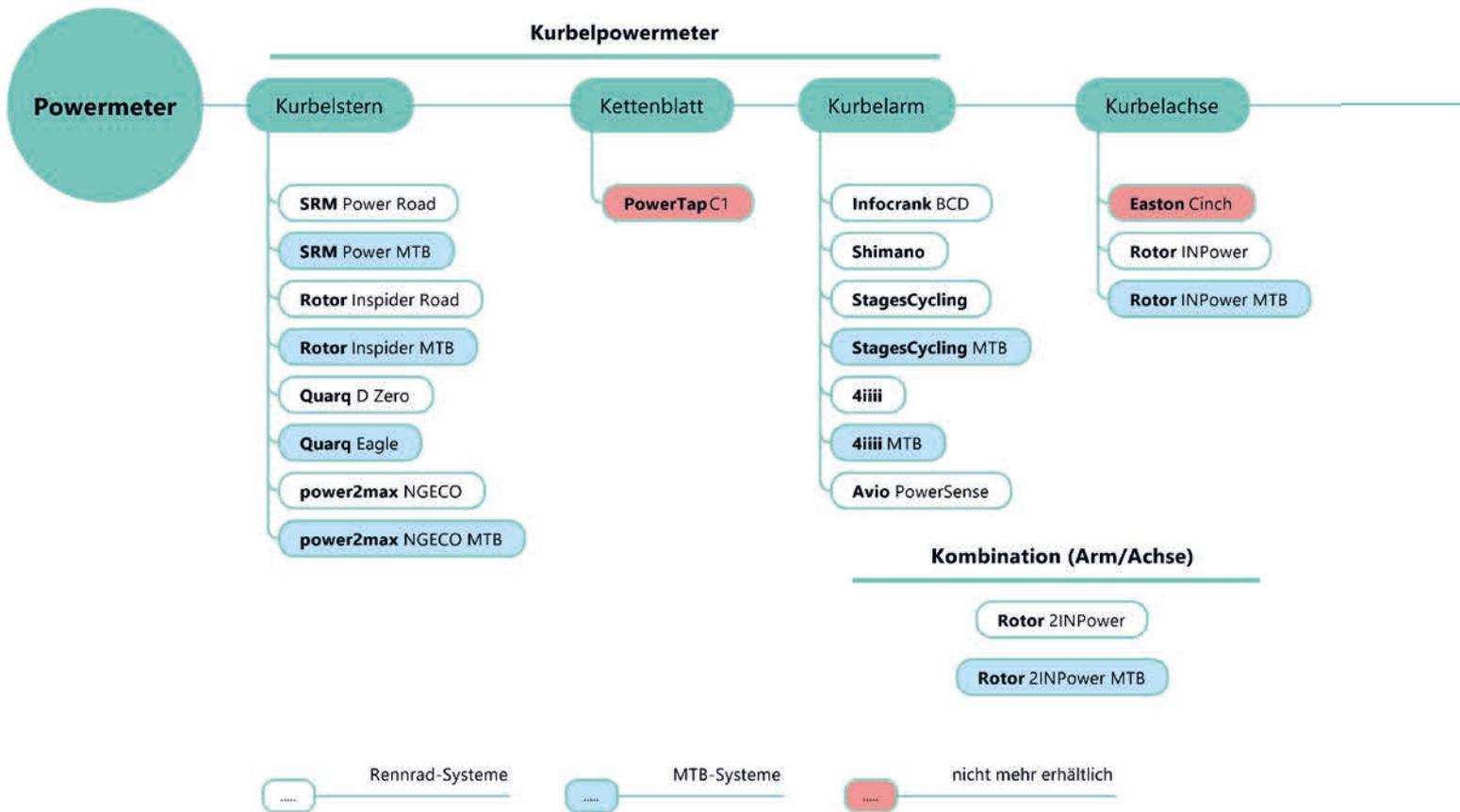
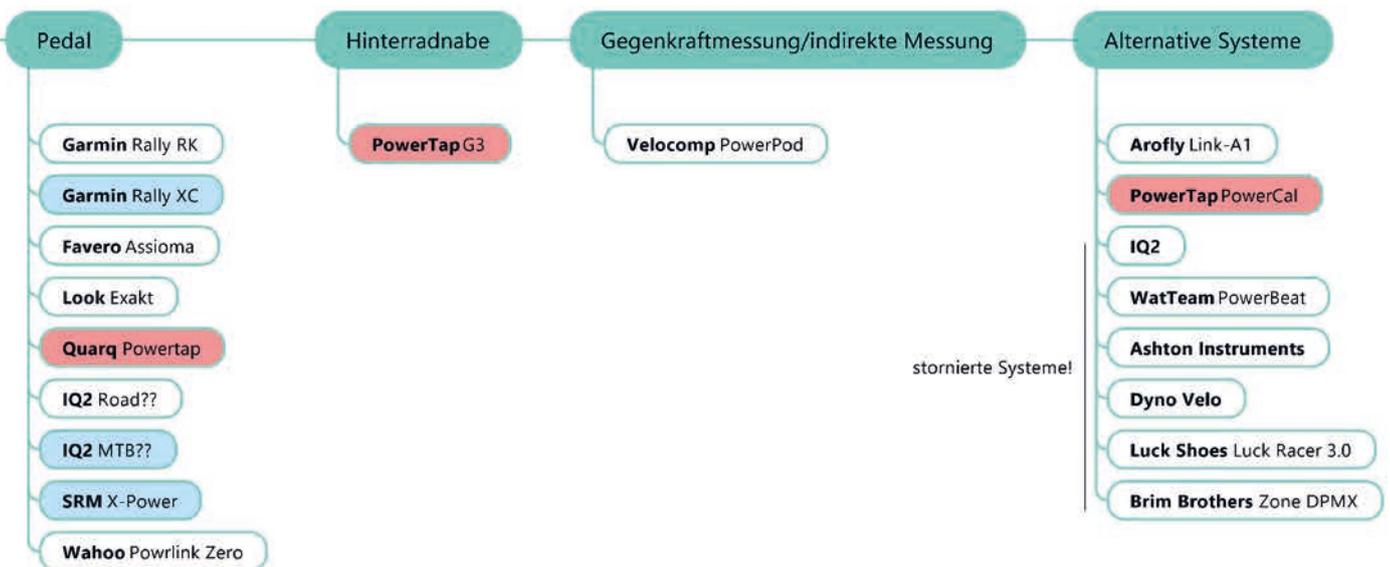


Abb. 17: Marktüberblick der Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Anhand der untenstehenden Grafik wird verdeutlicht, wie groß die Bandbreite an unterschiedlichen Powermetern ist. Aufgelistet sind 40 der bekanntesten und populärsten Systeme, die es derzeit zu erwerben gibt bzw. mal gab und zwischenzeitlich wieder vom Markt verschwunden sind und auch einige Produkte, die gescheitert sind. Der gesamte Markt an Anbietern ist daher noch größer. Es sind Powermeter für Rennräder und MTB's in der Grafik vertreten. Die speziellen Powermeter für MTB's sind blau hinterlegt. Es ist zu erkennen, dass die MTB-Systeme derzeit noch eine leicht untergeordnete Rolle am Markt spielen.



Der Überblick startet mit den Kurbelpowermetern, die den Anfang der Leistungsmessung vor über 30 Jahren einleiteten und jahrelang die beliebteste Powermeter-Option darstellten.

## **6.1 Kurbelpowermeter**

Die Kurbelpowermeter stellen zusammen mit den Pedalpowermetern die größte Gruppe an verfügbaren Powermetern dar. Da der Bereich nahe dort liegt, wo die Leistung tatsächlich gemessen wird, kommen diese Systeme am häufigsten zum Einsatz. Powermeter, die in diesem Bereich messen, decken den gesamten 360° Radius ab. Je nachdem an welcher Position und wie genau gemessen wird, wird zwischen drei unterschiedlichen Kurbelpowermeter-Varianten unterschieden. Die am weitest verbreiteten Kurbelpowermeter sind jene, bei denen im Kurbelstern, auch Spider genannt, der Powermeter verbaut ist und gemessen wird (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 30).

### **6.1.1 Kurbelstern**

Das allererste kommerzielle Wattmessgerät von SRM-Power, basierte auf dieser Grundlage, im Kurbelstern zu messen und setzte somit den Standard, an dem sich heute alle anderen Powermeter messen müssen. SRM folgte der Hersteller Sram mit den Quarq Kurbelstern Wattmessgeräten, mit ähnlicher Funktionsweise. Im Laufe der Jahre kamen immer mehr Anbieter solcher Systeme hinzu, die alle ähnlich funktionieren und sich in Bereichen wie Batterie, Gestaltung, Preis, usw. unterscheiden.

Bei der Messung im Kurbelstern wird die Kraft direkt an der Kurbel gemessen, daher wird die Kraft aus beiden Beinen berücksichtigt. Es handelt sich daher um einen gemeinsam-beidseitigen Leistungsmesser. Es wird somit die Summe der erbrachten Leistung richtig erfasst, aber die Links- Rechts-Darstellung ist ungenau, da unklar ist, welchen Beitrag die Beine in der Zugphase leisten. Daher können die Zug- und Druckkräfte nicht genau einem Bein zugeordnet werden. Viele dieser Powermeter können den oberen und unteren Totpunkt beim Tretzyklus mittels Reedschalter identifizieren, daher ist es möglich die Rechts-Links-Verteilung zu extrapolieren (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 30-32).

### *Kleines Beispiel:*

Die Gesamtleistung beträgt 300 Watt, auf der rechten Seite, während der Druckphase zwischen 0° und 180° bei 170 Watt. Daher müssen 130 Watt auf die linke Seite, die Zugphase fallen. Da jedoch zwischen 181° und 359° keine Kräfte erfasst werden können, könnte dieses Pseudo-Verhältnis also völlig falsch sein. Daher ist von keinem echten beidseitigen Messsystem die Rede.

Gemessen wird die ausgeübte Kraft vom Fuß, welche sich auf die Pedalachse und weiter über den Kurbelarm bis zum Kurbelstern und den Kettenblättern überträgt. Dadurch entsteht eine Längsverwindung am Kurbelstern, auch Torsion genannt. Diese Powermeter messen daher die Verwindung innerhalb des Kurbelsterns mit Dehnungsmessstreifen. Damit dieses System richtig funktioniert, muss die Tretkurbel jedoch ein gewisses Maß an Biegsamkeit gestatten. Die Dehnungsmessstreifen sind auf Stegen im Inneren des Kurbelsterns angebracht und messen die Torsionskräfte im Inneren. Über die Torsion wird anschließend die Wattzahl berechnet. In der Regel sind mehrere Dehnungsmessstreifen an verschiedenen Positionen verbaut, um ein exakteres Ergebnis zu erhalten. Es wird ein Durchschnittswert aller Messstreifen über eine Datensekunde gebildet, um die Wattzahl zu erhalten. Alle Geräte sind werksseitig kalibriert und sollten in regelmäßigen Abständen erneut kalibriert werden. Für die Temperaturkompensation kommt eine Wheatstone-Brücke zum Einsatz (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 30-32).

Diese Powermeter sind in der Regel in einem fix fertigem Kurbelsatz verbaut. Dieser kann auf jedes beliebige Rennrad montiert werden. Bei einigen Herstellern gibt es auch die Möglichkeit, nur die Wattmesseinheit (Spider) zu kaufen und anschließend in eine kompatible Kurbel am Rad einzubauen bzw. umzubauen. Diese Variante ist dadurch kostengünstiger. Aber Achtung: es sind nicht alle Wattmesseinheiten mit jeder Kurbel kompatibel. Größter Nachteil der Kurbelpowermeter ist, dass sie relativ schwer sind und nur auf ein Fahrrad anwendbar sind, ein Verwenden für mehrere Fahrräder ist nur mit hohem Aufwand und speziellem Werkzeug möglich.

Preislich reichen solche Systeme von 700€ bis 3.000€, abhängig von Hersteller und Material der Garnitur. Kauft man nur die Wattmesseinheit (Spider) startet es bei ca. 400€ (vgl. DC Rainmaker, 2018a).



Abb. 18: Kurbel-Powermeter SRM Power Road



Abb. 19: Kurbel-Powermeter Quarq D Zero



Abb. 20: MTB-Kurbel-Powermeter Quarq Eagle



## 6.1.2 Kettenblatt

2014 brachte die Firma PowerTap, heute Quarq, diese neue Art der Wattmessung auf den Markt. Wie der Kurbelstern, eignet sich auch das Kettenblatt für die Wattmessung, da es sich nahe der Stelle befindet, wo die Leistung vom Körper übertragen wird. Die Bezeichnung ist jedoch irreführend, da sich die Dehnungsmessstreifen nicht direkt auf den Kettenblättern, sondern auf einem weiteren Stern, der mit den Kettenblattschrauben auf den bestehenden Kurbelstern geschraubt wird, befinden. Dieser Stern bzw. Kettenblatt verfügt über zusätzliche Arme, in denen die Messstreifen untergebracht sind und die Torsion messen. Es wird daher die Kraft aus beiden Beinen berücksichtigt, eine einwandfreie Links – Rechts - Darstellung ist jedoch nicht möglich. Somit handelt es sich auch um einen gemeinsam beidseitig messenden Leistungsmesser. Für die Trittfrequenzmessung kommt ein Gyrosensor zur Anwendung. Nachteil dieses Systems ist, dass die Kettenblätter nicht mit allen Kurbelarmen kompatibel sind. Mittlerweile ist diese Art der Wattmessung wieder vom Markt verschwunden (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 33).



Abb. 21: Kettenblatt-Powermeter PowerTap C1



Abb. 22: Kettenblatt des PowerTap C1

### **6.1.3 Kurbelarm**

Diese Powermeter messen ebenfalls die Biegung mittels Dehnungsmessstreifen. Dabei muss jedoch unterschieden werden, ob die Messstreifen im Inneren des Kurbelarms oder nachträglich an der Außenseite des Kurbelarms angebracht sind. Zudem gibt es Hersteller, welche die Messstreifen nur einseitig oder auch beidseitig verbauen. Werden die Messstreifen auf beiden Seiten, sprich in/an beiden Kurbelarmen verbaut, handelt es sich dabei um beidseitig- getrennte Messsysteme. Es befinden sich daher links und rechts Dehnungsmessstreifen. Zudem verfügen alle Systeme über eine Temperaturkompensation, mittels Wheatstone-Brücke, um bei allen Wetterlagen und Temperaturen korrekte Daten zu liefern (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 32-33).

#### **\_ Messung im Inneren**

Erfolgt die Messung im Inneren des Kurbelarms, sind in symmetrischen Taschen in den Innen- und Außenflächen der beiden Kurbeln, Dehnungsmessstreifen eingeklebt. Das Messergebnis bei diesem System ist sehr exakt, da die Biegung nicht nur an der Außenseite der Kurbelarme gemessen wird, sondern die gesamte Biegung im Inneren des Arms. Dadurch ist es auch möglich, die Druck- und auch die Zugkräfte zu messen und zu analysieren (vgl. Rotor, 2021).

Zu den bekannten Herstellern in diesem Bereich zählt die Firma Infocrank. Der Hersteller wirbt mit 256 Abtastungen pro Sekunde, um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten. Bei einer Trittfrequenz von 60 U/min sind das 256 Abtastungen pro Kurbelumdrehung. Durch die hohe Abtastrate können sowohl Tangential- als auch Radialkräfte aufgezeichnet werden. Diese Messgrößen können hilfreich sein, um die Tritttechnik zu analysieren und zu korrigieren. Zudem werden die linke und rechte Kraftbalance, die Pedalglätte und die Drehmomenteffektivität aufgezeichnet. Der Preis für dieses System von Infocrank mit beidseitiger Messung liegt bei ca. 1.200€ (vgl. Infocrank, 2022).



Abb. 23: Kurbelarme Infocrank BCD



Abb. 24: Kurbelarm-Powermeter Infocrank BCD

## \_ Messung an der Außenseite

Meistens wesentlich günstiger sind Powermeter, die nicht im Arm, sondern ausschließlich an der Außenseite des Kurbelarms messen. Bekannte Hersteller in diesem Bereich sind Stages und 4iii. Dabei werden die Dehnungsmessstreifen zusammen mit der kleinen Elektronikeinheit außen auf die Innenseite des Kurbelarms von den Anbietern geklebt. Auch hier gibt es die Option, zwischen einer einseitigen oder beidseitigen Lösung auszuwählen. Wird jedoch nur auf der linken Seite gemessen, wird die Leistung mit zwei multipliziert, um die Gesamtleistung zu erhalten. Daher ist eine Aufschlüsselung in linkes und rechtes Bein bei einer einseitigen Messlösung auch hier nicht möglich. Einseitige Messsysteme sind daher kostengünstiger als beidseitig messende (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 32).

Der Hersteller Stages bietet neben den normalen Kurbel-Powermeter auch Nachrüstlösungen für bereits bestehende Kurbel-Komponenten an, ein sogenanntes „Factory Install“. Es können alle großen Hersteller von Kurbelkomponenten mit dieser Technologie nachgerüstet werden, egal ob Carbon- oder Aluminium-Kurbelarm. Dafür wird der eigene Kurbelarm an die Firma Stages eingeschickt und vier bis sechs Wochen später bekommt man die eigene Kurbel aufgerüstet zum Powermeter wieder zurückgesendet. Preise für die einseitige Messoption beginnen für die Nachrüstlösung des eigenen Shimano-Kurbelarms bei Stages bereits ab 380€. Die Preise für die normalen Powermeter (kein Factory Install) mit einseitiger Messoption beginnen bei Stages bereits ab 450€. Das beidseitige System ab 790€. StagesCycling spricht von einer Messgenauigkeit von +/- 1,5 Prozent bei ihren Lösungen (vgl. Stages Cycling, 2021).



Abb. 25: Kurbelarm-Powermeter StagesCycling



Abb. 26: Kurbelarm-Powermeter beidseitig "Factory Install" StagesCycling



Abb. 27: Kurbelarm-Powermeter einseitig "Factory Install" StagesCycling

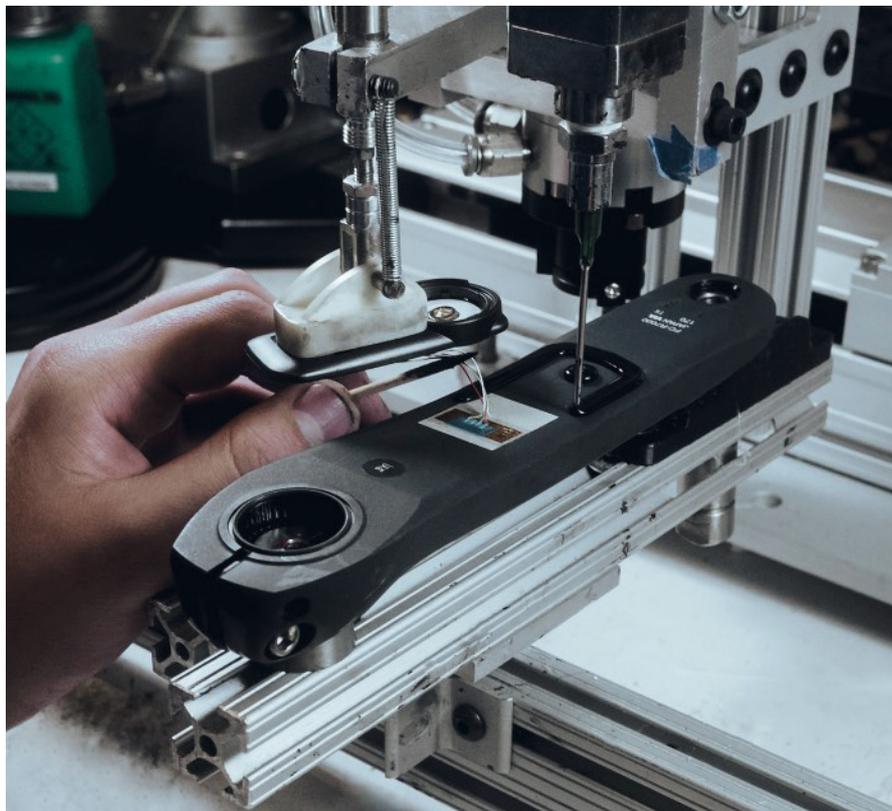


Abb. 28: Fertigungsprozess bei StagesCycling

Auch der Komponentenriese Shimano bietet seit Einführung der neuen 12-Fach Schaltgruppe im Jahr 2022 einen überarbeiteten Kurbelarm-Powermeter an. Dieser wirbt mit einer langen Akkulaufzeit von 250 Stunden und mit je zwölf Dehnungsmessstreifen auf der linken als auch rechten Seite. Er ist daher ausschließlich mit getrennt beidseitiger Messung erhältlich, zu saftigen Preisen ab 1100€, liefert jedoch auch Werte zur Tritteffizienz (vgl. Shimano, 2022).



Abb. 29: Kurbelarm-Powermeter Shimano



Abb. 30: Messeinheit Shimano

Der PowerSense von Avio hingegen wird als „do it yourself“ Nachrüstlösung für Zuhause um 160€ angeboten. Der kleine Pod wird, nicht wie bei Stages, vom Hersteller angebracht, sondern vom Nutzer auf die zuvor mit einem Schleifpapier aufgeraute Innenseite des linken Kurbelarms, mit einem mitgelieferten Klebstoff aufgeklebt und muss anschließend 24 Stunden aushärten. Danach muss er noch mit einem 10kg schweren Gewicht selbst kalibriert werden. Durch die Selbstmontage des Nutzers stellt der PowerSense im Bereich der Kurbelarm-Powermeter somit eine Ausnahme dar. „Factory Install“ für zu Hause! Der PowerSense ist nur als einseitig messende Powermeter-Version verfügbar und soll eine Messgenauigkeit von +/- 2 Prozent aufweisen (vgl. Brett, M., 2018).



Abb. 31: Kurbelarm-Powermeter Avio PowerSense



Abb. 32: Selbstinstallation Avio PowerSense

## 6.2 Kurbelachs-Powermeter

Diese Art von Powermeter wurde 2002 von einer deutschen Firma vorgestellt und wurde in der Tretlagerachse verbaut. Dieses System maß die Verwindung der Tretlagerachse mit optischen Lichtsensoren und konnte nur die Leistung, die mit dem linken Bein erzeugt wurde, messen. Aufgrund bauartbedingter Veränderungen der Tretkurbeln von der Radindustrie war diese Technologie nicht in der Lage, sich den neuen Standards anzupassen und verschwand wieder vom Markt (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 34).

Heute feiert die Powermeter-Achse wieder ein Comeback in neuen Systemen. Zu den bekanntesten Herstellern für solch ein System zählt die Firma Rotor. Gemessen wird mit Dehnungsmessstreifen, die systembedingt nur die linksseitige Torsion messen und für den Gesamtwert die ermittelten linksseitigen Werte verdoppeln. Somit handelt es sich hierbei um ein einseitiges Messsystem. Sämtliche Elektronik, die Akkueinheit und die Dehnungsmessstreifen befinden sich in einer geschlossenen Einheit, die in die Tretlagerachse bzw. Hohlachse des Tretlagers passt und außen am Endstück des Lagers mittels Micro-USB-Kabel geladen werden kann. Es handelt sich dabei jedoch nicht um eine Nachrüstlösung, die einfach in die Hohlachse eingesteckt werden kann, sondern um einen kompletten Kurbelsatz mit oder ohne Kettenblätter. Die günstigste Konfiguration des Powermeters besteht aus eben dieser Tretlagerachse und den beiden Kurbelarmen und kostet 500€. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, sich ein Set inkl. der beiden Rotor-Kettenblätter zu bestellen um 600€. Es können jedoch auch Kettenblätter anderer Hersteller montiert werden.

Diese Wattmessgeräte messen nach erfolgter Kalibrierung sehr präzise und sind für eine große Bandbreite an Tretlagern kompatibel und ermöglichen zusätzlich die Messung der Drehmomenteffektivität und Pedalglätte. Eine Aufschlüsselung der Balance zwischen links und rechts ist jedoch nicht möglich. Da diese Geräte jedoch sehr empfindlich sind, muss beim Ein- und Ausbau sorgfältig gearbeitet werden. Die Systeme bieten eine Messgenauigkeit von +/- 1 Prozent (vgl. Rotor, 2022).

Rotor bietet zudem auch einen kombinierten Powermeter an, bei dem sowohl in der Kurbelachse als auch im Kurbelarm gemessen wird. Details hierzu im nächsten Punkt.



Abb. 33: Kurbelachs-Powermeter Rotor InPower



Abb. 34: Kurbelachs-Powermeter-Set Rotor InPower

### 6.2.1 Kombination aus Achs- und Kurbelarmmessung

Neuartige Systeme wie von Rotor verfügen über eine kombinierte Achs- und Kurbelarmmessung. Beim Rotor 2INPower befinden sich zusätzliche Dehnungsmessstreifen und ein Beschleunigungssensor im rechten Kurbelarm. Man erhält somit die Gesamtleistung aus rechtem und linkem Bein. Dieser beidseitig getrennt messende Leistungsmesser ist sehr teuer und nicht mit den Standard Kurbel- Komponenten kompatibel (vgl. Nowak, F., 2017).

Es muss die gesamte Standard-Kurbelgarnitur gegen das Rotor-System ausgetauscht werden. Kettenblätter können weiterhin auch von anderen Herstellern verwendet werden. Dafür bekommt man die Messwerte, Drehmomenteffektivität und Pedalglätte für beide Beine geliefert. Sprich, wie viel der Gesamtkraft von jedem Bein zum Vorwärtsmoment beiträgt und wie gleichmäßig der Pedalhub ausgeführt wird. Die Preise für das Rotor 2INPower ohne Kettenblätter starten bei 1.000€. Für das komplette Set (inkl. Kettenblätter) werden 1.100€ fällig (vgl. Rotor, 2022).



Abb. 35: Achs- und Kurbelarm-Powermeter Rotor 2InPower

### 6.3 Pedalpowermeter

Neben der großen Anzahl an kurbelbasierten-Systemen gibt es heute auch fast genauso viele pedalbasierte-Leistungsmesser. In letzter Zeit fand hier sogar die meiste Innovation statt. Erst im Jahr 2008 kam von MetriGear das erste Wattmessgerät für die Pedale auf den Markt. 2010 erwarb Garmin diese Firma, um im heißumkämpften Markt der Leistungsmessung Fuß zu fassen. Garmin war die treibende Kraft in der Entwicklung pedalbasierter-Leistungsmesser und konnte sich jahrelang am Markt behaupten. Mittlerweile gibt es mehrere Anbieter solcher Pedalpowermeter, zum Teil auch zu erheblich günstigeren Preisen.

Großer Vorteil dieser Systeme ist, dass diese genau dort die Leistung messen, wo sie vom Fuß auf das Fahrrad übertragen wird. In der Pedalachse sind genau unter dem Druckpunkt der Schuhplatten mehrere Dehnungsmessstreifen angebracht, um die Kraft zu messen. Die Messstreifen sind entweder nur im linken Pedal oder auch im rechten Pedal eingebaut. Eine genaue Auflösung nach linkem und rechtem Bein leisten daher nur duale Pedal-Powermeter (beidseitig-getrennte Messung). Auch verfügen die Pedale über eine Temperaturkompensation und über einen Gyrosensor zum Erfassen der Trittfrequenz. Die Messgenauigkeit wird bei den meisten Systemen mit +/- 1 Prozent angegeben (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 36).

Ein derzeit sehr beliebtes Powermeter-Pedal ist das Assioma von Favero aus Italien. Die Pedale von Favero haben einen Drei-Achsen-Gyroskop Sensor verbaut, um die Winkelgeschwindigkeit in jedem Moment zu erfassen und den eigenen Tretstil zu analysieren. Da der Tritt in der Praxis während einer Kurbelumdrehung nie konstant ist kommt es so zu Abweichungen der Leistungsberechnung. Insbesondere wenn im Stehen getreten wird, kommt es häufig zu sehr unregelmäßigen Tritten. Favero gibt mögliche Abweichungen von bis zu 4,5 Prozent an, im Vergleich zu Systemen, die nur die mittlere Winkelgeschwindigkeit einer Umdrehung messen.

Einseitige Messsysteme kosten generell zwischen 400€ und 650€. Wird beidseitig gemessen, starten die Preise ab 680€ und reichen bis 1.100€ für ein Garmin-Pedal (vgl. Favero Electronics, 2022a).

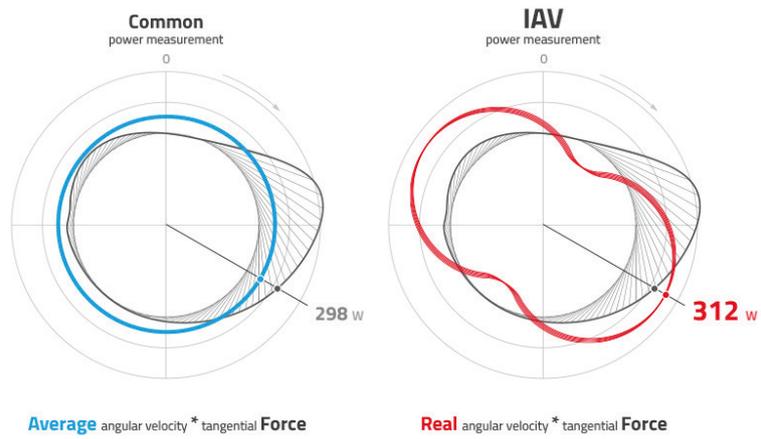


Abb. 36: Tretstil Erkennung beim Favero Assioma



Abb. 37: Pedal-Powermeter Favero Assioma Uno



Abb. 38: Pedal-Powermeter Garmin Rally RK



Abb. 39: Pedal-Powermeter Wahoo Powrlink Zero

Der größte Vorteil der Wattmess-Pedale besteht darin, dass diese leicht mittels Pedalschlüssel oder Inbusschlüssel von einem Fahrrad abgeschraubt und an ein anderes Rad montiert werden können. Daher sind diese Powermeter auch sehr gut für die Verwendung an einem Ergometer geeignet. Zudem sind die Pedale bauartbedingt in der Lage, zusätzliche Messgrößen wie Tangential- und Radialkräfte zu messen sowie die Drehmomenteffektivität und die Pedalglätte und somit den runden Tritt zu bestimmen. Außerdem kann bestimmt werden, ob stärker mit der Innenseite, der Außenseite oder zentral mit dem Fuß die Kraft auf den Pedalkörper ausgeübt wird.

Nachteil der Pedalpowermeter ist, dass diese schwerer sind als normale Pedale und dieses Mehrgewicht, bei jedem Tritt „mitgeschleppt“ werden muss. Zudem gibt es unterschiedliche Cleat-Standards (Klick-Pedalsysteme) bei den Pedalen und einige Fahrer haben gewisse Präferenzen für bestimmte Pedalsysteme, jedoch gibt es nicht für jeden Standard eine Powermeter-Option. (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 36).

Daher erfolgt im nächsten Unterpunkt ein kurzer Überblick über die gängigsten Klick-Pedalsysteme am Markt:

### 6.3.1 Pedalsysteme

1984 übertrug der französische Hersteller Look das Klick- Prinzip von Skibindungen auf Fahrradpedale und brachte damit das weltweit erste Klickpedal auf den Markt. An der Unterseite des Radschuhes wird eine Pedalplatte (Cleat) montiert, die in dem dazu passenden Pedal einrastet. In den meisten Pedalen ist ein einfacher Klickmechanismus mit Spannfeder verbaut. Zum Lösen der Verbindung wird der Fuß nach seitlich außen weggedreht.

Die Klickpedale eroberten schnell den Markt und verdrängten rasch die bis dato üblichen Riemenpedale. Sie ermöglichen eine effektive Kraftübertragung und verhindern ein Herum- oder Abrutschen des Pedals. Ein Fahren ohne Klickpedal ist heutzutage bei Rennrädern und MTB´s nahezu undenkbar (vgl. Pfeiffer, M., 2021).

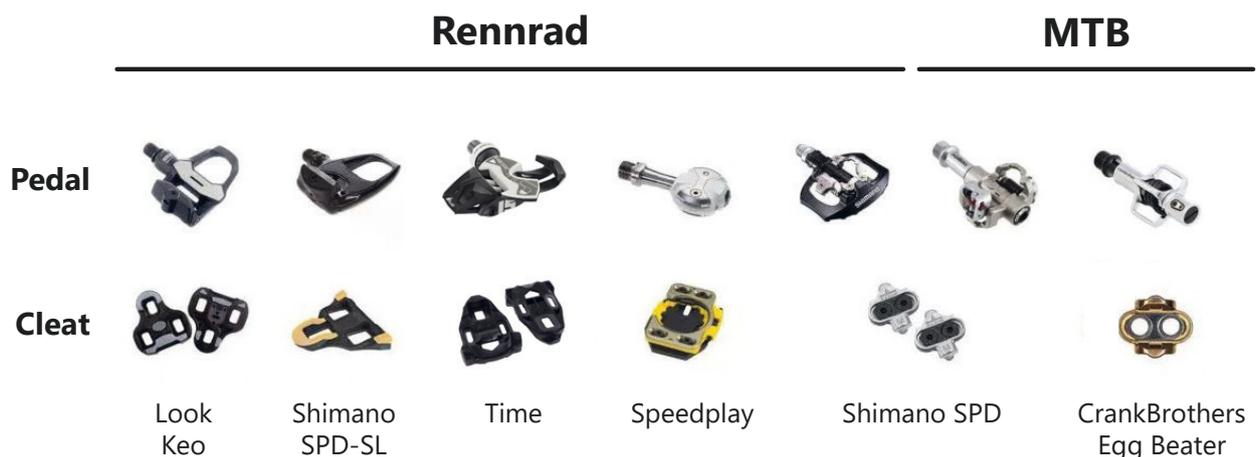


Abb. 40: Übersicht Pedalsysteme (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Aktuell gibt es sechs gängige Klickpedalsysteme am Markt die sich durch unterschiedliche Standards und Cleats unterscheiden. Pedal und Cleat System müssen immer übereinstimmen, um in das Pedal einklicken zu können. Zwei von den sechs Systemen sind für das Mountainbike gedacht und vier rein für das Rennrad, wobei mit den beiden Mountainbike Systemen auch auf dem Rennrad gefahren werden kann. In der Regel fährt man jedoch nicht mit einem MTB-System am Rennrad, aufgrund der schlechteren Kraftübertragung der kleineren Cleats und dem höheren Gewicht der Pedale.

Im MTB Sektor ist das Shimano SPD-System führend. Daneben gibt es noch einen anderen Standard der Firma CrankBrothers. Powermeter-Pedale gibt es derzeit im MTB Bereich nur für den Shimano Standard (vgl. Sinner, M., 2017).

Im Rennrad Bereich ist der Look- und Shimano SPD-SL- Standard mit Abstand am weitesten verbreitet. Time und Speedplay hingegen haben einen erheblich geringeren Marktanteil. Neben diesen vier unterschiedlichen Pedallösungen gibt es noch einige kleinere Anbieter, die jedoch die gleichen technischen Lösungen bieten. Daher sind diese Pedale entweder mit dem Look oder Shimano Cleat kompatibel!

Pedalpowermeter gibt es für den Look, Shimano und Speedplay Standard. Für Time Pedale hingegen gibt es noch keinen passenden Powermeter fürs Pedal (vgl. Pfeiffer, M., 2021).

### 6.3.2 Modulare Pedalpowermeter

Seit einem Jahr arbeiten die Hersteller daran, ihre Powermeter-Pedale modular aufzubauen. Dabei wird die komplette Elektronik in der Pedalachse untergebracht und der Pedalkörper kann abgenommen werden. Dadurch können beispielsweise bei den Garmin-Pedalpowermeter, sowohl ein MTB Shimano- SPD, als auch ein Look oder Shimano SPD-SL Pedalkörper montiert werden. Hat man daher ein Rennrad und MTB zu Hause, kauft man sich ein Paar Pedalpowermeter fürs Rennrad (Rennradpedalkörper) und nimmt ein Paar MTB-Pedalkörper (Pedalkörper Wechsel-Kit) hinzu. Somit kann durch Ummontieren der Pedale der Powermeter für mehrere Fahrräder und unterschiedliche Klickstandards verwendet werden. Dies war bis vor einigen Jahren noch nicht möglich, da benötigte man noch für jeden Fahrradtyp ein eigenes komplettes Powermeter-Setup (vgl. Garmin, 2022).

Auch andere Hersteller wie Favero Electronics verfolgen das Prinzip einer modularen Aufbauweise ihrer Pedale.



Abb. 41: Achsset des Pedal-Powermeter Favero Assioma Duo



Abb. 42: Pedalkörper Garmin Rally RK für Rennrad



Abb. 43: Pedalkörper Garmin Rally XC für MTB

### 6.3.3 Vergleichsmessung zwischen Pedal- und Kurbelpowermeter

Vergleichsmessungen zwischen Pedal- und Kurbelpowermetern mit Messeinheiten im Kurbelstern (Spider) zeigten, dass diese kaum voneinander abwichen. Lediglich die nachträglich umgebauten Kurbelpowermeter mit Messeinheiten im Kurbelarm von Stages zeigten größere Abweichungen. Die Standardkurbeln sind offensichtlich nicht darauf ausgelegt sich kontrolliert und identisch zu verformen (vgl. Kühnen, R., 2021, S. 85).

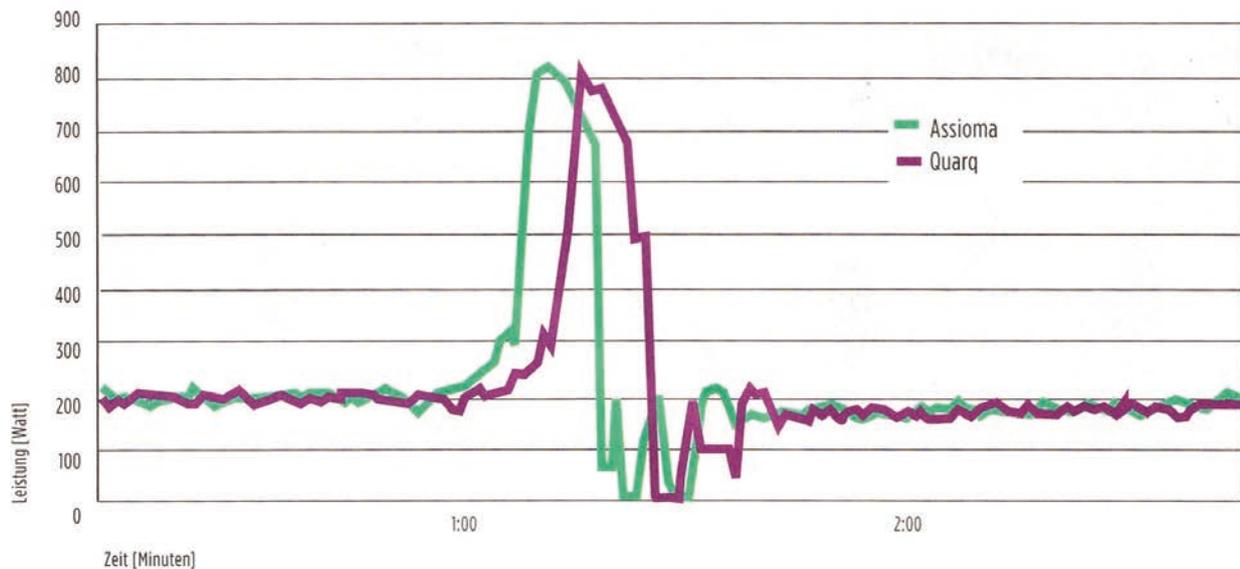


Abb. 44: Test zwischen Pedal- und Kurbelpowermeter (Kühnen, R., 2021, S. 85)

Die Grafik zeigt einen Sprintantritt zwischen dem Assioma-Pedalpowermeter und dem Quarq-Kurbelpowermeter. Der zeitliche Versatz in der Grafik dient nur der besseren Lesbarkeit! Es zeigt sich, dass die Kurven der beiden Systeme nahezu deckungsgleich sind und bei beiden Geräten eine mittlere Leistung von 665 Watt herauskommt. Die Durchschnittsleistung während der gesamten Fahrtdauer ist mit 222 zu 223 Watt ebenfalls fast identisch. Es zeigt sich daher, dass sowohl Pedalpowermeter, als auch die Kurbelpowermeter mit Spidermessung gleich gut funktionieren und idente Leistungsdaten liefern (vgl. Kühnen, R., 2021, S. 85).

## 6.4 Hinterradnabenpowermeter

1997 kam der erste Powermeter mit Messeinheit in der Hinterradnabe des Laufrades von einer Firma namens Etune auf den Markt. Im Laufe der Zeit wurde die Firma von CycleOps gekauft und die integrierten Wattmessgeräte in der Nabe wurden zu den heutigen bekannten PowerTap-Naben. PowerTap war jahrelang der einzige Anbieter solcher Systeme, spielt jedoch keine bedeutende Rolle am Gesamtmarkt. Gemessen wird ebenfalls mit in einem „Torsionsrohr“ verbauten Dehnungsmessstreifen in der Hinterradnabe. Diese Messstreifen messen die Torsion innerhalb der Nabe, die sich aufgrund der Tretkräfte beim Pedalieren verwindet. Da die Kette über den an der Nabe befestigten Zahnkranz läuft, kommt es durch die Bewegung zu kleinen Verwindungen in der Nabe. Dieses Drehmoment wird erfasst und anschließend in Watt umgerechnet (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 33-34).

Die Messung in der Nabe ist jedoch problematisch, da diese von der jeweiligen Übersetzung abhängig ist und daher nur eine Durchschnittswertmessung bietet. Ebenfalls ist keine korrekte Messung einer Links-Rechts-Verteilung möglich, deshalb handelt es sich um eine gemeinsam beidseitige Leistungsmessung. Die Messgenauigkeit wird mit +/-1,5 Prozent angegeben (vgl. Rotor, 2021).



Abb. 45: Hinterradnaben-Powermeter PowerTap

Vorteil dieses Systems ist jedoch, dass der Laufradtausch von einem zum anderen Rad relativ schnell erfolgen kann. Vorausgesetzt es sind beide Fahrräder desselben Typs. Ein Laufradtausch zwischen Rennrad und MTB ist aufgrund der technischen Unterschiede daher nicht möglich. Ein Nachteil der Nabenmessung ist ebenfalls, dass die Messung

nur mit dem einen Laufrad möglich ist, ein Umbau auf ein anderes Laufrad würde ein aufwendiges Umspeichen bedeuten. Möchte man z.B. im Wettkampf besondere Laufräder verwenden, muss eine weitere Nabe angeschafft werden. Die PowerTap Naben haben sich nie wirklich im Markt behaupten können und sind mittlerweile nur mehr sehr schwer zu bekommen (vgl. Sinner, M., 2021).

## **6.5 Gegenkraftmessung**

Die direkt messenden Powermeter messen mit Dehnungsmessstreifen die aufgebrachte Kraft, in Kombination mit der Winkelgeschwindigkeit und nutzen dies zur Berechnung der erzeugten Leistung. Einige neuere Systeme verzichten jedoch auf Dehnungsmessstreifen und Messen nicht im Kurbelbereich sondern auf lenkermontierten Einheiten. Diese Messgeräte machen sich die Grundsätze des dritten Newtonschen Gesetzes zu nutzen und messen die auf den/die Radfahrer\*in einwirkenden Gegenkräfte. Nach Newtons drittem Gesetz entsprechen nämlich die entgegengerichteten Kräfte den der aufgebrachten Kräfte (vgl. Grengs & Schmit, 2014).

Anhand dieser Gegenkräfte (Schwerkraft, Luftwiderstand, Trägheit und Rollwiderstand) und in Kombination mit der Geschwindigkeit und einem ausgeklügelten Algorithmus wird die vom Radfahrer abgegebene Leistung bestimmt.

Zum bekanntesten Produkt zählt der 2016 auf den Markt gekommene PowerPod von Velocomp. Um die Gegenkräfte bestimmen zu können besitzt dieser an der Vorderseite ein Staurohr, in die der Luftstrom hineinströmt, gemessen wird und anschließend mit der Geschwindigkeit vom Geschwindigkeitssensor verglichen wird. Der Geschwindigkeitssensor muss separat erworben werden. Zur Bestimmung des Luftwiderstandes und Rollwiderstandes muss ein Rollwiderstandskoeffizient, ein aerodynamischer Widerstandskoeffizient und das Fahrergewicht eingegeben werden. Die Software wandelt die Luftdruck-, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensordaten in Wind-, Steigungs-, Beschleunigungs- und Reibungskräfte um. Die Summe dieser entgegengesetzten Kräfte und die Geschwindigkeit entsprechen der Kraft des/der Radfahrers/Radfahrerin. Somit sind diese Systeme die einzigen am Markt, die die Kraft nicht direkt messen, sondern indirekt ermitteln.

Zudem sind noch ein Beschleunigungs-, Neigungssensor und ein Barometer verbaut. Dadurch kann das System Druck- und Höhenänderungen feststellen. Über ANT+ kann das Gerät mit jedem beliebigen Fahrradcomputer gekoppelt werden (Velocomp, 2022). Der PowerPod kann nicht linke und rechte Leistung bestimmen, sondern nur die Gesamtleistung. Tests zeigten jedoch, dass das Gerät solide funktioniert und relativ genaue Leistungsdaten liefert. Die größten Schwierigkeiten bestehen jedoch, wenn sich der Straßenbelag ändert, z.B. Kopfsteinpflaster oder rauher Asphalt, da funktioniert die Berechnung noch nicht so einwandfrei im Vergleich zu direkt messenden Systemen. Größter Vorteil des Systems ist jedoch die einfache Verwendung an mehreren Rädern. Es können bis zu vier Radprofile gespeichert werden. Die Preise starteten bei ca. 285 Euro, mittlerweile gibt es auch teurere Versionen mit mehr Funktionsumfang, diese belaufen sich auf ca. 475 Euro (vgl. DC Rainmaker, 2016a).



Abb. 46: Gegenkraftmesser Velocomp



Abb. 47: Lenkermontage Velocomp PowerPod

## 6.6 Alternative Powermeter

### \_ Arofly Link-A1

Ein Powermeter mit nur 10 Gramm Eigengewicht für das Ventil! Dieser Powermeter ist völlig anders als alle andere auf dem Markt erhältliche. Der Arofly wird auf das Ventil des Hinterreifen aufgeschraubt und misst die auftretenden Druckschwankungen im Reifen. Je stärker der Fahrer in die Pedale tritt, desto größer werden die Druckschwankungen im Hinterreifen, dies macht sich der Arofly zu nutze. Er misst die Geschwindigkeit, und berechnet aus der Änderung des Reifendrucks während der Radumdrehung, und einem ausgeklügelten Algorithmus, die Leistung. Neben einer piezoelektrischen Kraftmessplatte, die als Drucksensor fungiert, ist auch ein Schwerkraftsensor verbaut. Für die Bestimmung der Trittfrequenz muss ein separater Trittfrequenzsensor an der Kurbel angebracht werden. Die Stromversorgung erfolgt über eine kleine Knopfatterie. Tests zeigten jedoch, dass die Messgenauigkeit nicht mit der von Powermetern mithalten kann und größere Abweichungen zeigt. Der Preis startet bei 290 Euro für den Ventil-Powermeter inkl. Trittfrequenzsensor und Transmitter, um mit jedem Radcomputer verwendet werden zu können (vgl. VeloNews, 2022).



Abb. 48: Ventil-Powermeter Arofly Link-A1



Abb. 49: Package Arofly Link-A1

## \_ PowerTap PowerCal

2013 brachte Cycle Ops, später PowerTap, einen Herzfrequenz Brustgurt mit integrierter Leistungsberechnung auf Basis der Herzfrequenzdaten und einem Algorithmus auf den Markt, den PowerCal. Das Set bestand aus einem Brustgurt und einem externen Geschwindigkeitssensor für das Laufrad. Tests zeigten jedoch, dass die Wattzahlen sehr ungenau sind im Vergleich zu direkt messenden Systemen. Grund dafür ist, dass die Berechnung der Leistung nur auf Grundlage der Herzfrequenzdaten basiert und diese immer eine leichte zeitliche Verzögerung mit sich bringt. Besonders bei kurzen Sprints und bergab dauert es einige Sekunden, bis die Herzfrequenz angepasst ist. Das Gerät hingegen funktioniert gut, wenn es um die durchschnittlichen Leistungszahlen während einer Trainingsfahrt geht. Das Gerät richtet sich mit einem Preis von 95 Euro somit an Einsteiger, die sich für den Trainingsdurchschnitt interessieren. Der PowerCal kann daher nicht als echte Alternative zu den direkt messenden Systemen gesehen werden. Mittlerweile ist er jedoch vom Markt verschwunden (vgl. DC Rainmaker, 2012).



Abb. 50: Brustgurt PowerCal

## 6.6.1 unveröffentlichte/stornierte Powermeter

### \_ IQ2

2018 kündigte IQ2 auf Kickstarter einen Powermeter an, der 2019 auf den Markt kommen sollte. Dieser Powermeter ist für die Montage zwischen Pedal und Kurbelarm gedacht und wird zwischen Pedalkörper und Kurbelarm mitbefestigt und sollte ein erschwinglicher Leistungsmesser werden. In einer kleinen Adapter-Metallhülse, die auf die Pedalachse und in die Bohrung in den Kurbelarm geschraubt wird, befinden sich spezielle Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen, um die Verformung zu messen. Diese sind dünner als herkömmliche Dehnungsmessstreifen und werden nicht aufgeklebt, sondern direkt auf das Bauteil rauf gelasert. Der Powermeter kann zudem ermitteln in welchem Bereich einer Pedalumdrehung welche Kraft des Beins erzeugt wird. Die kleine Elektronikeinheit wird auf die Pedalachse hinaufgeschoben und befindet sich zwischen Metallhülse und Pedalkörper und wird mittels Knopfbatterie mit Energie versorgt. Vorteil dieses Systems ist, dass die Montage keine zwei Minuten dauert und es schnell zwischen verschiedenen Fahrrädern getauscht werden kann. Jedoch kam es nie zu einer Serienreife des Produkts bzw. zu Auslieferungen an die Kunden, aufgrund inkonstanter Messwerte und Problemen für die Serienproduktion. Kosten sollte es 150 Euro für die einseitige Messoption, bzw. 200 für die beidseitige.

In der Zwischenzeit ist die Technologie in einem vollständigen Klickpedal untergebracht. Die Auslieferung des neuen pedalbasierten Leistungsmessers sollte eigentlich ab Mitte 2021 erfolgen. Grund für die Verzögerung sind die hohen Produktionskosten für das Auftragen der Dünnschicht-Messstreifen. Mittlerweile kann jedoch die einseitig-messende Variante um 179 Euro gekauft werden (Stand Jänner 23) (vgl. DC Rainmaker, 2018b).



Abb. 51: Powermeter IQ2 am Rad montiert



Abb. 52: Powermeter IQ2

## **\_ WatTeam PowerBeat**

WatTeam brachte 2018 einen Powermeter zur Selbstinstallation am Kurbelarm auf den Markt. Damit wollte man die Installation des Powermeters nach Hause verlagern, um so den Preis für den Powermeter möglichst gering zu halten. Zuerst müssen die mitgelieferten dünnen Aufkleber-Schablonen an den Kurbelarm angebracht werden. Sie dienen dazu, die richtige Position für den Sensor zu bestimmen. Anschließend wird der Bereich, an dem der Sensor mit einem Kleber angeklebt wird, mit einem Schleifpapier aufgeraut, damit der Kleber besser haftet. Es sind jedoch nur Aluminiumkurbeln, keine Carbonkurbeln geeignet. Zum Schluss wird die Elektronikeinheit am Sensor angesteckt und an der Pedalachse befestigt. Nun muss der Powermeter nur mehr mittels App kalibriert werden (vgl. Stevenson, J., 2017).

Da die Elektronikeinheit schnell vom Messsensor am Kurbelarm abgesteckt werden kann, eignet sich dieses System bestens für die Verwendung an mehreren Fahrrädern. Dazu muss natürlich an jedem Fahrrad ein Messsensor angeklebt werden. Mittlerweile gibt es die Firma und den Powermeter nicht mehr zu erwerben, Grund unbekannt (vgl. DC Rainmaker, 2018c).



Abb. 53: Selbstmontage PowerBeat



Abb. 54: Powermeter WatTeam PowerBeat

## **\_ Ashton Instruments**

Diese Firma stellte 2014 ein Powermeter Konzept zum Einsetzen in die Hohlachse des Tretlagers vor. Die kleine Powermeter Einheit wird links eingeschraubt, indem sich die Kappe durch die Schraubbewegung leicht weitet und sich in der Hohlachse verkeilt und hält. Gemessen wird nicht mit Dehnungsmessstreifen, sondern die Drehbewegung an zwei Stellen innerhalb der Tretlagerachse. Anhand der Rotationsbewegung kann die Kraft und Leistung bestimmt werden. Gemessen wird jedoch nur die linke Beinkraft. Vorteil des Systems ist, dass es sehr einfach auf mehrere Räder umgesteckt werden kann und somit sehr kompatibel ist. Leider kam auch dieses Produkt nie auf den Markt (vgl. DC Rainmaker, 2015).



Abb. 55: Powermeter Ashton Instruments



Abb. 56: Montage Ashton Instruments

## **\_ Dyno Velo**

Das Konzept von Dyno Velo ist auch wie Ashton Instruments für den Einbau in die Tretlagerachse vorgesehen. Gemessen wird auch hier die Verdrehung der Kurbelwelle. Auch bei diesem Produkt blieb es nur bei einem Konzept (vgl. DC Rainmaker, 2018a).

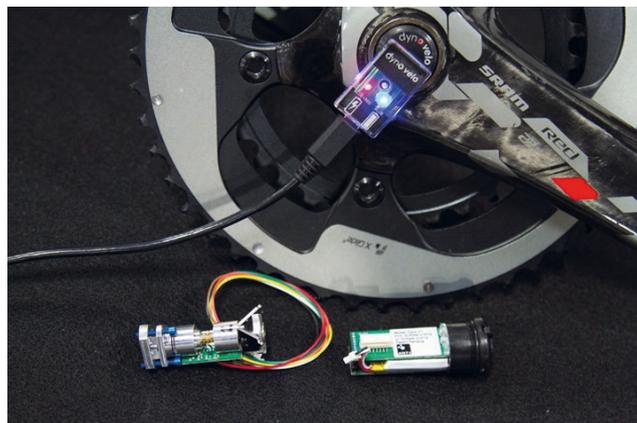


Abb. 57: Powermeter Dyno Velo

### **\_ Luck Shoes Luck Racer 3.0**

Luck Shoes aus Spanien versuchte vor einigen Jahren einen Powermeter in die Sohle ihrer Schuhe zu integrieren. Der Bauraum dafür reicht aus um den Dünnschicht FSR-Drucksensor, den Akku und die Elektronik unterzubringen. Die Sohle ist lediglich ein paar Millimeter dicker und ca. 35 Gramm schwerer als die herkömmliche. Die Messgenauigkeit wird mit +/- 2 Prozent angegeben. Leider hat es auch für dieses Konzept nicht über den Prototypenstatus hinaus gereicht, Grund unbekannt (vgl. DC Rainmaker, 2016b).



Abb. 58: Powermeter-Schuh Luck Racer 3.0



Abb. 59: Schuhsohle mit Elektronik Luck Racer 3.0

## **\_ Brim Brothers Zone DPMX**

Brim Brothers entwickelte vor einigen Jahren einen Schuhplatten-basierten Leistungsmesser auf Basis der Speedplay Pedalplatten. Dies ermöglicht einen einfachen Wechsel von Fahrrad zu Fahrrad, ohne einen Powermeter am Fahrrad installieren zu müssen. Die Messensoren befinden sich in einer dünnen Platte, die zwischen Schuhsohle und Speedplay-Cleat montiert wird. Die Messplatte wird über die drei standardmäßigen Schraubpunkte und einem mitgelieferten Klebstoff mit dem Cleat und der Schuhsohle verschraubt. Gemessen wird nicht mit Dehnungsmessstreifen, sondern mit keramischen Kraftsensoren, wo auch keine Temperaturkompensation notwendig ist. Von der Messplatte verläuft ein flaches Gummikabel, welches um den Schuh geführt wird, hin zum Pod (Elektronikeinheit). Im Pod ist der Akku und die restliche Elektronik untergebracht und die Schnittstelle zum Fahrradcomputer. Der Pod kann auf der Oberseite des Schuhs im Bereich der Schuhzunge eingehängt werden. Die gesamte Einheit in der Pedalplatte zu integrieren ist aufgrund des beschränkten Bauraums nicht möglich.

Die Messgenauigkeit ist mit +/- 2 Prozent angegeben und der Preis für das beidseitig messende System mit 950 Euro. Am Ende gab es jedoch Probleme bei der Finanzierung und bei der Leistungsberechnung aufgrund unterschiedlicher Steifheitswerte der Carbon Schuhsohlen. Dies führte 2016 zum Ende der Firma (vgl. DC Rainmaker, 2014).



Abb. 60: Powermeter Brim Brothers Zone DPMX



Abb. 61: Montageprozedere an der Sohle



Abb. 62: Montage an der Schuhsohle



Abb. 63: Pod am Schuh

Neben den Powermeter-Systemen gibt es noch eine alternative Methode, um die Wattleistung während einer Radfahrt zu bestimmen. Mit diversen Fahrradapps kann auch ohne physischen Powermeter am Rad eine Wattleistung ermittelt werden.

## 6.7 Leistungswattmessung ohne Powermeter

Ist kein Powermeter am Fahrrad montiert, kann die Leistung auch durch gewisse Fahrparameter ermittelt werden. Dazu kann an bestimmten Streckenabschnitten anhand von Geschwindigkeit, Gewicht, Distanz, Höhenunterschied, etc. die Leistung relativ genau bestimmt werden.

Apps wie Strava berechnen die Leistung nach diesem Schema. Dabei sind unzählige Streckenabschnitte (sogenannte Segmente) auf der Karte hinterlegt. Fährt man mit dem Fahrrad eine Ausfahrt im Freien, erkennt die App automatisch alle befahrenen Segmente und ermittelt für jedes Segment die erbrachte Leistung in Watt bzw. die sogenannte Steigleistung. Eine genaue Beschreibung und Berechnung der Steigleistung folgt im Kapitel 8, physikalische Grundlagen unter dem Punkt Steigleistung (vgl. Bergfreunde, 2022).

Da nun ein Überblick der unterschiedlichen Systeme erfolgt ist, findet im nächsten Absatz ein kurzer Überblick über die Kompatibilität der Powermeter statt.

## 6.8 Kompatibilität der Systeme

Fast alle Arten der Leistungsmesssysteme sind nur auf einen einzigen Fahrradtyp ausgelegt. Die meisten Systeme am Markt sind für Rennräder bestimmt, da die Messsensoren in Bauteilen, die für Rennräder gedacht sind, verbaut sind. Bei den kurbelbasierten Powermetern muss daher immer ausgewählt werden, ob der Powermeter für das Rennrad oder das MTB benötigt wird. Ein Wechsel zwischen beiden Fahrradtypen ist ausgeschlossen. Hat man zwei Fahrräder und möchte auf beiden einen Leistungsmesser installieren, muss für jedes Fahrrad ein Powermeter gekauft werden.

Auch Hinterradnabenpowermeter sind nicht fahrradübergreifend geeignet, da sich die Laufräder von Rennrad und MTB unterscheiden.

Ausnahme stellen die Pedalmesssysteme dar, diese können relativ schnell von Fahrrad zu Fahrrad umgeschraubt werden. Da sich die Klicksysteme von Rennrad und MTB jedoch unterscheiden gibt es für das MTB eigene Pedalmesssysteme. Befinden sich mehrere Rennräder in Besitz, sind diese Systeme uneingeschränkt miteinander kompatibel. Hat man jedoch ein Rennrad und MTB, sind die Systeme nicht miteinander kompatibel und es wird wieder für beide Räder ein eigener Powermeter benötigt.

Seit 2021 gibt es jedoch die neuen modularen Powermeter-Pedale, bei denen der Pedalkörper einfach gewechselt werden kann. Es wird daher nur eine Powermeter-Pedalachse benötigt und dann kann diese trotzdem für mehrere unterschiedliche Fahrradtypen verwendet werden. Dazu muss der Powermeter nur auf das andere Rad und der passende Pedalkörper aufgeschraubt werden.

Die beste Kompatibilität bieten derzeit jedoch die lenkermontierten Gegenkraftmesssysteme, diese können innerhalb weniger Sekunden von Fahrrad zu Fahrrad ummontiert werden.

## 6.9 Leistungswattmessung am Ergometer

Ergometer oder sogenannte Smarttrainer werden mit Strom betrieben und dienen dem Radtraining im Innenbereich. Bei den meisten Systemen wird das eigene Rennrad mit den hinteren "Ausfallenden" am Smarttrainer fixiert, dazu wird das hintere Laufrad entnommen. Bei den günstigen Systemen wird das Fahrrad samt hinterem Laufrad am Trainer montiert. Alle Smarttrainer ermöglichen eine Form der Leistungsmessung, wie genau, ist abhängig vom Preis der Systeme. Die günstigen Systeme bestimmen mit einem bestimmten Algorithmus die Leistung. Von einer Software wird der Widerstandslevel am Gerät, die Geschwindigkeit des Laufrades und eingegebene Faktoren wie Körpergewicht und Größe herangezogen, um möglichst genau die Leistungsabgabe zu bestimmen (vgl. RoadcyclingDE, 2022).

Teure Geräte hingegen messen die Leistung direkt und generieren sehr genaue Ergebnisse. Der integrierte Powermeter misst mit Dehnungsmessstreifen an der Antriebseinheit die abgegebene Leistung. Die Messstreifen sind im Bereich zwischen Trainerrahmen und elektromagnetischer Bremse angebracht und messen das Drehmoment, das während des Pedaltritts ausgeübt wird. Die Drehzahl des Hinterrades wird an der Riemenscheibe durch optische Sensoren in Umdrehung pro Minute gemessen. Der Smarttrainer misst zudem die momentane Geschwindigkeit (wie schnell der Fahrer in die Pedale tritt) basierend auf der Drehzahl des Schwungrades. Anhand dieser Parameter und das auf das Schwungrad aufgebrachte Drehmoment wird die Leistung, mit der der/die Fahrer\*in in die Pedale tritt, berechnet (vgl. Hawkins, H. M. et al., 2021).



Abb. 64: Smarttrainer von Tacx

## 6.10 Fazit Marktanalyse

Zum Abschluss der Marktanalyse werden die wichtigsten Punkte in diesem Fazit noch einmal zusammengefasst, um einen abschließenden Überblick über die unterschiedlichen Produkte zu bekommen.

### Kurbelstern

#### Vorteile

- große Auswahl an Anbietern
- langjährig bewährtes Konzept
- zuverlässige Messung
- kompatibel mit allen Rennradrahmen

#### Nachteile

- sehr teuer
- nur für 1 Rad verwendbar
- relativ schwer
- andere Anmutung als Originalkurbel
- wenig Auswahl im MTB-Sektor
- keine exakte Links- Rechtsmessung

### Kurbelarm

#### einseitig, Messung Außen

- große Auswahl an Anbietern
- preiswert
- ideal als Nachrüstlösung
- kompatibel mit fast allen Kurbeln
- eigener Kurbelarm kann vom Anbieter nachgerüstet werden (Factory Install)

#### beidseitig, Messung Innen

- sehr genaue Messung
- beidseitige Messung
- Trittanalyse
- kompatibel mit allen Rennradrahmen
- kleine Auswahl an Anbietern
- relativ teuer
- andere Anmutung als Originalkurbelarm
- nur für 1 Rad verwendbar

### Pedal

#### Vorteile

- große Auswahl an Anbietern
- preiswert
- ideal als Nachrüstlösung, auch für sehr alte Räder
- kompatibel mit allen Kurbelarmen
- für mehrere Räder mit gleichem Cleat-Standard verwendbar
- Möglichkeit, ob einseitig oder beidseitige Messung
- nachträgliches Aufrüsten auf beidseitige Messung möglich
- auch auf einem Leihrad schnell montierbar
- relativ leicht
- Trittanalyse
- spezielle Systeme auch fürs MTB
- meist Stromversorgung mit Akku
- Anmutung: sieht aus wie ein Standardclickpedal

#### Nachteile

- verschiedene Cleat-Standards
- bei Sturz kann es leicht beschädigt werden

### Hinterradnabe\*

- Laufrad für mehrer Räder des selben Typs verwendbar
- Laufradtausch geht schnell

\*nicht mehr erhältlich

- teuer
- keine exakte Links- Rechtsmessung
- ungenauere Messung, wegen Übersetzung
- relativ schwer

Abb. 65: Vor- und Nachteile der Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)

In der nachfolgenden Grafik sind die jeweiligen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Powermeter aufgeschlüsselt. Bereits in dieser Grafik zeigt sich, welche eklatanten Vorteile die sehr beliebten Pedalpowermeter mit sich bringen.

## Kurbelachse

- sehr genaue Messung
- Trittanalyse
- kompatibel mit fast allen Rennradrahmen
- Stromversorgung meist mit Akku

## Kombination Arm/Achse

- sehr genaue Messung
- beidseitige Messung
- Trittanalyse
- kompatibel mit fast allen Rennradrahmen
- Stromversorgung mit Akku

- kleine Auswahl an Anbietern
- relativ teuer
- relativ schwer
- aufwendiger Einbau
- nur für 1 Rad verwendbar
- nur Linksmessung

- kleine Auswahl an Anbietern
- sehr teuer
- relativ schwer
- aufwendiger Einbau
- nur für 1 Rad verwendbar

## Gegenkraftmes.

- einfache Lenkermontage (Plug&Play)
  - preiswert
  - bis 4 Fahrräder verwendbar
  - leicht
  - uneingeschränkt für alle Fahrradtypen geeignet
  - auch auf einem Leihrad schnell montierbar
- 
- externer Geschw./Kadenzsensor notwendig
  - keine Direktmessung, sondern indirekt über diverse Fahrparameter
  - nur 1 Anbieter

## Ausblick

- Option einer einseitigen oder beidseitigen Messung
- **Sensor:** Piezoelektrischer Sensor; Dünnschicht-DMS; Foliendrucksensor
- **Analysefunktionen:** Tritteffizienz, Pedalglätte, Sitzposition
- Alle Phasen des Tretzyklus erfassen
- **Energieversorgung:** Energy Harvesting
- **Kompatibilität:** mind. 4 Fahrräder & auch Laufschuhe/Wanderschuhe (Sportart unabhängig)
- **Preisbereich:** 400-500€

Um noch einen besseren Überblick über die wichtigsten Vor- und Nachteile der obigen Grafik, der Messmethode, der Messgenauigkeit, der Kompatibilität und des Funktionsumfangs zu bekommen, sind diese Punkte in untenstehender Matrix übersichtlich, kurz und prägnant aufgeführt.

	<b>Kurbelpowermeter</b>			
	<b>Kurbelstern</b>	<b>Kurbelarm</b>		<b>Kurbelachse</b>
		<b>einseitig</b>	<b>beidseitig</b>	
<b>Eins. /Beids. Messung</b>	gemeinsam beidseitig	einseitig, Außen	getrennt beidseitig, Außen oder Innen	einseitig
<b>Messsensor</b>	Dehnungsmessstreifen	Dehnungsmessstreifen	Dehnungsmessstreifen	Dehnungsmessstreifen
<b>Messgenauigkeit</b>	+/- 1%	+/- 1,5%	keine Angabe	+/- 1%
<b>Druckphase erfassen</b>	Ja	Ja	Ja	Ja
<b>Zugphase erfassen</b>	Jein, mittels Extrapolation	Nein	Ja	Nein
<b>Energieversorgung</b>	Batterie oder Akku	Batterie	Batterie	Akku
<b>Kompatibilität</b>	nur 1 Fahrrad	nur 1 Fahrrad	nur 1 Fahrrad	nur 1 Fahrrad
<b>Preisbereich</b>	700-3.000€	ab 380€	1.000-1.100€	ab 500€
<b>zusätzl. Funktionen</b>	-	-	Tritteffizienz	Tritteffizienz
<b>Vorteile</b>	große Auswahl, bewährtes Konzept	günstige Nachrüstlösung, viel Auswahl	Trittanalyse	Trittanalyse
<b>Nachteile</b>	Kompatibilität, teuer	etwas ungenauer, Zuverlässigkeit	kleine Auswahl, relativ teuer	relativ schwer, aufwendiger Einbau

\*nicht mehr erhältlich

Abb. 66: Übersicht der wichtigsten Punkte (Schaden-Handstanger, P., 2022)

**Kombination  
Arm/Achse**

**Pedal**

**Hinterradnabe\* Gegenkraftmes.**

getrennt beidseitig	einseitig oder getrennt beidseitig	gemeinsam beidseitig	gemeinsam beidseitig über Gegenkräfte
Dehnungsmess- streifen	Dehnungsmess- streifen	Dehnungsmess- streifen	„Windport“
+/- 1%	+/- 1%	+/- 1,5%	+/- 1%
Ja	Ja	Ja	-
Ja	Ja	Nein	-
Akku	Batterie oder Akku	Batterie	Akku
nur 1 Fahrrad	mehrere Fahrräder	mehrere Fahrräder	bis 4 Fahrräder
ca. 1.000€	einseitig ab 400€ beidseitig ab 680€	ab 500€	300-550€
Tritteffizienz, Pedalglätte	Tritteffizienz, Pedalglätte, PCO	-	Aeromesswerte
Trittanalyse, sehr genau	große Auswahl, leicht, einfache Mon- tage, Kompabilität, Trittanalyse	Laufрад für mehrere Räder verwendbar	einfache Lenkermontage (Plug&Play)
kleine Auswahl, relativ teuer	verschiedene Cleat-Standards	Messung abhängig von Übersetzung	externer Geschw.-/ Kadenzsensor not- wendig

M

A

T

R

I

X

Die Recherche und die darauffolgende Analyse zeigen, dass Powermeter im Rennradbereich eine große Akzeptanz finden und es mittlerweile sehr viele Anbieter solcher Produkte gibt. Alle Systeme, mit Ausnahme des Gegenkraftmessprinzips von Velocomp, arbeiten mit Dehnungsmessstreifen, um eine Verformung zu erfassen und daraus das Drehmoment und die Leistung zu errechnen. Nur der PowerPod von Velocomp wird am Fahrradlenker montiert und misst nicht direkt die Pedalkräfte, sondern die Gegenkräfte über einen Windport und stellt so die Ausnahme dar. Alle anderen Systeme messen im Bereich des Antriebs. Die Datenübertragung erfolgt bei allen Systemen mit ANT+ oder BLE. Generell unterscheiden sich die Powermeter-Systeme hauptsächlich durch die verbaute Position am Fahrrad, ob einseitig oder beidseitig gemessen wird, der Preisgestaltung und der Usability. Beidseitige Systeme sind vor allem für jene interessant, die eine beträchtliche Dysbalance zwischen linkem und rechtem Bein haben, sich mit dem Pedaltritt und dem Bewegungsablauf auseinandersetzen wollen oder gerade von einer Verletzung zurückkehren, bei der ein Bein stärker geschwächt ist. Grundsätzlich reicht jedoch für den/die Radsportler\*in, der/die den Powermeter als Kontrollinstanz zum Pacing und zum Verlauf seiner Leistungsfähigkeit nutzt, ein einseitig messendes System aus.

Das Messprinzip und die Berechnung funktionieren hingegen bei allen Systemen nach dem selben Schema. Folglich funktionieren Powermeter am Fahrrad an jenen Stellen, an denen die Kraft des/der Fahrers/Fahrerin auf den Antrieb einwirkt, sehr gut. Oft ist es einfach eine Geschmackssache, für welches Produkt sich entschieden wird.

Marktführend waren lange Zeit die Kurbelstern-Powermeter, die auch als Pioniere gelten. Sie wurden jedoch in den letzten Jahren vermehrt von Pedalpowermeter-Systemen abgelöst, da diese erheblich günstiger sind und diverse Vorteile mit sich bringen. Pedalbasierte Systeme bieten zusätzliche Funktionen zur Analyse des eigenen Tritts und können erkennen, ob der Fuß zentral am Pedal steht oder es eine Links-Rechts-Abweichung gibt. Zudem sind diese sehr einfach in der Montage und können von einem Laien ohne speziellem Werkzeug innerhalb einer Minute auf das Fahrrad geschraubt werden.

Kurbelarm-Powermeter eignen sich besonders als günstige Nachrüstlösungen und finden ebenso eine breite Akzeptanz bei den Nutzer\*innen. Systeme, die in der Hinterradnabe eingebaut sind, sind hingegen gänzlich vom Markt verschwunden.

Es gibt jedoch auch einige interessante Powermeter Konzepte, die in Ansätzen fahrradunabhängiger und günstiger sein wollen, jedoch meist aufgrund von technischen Schwierigkeiten auf dem Weg zur Serienreife und finanziellen Problemen nie veröffentlicht wurden bzw. gescheitert sind.

Die folgende Grafik verdeutlicht nochmals die diversen Messpositionen der unterschiedlichen Powermetersysteme.

<b>Typ</b>	einseitig - Kurbelarm - Pedal	- Kurbelachse	- Kurbelstern - Hinterradnabe - Gegenkraftmes.	zweiseitig - Kurbelarm - Kombi Arm/Achse - Pedal
<b>Messsensor</b>	Einer	Einer	Einer	Zwei
<b>Messposition</b>	Links	„Mittig“	„Mittig“	Links* & Rechts
<b>Leistung L+R erfassen</b>	Schätzung	Schätzung	Ja	Ja
<b>Balance L/R erfassen</b>	-	-	Schätzung**	Ja

\*Mittig & Rechts bei Kombi Arm/Achse

\*\*bei Gegenkraftmessung nicht möglich

Abb. 67: Verschiedene Sensorpositionen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Pedalpowermeter im Jahr 2022 die derzeit beste Lösung für das Fahrrad darstellen und auch bedingt für mehrere Fahrräder der selben Fahrradgattung geeignet sind.

Doch nicht nur im Radbereich macht man sich die Leistungswattmessung zu Nutze, um effizienter und besser trainieren zu können, sondern auch in anderen Sportbereichen werden Leistungsberechnungen verwendet. Im nächsten Kapitel erfolgt ein kleiner Überblick über die Leistungswattmessung im Laufsport.



# **7. Leistungswattmessung im Laufsport**

Die Leistungsmessung im Laufsport ist noch sehr jung und noch nicht so populär wie im Radsport. Zuerst gab es beim Laufen nur das Körpergefühl, später folgten die Zeitmessung und die Herzfrequenzmessung, dann die Pace und heute immer mehr auch die Leistungsmessung. Beim Laufen gilt dasselbe wie beim Radfahren: Geschwindigkeit, Herzfrequenz und Anstrengung korrelieren nicht wirklich miteinander. Zudem haben neben Anstiegen auch die externen Faktoren wie Wind, Untergrund, Ermüdung und Temperatur einen großen Einfluss darauf, wie sehr man sich anstrengt. Die Leistung ist die einzige Größe, die eine verlässliche Rückmeldung darüber gibt. Deshalb möchte man nun auch vermehrt im Laufsport wissen, wie viel Kraft man Meter für Meter während der Einheit aufbringen muss.

Beim Radfahren ist die Messung der Leistung relativ leicht, da die Arbeit fast ausschließlich mit den Beinen verrichtet wird. Beim Laufen hingegen ist der Oberkörper auch in Bewegung. Es schwingen die Arme mit, der Rumpf rotiert und der gesamte Körper bewegt sich auf und ab. Das macht die Messung sehr viel komplexer als beim Radfahren (vgl. Lenertz, H., 2021).

### ***Wie kann man die Leistung beim Laufen messen?***

Beim Laufen wird anders als beim Radfahren grundsätzlich zwischen der interne und externe Leistung unterschieden. Die interne Leistung umfasst nur die Bewegung, mit der sich der Körperschwerpunkt nach vorne bewegt. Bei der externen Leistung spielen alle Bewegungen eine Rolle, etwa die Laufbewegung der Beine und Arme, die Rotation des Oberkörpers oder auch die Bewegung des Kopfes. Aufgrund dieser beiden unterschiedlichen Leistungsbegriffe gibt es unterschiedliche Methoden zur Leistungsermittlung.

Die meisten Systeme berechnen unter Einbeziehung diverser Daten wie Pace, Steigung, Wind, Körpergewicht und Größe und einem Algorithmus die Leistung. Die Systeme messen daher nicht direkt die Leistung, sondern indirekt. Das Ergebnis ist somit ein kalkulierter Wert. Deshalb kommt es vor, dass verschiedene Systeme auch unterschiedliche Leistungswerte anzeigen. Dies klingt widersinnig, dass die Leistungsmesser keinen objektiven Wert angeben, ist in der Praxis jedoch weniger ein Problem, da beim Laufen eher die Leistungsverbesserung eine Rolle spielt. Im Laufsport geht es bei der Leistungsmessung daher nicht um absolute Wattwerte oder dem Vergleich mit anderen

Geräten, sondern um die Entwicklung, der mit demselben System gemessenen Werte im Laufe der Zeit. In der Praxis ist es daher egal, ob 300 Watt wirklich exakt 300 Watt sind (vgl. Lenertz, H., 2021).

Im Folgenden werden sechs unterschiedliche Powermeter für den Laufsport kurz vorgestellt. Den Anfang macht der sehr populäre Stryd-Laufsensor.

## 7.1 Überblick gängiger Systeme

### \_ Stryd-Laufsensor

Die Firma brachte vor einigen Jahren sehr erfolgreich den ersten am Schuh montierbaren Leistungssensor auf den Markt. Der kleine 8 Gramm leichte Pod wird vorne am Schuh in die Schnürung eingeklippt und kann mit den gängigen Laufuhren gekoppelt werden. Das Geheimnis dieses kleinen Pods ist der patentierte Windport. Denn anders als die Laufuhren kann der Stryd die vorherrschenden Windverhältnisse bestimmen. Im Zusammenspiel mit diversen Bewegungs- und Umgebungssensoren, einem Magnetometer, dem Windsensor und einem ausgeklügelten Algorithmus kann daraus die erbrachte Leistung ermittelt werden. Der eingebaute Akku kann induktiv geladen werden und sollte mindestens einen Monat halten bis zur nächsten Ladung. In Bezug auf Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit zählt der Stryd laut unabhängigen Studien zu dem besten System am Markt und ist den anderen in der Genauigkeit überlegen. Zudem zählt er zu den bekanntesten und beliebtesten Powermeter unter den Laufsportlern. Der Preis liegt bei ca. 230 Euro (vgl. Stryd, 2022).



Abb. 68: Stryd Laufsensor



Abb. 69: Position am Laufschuh

## **\_ Polar-Laufuhr**

Der Sportuhrenhersteller Polar brachte mit dem Modell Vantage V die erste Leistungsmessung am Handgelenk auf den Markt. Mittlerweile gibt es einige Uhrenmodelle des Herstellers und auch anderer Hersteller mit dieser Funktion. Zur Ermittlung der Laufleistung werden die Geschwindigkeit, die Steigung und das eingegebene Körpergewicht zur Berechnung herangezogen. Geschwindigkeit und Steigung werden durch den verbauten GPS-Sensor und barometrischen Sensor bereitgestellt. Vorteil dieser Uhr ist, dass kein weiterer externer Sensor nötig ist, um die Laufleistung zu bestimmen. Studien zeigten jedoch, dass die Messung nicht sehr genau ist. Zudem funktioniert die Messung aufgrund der GPS-Daten nur im Freien. Die Preise für solch eine Uhr liegen bei etwa 500 Euro (vgl. Lenertz, H., 2021).

## **\_ Garmin-Brustgurt**

Von Garmin gibt es bestimmte Herzfrequenzgurte die speziell für den Laufsport ausgelegt sind, um die Laufleistung bestimmen können. Der HRM-Run Brustgurt bietet in Kombination mit kompatiblen Uhren des Herstellers die Funktion „Running Power“. Anhand von Pace, Steigung, Wind und Laufstil wird die Leistung beim Laufen bestimmt. Der Laufstil wird vom Gurt anhand der vertikalen und horizontalen Bewegungen ermittelt. Die Höhendaten werden durch den Barometer der Uhr bereitgestellt. Zur Bestimmung des Windes/Luftwiderstandes werden die Laufgeschwindigkeit, die Laufrichtung, die gemeldeten Windverhältnisse von Wetterdiensten und die barometrischen Daten herangezogen.

Ist man bereits Garmin Nutzer und im Besitz einer kompatiblen Uhr, bekommt man für wenig Geld eine brauchbare Leistungsmessung dazu. Der Preis für den Gurt liegt nur bei etwa 80 Euro. Hat man jedoch noch keine compatible Garmin Uhr muss für die Uhr nochmals mit ca. 400 Euro gerechnet werden (vgl. Garmin Support, 2022b).



Abb. 70: Garmin Brustgurt HRM und Laufuhr

## **\_ Arion-Zwischensohle**

Die intelligente Arion-Sohle ist ein fußbasiertes Tracking-System und erkennt die Druckverteilung und kann Schrittlänge, Schrittfrequenz, Kontaktzeit, Tempo, Stabilität, Impuls und Leistung bestimmen. Die Sohle soll dabei helfen, effizienter zu laufen, Verletzungen zu vermeiden und schneller zu werden. Die nur zwei Millimeter dicke Sohle ist in vier Größen erhältlich und ist mit acht Drucksensoren ausgestattet. Die Sohle wird unter die Standardsohle des Laufschuhs gelegt, um die Daten zu erfassen. Im Fersenbereich verläuft ein sehr dünnes Flachbandkabel aus der Sohle zu einem Pod. Dieser Pod wird an der Außenseite des Schuhs im Knöchelbereich angesteckt und kann auch abgenommen und aufgeladen werden. Im Pod ist ein Beschleunigungssensor, ein Gyrosensor, ein GPS-Sensor und ein Bluetooth-Modul eingebaut, um die gesammelten Daten auf ein Smartphone zu übertragen. Die App ist mit vielen Grafiken wie z.B. der Fußbelastung bestückt.

Das Paket besteht aus zwei intelligenten Einlegesohlen, zwei Pods und einer Smartphone-App. Es ist auch ein Starterpaket mit nur einem Pod verfügbar. Für das gesamte Paket ist ein Preis von 250 Euro fällig. Hat man mehrere Laufschuhe, kann ein zweites Paar Sohlen um 80 Euro dazu geordert werden (vgl. Alger, K., 2018).



Abb. 71: Arion Laufsohle



Abb. 72: Pod am Laufschuh

## \_ Runvi-Einlegesohle

Diese Sohlen sollen ebenfalls die Lauftechnik und Laufeffizienz verbessern und funktionieren sehr ähnlich wie die Arion Sohlen. Es sind jedoch keine Zwischensohlen, sondern normale Sohlen, die mit Sensoren vollgepackt sind. Die Runvi-Sohle wird anstelle der Standard-Sohle in den Laufschuh gelegt. Anders als bei der Arion Sohle ist bei der Runvi Sohle der Pod jedoch an der Unterseite der Sohle in eine Aussparung eingesteckt. Um den Pod aufzuladen, muss dieser aus der Sohle entnommen werden. Verbaut ist ein Beschleunigungssensor ein Bewegungssensor und 30 Drucksensoren um Bewegung, Druckverteilung und Gewicht zu messen. Die Sohlen werden mittels Bluetooth mit dem Smartphone verbunden und dienen vorwiegend, um seinen Laufstil zu analysieren und zu verbessern.

Bei den Runvi-Sohlen handelt es sich um ein Kickstarter Projekt, welches derzeit noch nicht im Verkauf ist (vgl. Sawh, M., 2018).



Abb. 73: Smarte Sohle Runvi

## \_ Sensoria-Laufsocken

Die smarten Sensoria Socken zielen darauf ab, die Läufe im Detail zu verfolgen und liefern Daten zu Tempo, Distanz, Zeit und Laufstil. Die Socken sind mit drei textile Drucksensoren an der Unterseite ausgestattet, die den Druck beim Laufen messen. Die leitfähigen Fasern leiten die von den Sensoren gesammelten Daten weiter zum Pod. Dieser kleine Pod ist mit einem Beschleunigungssensor, einem Gyrosensor und einem Magnetometer ausgestattet und wird an der Seite über dem Knöchelbereich an der Socke eingesteckt. Die Socke wird mittels Bluetooth mit dem Smartphone und der dazugehörigen App verbunden. Die Socken sind in drei Größen verfügbar und können ohne Pod in der Waschmaschine gewaschen werden. Ein komplettes Set inkl. Pod kostet 378 Euro. Möchte man mehrere Socken haben, gibt es auch die Möglichkeit ein zusätzliches Paar Socken um 47 Euro zu kaufen (vgl. Sensoria, 2022).



Abb. 74: Smarte Socken Sensoria



Abb. 75: Pod für den Socken

## 7.2 Fazit

Die Leistungsberechnung im Laufsport gestaltet sich schwieriger als im Radsport, da die tatsächliche Leistung aufgrund der Ganzkörper-Bewegung beim Laufen nur schwer erfasst werden kann. Deshalb basieren alle Geräte auf dem Markt derzeit fast ausschließlich auf kalkulierten Werten diverser Messwerte. Interessante Ansätze bieten jedoch die Sohlenkonzepte und die Sensoria Laufsocken. Solche Konzepte sind auch im Radsektor durchaus vorstellbar und würden den Powermeter-Markt im positiven Sinne erweitern und eine Alternative zu den etablierten Systemen darstellen. Aber auch im Laufsport wird sich im Bereich der Leistungsmessung in den kommenden Jahren noch einiges an Neuentwicklungen anbahnen.



# **8. Physikalische Grundlagen**

In diesem Kapitel geht es um die Kräfte und Widerstände beim Radfahren, die Arbeit und die daraus resultierende Berechnung der Leistung, speziell in Hinblick auf Leistungswattmessung im Radsport.

## 8.1 Widerstände und Kräfte

Um ein Fahrrad in Bewegung zu setzen, sind äußere und innere Kräfte notwendig, um den diversen Widerständen entgegenzuwirken. Äußere Kräfte beschreiben jene Kräfte, die auf den/die Fahrer\*in einwirken und die inneren jene der Muskelkräfte. Die Kräfte beim Radfahren setzen sich meist zusammen aus den inneren Pedalkräften des/der Radfahrers/Radfahrerin, der Schwerkraft beim Gefälle, der Trägheitskraft beim Ausrollen und der Windkraft.

Beim Radfahren wirken immer zwei Kräfte gegeneinander. Zum einen die Antriebskraft  $F_A$  in Fahrtrichtung und die Gesamtwiderstandskraft  $F_{ges}$  in entgegen gesetzter Fahrtrichtung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 26).

In der Regel ist beim Radfahren die Gesamtwiderstandskraft kleiner als die von den Beinen aufgebrauchte Antriebskraft um sich vorwärts zu bewegen. Der überschüssige Anteil der Antriebskraft äußert sich beim Radfahren durch Zuwachs der Wegstrecke oder Geschwindigkeit. Die Gesamtwiderstandskraft setzt sich aus den gesamten Fahrwiderständen, verursacht durch Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand und den Fahrradwiderständen zusammen. Bei den Fahrradwiderständen ist vor allem der Rollwiderstand von großer Bedeutung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 27).

Auf der folgenden Doppelseite sind die Widerstände beim Radfahren in einer Grafik aufgeschlüsselt.

Generell können drei grundlegende Fälle unterschieden werden:

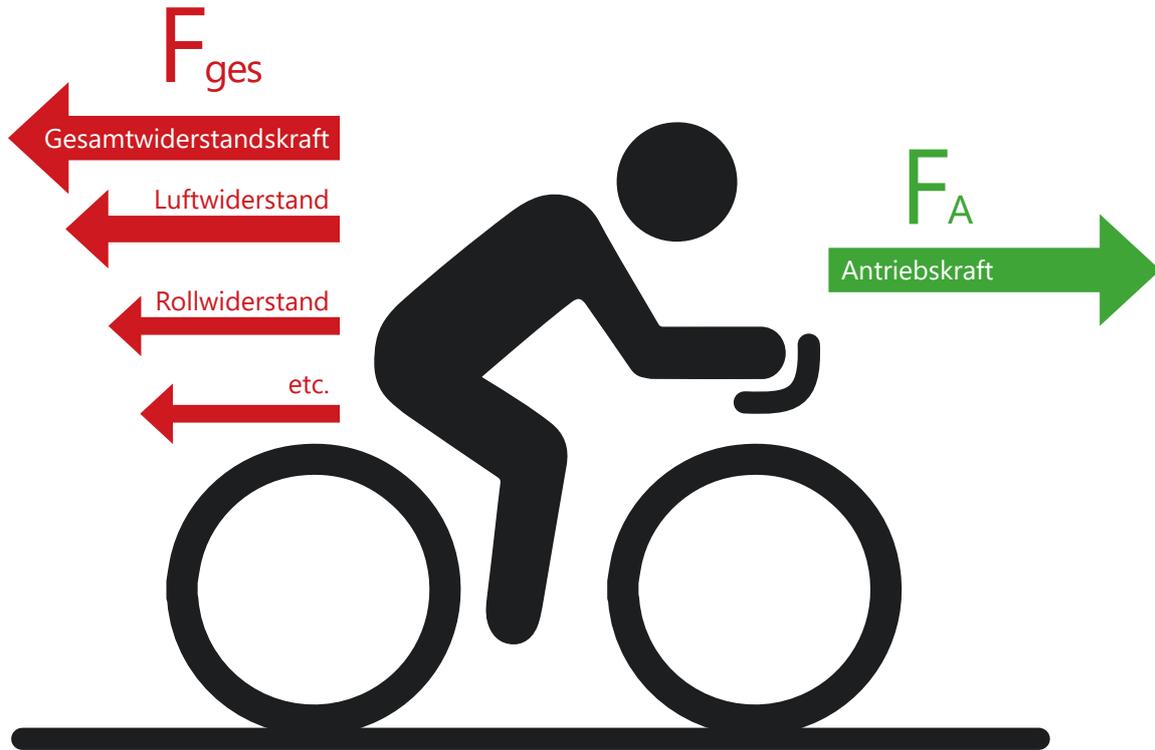


Abb. 76: Widerstände beim Radfahren (Schaden-Handstanger, P., 2022)

**Fall 1:  $F_A = F_{ges}$**

Der/die Radfahrer\*in fährt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, dabei entspricht die Antriebskraft der Widerstandskraft.

**Fall 2:  $F_A > F_{ges}$**

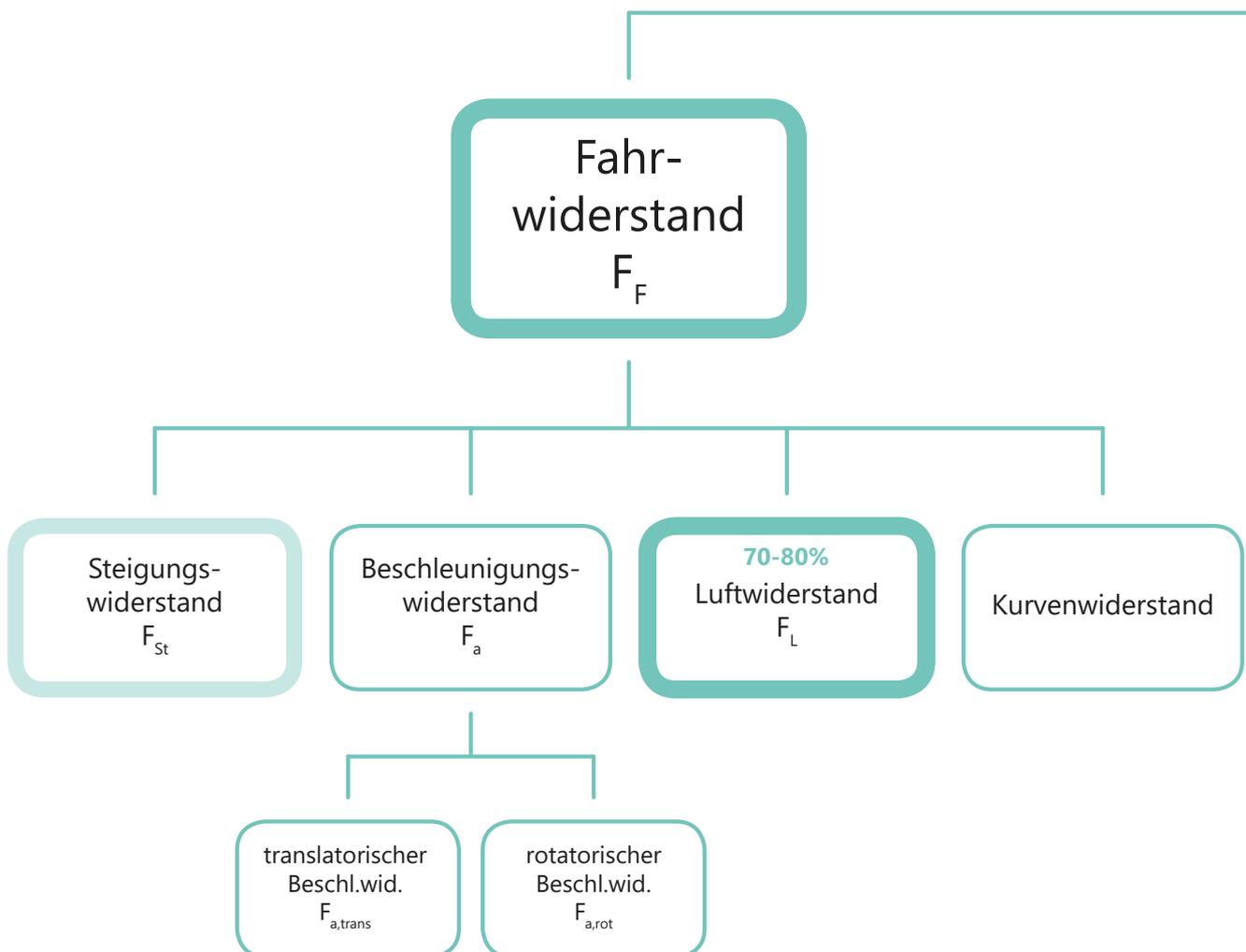
Der/die Radfahrer\*in beschleunigt, dabei ist die Antriebskraft größer als die Gesamtwiderstandskraft.

**Fall 3:  $F_A < F_{ges}$**

Der/die Radfahrer\*in wird langsamer, dabei ist die Gesamtwiderstandskraft größer als die Antriebskraft.

Das System kommt zum Stillstand!

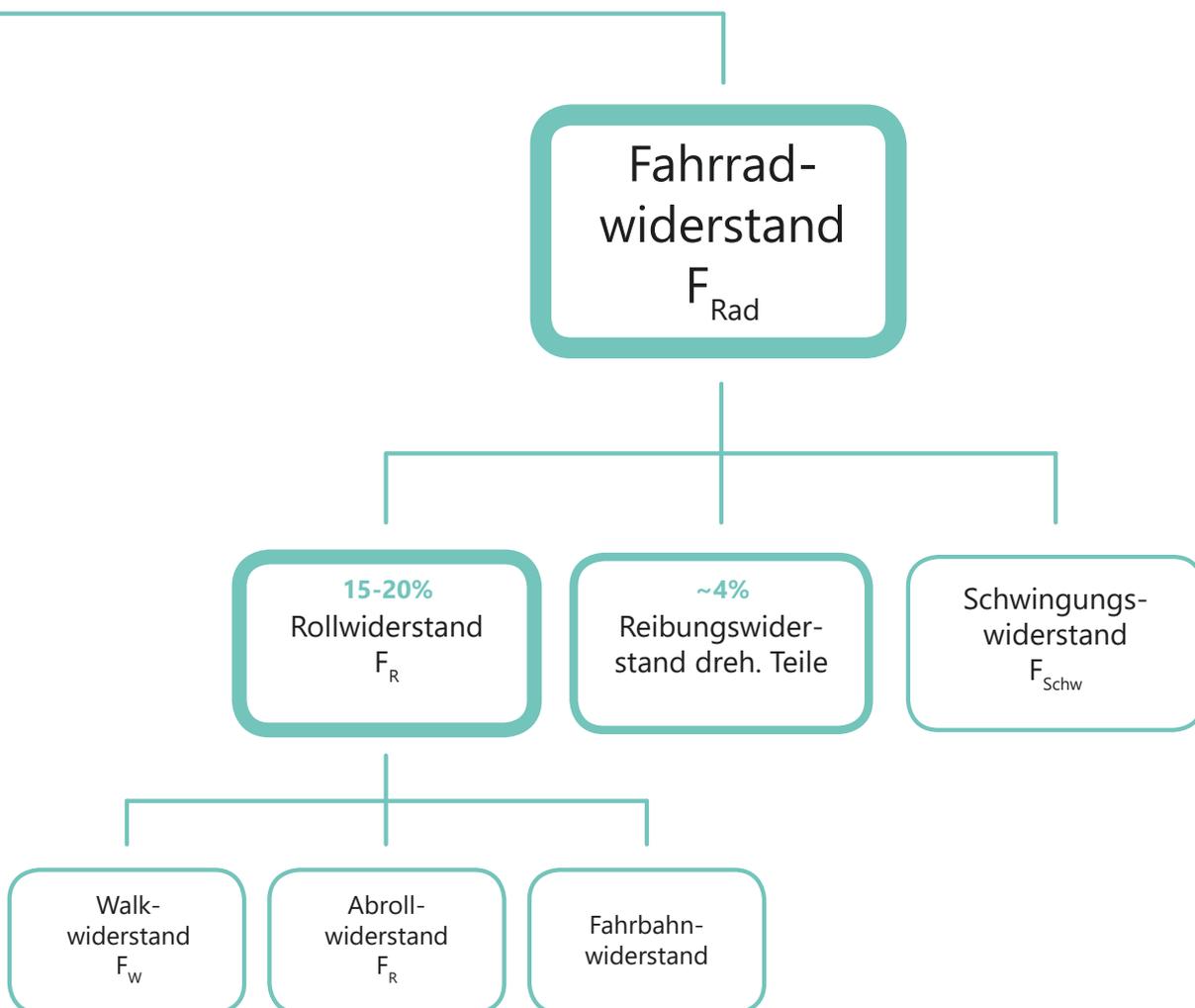
# Gesamt



**%....Einflussfaktor auf ebener Strecke bei etwa 35km/h Fahrgeschwindigkeit**

Abb. 77: Übersicht der Fahr- und Fahrradwiderstände (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 55)

# widerstand



In den nächsten Punkten folgt eine Erläuterung der einzelnen Fahrwiderstände.

### **8.1.1 Beschleunigungswiderstand**

Der Beschleunigungswiderstand wird auch Trägheitswiderstand, Trägheitskraft, Beharrungsvermögen oder einfach nur Trägheit bezeichnet. Trägheitskräfte spürt man beim Radfahren vor allem beim Anfahren, beim Beschleunigen, beim Abbremsen und in Kurven. Die Trägheitskräfte wirken der Beschleunigung immer entgegengesetzt. Auch beim Bremsen wirkt die Trägheitskraft entgegen der negativen Beschleunigung, also nach vorne. Der Beschleunigungswiderstand hängt von der Masse des gesamten Systems ab (Radfahrer + Fahrrad) und ist größer je höher die Masse des zu bewegenden Systems ist. Ein leichterer Radfahrer benötigt somit weniger Kraftaufwand als ein schwererer um den Beschleunigungswiderstand zu überwinden. Daher kann gesagt werden, dass die Trägheitskraft bzw. der Beschleunigungswiderstand von der Masse und der Beschleunigung abhängig ist. Die Masse und die Beschleunigung sind daher direkt proportional zur Trägheitskraft (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 27-28).

### **8.1.2 Steigungswiderstand**

Den Steigungswiderstand oder auch Hangabtriebskraft genannt, gilt es bei Steigungen zu überwinden, um Wegstrecke zu generieren. Die Hangabtriebskraft ist ein Teil der Gewichtskraft und wirkt parallel zur Fahrbahn und will das System bergauf immer rückwärts rollen lassen. Die Hangabtriebskraft ist daher stark von der Steigung und der Masse des Systems abhängig. Es gilt daher, je größer die Steigung und die Masse, desto größer der Steigungswiderstand. Im Bild muss der Radfahrer bei Steigungen daher hauptsächlich den Steigungswiderstand mit seiner Antriebskraft überwinden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 40-41).

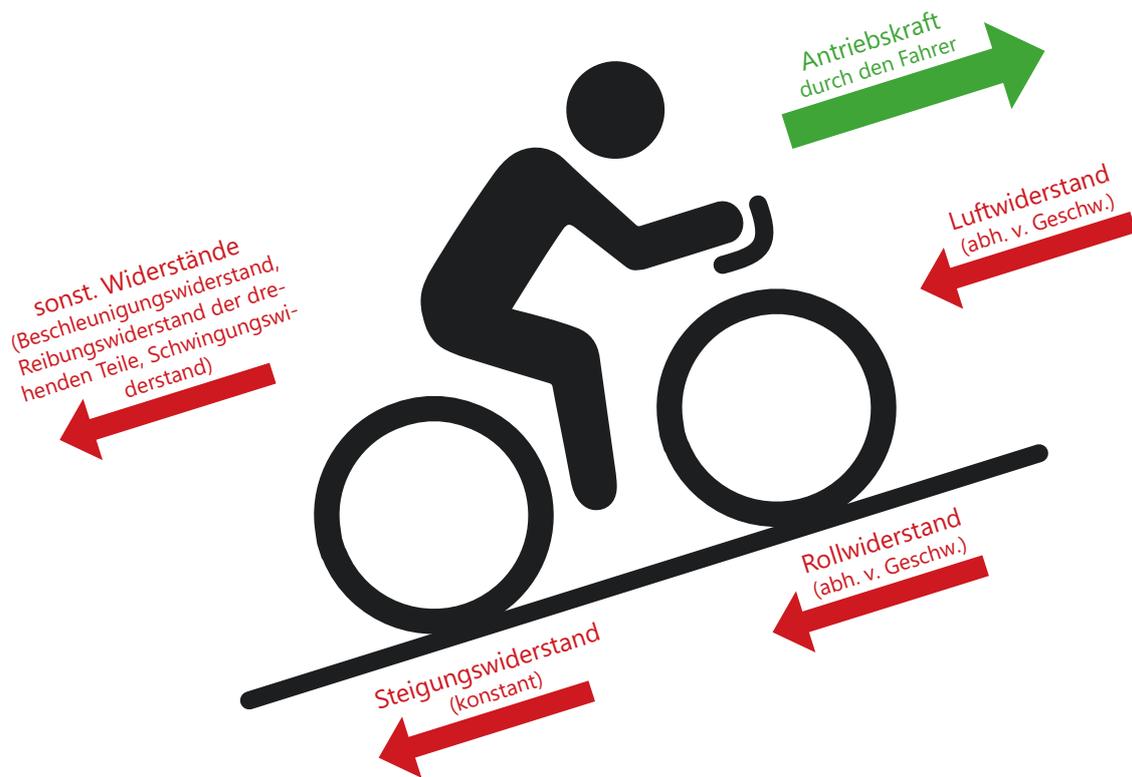


Abb. 78: Widerstände an Steigungen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Die Steigleistung beschreibt die Leistung, die man bei einer bestimmten Steigung erbringen muss, um den Steigungswiderstand und den Luft- und Rollwiderstand zu überwinden. Die Berechnung der Steigleistung funktioniert daher am besten bei steilen Anstiegen, da der Einfluss von Roll- und Luftwiderstand dort sehr gering ist. Bergab und auf flachen Streckenabschnitten wird die Berechnung der Steigleistung jedoch immer ungenauer (vgl. Bergfreunde, 2022).

### 8.1.2.1 Berechnung der Steig- und Gesamtleistung

Radfahrapps können sehr genau die Steigleistung berechnen, wie im Punkt Wattmessung ohne Powermeter kurz beschrieben ist, sind jedoch nie so genau wie die direkt messenden Powermeter am Fahrrad. Dennoch sind die Werte, die sie an den Anstiegen liefern, sehr plausibel. Damit jedoch ein möglichst genaues Ergebnis herauskommt, geht man bei der Berechnung von folgenden Annahmen aus:

- *Windstille*
- *möglichst gleichmäßige Steigung des Streckenabschnitts*
- *gleichbleibende Position am Fahrrad*

Sind diese Annahmen nicht erfüllt, kommt es jedoch zu größeren Abweichungen der Wattleistung. Anhand folgender Parameter kann die Steigleistung/Wattzahl und die Gesamtleistung an den Streckenabschnitten ermittelt werden (vgl. Bergfreunde, 2022):

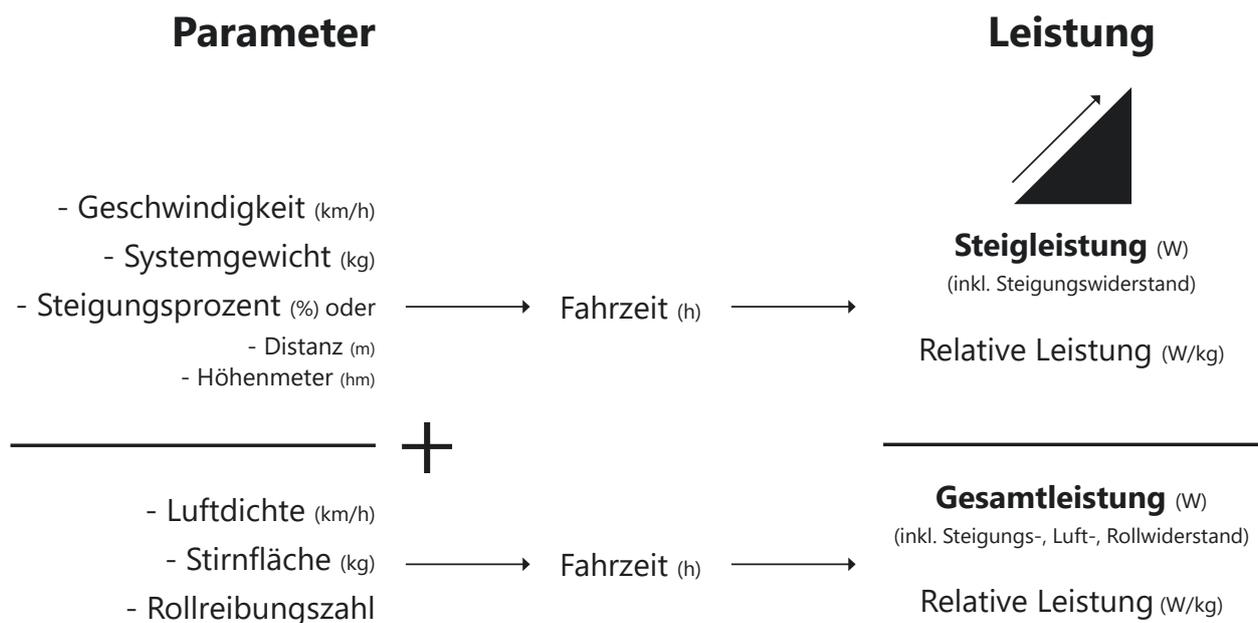


Abb. 79: Parameter für die Berechnung der Steigleistung (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Die Steigungsprozente können über die gefahrene Distanz und Höhenmeter ermittelt werden. Das Systemgewicht und die Geschwindigkeit sind bekannt. All diese Werte können nun in folgende Formel für die Steigleistung eingesetzt werden:

$$P_{st} = 0,02725 \cdot m \cdot \% \cdot v$$

*Kleines Rechenbeispiel:* Ein Radfahrer mit einer Systemmasse von 80kg fährt mit 10km/h eine Steigung mit durchschnittlich zehn Prozent berghoch. Setzt man diese Werte in die obige Formel ein, erhält man eine Steigleistung von 218 Watt. Dabei handelt es sich jedoch nicht um die Gesamtleistung, sondern nur um die Steigleistung, da der Rollwiderstand und Luftwiderstand außen vorgelassen sind. Möchte man daher die Gesamtleistung berechnen müssen noch Rollwiderstand und Luftwiderstand berücksichtigt werden. Daher müssen noch folgende Parameter angenommen werden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 47):

- Luftdichte (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho$
- Stirnfläche (m<sup>2</sup>)  $A$
- Widerstandsbeiwert (dimensionslos)  $c_w$
- Rollreibungszahl (dimensionslos)  $\mu_R$

Die Luftdichte wird über die Temperatur und den Luftdruck berechnet. Der Luftdruck wiederum ist von der Seehöhe abhängig. Die Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes und Rollwiderstandes wird anhand folgender beiden Formeln berechnet:

$$P_{luft} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

$$P_{roll} = m \cdot g \cdot \mu_R \cdot v$$

Werden diese beiden Teilleistungen noch berücksichtigt erhält man für obiges Rechenbeispiel eine Gesamtleistung an dem Anstieg von 239 Watt, davon 218W für die Steigleistung und 17W für die Rollreibung und 4W für den Luftwiderstand. Die Formel für die Gesamtleistung lautet daher (vgl. Michael Konczer, 2022):

$$P_{ges} = P_{st} + P_{luft} + P_{roll}$$

### **8.1.2.2 Berechnungsgrundlage App**

Geschwindigkeit, Distanz und Höhenunterschied werden von der App gemessen. Das Gesamtgewicht wird vorab in den Einstellungen eingegeben. Die Luftdichte wird anhand der Seehöhe und Temperatur ermittelt. Für den Rollwiderstand wird eine bestimmte Rollreibungszahl für das eingestellte Fahrrad angenommen. Die Stirnfläche beschreibt die Angriffsfläche von Radfahrer und Fahrrad und ist abhängig von der Haltung am Fahrrad, der Fahrergröße, der Bekleidung und dem Fahrrad an sich. Da diese Werte nicht ermittelt werden können, wird für die Stirnfläche ebenfalls ein Durchschnittswert angegeben. Aus diesen Parametern und Annahmen errechnet die App nun die Steigleistung an den Segmenten und die relative Leistung (W/kg), bezogen auf das eingegebene Gewicht (vgl. Michael Konczer, 2022).

Da einige Parameter nur auf Durchschnittswerten und Annahmen basieren und stark von äußerlichen Umwelteinflüssen abhängen, ist in bestimmten Fahrsituationen die Berechnung ungenau und nicht mit direkt messenden Systemen vergleichbar. Jedoch insbesondere Bergauf liefert die Berechnung bzw. die App sehr plausible Durchschnittswattzahlen für einen betrachteten Abschnitt bzw. Segment (vgl. Bergfreunde, 2022).

### **8.1.2.3 Berechnungsgrundlage ohne App**

Auch ohne App und Powermeter gibt es an sehr beliebten Anstiegen die Möglichkeit die erbrachte Wattleistung über eine Tabelle ausfindig zu machen. Die Wattleistung wird anhand von der „gestoppten“ Fahrzeit an diesem Anstieg und der Gesamtmasse (Radfahrer\*in und Ausrüstung) ermittelt. Berechnungsgrundlage dieser Tabellen stellen auch hier wie bei den Apps die Distanz und die Höhenmeter des Abschnitts dar. Solche Tabellen befinden sich meist auf der Passhöhe. Die unten angeführte Tabelle ist von der Wertungsstrecke „Weißen am Sattel“ im Bezirk Kirchdorf. Hier gibt es vor Beginn des Anstiegs sogar eine Waage, um die Gesamtmasse exakt zu ermitteln.

Ist man oben angekommen und hat die Zeit gestoppt und sich die Gesamtmasse gemerkt, kann nun in der angeschlagenen Tabelle die Wattleistung abgelesen werden.

In der ersten Tabelle an der Senkrechten liest man die gestoppte Fahrzeit ab und an der Waagrechten die eigene Gesamtmasse. Im Schnittpunkt dieser beiden Werte kann nun

daraus die Wattleistung abgelesen werden.

Beispiel: Benötigt man für den Anstieg 15 Minuten und hat eine Gesamtmasse von 80 Kilogramm, hat man eine durchschnittliche Leistung von 339 Watt am Anstieg erbracht.

		Gesamtgewicht in kg (FahrerIn + Rad + Ausrüstung)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
gestaute Fahrzeit in min	10	106	118	132	145	158	172	186	199	213	227	241	254	268	281	295	309	323	337	350	364	378	392	406	420	434	448	462	476	490	504	518	532	546	560	574	588	602	616	630	644	658	672	686	700	714	728	742	756	770	784	798	812	826	840	854	868	882	896	910	924	938	952	966	980	994	1008	1022	1036	1050	1064	1078	1092	1106	1120	1134	1148	1162	1176	1190	1204	1218	1232	1246	1260	1274	1288	1302																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	11	108	120	134	147	160	174	188	201	215	229	243	257	271	285	299	313	327	341	355	369	383	397	411	425	439	453	467	481	495	509	523	537	551	565	579	593	607	621	635	649	663	677	691	705	719	733	747	761	775	789	803	817	831	845	859	873	887	901	915	929	943	957	971	985	999	1013	1027	1041	1055	1069	1083	1097	1111	1125	1139	1153	1167	1181	1195	1209	1223	1237	1251	1265	1279	1293	1307	1321	1335	1349	1363	1377	1391	1405	1419	1433	1447	1461	1475	1489	1503	1517	1531	1545	1559	1573	1587	1601	1615	1629	1643	1657	1671	1685	1699	1713	1727	1741	1755	1769	1783	1797	1811	1825	1839	1853	1867	1881	1895	1909	1923	1937	1951	1965	1979	1993	2007	2021	2035	2049	2063	2077	2091	2105	2119	2133	2147	2161	2175	2189	2203	2217	2231	2245	2259	2273	2287	2301	2315	2329	2343	2357	2371	2385	2399	2413	2427	2441	2455	2469	2483	2497	2511	2525	2539	2553	2567	2581	2595	2609	2623	2637	2651	2665	2679	2693	2707	2721	2735	2749	2763	2777	2791	2805	2819	2833	2847	2861	2875	2889	2903	2917	2931	2945	2959	2973	2987	3001	3015	3029	3043	3057	3071	3085	3099	3113	3127	3141	3155	3169	3183	3197	3211	3225	3239	3253	3267	3281	3295	3309	3323	3337	3351	3365	3379	3393	3407	3421	3435	3449	3463	3477	3491	3505	3519	3533	3547	3561	3575	3589	3603	3617	3631	3645	3659	3673	3687	3701	3715	3729	3743	3757	3771	3785	3799	3813	3827	3841	3855	3869	3883	3897	3911	3925	3939	3953	3967	3981	3995	4009	4023	4037	4051	4065	4079	4093	4107	4121	4135	4149	4163	4177	4191	4205	4219	4233	4247	4261	4275	4289	4303	4317	4331	4345	4359	4373	4387	4401	4415	4429	4443	4457	4471	4485	4499	4513	4527	4541	4555	4569	4583	4597	4611	4625	4639	4653	4667	4681	4695	4709	4723	4737	4751	4765	4779	4793	4807	4821	4835	4849	4863	4877	4891	4905	4919	4933	4947	4961	4975	4989	5003	5017	5031	5045	5059	5073	5087	5101	5115	5129	5143	5157	5171	5185	5199	5213	5227	5241	5255	5269	5283	5297	5311	5325	5339	5353	5367	5381	5395	5409	5423	5437	5451	5465	5479	5493	5507	5521	5535	5549	5563	5577	5591	5605	5619	5633	5647	5661	5675	5689	5703	5717	5731	5745	5759	5773	5787	5801	5815	5829	5843	5857	5871	5885	5899	5913	5927	5941	5955	5969	5983	5997	6011	6025	6039	6053	6067	6081	6095	6109	6123	6137	6151	6165	6179	6193	6207	6221	6235	6249	6263	6277	6291	6305	6319	6333	6347	6361	6375	6389	6403	6417	6431	6445	6459	6473	6487	6501	6515	6529	6543	6557	6571	6585	6599	6613	6627	6641	6655	6669	6683	6697	6711	6725	6739	6753	6767	6781	6795	6809	6823	6837	6851	6865	6879	6893	6907	6921	6935	6949	6963	6977	6991	7005	7019	7033	7047	7061	7075	7089	7103	7117	7131	7145	7159	7173	7187	7201	7215	7229	7243	7257	7271	7285	7299	7313	7327	7341	7355	7369	7383	7397	7411	7425	7439	7453	7467	7481	7495	7509	7523	7537	7551	7565	7579	7593	7607	7621	7635	7649	7663	7677	7691	7705	7719	7733	7747	7761	7775	7789	7803	7817	7831	7845	7859	7873	7887	7901	7915	7929	7943	7957	7971	7985	7999	8013	8027	8041	8055	8069	8083	8097	8111	8125	8139	8153	8167	8181	8195	8209	8223	8237	8251	8265	8279	8293	8307	8321	8335	8349	8363	8377	8391	8405	8419	8433	8447	8461	8475	8489	8503	8517	8531	8545	8559	8573	8587	8601	8615	8629	8643	8657	8671	8685	8699	8713	8727	8741	8755	8769	8783	8797	8811	8825	8839	8853	8867	8881	8895	8909	8923	8937	8951	8965	8979	8993	9007	9021	9035	9049	9063	9077	9091	9105	9119	9133	9147	9161	9175	9189	9203	9217	9231	9245	9259	9273	9287	9301	9315	9329	9343	9357	9371	9385	9399	9413	9427	9441	9455	9469	9483	9497	9511	9525	9539	9553	9567	9581	9595	9609	9623	9637	9651	9665	9679	9693	9707	9721	9735	9749	9763	9777	9791	9805	9819	9833	9847	9861	9875	9889	9903	9917	9931	9945	9959	9973	9987	10001	10015	10029	10043	10057	10071	10085	10099	10113	10127	10141	10155	10169	10183	10197	10211	10225	10239	10253	10267	10281	10295	10309	10323	10337	10351	10365	10379	10393	10407	10421	10435	10449	10463	10477	10491	10505	10519	10533	10547	10561	10575	10589	10603	10617	10631	10645	10659	10673	10687	10701	10715	10729	10743	10757	10771	10785	10799	10813	10827	10841	10855	10869	10883	10897	10911	10925	10939	10953	10967	10981	10995	11009	11023	11037	11051	11065	11079	11093	11107	11121	11135	11149	11163	11177	11191	11205	11219	11233	11247	11261	11275	11289	11303	11317	11331	11345	11359	11373	11387	11401	11415	11429	11443	11457	11471	11485	11499	11513	11527	11541	11555	11569	11583	11597	11611	11625	11639	11653	11667	11681	11695	11709	11723	11737	11751	11765	11779	11793	11807	11821	11835	11849	11863	11877	11891	11905	11919	11933	11947	11961	11975	11989	12003	12017	12031	12045	12059	12073	12087	12101	12115	12129	12143	12157	12171	12185	12199	12213	12227	12241	12255	12269	12283	12297	12311	12325	12339	12353	12367	12381	12395	12409	12423	12437	12451	12465	12479	12493	12507	12521	12535	12549	12563	12577	12591	12605	12619	12633	12647	12661	12675	12689	12703	12717	12731	12745	12759	12773	12787	12801	12815	12829	12843	12857	12871	12885	12899	12913	12927	12941	12955	12969	12983	12997	13011	13025	13039	13053	13067	13081	13095	13109	13123	13137	13151	13165	13179	13193	13207	13221	13235	13249	13263	13277	13291	13305	13319	13333	13347	13361	13375	13389	13403	13417	13431	13445	13459	13473	13487	13501	13515	13529	13543	13557	13571	13585	13599	13613	13627	13641	13655	13669	13683	13697	13711	13725	13739	13753	13767	13781	13795	13809	13823	13837	13851	13865	13879	13893	13907	13921	13935	13949	13963	13977	13991	14005	14019	14033	14047	14061	14075	14089	14103	14117	14131	14145	14159	14173	14187	14201	14215	14229	14243	14257	14271	14285	14299	14313	14327	14341	14355	14369	14383	14397	14411	14425	14439	14453	14467	14481	14495	14509	14523	14537	14551	14565	14579	14593	14607	14621	14635	14649	14663	14677	14691	14705	14719	14733	14747	14761	14775	14789	14803	14817	14831	14845	14859	14873	14887	14901	14915	14929	14943	14957	14971	14985	14999	15013	15027	15041	15055	15069	15083	15097	15111	15125	15139	15153	15167	15181	15195	15209	15223	15237	15251	15265	15279	15293	15307	15321	15335	15349	15363	15377	15391	15405	15419	15433	15447	15461	15475	15489	15503	15517	15531	15545	15559	15573	15587	15601	15615	15629	15643	15657	15671	15685	15699	15713	15727	15741	15755	15769	15783	15797	15811	15825	15839	15853	15867	15881	15895	15909	15923	15937	15951	15965	15979	15993	16007	16021	16035	16049	16063	16077	16091	16105	16119	16133	16147	16161	16175	16189	16203	16217	16231	16245	16259	16273	16287	16301	16315	16329	16343	16357	16371	16385	16399	16413	16427	16441	16455	16469	16483	16497	16511	16525	16539	16553	16567	16581	16595	16609	16623	16637	16651</

Es gibt auch eine zweite Tabelle, wo die relative Leistung abgelesen werden kann. In dieser Tabelle kann an der Senkrechten die zuvor erhobene durchschnittliche Leistung und an der Waagrechten wieder die eigene Gesamtmasse abgelesen werden. Im Schnittpunkt dieser beiden Werte kann nun daraus die relative Leistung, also wie viel Watt pro Kilogramm erbracht wurden, abgelesen werden.

Solche Tabellen sind an den Anstiegen eine nette Einrichtung für die Radfahrer\*innen, um in Erfahrung zu bringen, wie viele Watt im Schnitt getreten wurden, auch ohne Powermeter und App. In der heutigen Zeit gibt es jedoch immer weniger solcher Tabellen an den Anstiegen.

### **8.1.3 Luftwiderstand**

Der Luftwiderstand ist von allen Fahrwiderständen der unangenehmste für den/die Radfahrer\*in. Auch bei völliger Windstille stemmt er sich entgegen dem/der Fahrer\*in und muss überwunden werden. Um den Luftwiderstand zu überwinden sind auf ebener Strecke bis zu 80 Prozent der Antriebsleistung notwendig. Zudem steigt der Luftwiderstand im Quadrat zur Geschwindigkeit. Deshalb wird der zu überwindende Luftwiderstand größer, je schneller man sich fortbewegt. Kommt der Wind von vorne oder schräg von der Seite, addieren sich die Luftwiderstandskräfte. Kommt der Wind jedoch von hinten und ist größer als die eigene Fahrgeschwindigkeit, spürt man keinen Gegenwind. Dieser Fall tritt jedoch nicht oft auf, deshalb kommt es einem immer so vor, als hat man ständig Gegenwind obwohl vielleicht gerade Windstille herrscht. Deshalb ist es wichtig, den Luftwiderstand möglichst gering zu halten, um effizienter voranzukommen. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 68):

- Die Stirnfläche verkleinern durch eine Veränderung der Sitzposition und enganliegender Kleidung
- Fahrrad und Komponenten aerodynamischer gestalten
- Die Form des gesamten Systems (Fahrrad & Fahrer\*in) verbessern, damit sich die Stromlinien besser anschmiegen
- Den Luftreibungswiderstand verringern durch glattere Oberflächen
- oder einfach Windschatten fahren

Der Luftwiderstand setzt sich zudem aus mehreren unterschiedlichen Anteilen zusammen, die unterschiedliche Folgen haben. Es wird zwischen Strömungswiderstand (Druck- oder Formwiderstand), dem induzierten Widerstand (Querwiderstand) und dem Reibungswiderstand unterschieden. Der Strömungswiderstand ist stark abhängig von der Stirnfläche, da die Luftmoleküle auf der Oberfläche auftreffen und wieder abprallen und so senkrecht zur Oberfläche eine Kraft ausüben. Der viel kleinere Reibungswiderstand entsteht durch die Fließbewegung der Moleküle entlang der Oberflächen und kann durch bestimmte Oberflächenstrukturen beeinflusst werden. Der induzierte Widerstand erzeugt aerodynamischen Auftrieb, kann jedoch unter den Aspekten des Radfahrens vernachlässigt werden.

Der größte Einflussfaktor der Fahrwiderstände ist somit der Luftwiderstand. Je steiler und langsamer man fährt, desto unbedeutender wird der Luftwiderstand. Daher spielt in steilen Anstiegen vor allem der Steigungswiderstand eine Rolle (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 68).

Weiter geht es nun mit den Fahrradwiderständen, wobei hier in erster Linie der Rollwiderstand genauer betrachtet werden muss.

#### **8.1.4 Rollwiderstand**

Der Rollwiderstand ist die größte Komponente unter den Fahrradwiderständen und die zweitgrößte des Gesamtwiderstandes. Er lässt sich in den Walkwiderstand, den Abrollwiderstand und den Fahrbahnwiderstand unterteilen. Der Rollwiderstand tritt bei der Verformung des Reifens beim Durchlaufen der Reifenaufstandsfläche auf und ist auf die Dämpfung des Reifengummi zurückzuführen. Die Reifenaufstandsfläche beschreibt die Kontaktfläche, mit der der Gummi den Untergrund berührt. Der Rollwiderstand ist daher von der Wahl des Reifens, dem Durchmesser, den Abrolleigenschaften, dem Fahrbahnbelag und dem Luftdruck abhängig (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 55-56).

### 8.1.4.1 Walkwiderstand

Der Walkwiderstand ist stark abhängig vom Reifendruck und der Achslast. Je weniger Luft im Reifen ist und je höher die Achslast, desto mehr verformt sich der Reifen und desto höher ist der Widerstand. Ab einem bestimmten Reifendruck verringert sich der Rollwiderstand jedoch nicht mehr. Die Reifengeometrie spielt dabei keine Rolle, denn bei gleichem Luftdruck und glattem Untergrund rollen breite Reifen genau so gut wie schmale Reifen, eventuell sogar leicht besser aufgrund der kurzen, breiteren Aufstandsfläche, die weniger stark ein federt. **Deshalb ist die Aussage falsch, dass schmale Reifen immer besser laufen als Breite (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 57)!**

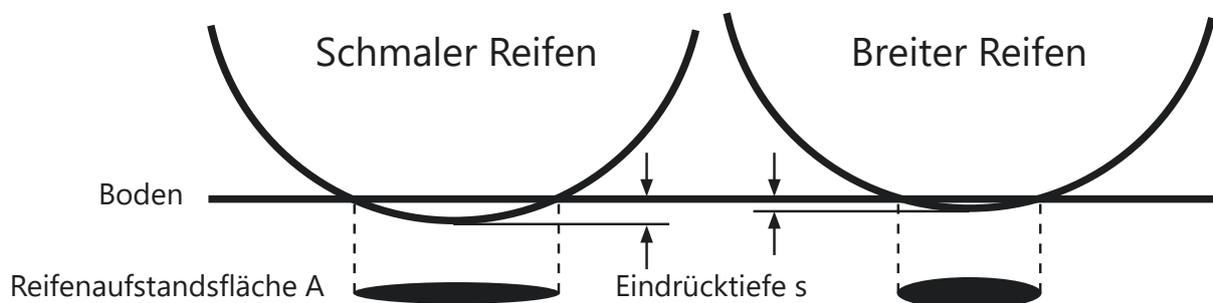


Abb. 82: Reifenverformung von schmalen und breiten Reifen (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 57)

### 8.1.4.2 Abrollwiderstand

Der Abrollwiderstand entsteht am vorderen Berührungspunkt von Reifen und Fahrbahn. Dabei entsteht eine Kraft, die den Reifen zusammendrückt und ein Bremsmoment, das dem Drehsinn des Rades entgegenwirkt. Der Abrollwiderstand wird mit zunehmendem Raddurchmesser geringer, deshalb rollen große Räder leichter als kleine Räder. Generell kann gesagt werden, dass der Abrollwiderstand mit zunehmender Belastung, zunehmender Geschwindigkeit und abnehmendem Reifendruck steigt. Den größten Einfluss hat jedoch der Reifendruck, da sich mit wenig Luft im Reifen die Aufstandsfläche vergrößert und der Walkwiderstand steigt. Zudem ist der Abrollwiderstand bei profillosen Reifen besser als bei jenen mit Profil (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 59-60).

### 8.1.4.3 Fahrbahnwiderstand

Der Fahrbahnwiderstand ist abhängig von der Beschaffenheit des Untergrunds und wird höher, je unebener die Fahrbahn ist. Ist daher der Fahrbahnwiderstand aufgrund der rauen Fahrbahn sehr hoch, geht dies zu Lasten des Rollwiderstandes.

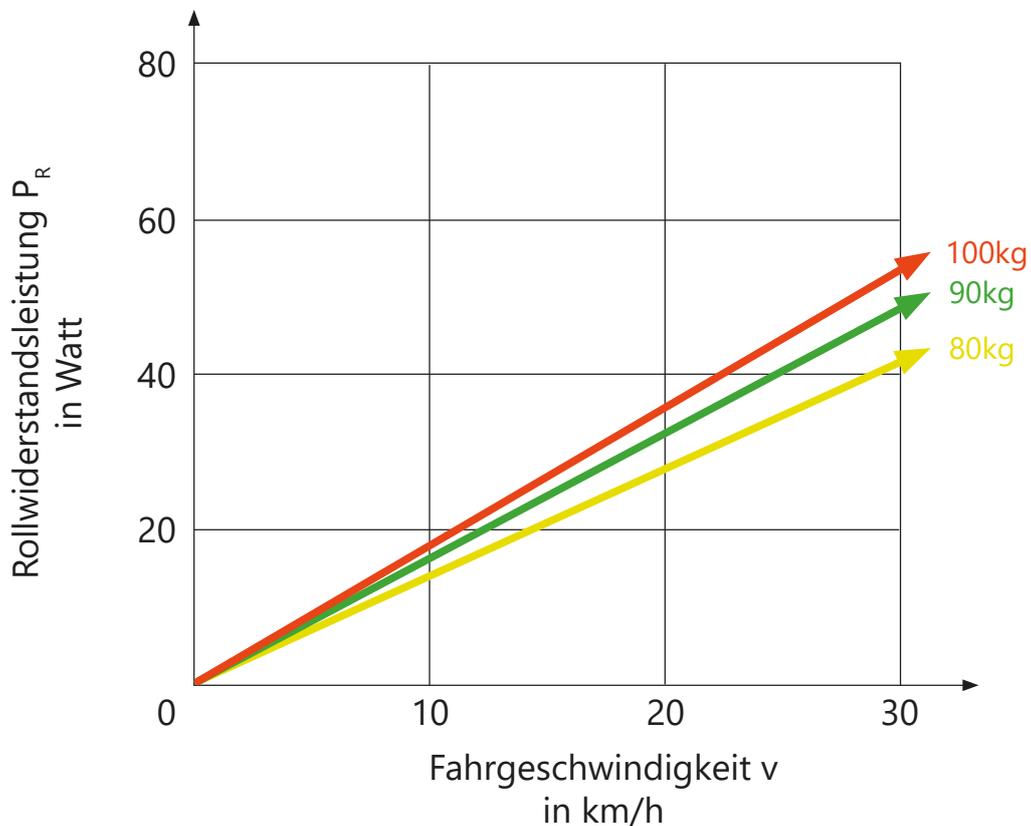


Abb. 83: Rollwiderstandsleistung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 64)

Der Rollwiderstand setzt sich daher aus dem Walkwiderstand, dem Abrollwiderstand und dem Fahrbahnwiderstand zusammen. Je langsamer man fährt, desto mehr wirkt sich der Rollwiderstand aus. Ab Geschwindigkeiten von etwa 16km/h wirkt sich jedoch der Luftwiderstand stärker aus als der Rollwiderstand. Beim Fahren auf ebener Strecke mit 35 km/h macht der Rollwiderstand in etwa 20 Prozent der Gesamtleistung aus, die restlichen Prozente hauptsächlich der Luftwiderstand (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 64).

### **8.1.5 Reibungswiderstand der drehenden Teile**

Neben den beiden großen Komponenten Luft- und Rollwiderstand beeinflussen auch die drehenden Teile am Fahrrad durch mechanische Reibung den Gesamtwiderstand. Vorwiegend treten diese Reibungen in den Lagern und der Kette auf. Etwa vier Prozent der Antriebsleistung gehen durch die mechanische Reibung verloren. Der Reibungswiderstand der drehenden Teile ist daher sehr gering (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 65).

### **8.1.6 Schwingungswiderstand**

Jede Kraft am Fahrrad führt zu elastischen Verformungen der belasteten Teile. Diese Leistungsverluste sind aufgrund von zahlreichen Schwingungen und Dämpfungen sehr schwer zu erfassen und zu berechnen. Zudem haben die Schwingungswiderstände einen so geringen Anteil an dem Gesamtwiderstand, so dass diese vernachlässigt werden können (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 66).

### 8.1.7 Widerstände in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit

Folgende Grafik veranschaulicht den Zusammenhang der Widerstände in Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit und Antriebsleistung. Der Luftwiderstand und der Rollwiderstand haben auf ebener Strecke den größten Anteil des Gesamtwiderstandes und haben damit großen Einfluss auf den Vortrieb. Je schneller gefahren wird, desto größer werden auch die auftretenden Widerstände. Bei Geschwindigkeiten bis ca. 15km/h ist der Rollwiderstand größer als der Luftwiderstand. Dieser spielt bei geringen Geschwindigkeiten eine untergeordnete Rolle. Ab Geschwindigkeiten von knapp 20km/h wendet sich das Blatt und der Luftwiderstand beginnt stark exponentiell zu steigen. Der Rollwiderstand steigt mit höherem Tempo ebenso an, jedoch nicht exponentiell, sondern nur leicht linear. Daher gilt, umso schneller gefahren wird, umso stärker wirkt sich der Luftwiderstand auf den Gesamtwiderstand aus.

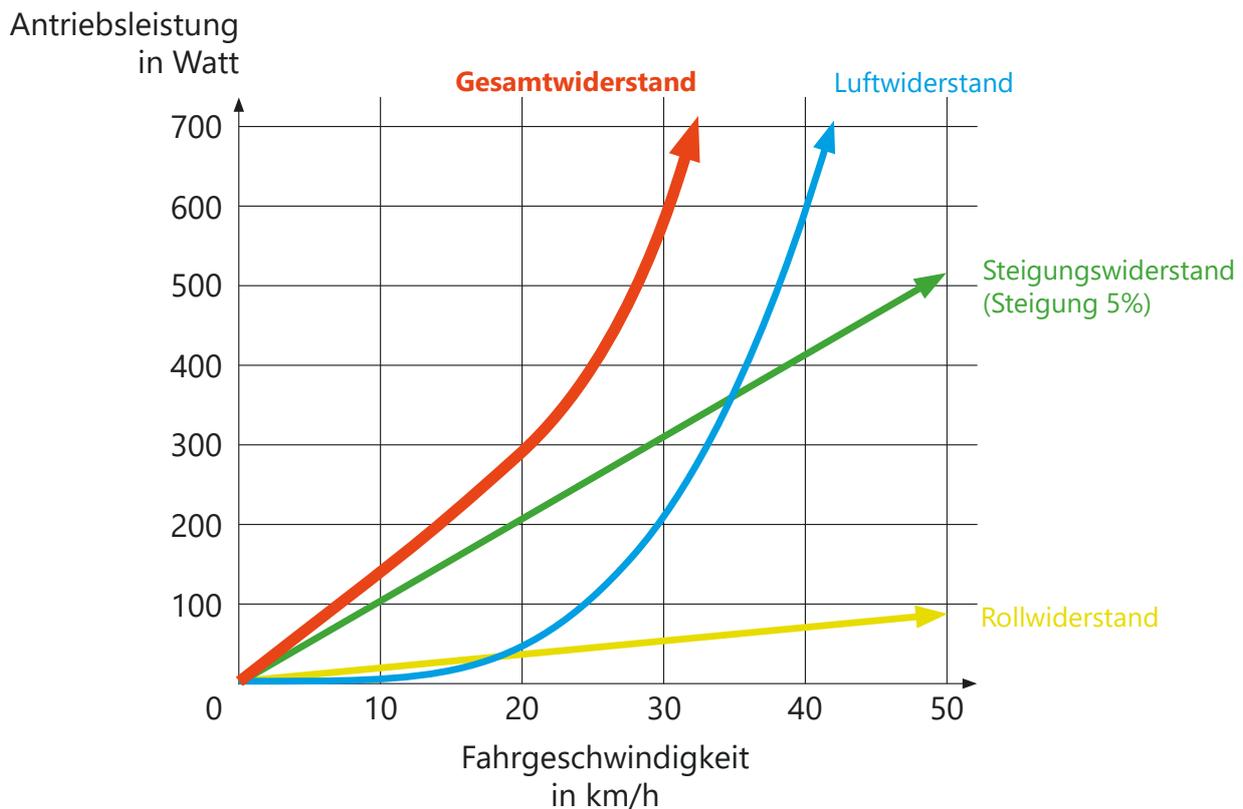


Abb. 84: Widerstände in Abhängigkeit zur Fahrgeschwindigkeit (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 261)

### 8.1.8 Widerstände in Abhängigkeit zur Steigung

Diese Grafik veranschaulicht den Zusammenhang der Widerstände in Abhängigkeit zur Steigung und Antriebsleistung. Bis Steigungen von ca. drei Prozent haben Steigungswiderstand und Luftwiderstand den gleichen Einfluss auf den Gesamtwiderstand. Umso steiler der Anstieg wird, desto größer wird auch der Steigungswiderstand. Bei Steigungen ab sechs Prozent macht der Luftwiderstand nicht mehr so viel aus wie noch bei geringeren Steigungen. Bei sehr steilen Anstiegen ist es daher von Vorteil, wenn das Systemgewicht (Radfahrer\*in + Fahrrad) möglichst gering ist. Bei sehr geringen Steigungen hingegen bietet ein aerodynamisches Fahrrad mehr Vorteile als ein extrem leichtes Bergfahrrad. Bei sehr steilen Anstiegen ist daher der Steigungswiderstand der maßgebende Faktor des Gesamtwiderstandes.

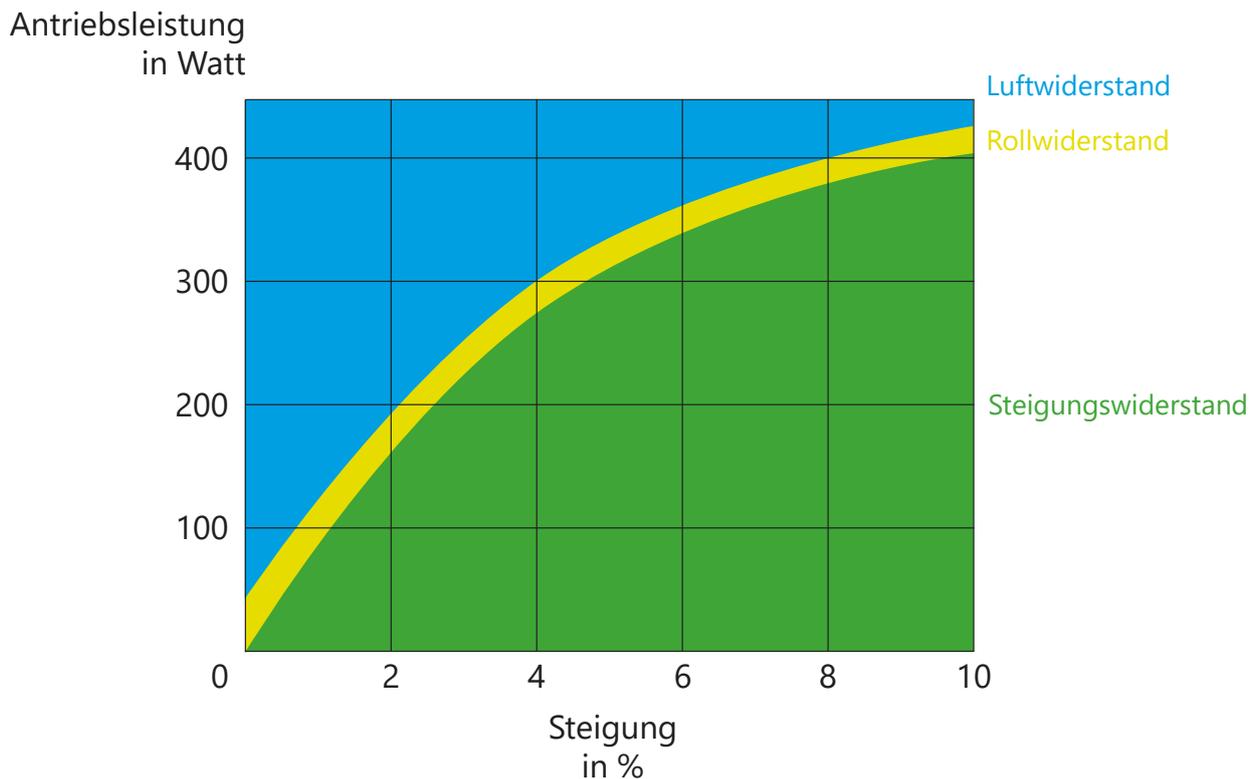


Abb. 85: Widerstände in Abhängigkeit zur Steigung (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 261)

Im nächsten Unterpunkt folgt ein Überblick über die Kräfte und Drehmomente am Pedal.

### 8.1.9 Kräfte und Drehmomente am Pedal

Die Kräfte am Pedal bzw. das daraus resultierende Drehmoment sind der Hauptfaktor für die Fortbewegung beim Radfahren und die Erzeugung der Leistung. Optimal wäre es, wenn die gesamte Pedalkraft in den Vortrieb umgesetzt werden könnte, dies ist in der Realität jedoch nicht möglich, da die Kräfte nicht zu hundert Prozent tangential am Pedal angreifen, aufgrund der „Zwangsführung“. Die meisten Radfahrer\*innen drücken zudem die Kraft fast ausschließlich senkrecht nach unten aufs Pedal. Dies hat zur Folge, dass im oberen und unteren Totpunkt der Drehbewegung kein Drehmoment wirkt, da nur die tangentielle Kraftkomponente am Pedal für den Vortrieb wirksam ist. Der optimale runde Tritt herrscht demnach vor, wenn in jedem Tretzyklus nur Tangentialkräfte auf die Kurbel gebracht werden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 185).

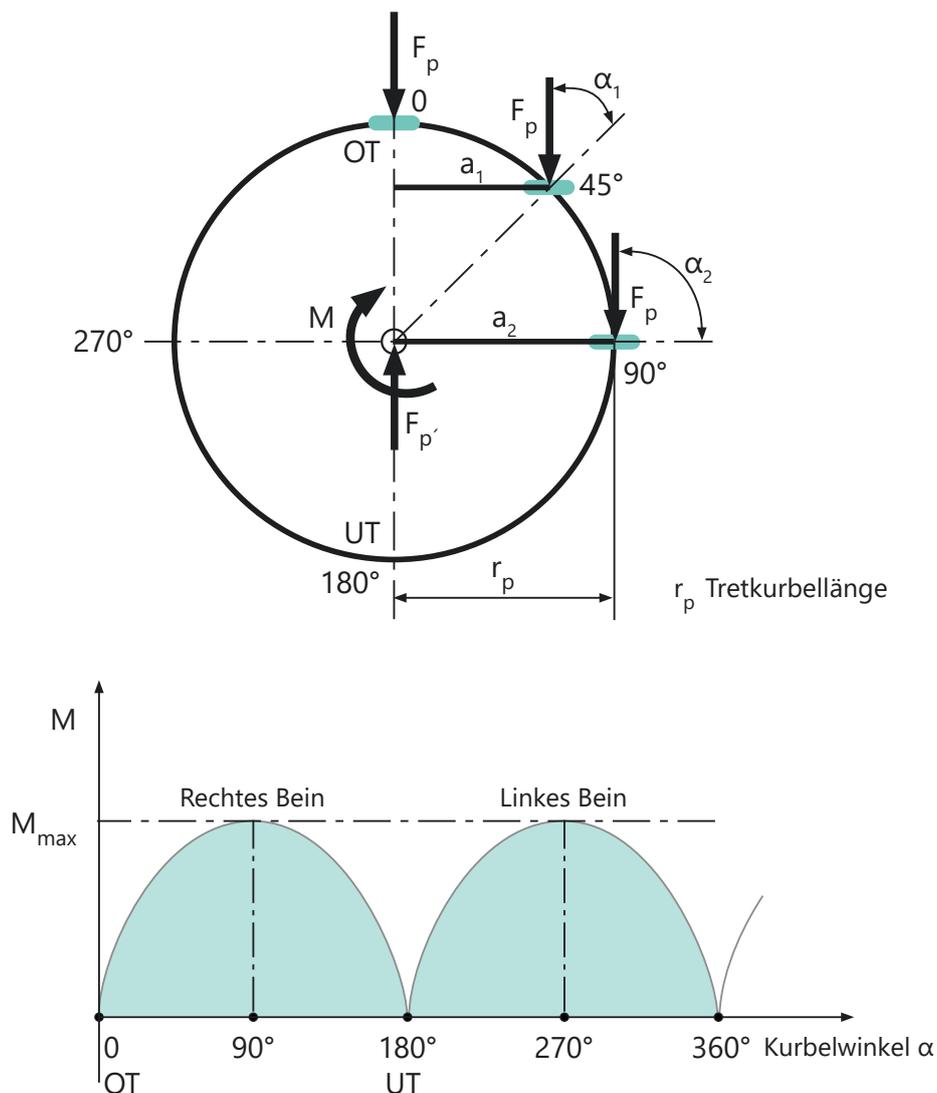


Abb. 86: Kräfte und Momente beim Pedalieren (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 185)

In der vorherigen Grafik werden die auftretenden Pedalkräfte und Momente beim Pedalieren aufgezeigt. Die Tretkurbellänge wird mit  $r_p$  bezeichnet und die Pedalkraft mit  $F_p$ .

Es wird gut ersichtlich, dass das resultierende Drehmoment "M" der Pedalkraft bei 0 und 180 Grad null beträgt, da der Kraftarm des Momentes null ist. Deshalb wäre es wichtig am oberen Totpunkt das Pedal, aktiv nach vorne zu schieben, um eine Tangentialkraft zu generieren. Bei 90 und 270 Grad hingegen liegt das maximale Drehmoment an. Im Bereich von 45 Grad ist das Drehmoment hingegen geringer, da in diesem Bereich der Hebelarm  $a_1$  kleiner ist als die Tretkurbellänge  $r_p$  (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 185).

Die untenstehende Grafik veranschaulicht die auftretenden Kräfte am Pedal im Detail. Tritt ein\*e Radfahrer\*in in die Pedale entsteht eine Pedalkraft. Aus dieser Pedalkraft resultieren die Radial- und Tangentialkräfte. Die Radialkraft  $F_r$  übt beim Abwärtstreten einen Zug und bei der Aufwärtsbewegung einen Druck auf die Tretkurbel aus. Dies führt zu einer leichten Biegung der Kurbel bzw. zu einer Reibung im Tretlager. Für den Vortrieb verantwortlich hingegen sind die Tangentialkräfte  $F_t$ . Daher gilt es den Tretstil so zu optimieren, um die Tangentialkräfte zu forcieren (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 186).

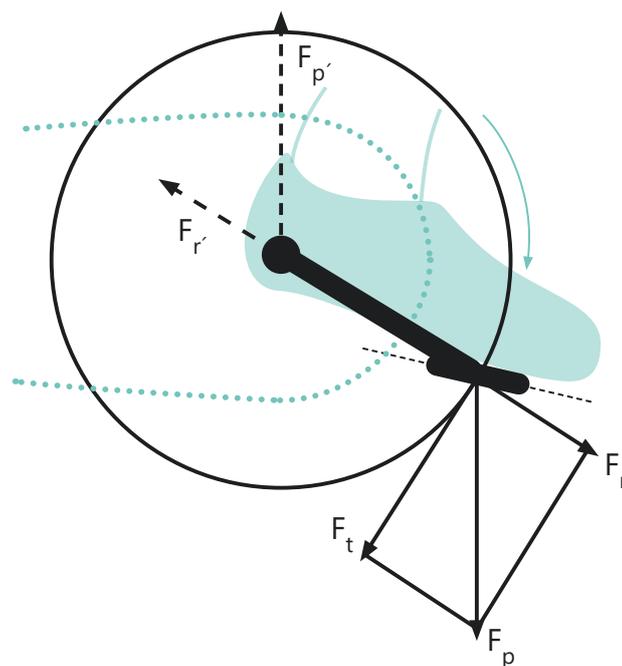


Abb. 87: Kräfte am Pedal und Tretlager (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 186)

Diese Darstellung veranschaulicht das physikalische Optimum, bei dem der tangentiale Kraftanteil den gleichen Betrag wie die Pedalkraft annimmt. Dies ist bei etwa 10 Grad vor der waagrechten Stellung der Tretkurbel der Fall. In diesem Punkt wird die gesamte Pedalkraft in wirksame Tangentialkraft umgewandelt. Es genügt daher nicht, die Pedale einfach nur von oben nach unten zu drücken, sondern auch das Pedal in der Aufwärtsbewegung aktiv zu entlasten und mit der Beugemuskelatur hochzuziehen. Dies kann anhand der unterschiedlichen Phasen des Tretzyklus sehr gut veranschaulicht werden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 187).

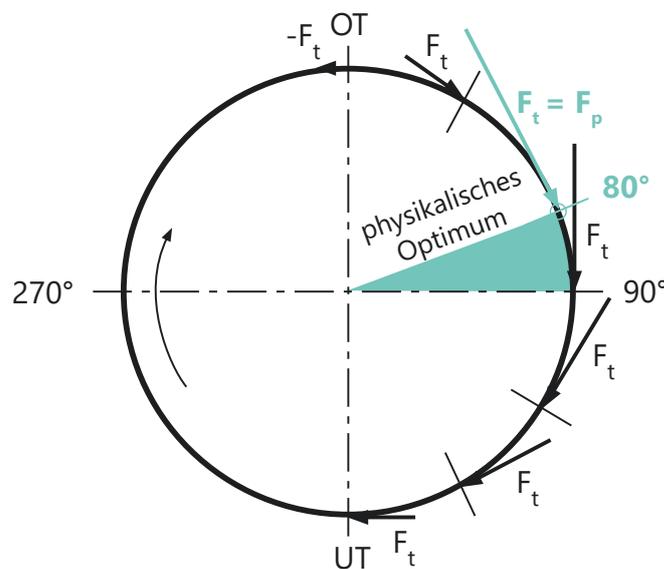


Abb. 88: Tangentialer Kraftanteil beim Pedalieren (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 187)

Da nun ein Überblick über die Kräfte und Widerstände am Fahrrad und die Kräfte und Drehmomente am Pedal erfolgte, folgen nun Arbeit und Leistung, welche für die Powermetersysteme von wichtiger Bedeutung sind.

## 8.2 Arbeit und Leistung

Unter Arbeit versteht man in der Physik ausschließlich die körperliche Arbeit. Die Arbeit beschreibt einen Vorgang, bei dem man sich körperlich bewegt, sprich Kniebeugen macht, Rad fährt, etc. Diese Arbeit ist von der Kraft  $F$  und dem Weg  $d$  abhängig. Die Arbeit ist daher das Ergebnis einer von außen einwirkenden Kraft, die ein Objekt über eine Distanz bewegt. Beispielsweise das auf und ab bewegen der Beine während des Radfahrens. Daher kann gesagt werden, dass die Arbeit "W" (engl. work) gleich Kraft mal Distanz ist. Die Kraft wird mit „F“ (engl. force) und dem Weg mit „d“ (engl. distance) bezeichnet. Die Formel für die Arbeit lautet daher (vgl. Friel, J., 2013, S. 30-31):

$$W = F \cdot d$$

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$$

In der Physik versteht man unter Leistung das Verhältnis von Arbeit und Zeit, oder einfacher gesagt, wie viel Arbeit ich in welcher Zeit erbringe. Die Leistung als physikalische Größe bezeichnet daher die in einer Zeitspanne umgesetzte Energie bzw. erbrachte Arbeit. Die Einheit der Leistung ist Nm/s. Jedoch schreibt man statt 1 Nm/s, 1 Watt. Die Leistung wird daher in der Regel mit der SI-Einheit Watt angegeben und mit dem Buchstaben  $P$  beschrieben.

Die Einheit der Leistung wurde nach dem Erfinder James Watt (1736-1819) benannt. Dieser entdeckte 1765, wie die Dampfmaschine mehr Leistung und Effizienz bringt und somit die industrielle Revolution im späten 18. und frühen 19. Jahrhunderts ermöglichte. Die „Wattzahlen“ zeigen somit an, wie viel Energie man während einer Zeitspanne bei einer Radfahrt aufbringen muss.

Das Verhältnis von Leistung, Arbeit und Zeit wird mit untenstehender Formel beschrieben. „P“ (engl. power) steht dabei für die Leistung, „W“ (engl. work) für die Arbeit und „t“ (engl. time) steht für die Zeit (vgl. Friel, J., 2013, S. 30-32).

$$P = W / t$$

$$\text{Leistung} = \text{Arbeit} / \text{Zeit}$$

### 8.2.1 Berechnung der Leistung

Um die Leistung aus Arbeit und Zeit berechnen zu können, ersetzt man nun in der zweiten Formel ( $P=W/t$ ) die Arbeit durch die erste Formel Kraft mal Distanz ( $F \times d$ ). Daraus ergibt sich nun folgende Darstellung der Leistungsformel:

$$P = F \cdot d / t$$

Dies heißt daher, dass die Leistung aus Kraft mal Distanz geteilt durch die Zeit, in der dieser Vorgang verrichtet wird, resultiert. Anhand des Beispiels Fahrradfahren kann dies einfach erklärt werden: Tritt man einen Berg mit einer gewissen Beinkraft in einer bestimmten Zeit hoch, resultiert daraus der erzeugte Leistungswert. Fährt man nun diesen Berg mit einem schwereren Gang hoch, sprich mit mehr Beinkraft, jedoch auch die idente Zeit, hat man somit den Leistungswert erhöht. Es ist somit zu einer Leistungssteigerung gekommen. Die Leistung ist daher immer ein Zusammenspiel aus Kraft, Distanz und Zeit.

Um das Ganze noch etwas einfacher darzustellen, kann jedoch die Distanz und die Zeit durch die Geschwindigkeit „v“ ersetzt werden. Da Geschwindigkeit gleich Distanz durch Zeit ist, kann dies in der Formel eingesetzt werden. Daraus resultiert, die allgemein bekannte Formel, Leistung gleich Kraft mal Geschwindigkeit (vgl. Friel, J., 2013, S. 31-32).

$$P = F \cdot v$$

**Leistung = Kraft · Geschwindigkeit**

## 8.2.2 Leistungsberechnung beim Radfahren

Auch im Radsport sind Kraft und Geschwindigkeit die relevanten Faktoren, um die Leistung zu berechnen. Das Treten beim Radfahren erfordert eine bestimmte Pedalkraft „F“, welche größer wird, je stärker in die Pedale getreten wird. Da es sich beim Fahrrad jedoch nicht um eine lineare, sondern um eine kreisförmige Bewegung handelt, wird die Kraft als Drehmoment beschrieben. Die Geschwindigkeit entspricht beim Radfahren der Winkelgeschwindigkeit oder der Trittfrequenz in „Umdrehungen pro Minute“. Mit steigender Trittfrequenz steigt auch die Leistung potenziell an, vorausgesetzt man bleibt im selben Gang. Die allgemeine Formel für die Leistung (Kraft x Geschwindigkeit) wird daher durch die beiden Parameter Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit ersetzt. Die Leistungsberechnung aller gängigen Systeme am Markt basiert auf dieser Berechnungsmethode (vgl. Stages Cycling, 2021).

Für die Leistungsberechnung beim Radfahren wird daher folgende Formel verwendet:

$$P_{\text{rot}} = M \cdot \omega$$

**Leistung = Drehmoment · Winkelgeschw.**

Dabei setzt sich das Drehmoment aus der Tangentialkraft  $F_t$  und der Drehlänge zusammen. Die Länge ist abhängig von der Position der Kraftmessung und beschreibt die Distanz zwischen Kurbeldrehpunkt und Messpunkt der Pedalkraft (Kurbelarm, Pedal, etc.) (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 34-35).

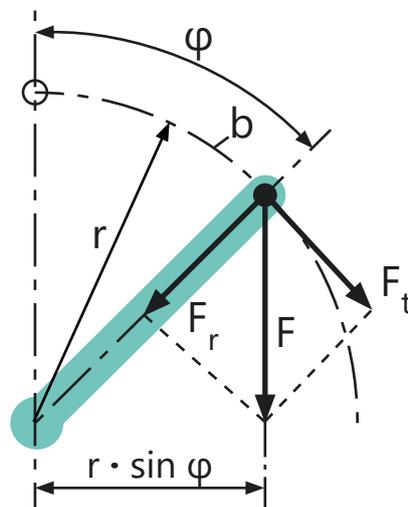


Abb. 89: Kräfte und Momente am Pedal (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 35)

Daher wird das Drehmoment wie folgt berechnet:

**Drehmoment = Kraft · Länge**

$$\mathbf{M = F_t \cdot r}$$

$$\mathbf{M = F \cdot r \cdot \sin \varphi}$$

Die Winkelgeschwindigkeit kann über die Kreiszahl Pi und der Trittfrequenz, sprich den Umdrehungen pro Minute ermittelt werden. Die Trittfrequenz ist jene Zeit, die die Kurbel benötigt, um eine ganze Umdrehung zu absolvieren.

Die Winkelgeschwindigkeit oder auch Drehgeschwindigkeit genannt, gibt an, wie schnell sich ein Winkel mit der Zeit um eine Achse ändert. Die Einheit dafür ist rad/Sekunde (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 35).

Die Formel für die Winkelgeschwindigkeit lautet wie folgt:

**Winkelgeschwindigkeit =  $2\pi$  · Drehzahl**

$$\mathbf{\omega = 2\pi \cdot n}$$

Da nun das Drehmoment und die Winkelgeschwindigkeit bekannt sind kann daraus nun die Leistung oder genauer gesagt die "Drehleistung" berechnet werden. Die Formel lautet dafür (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 35):

$$\mathbf{P_{rot} = 2\pi \cdot M \cdot n/60}$$

*Kleines Rechenbeispiel:*

Ein Radfahrer kurbelt mit  $n= 90$  Umdrehungen pro Minute einen Anstieg hoch. Dabei wird ein Drehmoment von 32 Newtonmeter auf die Pedalachse übertragen. Wie viel Watt leistet der Radfahrer dabei?

Setzt man diese Werte in obige Formel, dann sieht das wie folgt aus:

$$\mathbf{P_{rot} = 2 \cdot 3,14 \cdot 32 \cdot 90/60}$$

$$\mathbf{P_{rot} \sim 301 \text{ Watt}}$$

Aktuell tritt der Radfahrer somit mit 301 Watt in die Pedale.

Würde der Radfahrer nun seine Trittfrequenz auf  $n = 75$  Umdrehungen pro Minute verringern hätte dies einen Anstieg des Drehmoments zur Folge, beispielsweise um acht Newtonmeter auf 40 Newtonmeter. Vorausgesetzt er bleibt im selben Gang. Setzt man diese Werte wieder in die Formel ein, leistet er jetzt eine Leistung von 314 Watt. Es ist somit zu einer Leistungssteigerung gekommen.

Das Rechenbeispiel zeigt, dass eine langsamere Drehzahl nicht gleichzeitig eine Verringerung der Wattzahl bedeutet. Daher immer mit möglichst hoher Trittfrequenz treten!

Die beste Berechnung bringt nichts, wenn die Tretbewegung falsch ausgeführt wird. Deshalb liefern Powermeter, je sauberer der Tritt vollführt wird auch aussagekräftigere Wattwerte. Im nächsten Punkt wird daher auf den Tretablauf und die Sitzposition eingegangen und beschrieben welche Nachteile sich ergeben, wenn der Tretzyklus falsch ausgeführt wird.

## 8.3 Tretablauf und Sitzposition

Tretablauf und Sitzposition sind stark voneinander abhängig und grundlegend dafür verantwortlich, wie Effizient in die Pedale getreten wird. Daher wird ein Bikefitting bei jedem Radneukauf empfohlen.

### 8.3.1 Der runde Tritt

Es hilft die beste Berechnung und das beste System nichts, wenn der Tretstil ineffizient ausgeführt wird. Für ein ökonomisches Radfahren ausschlaggebend ist daher das flüssige Pedalieren mit gleichmäßigem Krafteinsatz, dem sogenannten „Runden Tritt“. Um die Pedalkräfte ideal zu übertragen, ist neben der korrekten Sitzposition auch die korrekte Pedalstellung, für den runden Tritt notwendig. Die korrekte Pedalstellung (Vorderfußwinkel) ist dabei primär abhängig von der Sitzhöhe und der Sattelposition. Ist die Sitzhöhe zu hoch eingestellt, ist der Kniewinkel und der Vorderfußwinkel im unteren Totpunkt zu groß. Dadurch wird das flüssige Pedalieren behindert und eine ideale Kraftübertragung während des Tretzyklus ist nicht möglich. Selbiges gilt bei einer zu niedrigen Sitzposition (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 185).

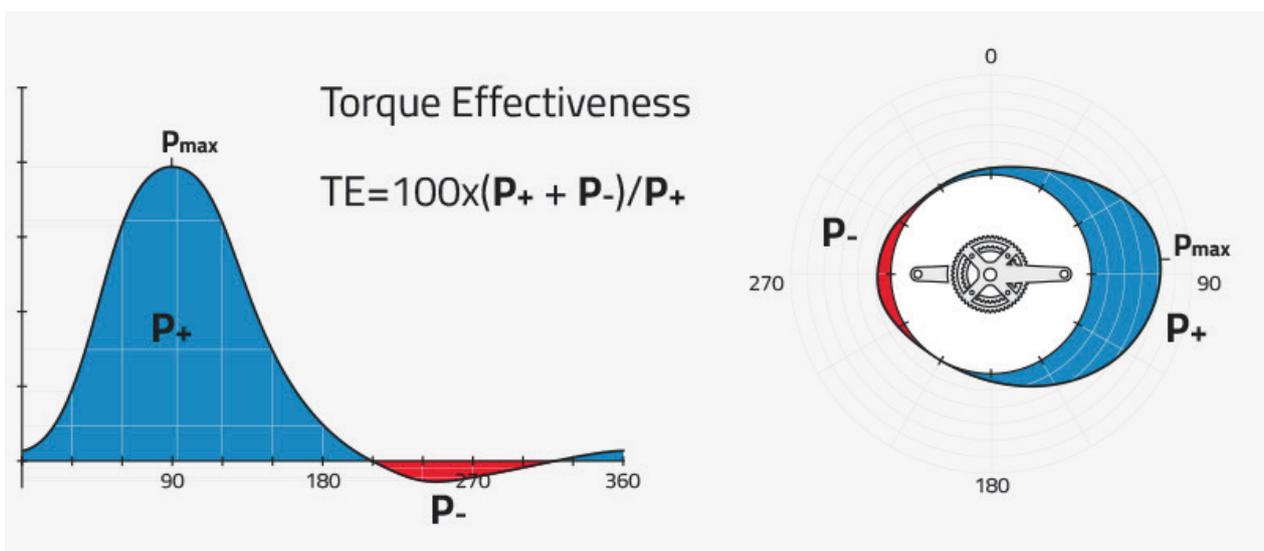


Abb. 90: Drehmomenterkennung beim Favero Pedal

### 8.3.1.1 Phasen des Tretzyklus

Um den Bewegungsablauf beim Treten besser erläutern zu können, kann der Tretzyklus in vier Phasen unterteilt werden. Jeder Abschnitt vollführt einen eigenen Bewegungsablauf, bei dem unterschiedliche Muskeln zum Einsatz kommen. Es wird in die Schub-, Druck-, Zug- und Hubphase unterschieden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 189-190).

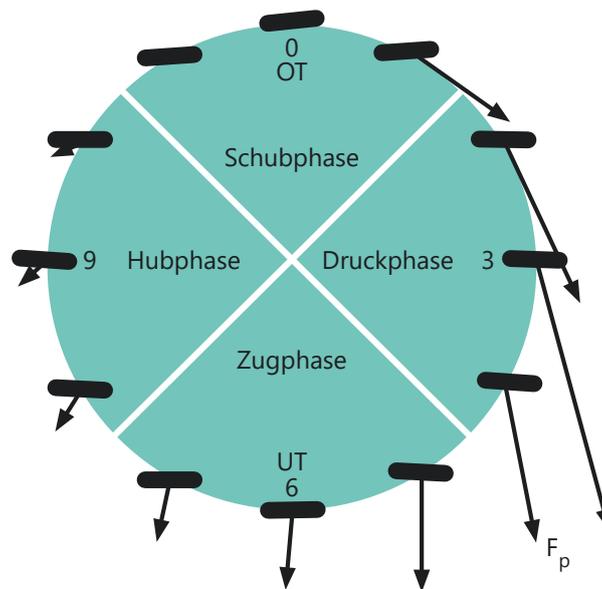


Abb. 91: Phasen des Tretzyklus (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 189)

*"Die Schub- und die Hubphase sind die Schwachpunkte im Tretzyklus. Um zu einem harmonischen flüssigen (runden) Tritt zu kommen, sollten die Übergänge von der Schub- zur Druckphase bzw. von der Druck- zur Zugphase fließend erfolgen (Gressmann, M., 2017, S. 190)."*

## **1. Schubphase**

Die Schubphase ist die erste Phase und liegt zwischen 315° und 45° im oberen Totpunkt Bereich. Im oberen Bereich wird das Pedal mit einer leichten Schub Bewegung des Fußes nach vorne geschoben. Durch die feste Verbindung zwischen Fuß und Pedal, aufgrund des Klickpedales, können hier bereits nennenswerte Tangentialkräfte ausgeübt werden. Anschließend zur Schubphase wird die Druckphase fließend eingeleitet (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 189).

## **2. Druckphase**

In dieser Phase entstehen die größten vortriebswirksamen Kräfte. Durch das Hinunterdrücken des Pedals entstehen so weitgehend Tangentialkräfte, die das Drehmoment über die gesamte Druckphase konstant hochhalten (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 190).

## **3. Zugphase**

In der Zugphase gleitet der Fuß mit geringem Krafteinsatz nach hinten und durchläuft den unteren Totpunkt mit einer leichten Zugbewegung. Wird hier der Fuß aktiv nach hinten gezogen können auch in diesem Bereich merkbare Tangentialkräfte eingeleitet werden (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 190).

## **4. Hubphase**

Im Bereich zwischen 225° und 315° ist die Kraftwirkung auf das Pedal am geringsten. Es müssten hier erhebliche Kräfte aufgewendet werden, um das Bein entgegen der Schwerkraft hochzuheben. Da sich das andere Bein gerade in der Druckphase befindet könnte hier sogar ein negatives Moment auftreten. Sehr gute Fahrer sind in der Lage in dieser Phase das Bein leicht nach oben zu ziehen, jedoch tritt auch dann kaum ein positives Drehmoment auf (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 190).

### 8.3.1.2 prozentuale Verteilung der Vortriebskräfte

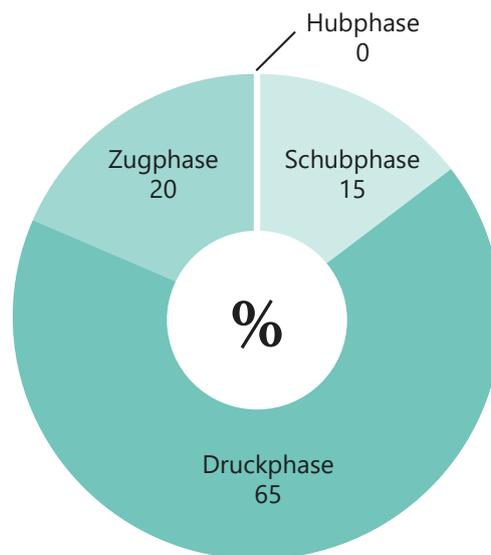


Abb. 92: geschätzter Prozentanteil an Vortriebskräften (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 191)

Die Grafik zeigt die prozentuale Verteilung der Vortriebskraft in den einzelnen Phasen des Tretzyklus. Das theoretische Ideal wäre 25 Prozent in jeder der vier Phasen, dies ist praktisch jedoch unerreichbar. Geschätzt werden 65 Prozent der Vortriebskraft in der Druckphase erzeugt und lediglich 20 Prozent in der Zugphase und 15 Prozent in der Schubphase. In der Hubphase werden sogar in der Regel gar keine Vortriebskräfte erzeugt. Die Schub- und Hubphase sind daher die Schwachpunkte im Tretzyklus. Um dennoch einen runden Tritt zu bekommen, sollten die Übergänge von der Schub- zur Druckphase bzw. von der Druck- zur Zugphase trotzdem möglichst fließend erfolgen (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 191).

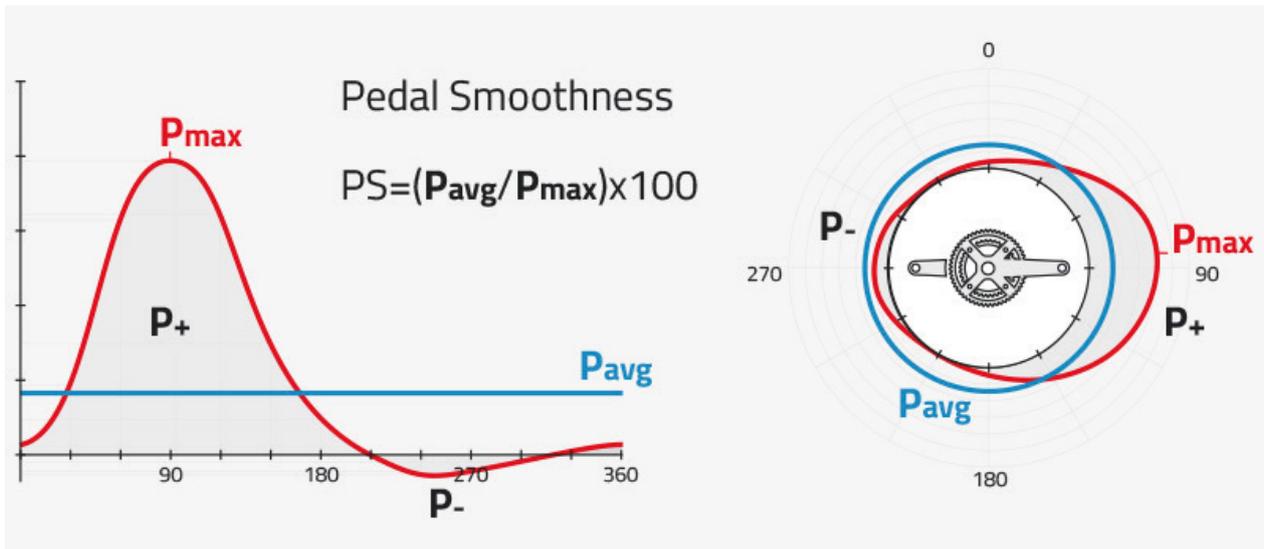


Abb. 93: Pedalglätte-Funktion beim Favero Pedal

Das Powermeterpedal von Favero ist in der Lage über die Pedalglätte-Funktion zu erkennen, in welchem Bereich des Tretzyklus die meiste Kraft erzeugt wird, bzw. wie sich diese verteilt. In Prozent wird angegeben, wie gleichmäßig sich die Kraft bei einer vollen Umdrehung des Pedalhubs, verteilt. Ein Wert von 100 Prozent bedeutet, dass die Leistung während einer Umdrehung konstant ist und somit der runde Tritt perfekt ausgeführt wird. Die Pedalglätte wird ermittelt, indem die durchschnittliche Leistung mit der maximalen Leistung, während einer 360°-Drehung des Pedals gemessen und korreliert wird. Das einseitig messende System Assioma Uno gibt den Pedalglätte-Wert für das linke Bein an, während das beidseitig messende System Assioma Duo die Werte getrennt für das linke und rechte Bein liefert (vgl. Favero Electronics, 2022b).

### 8.3.2 Sitzposition

Um die im vorigen Punkt beschriebenen Druck-, Zug-, Hub- und Schubkräfte ideal über die Großzehenballen auf das Pedal bringen zu können, ist die korrekte Sitzposition essenziell. Die Sitzposition setzt sich hauptsächlich aus den beiden Parametern, Sitzhöhe und Sattelposition, zusammen. Durch ein professionelles Bikefitting können diese Werte optimal angeglichen werden. Beim Bikefitting werden unzählige Parameter erhoben und teils mit unterschiedlichen Messmethoden gemessen. Untenstehend befindet sich ein Ergebnis eines "3D Motion Capture" Bikefitting für ein Triathlonrad. Diese Grafik veranschaulicht die Komplexität eines professionellen Bikefittings und deren unzähligen Fahrradmaße (vgl. Technische Universität Darmstadt, 2020).

Dies führt dazu, dass das Thema Bikefitting sehr komplex ist und den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Es folgt daher nur ein kleiner Überblick über den Kniewinkel und Vorderfußwinkel.

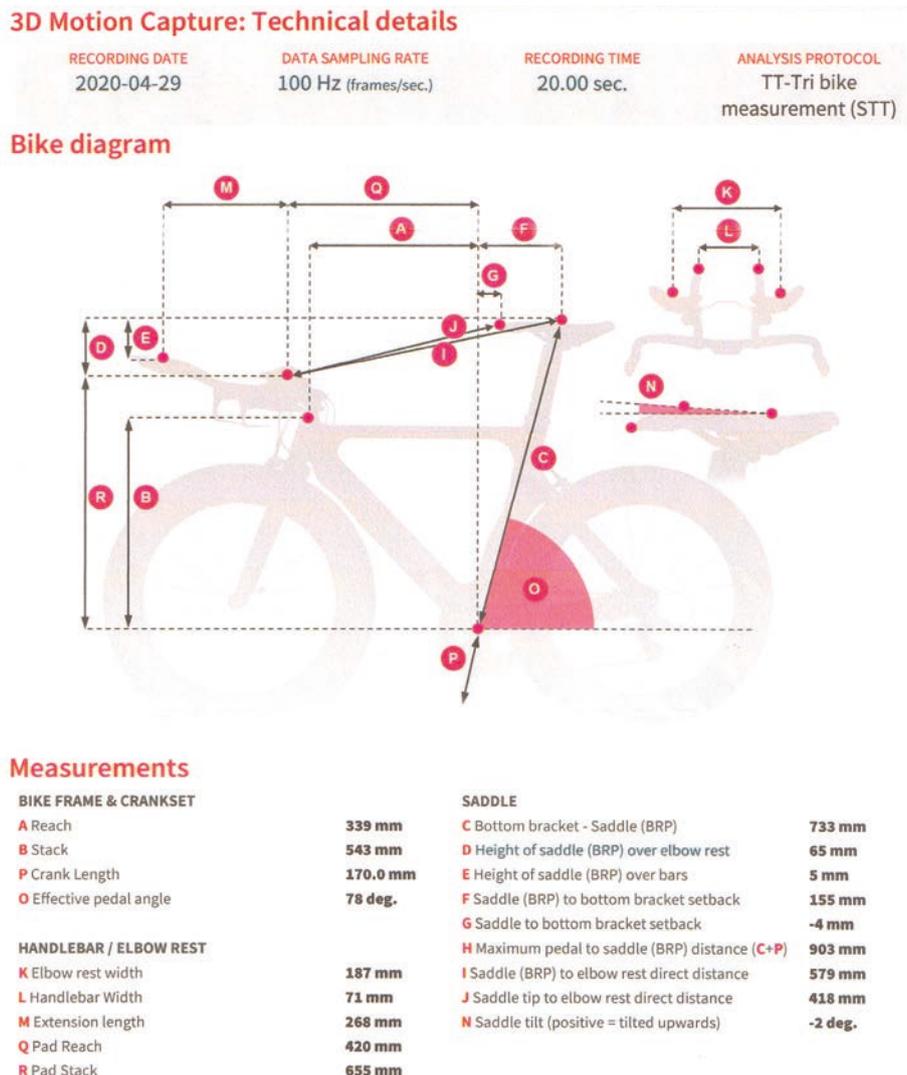


Abb. 94: 3D Motion Capture Bikefitting Triathlonrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## \_ Kniewinkel und Vorderfußwinkel

Es gibt unterschiedliche Methoden, um den Kniewinkel zu bestimmen. Eine gängige Methode den Kniewinkel zu bestimmen ist über die maximale Streckung auf der tiefsten Pedalstellung, also dem unteren Totpunkt.

Auf der folgenden Seite befindet sich eine schematische Darstellung der Sitzposition und des Winkels bei unterschiedlichen Fahrradtypen. Idealerweise sollte der Kniewinkel bei dieser Messmethode bei Rennrädern zwischen  $145^\circ$  und  $160^\circ$  liegen. Die Sitzposition zwischen Rennrad und Triathlonrad unterscheiden sich etwas. Auf dem Triathlonrad sitzt man weiter vorne, somit zentraler über der Tretachse. Daraus resultiert bei diesem Rad tendenziell eher ein größerer Kniewinkel als beim konventionellen Rennrad.

Der Vorderfußwinkel ist stark von der Sitzhöhe und dem Bewegungsablauf des Vorfußes beim Pedalieren abhängig. Je sauberer man den runden Tritt vollführt, desto konstanter ist auch der Vorderfußwinkel. Es ist daher sehr schwer den optimalen Vorderfußwinkel zu definieren und zu messen. In der Regel sollte dieser jedoch im unteren Totpunkt im Bereich über  $100^\circ$  liegen (vgl. Technische Universität Darmstadt, 2020).

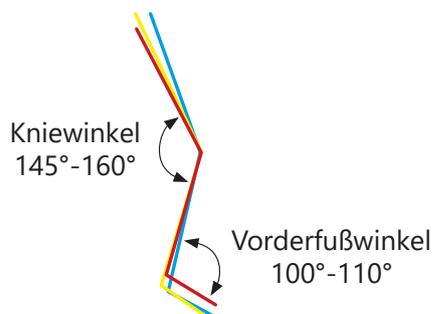
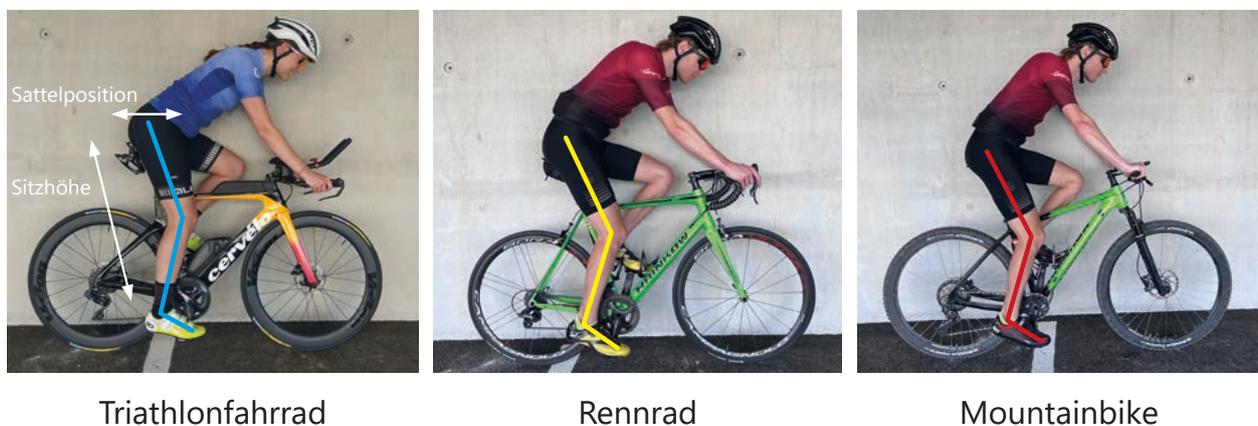


Abb. 95: Kniewinkel und Vorderfußwinkel bei Fahrradtypen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Pedalstellung**

Die Pedalstellung ist primär das Ergebnis der Sitzposition und der Ausführung des runden Tritts und beschreibt den Vorderfußwinkel in den unterschiedlichen Phasen des Tretzyklus während einer Pedalumdrehung. Die Pedalstellung steht dabei im Zusammenhang zur Sitzhöhe. Ist die Sitzhöhe zu hoch, kann auch die Pedalstellung nicht optimal ausgeführt werden.

Die Fußspitze vollführt eine lockere Auf- und Abbewegung um das Sprunggelenk und liefert dabei einen großen Beitrag zum tangentialen Kraftanteil. In der ersten Phase, der Schubphase sollte die Ferse leicht gesenkt und die Fußspitze leicht angehoben werden. In der Zugphase im unteren Totpunktbereich sollte die Fußspitze hingegen deutlich nach unten gerichtet sein. Ein generelles Pedalieren mit gesenkter Ferse sollte dagegen vermieden werden. Das Bild zeigt die Pedalstellung in den vier unterschiedlichen Tretphasen (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 214).



Abb. 96: Pedalstellung während einer vollen Umdrehung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 214)

Um einen möglichst effizienten Tretstil zu etablieren, ist es daher sehr wichtig den „runden Tritt“ zu forcieren. Ist die Sitzhöhe korrekt eingestellt und die Pedalstellung den vier Tretphasen angepasst, forciert man die Tangentialkräfte, die für den notwendigen Vortrieb von Bedeutung sind (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 214).

## 8.4 Fazit

Das Thema Sitzposition, Pedalstellung etc. ist sehr komplex und schwer abzubilden. Ohne professionellem Bikefitting mittels Motion-Capture-Messsystem ist es daher nur sehr schwer möglich, die optimalen Winkel messen zu können. Moderne Pedalpowermeter sind bereits in der Lage, den eigenen Tretstil zu analysieren und helfen dabei, möglichst flüssig und rund zu treten. Kurbelpowermeter können diesen Mehrwert aufgrund der anderen Messposition nicht bieten. Es ist schwer die optimale Sitzhöhe anhand des Bewegungsablaufs zu bestimmen, da diese von unzähligen anderen Faktoren und Maßen abhängig ist und als ganzheitliches System aus Fahrrad und Radfahrer anzusehen ist.

Systeme könnten jedoch in der Lage sein, den Nutzer auf Abweichungen beim Tretzyklus hinzuweisen, um gegebenenfalls kleine Änderungen vorzunehmen oder dadurch den Weg zu einem Bikefitter zu bestreiten.



# **9. Technologische Grundlagen/ Sensorik**

Ein Powermeter muss mit diversen Sensoren ausgestattet sein, um die Leistung ermitteln zu können. In diesem Kapitel folgt ein kleiner Einblick in die Sensorik. Dabei werden Sensoren, welche bereits bei Powermetern zum Einsatz kommen, aber auch alternative Messsensoren, aufgezeigt.

## 9.1 Kraftsensoren

Kraftsensoren werden für das Messen einer Kraft, Last oder eines Gewichtes verwendet. Die am häufigsten verwendeten Sensoren basieren auf piezoelektrischen Quarzkristallen oder Dehnungsmessstreifen-Sensorelementen (vgl. Wilson, J. S., 2005, S. 255). Bei den Powermetern ist der Kraftsensor eines der wichtigsten Bauteile und für die Bereitstellung der Messdaten verantwortlich, welche zur Berechnung der Kraft bzw. des Drehmomentes, genutzt werden.

### 9.1.1 Folien-Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen sind elektrische Leiter, die schlangenförmig auf einer Folie aufgebracht und für präzise Messungen ausgelegt sind. Die Dehnungsmessstreifen, kurz DMS genannt, müssen mit einem Bauteil fest verklebt werden und können dadurch jegliche dehnende und stauchende Verformungen erfassen. Wird eine Kraft ausgeübt, kommt es zu einer Längenveränderung der Dehnungsmessstreifen, wodurch eine Widerstandsänderung im elektrischen Leiter auftritt. Dieser Widerstand wird bei Dehnung größer und bei Stauchung kleiner. Folglich, kann daraus die Kraft bestimmt werden.

In der Regel werden vier DMS in einer so genannten Wechselbrückenschaltung (Wheatstone-Brücke) aufgebaut (vgl. Wilson, J. S., 2005, S. 262-263).

Bei fast allen erhältlichen Powermetern sind Dehnungsmessstreifen verbaut, um die Verformung und folglich die Kraft erfassen zu können.

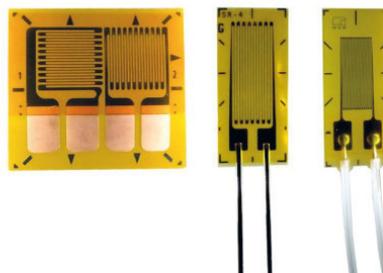


Abb. 97: Folien-DMS

## **\_ Wheatstone-Brücke**

Die Wechselbrückenschaltung fungiert als addierendes und subtrahierendes elektrisches Netzwerk und ermöglicht dadurch eine Kompensation von Temperatureinflüssen, sowie eine Auslöschung von Signalen, hervorgerufen durch Fremdkräfte.

Tritt eine temperaturbedingte Dehnung auf, sehen beide Dehnungsmessstreifen diese mit gleichem Vorzeichen, so dass sich die Effekte in der Wheatstone-Brücke gegenseitig aufheben und zu einer Temperaturkompensation führen (vgl. Wilson, J. S., 2005, S. 263).

### **9.1.2 Piezoelektrischer Sensor**

Die piezoelektrischen Sensoren werden zur Messung von Druck, Kraft und dem Messen von Schockwellen verwendet. Dieser Sensor besteht aus einem piezoelektrischem Kristall, z.B. Quarz die bei Krafteinwirkung eine Ladung abgeben. Diese Quarzscheiben sind zwischen zwei Metall-Platten "eingeklemmt" und geben mehr Ladung ab, je mehr Kraft ausgeübt wird. Bei Belastung durch Zug-, Druck- oder Schubkräfte wird eine elektrische Ladungsverschiebung und dadurch eine elektrische Spannung erzeugt. Durch diese Spannungsänderungen kann die auftretende Kraft ermittelt werden.

Piezoelektrische Sensoren haben den Vorteil, dass sie sehr große Messbereiche abdecken und in einem sehr kleinen Format angefertigt werden können. Großer Nachteil ist, dass sich die Ladungsdifferenz, die zum Messen notwendig ist, nicht beliebig lang aufrecht erhalten lässt. Vor allem, wenn kleine Kräfte über einen längeren Zeitraum gemessen werden, fällt dies ins Gewicht (vgl. Wilson, J. S., 2005, S. 258).



Abb. 98: piezoelektrischer Kraftsensor

### 9.1.3 FSR-Sensor

FSR-Sensoren (Force Sensing Resistor) oder auch Foliendrucksensoren (Film Pressure Sensor) genannt, sind sehr dünne flexible Sensoren, mit denen Druckkräfte erfasst werden können. Wird Kraft auf den FSR-Sensor ausgeübt, ändert sich deren elektrischer Widerstand, wodurch sie in die Gruppe der piezoresistiven Sensoren fallen. Diese Sensoren sind kostengünstig und in einer Vielzahl an Formen und Größen verfügbar, jedoch liefern sie selten genaue Messdaten. Diese Sensoren können die ausgeübte Kraft sehr gut erkennen, jedoch eher nicht exakt wie viel Kraft ausgeübt wird.

Typischerweise bestehen diese Sensoren aus zwei Schichten, einem membranähnlichen flexiblen Substrat, welches mit zwei nicht miteinander verbundenen Hälften einer ineinandergreifenden Schaltung bedruckt ist und einem zweiten, leitfähigem, mit Tinte beschichteten Substrat, an der obersten Schicht. Beide Schichten sind durch einen Abstandshalter getrennt voneinander. Wird kein Druck ausgeübt, bleibt der Stromkreis offen und es kann kein Strom von der einen Hälfte zur Anderen fließen. Wird eine Kraft ausgeübt, kommt das leitfähige Substrat der obersten Schicht, mit dem Substrat der gedruckten Schaltung in Kontakt, wodurch nun Strom von einem zum anderen Draht der gedruckten Schaltung fließen kann. Die Strommenge die dadurch fließen kann, ist abhängig von dem auf dem Sensor ausgeübten Druck. Je mehr Druck, desto mehr leitfähiges Material kommt mit den Drähten der Schaltung in Kontakt, wodurch die elektrische Leistung erhöht wird und die Kraft gemessen werden kann (vgl. Interlink Electronics, 2022).

Dieser Sensortyp wurde beispielsweise bei dem im Fahrradschuh integrierten Powermeter von Luck Shoes verwendet.



Abb. 99: FSR-Sensor

## 9.2 Inertialsensor (IMU-Einheit)

Inertialsensoren werden verwendet, um dreidimensionale Bewegungen in allen Raumrichtungen, bestimmen zu können. Mit dieser sogenannten IMU-Einheit (Inertial Measurement Unit), bestehend aus einer Gruppe von verschiedenen Sensoren, wie Beschleunigungssensor, Gyrosensor und Magnetometer, können die Beschleunigung, die Winkelgeschwindigkeit und die Orientierung des Bauteils, gemessen werden.

Dabei wird in zwei unterschiedliche IMU-Typen unterschieden. Typ 1 umfasst Beschleunigungssensoren und Gyrosensoren. Bei Typ 2 werden noch zusätzlich Magnetometer verbaut. Mit diesen drei unterschiedlichen Sensoren können Messungen auf jeweils einer einzigen Achse durchgeführt werden ( $x, y, z$ ). Um jedoch Informationen für alle drei Achsen zu erhalten, müssen jeweils drei Bauteile jedes Sensors auf der IMU-Einheit verbaut sein, sprich jeweils drei Beschleunigungssensoren, Gyrosensoren und Magnetometer. Diese typische IMU-Einheit des Typ 2 umfasst daher neun Freiheitsgrade. Bestimmte IMU-Einheiten können auch noch zusätzliche Freiheitsgrade über GPS-Sensor, Temperatursensor, Drucksensor, usw. bestimmen.

Großer Vorteil der IMU-Einheit ist es, zu jeder Zeit die genaue Bewegung des Sensors nach zu vollziehen und so immer die aktuelle Position sowie Orientierung, im dreidimensionalen Raum, zu bestimmen. Daher ist es mit dieser Einheit beispielsweise möglich, den genauen Bewegungsablauf des Radschuhs beim Pedalieren, nachzuvollziehen (vgl. Generation Robots, 2021).

Untenstehend folgt eine kurze Beschreibung der drei Sensortypen.

### 9.2.1 Beschleunigungssensor

Der Beschleunigungssensor kann statische und dynamische Kräfte wie Schwerkraft, Bewegungs- oder Schwingungskräfte, erfassen. Die beliebteste Klasse von Beschleunigungssensoren ist jene der piezoelektrischen Beschleunigungssensoren. Dabei ist jede Achse, entlang der die Beschleunigung gemessen werden soll, mit einem federgelagerten Gewicht ausgestattet, welches auf ein piezoelektrisches Element drückt. Dabei kann bestimmt werden, ob eine Geschwindigkeitszunahme oder -abnahme stattfindet (vgl. Generation Robots, 2021).

### 9.2.2 Gyrosensor

Der Gyrosensor, auch Drehsensor genannt, misst nach dem selben Prinzip wie der Beschleunigungssensor, jedoch nicht die absolute Beschleunigung, sondern die Drehgeschwindigkeit eines Körpers um eine Achse, auch Winkelgeschwindigkeit genannt. Die Winkelgeschwindigkeit ist eine Messung der Rotationsgeschwindigkeit und gibt an, wie viel sich ein Gegenstand in einer Sekunde um die gemessene Achse dreht. Die Maßeinheit dafür ist rad/Sekunde, also der Bogenwinkel.

Eine lineare Beschleunigung entlang einer Achse kann hingegen mit dem Gyrosensor nicht gemessen werden (vgl. Generation Robots, 2021).

### 9.2.3 Magnetometer

Magnetometer dienen der Messung von Magnetfeldern und können dabei die Stärke und die Richtung des Magnetfeldes bestimmen. Es gibt verschiedene Arten von Magnetometern die in unterschiedlichen Bereichen verwendet werden und entweder als zweiachsiger oder dreiachsiger Sensor ausgeführt wird. Für die IMU-Einheit werden jedoch in der Regel magnetoinduktive oder magnetoresistive Sensoren, aufgrund der sehr kleinen Bauweise, eingesetzt. Die magnetoresistiven Sensoren messen den elektrischen Widerstand, in einer Nickel-Eisen-Legierung, der bei Änderung des Magnetfeldes variiert. Somit kann jederzeit die Lage des Sensors im Raum ermittelt werden (vgl. Wilson, J. S., 2005, S. 234).

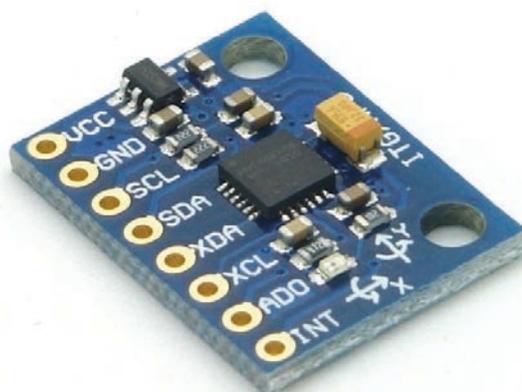


Abb. 100: IMU-Einheit

## 9.3 Funkstandards

Damit der Powermeter und der Fahrradcomputer untereinander kommunizieren können bzw. die Daten anzeigen kann, müssen diese über einen gemeinsamen Funkstandard verfügen. Dabei kommen zwei unterschiedliche Funkstandards zum Einsatz, wobei sich im Fitnessbereich das ANT+ Protokoll in den letzten Jahren stark durchsetzte.

### 9.3.1 ANT+ Protokoll

Die führende Radcomputer Marke Garmin ist Eigentümer des drahtlosen ANT+-Protokolls und machte es erfolgreich zur universell einsetzbaren Technologie. ANT+ ist ein kleiner Computerchip, der in fast allen Powermetern, Radcomputern und Smartphones verbaut ist. Dieser Chip sorgt dafür, dass der Powermeter und der Radcomputer mit einer „gemeinsamen Sprache“ sprechen, um so miteinander kommunizieren zu können. Diese Übertragungstechnologie verbraucht sehr wenig Energie und wird auch bei anderen Fitnessgeräten (Sportuhren, Trackern...) häufig genutzt. Mit der ANT+ Technologie werden Powermeter und Radcomputer zu zwei separaten Einheiten, welche frei miteinander kombiniert werden können. Es ist daher nicht mehr nötig den Radcomputer zu verwenden, den der Powermeter Hersteller anbietet. Man kann daher jeden beliebigen ANT+ kompatiblen Powermeter mit einem ANT+ fähigen Radcomputer koppeln.

Wegen dieser Interoperabilität ist diese Technologie im Radsport so wertvoll und weit verbreitet. Mittlerweile funken alle Powermeter mit dieser Technologie. Daher kann der Kunde sein ideales Wattmesssystem individuell (Powermeter + Radcomputer) zusammenstellen.

Nachteil dieser Übertragungstechnologie ist, dass die Art und Menge der Daten, die empfangen und gesendet werden, eingeschränkt ist. Dies bedeutet, dass die Radcomputer vier sogenannte „Broadcasts“ pro Sekunde empfangen können, wobei drei der vier wiederholt werden. Aufgrund der eingeschränkten Datenübertragung kann dies zu Hindernissen und Einschränkungen bei künftigen Produktweiterentwicklungen führen. Die ANT+-Protokolle werden jedoch laufend aktualisiert wodurch neue Datenkanäle hinzukommen (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 38).

### 9.3.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

Diese Technologie, auch Bluetooth Smart genannt, wird ebenfalls von sehr vielen Herstellern von Powermetern für die Datenübertragung verwendet. BLE nutzt auch wie ANT+ eine „gemeinsame Sprache“ für die Kommunikation zwischen Powermeter und Radcomputer. Da diese Technologie sogar in jedem Smartphone verbaut ist, kann jeder sein Smartphone zum Radcomputer machen. Größter Vorteil der BLE-Technologie ist die höhere Datenübertragungsrate im Vergleich zum ANT+ Standard. Es können mehr und detailliertere Daten übertragen werden. Bei einigen Powermetern werden mit der BLE-Technologie auch die Radial- und Tangentialkräfte zusammen mit den Wattzahlen des linken und rechten Beins übertragen. Dies führt durch die ausreichend hohe Datenrate zu einem detailreicheren Ergebnis. Mit dieser Übertragungstechnologie ist es zudem einfacher, den Powermeter auf eine neueste Firmware zu aktualisieren und damit etwaige Softwarefehler zu beheben und neueste Funktionen zu nutzen (vgl. Allen, H. et al., 2020, S. 38-39).

## 9.4 Fazit

Bei den Kraftsensoren bieten die Dehnungsmessstreifen die derzeit beste Option für mein Forschungsvorhaben, da diese eine extrem flache und kleine Bauform aufweisen, sehr günstig in der Anschaffung sind, zuverlässige Messwerte liefern und rasch in einem Funktionsprototyp umsetzbar sind. Generell kann jedoch gesagt werden, dass es im Bereich der Kraftsensoren unzählige verschiedene Sensoren gibt und in den nächsten Jahren bei den Powermetern eventuell neuartige Sensortypen, zum Erfassen der Kräfte, zum Einsatz kommen werden.

Die IMU-Einheit zum Erfassen der Bewegungsabläufe ist in einem Powermeter unerlässlich und wird auch bis auf weiteres Stand der Technik sein. Ähnlich verhält es sich mit den sehr energieeffizienten Funkprotokollen ANT+ und BLE. Diese werden auch in Zukunft, als Standard im Bereich der Funkprotokolle, genutzt werden.





# **10. Umfrage, Exploration der Zielgruppe mittels Fragebogen**

Um einen besseren Überblick über die „Ist-Situation“ am Powermeter-Markt zu erhalten, habe ich einen Fragebogen gestaltet. Der Fragebogen wurde in Google Forms erstellt und soll einen Einblick geben, wie viele Hobbysportler\*innen ein Wattmesssystem besitzen, welche Verbesserungswünsche es gibt und ob sich die Befragten für ein zwischen Fahrradtypen einfach wechselbares Wattmesssystem interessieren würden. Weiteres wurden allgemeine Informationen erfragt, beispielsweise wie viele Fahrräder eine Person besitzt, wie häufig die Radschuhe gewechselt werden und wie viele Kilometer jährlich am Rad zurückgelegt werden.

Die Zielgruppe der Umfrage sind ambitionierte Hobbysportler\*innen, darauf wurde auch in der Einleitung des Fragebogens hingewiesen. Insgesamt haben 47 Personen an der Umfrage teilgenommen, welche mittels dem Schneeballverfahren generiert wurden. Das Schneeballverfahren ist eine Sampling Strategie, bei der zunächst eine Schlüsselperson ausgewählt wird, welche relevante Erkenntnisse zu dem Thema liefern kann. Diese Person wird dann gebeten, den Fragebogen an ihr bekannte Personen, welche sich für dieses Thema interessieren könnten, weiterzuleiten. Durch dieses Verfahren werden von den Teilnehmer\*innen selbst immer wieder neue potenzielle Teilnehmer\*innen akquiriert. Das Schneeballsystem ist geeignet, um bestehende Netzwerke optimal zu nutzen (vgl. Steinhardt, 2017).

Im ersten Schritt werden die Ergebnisse der einzelnen Fragen dargestellt, um ein Bild über die Gesamtsituation der Teilnehmer\*innen zu erhalten. Anschließend folgt die Detailauswertung einzelner Personen. Dabei werden aus den 47 teilnehmenden Personen sechs ausgewählt (vier männliche und zwei weibliche) und jede Frage im Detail beschrieben, um ein genaues persönliches Ergebnis der Personen zu bekommen. Im Anschluss daran werden vier Personas anhand der gewonnenen Umfragedaten erstellt. Zwei männliche, eine weibliche Person und ein Pärchen.

# Exploration der Zielgruppe

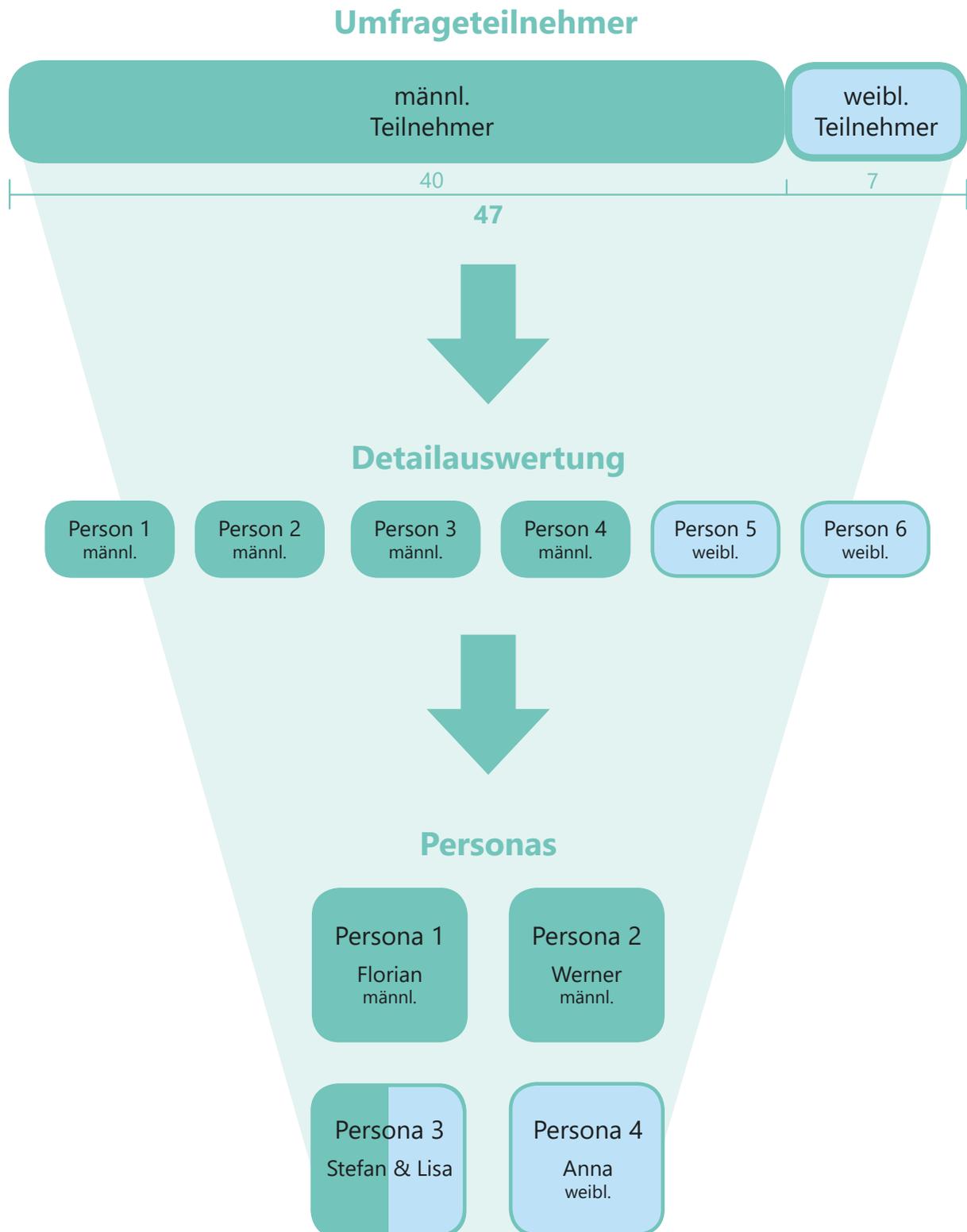


Abb. 101: Exploration der Zielgruppe (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse jeder Frage des Fragebogens dargestellt.

## Frage 1&2: Geschlecht und Alter

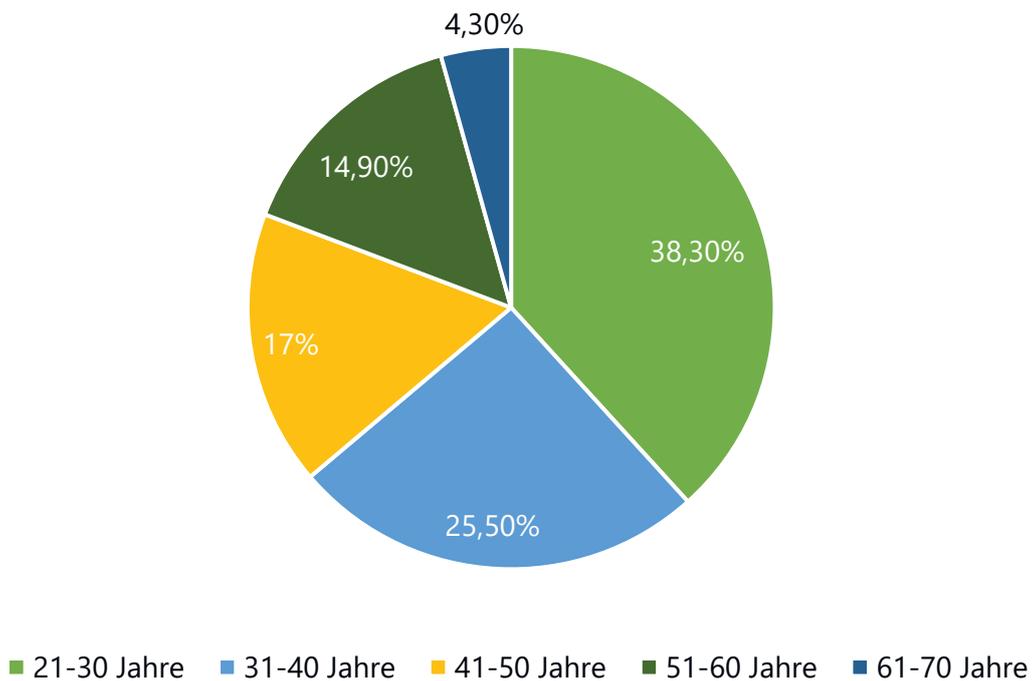


Abb. 102: Frage 2: Alter

Bei der Umfrage waren von den 47 teilnehmenden Personen 85,1 Prozent männliche und 14,9 Prozent weibliche Teilnehmer. Das Alter wurde dabei in vorgegebenen Altersbereichen angegeben. Die größte Altersgruppe mit einem Anteil von ca. 40 Prozent stellte dabei jene der zwischen 21- und 30-Jährigen dar. Die zweitgrößte Altersgruppe mit 25,5 Prozent war jene Gruppe der 31- bis 40-Jährigen. Auf dem dritten Platz folgten jene der 41- bis 50-Jährigen und 51- bis 60-Jährigen, mit einem Anteil von jeweils knapp 15 Prozent. Zwei Personen waren sogar in der Altersgruppe der 61- bis 70-Jährigen.

Die Ergebnisse dieser Umfrage deckt sich dabei annähernd mit den Daten der statistischen Altersverteilung bei Rennradfahrer\*innen des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie aus dem Jahr 2013 (Kapitel 4). Diese besagt, dass die größte Gruppe mit 58 Prozent jene der 25- bis 44-Jährigen darstellt. Fasst man bei meiner Umfrage die zweite und dritte Altersgruppe zusammen, erhält man einen Altersbereich zwischen 21 und 40 Jahren und kommt dabei auf etwa 67 Prozent Anteil.

### Frage 3: Höchste abgeschlossene Schulbildung

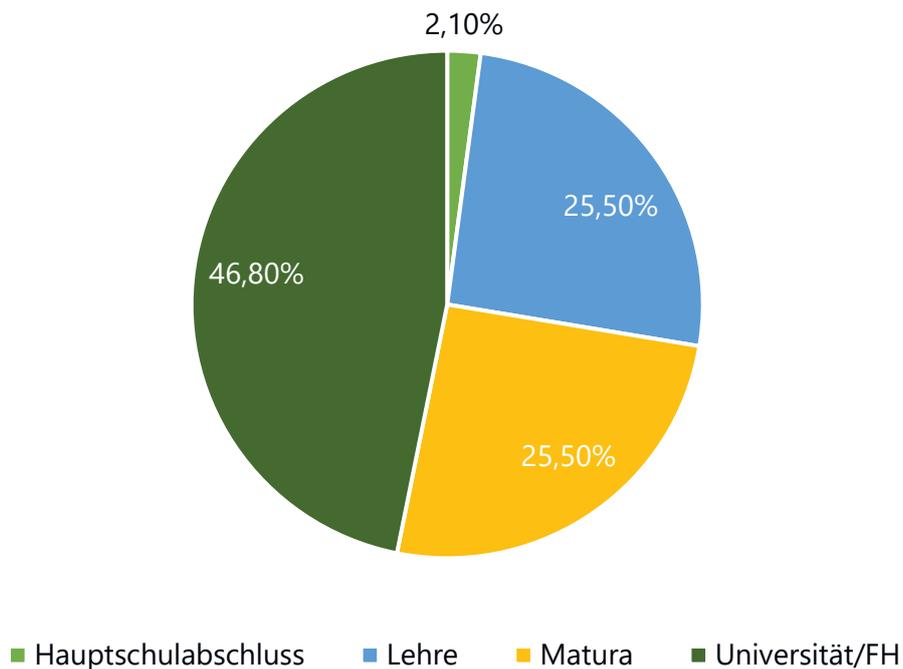


Abb. 103: Frage 3: abgeschlossene Schulbildung

Fast 50 Prozent der Teilnehmer\*innen gaben an, einen Universitäts/FH-Abschluss zu haben. Jeweils 25,5 Prozent der 47 Befragten gaben an, einen Matura- oder einen Lehrabschluss zu besitzen.

Nachdem die allgemeinen Angaben zur Person abgefragt wurde, folgten anschließend einige Fragen zu den Sportgewohnheiten und der Sportausrüstung, speziell in Hinblick auf unterschiedliche Fahrradmodelle. Die erste Frage befasste sich dabei mit dem Thema, welche Ausdauersportarten man am häufigsten betreibt.

#### Frage 4: Welche Ausdauersportarten betreibst du am häufigsten?

(Mehrfachnennung möglich)

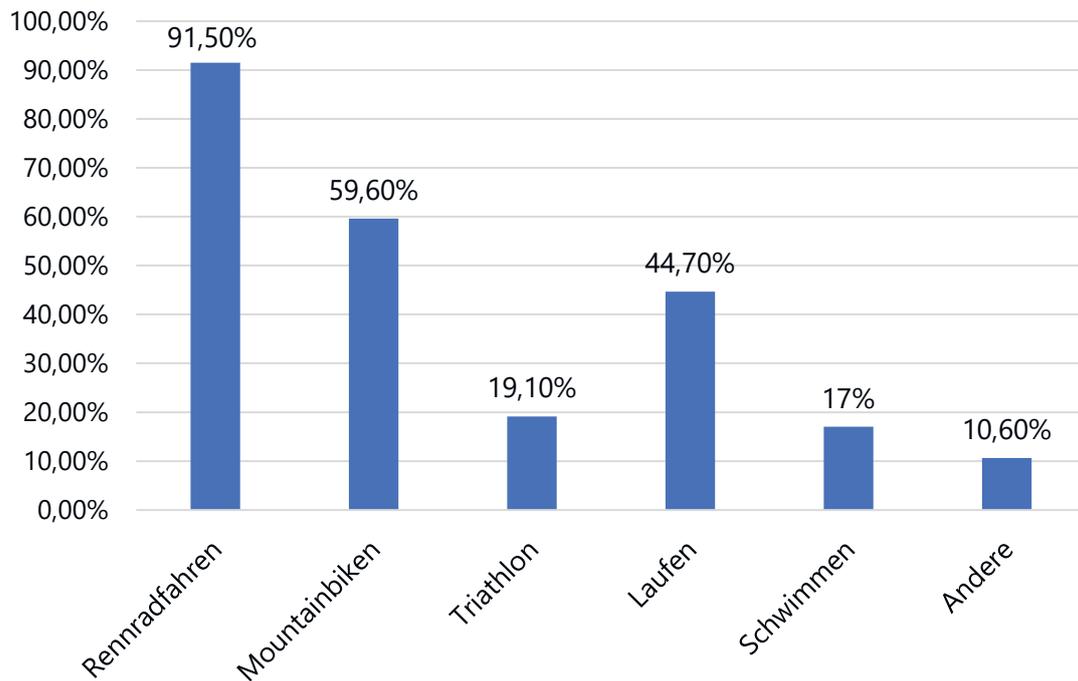


Abb. 104: Frage 4: Ausdauersportarten

43 der 47 befragten Personen gaben an Rennradfahren am häufigsten auszuüben. Wiederum 28 Personen gaben Mountainbiken und 21 Personen Laufen als häufige Ausdauersportart an. Sogar neun Personen gaben auch Triathlon an, das sind immerhin fast 20 Prozent der Befragten. Die beliebteste Sportart stellt damit in meiner Umfrage das Rennradfahren dar.

Bei dieser Frage ist zu erwähnen, dass mehrfach Nennungen möglich waren und die meisten Befragten 2 zwei bis 3 Sportarten auswählten.

### Frage 5: Wie viele Räder besitzt du insgesamt? (inkl. City Bike)

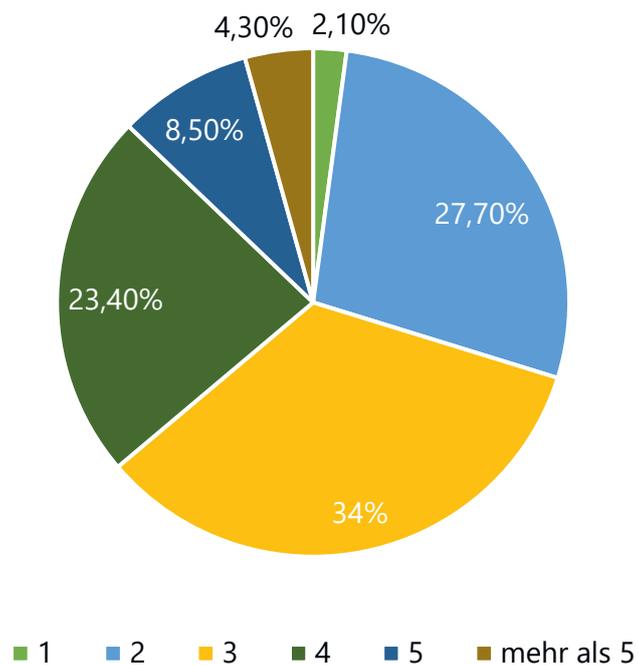


Abb. 105: Frage 5: Fahrräder in Besitz

Um einen Überblick über den Besitz an Fahrrädern zu erhalten, fragte ich, wie viele Fahrräder jede\*r Teilnehmer\*in besitzt. Es zeigte sich, dass die Mehrheit der Befragten (17 Personen), nämlich 36,2 Prozent, drei Fahrräder besitzen. Die zweitgrößte Gruppe ist jene die zwei Fahrräder besitzen, das entspricht 12 Personen, dicht gefolgt von Personen, die sogar vier Fahrräder besitzen (11 Personen). Es zeigt sich daher, dass knapp 62 Prozent der Befragten bereits zwei oder drei Fahrräder besitzen.

In der nächsten Frage wurde daher abgefragt, welche Fahrradmodelle jeder im Besitz hat.

## Frage 6: Welche Art von Rädern besitzt du? (Mehrfachnennung möglich)

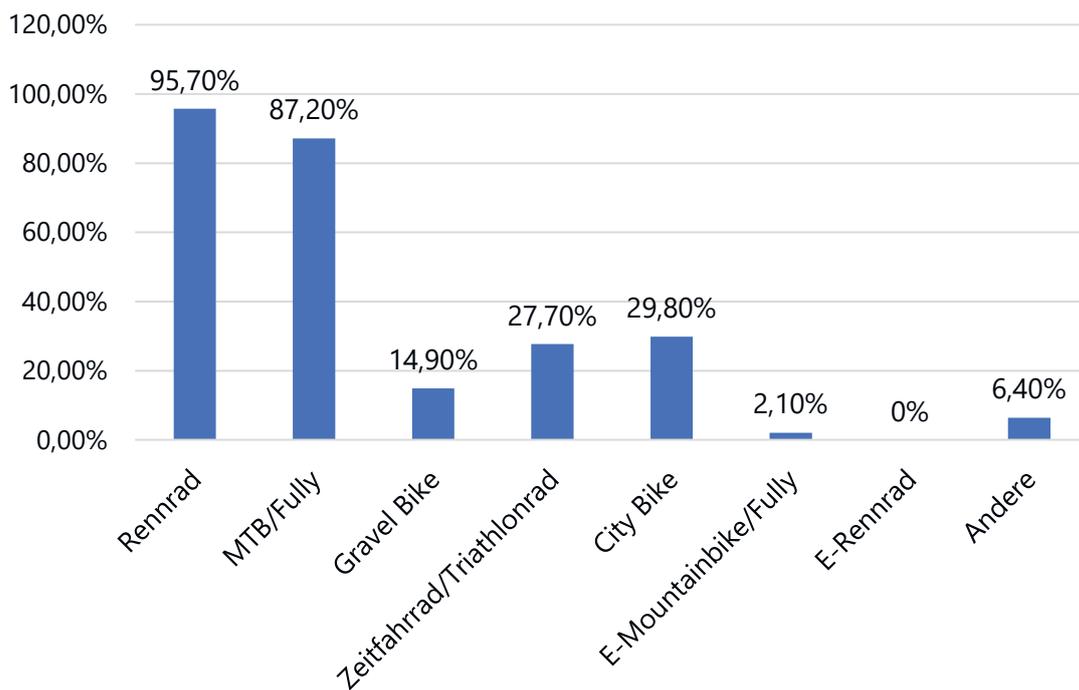


Abb. 106: Frage 6: Fahrradmodelle in Besitz

Es zeigte sich, dass fast alle befragten, nämlich 45, ein Rennrad besitzen. Dies deckt sich mit einer der vorherigen Frage: welche Ausdauersportarten betreibst du am häufigsten? Dort gaben 43 Personen Rennradfahren an. Das heißt zwei Personen besitzen zwar ein Rennrad, es ist jedoch nicht ihr Lieblingssport.

41 Personen gaben zudem an, ein Mountainbike zu besitzen, das sind 87 Prozent. Ein Zeitfahrrad/Triathlonrad besitzen auch 13 der Befragten. Neun gaben jedoch nur an, Triathlon als Sportart auszuüben. Daher besitzen mit großer Wahrscheinlichkeit vier der Befragten ein reines Zeitfahrrad. Zudem besitzen bereits sieben Personen ein Gravel-Bike. Spannend, bei den Befragten besitzt nur eine Person ein E-Fahrrad, dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sehr ambitionierte Sportler\*innen befragt wurden.

### Frage 7: Welches Rad fährst du am häufigsten? (max. 2 auswählen)

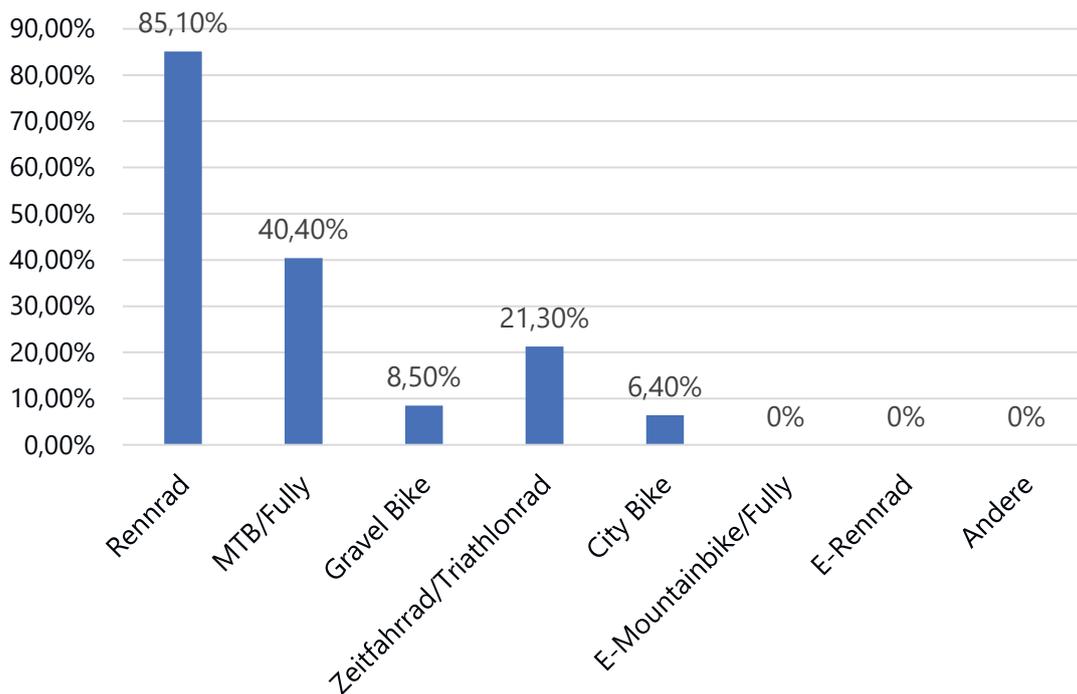


Abb. 107: Frage 7: Fahrradnutzung

Bei der Fahrradnutzung gaben die meisten Personen das Rennrad, mit großem Abstand gefolgt vom Mountainbike, an. Dies deckt sich wieder mit den Ergebnissen der Frage: welche Ausdauersportarten betreibst du am häufigsten?

Da vorwiegend Personen die hauptsächlich den Rennradsport oder auch den Triathlonsport ausüben bei dieser Umfrage abstimmten, fällt das Ergebnis zu diesen Fahrradtypen dementsprechend hoch aus. Hätte man vorwiegend Mountainbiker\*innen befragt, wäre das Ergebnis höchst wahrscheinlich ein anderes, die sind jedoch nicht meine Hauptzielgruppe.

Nachdem die Abfrage der Sportarten und Fahrradmodelle abgeschlossen wurde, folgen nun zwei Fragen wie regelmäßig man pro Woche und wie viele Kilometer man im Jahr, mit dem Fahrrad fährt.

### Frage 8: Wie regelmäßig fährst du mit dem Rad?

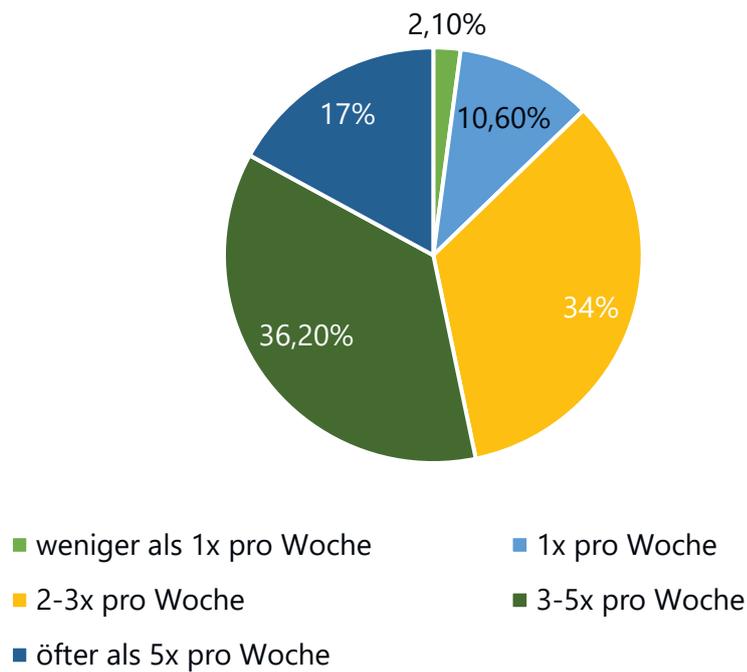


Abb. 108: Frage 8: Häufigkeit der Fahrradnutzung

18 Personen der 47 gaben an drei- bis fünfmal pro Woche mit dem Fahrrad zu fahren. 15 Personen gaben an zwei- bis dreimal pro Woche auf dem Rad unterwegs zu sein. Acht Personen gaben sogar an, öfter als fünfmal das Fahrrad zu nutzen. Entsprechend der befragten Zielgruppe fallen die Ergebnisse dementsprechend hoch aus.

### Frage 9: Wie viele km fährst du ca. pro Jahr mit deinen Rädern?

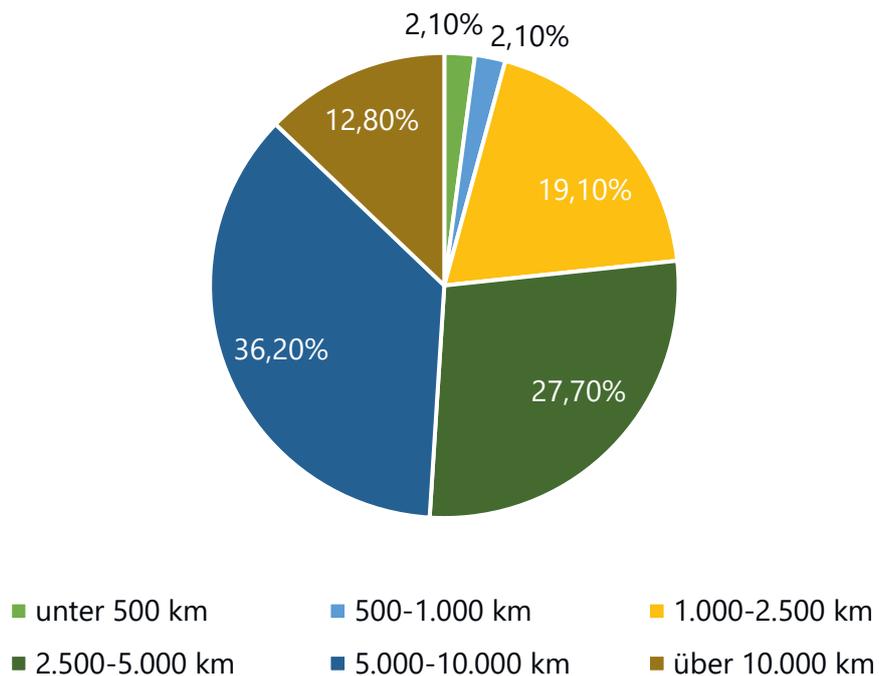


Abb. 109: Frage 9: Fahrradnutzung in Kilometer pro Jahr

Da es sich bei den Befragten um sehr ambitionierte Hobbysportler und auch Leistungssportler handelt, fallen die jährlichen Kilometerleistungen am Fahrrad ebenfalls dementsprechend sehr hoch aus. Die meisten der Befragten geben eine Jahreskilometerleistung zwischen 5.000 und 10.000 Kilometer an. Dies entspricht 17 der 47 befragten Personen oder 36,2 Prozent. Die zweitgrößte Gruppe sind jene Personen die zwischen 2.500 und 5.000 Kilometer im Jahr zurücklegen. Das sind fast 30 Prozent der Befragten. Sechs Personen gaben sogar mehr als 10.000 Kilometer im Jahr an.

## Frage 10: Wie lange fährst du im Durchschnitt mit einem Fahrradschuh bis zur nächsten Neuanschaffung?

Ein weiterer spannender Aspekt ist die durchschnittlichen Nutzungsdauer von Radschuhen. Insbesondere im Bezug auf meine Arbeit kann dabei abgewogen werden, ob die Position für einen verbauten Powermeter in einem Radschuh Sinn machen würde. Die Umfrage kam zu folgendem Ergebnis bezüglich der durchschnittlichen Nutzungsdauer von Radschuhen bis zu einer Neuanschaffung:

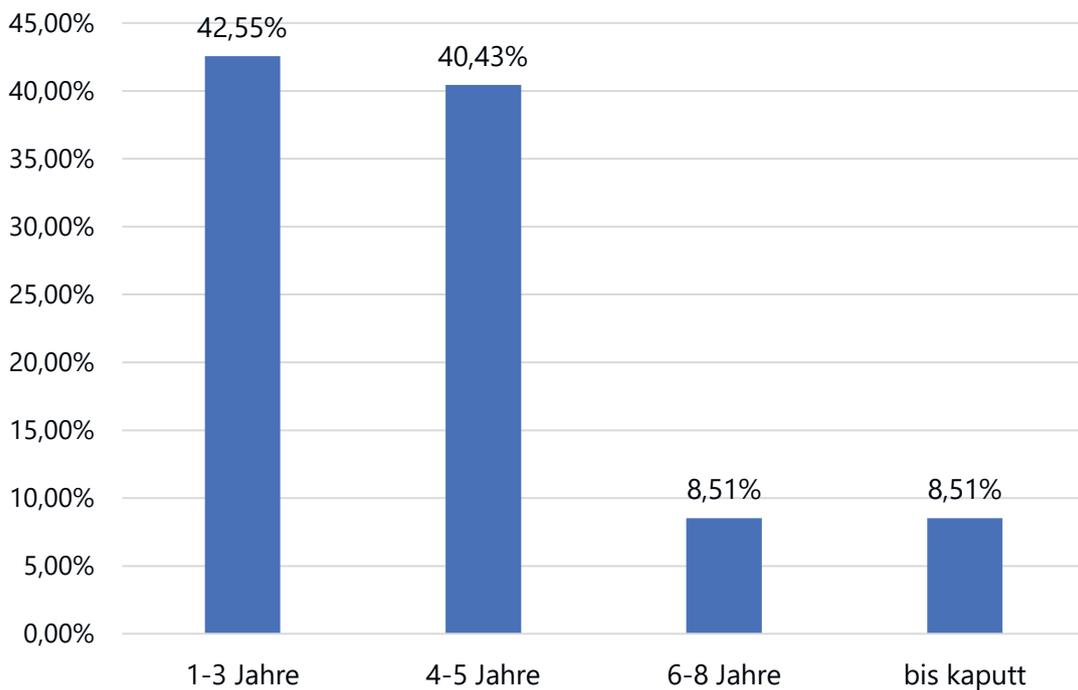


Abb. 110: Frage 10: Fahrradschuh-Nutzung in Jahren

Von den 47 Teilnehmern gaben 20 von ihnen an einen Radschuh zwischen 1 und 3 Jahren zu nutzen. Weitere 19 gaben an, einen Radschuh 4 bis 5 Jahre zu nutzen und vier Personen sogar bis der Radschuh kaputt wird. Es zeigt sich daher, dass das Nutzungsende im Schnitt nach drei Jahren erreicht ist. Ein fest eingebauter Powermeter in einem Radschuh würde daher nur wenig Sinn machen.

Nachdem nun die Parameter bezüglich Fahrradnutzung, Fahrradmodelle, Sportarten, etc. abgeklärt wurden, folgen nun spezifische Fragen zum Thema Leistungswattmessung.

## Frage 11: Weißt du was ein Leistungswattmesssystem für das Fahrrad ist?

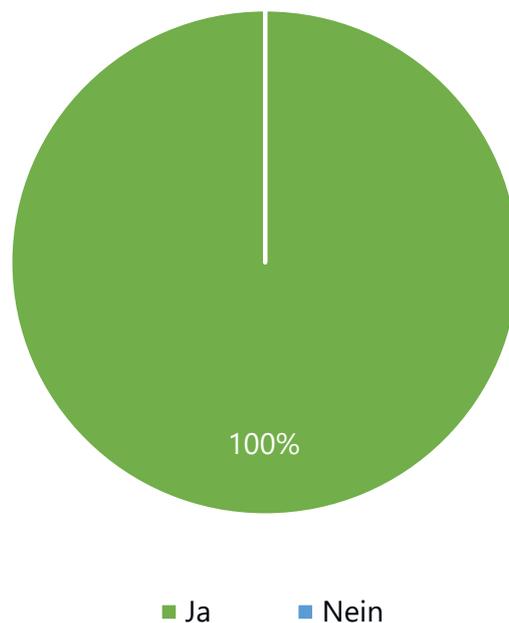


Abb. 111: Frage 11: Kenntnis über Leistungswattmesssystem

Allen 47 teilnehmenden Personen ist grundsätzlich bekannt, was eine Leistungswattmessung am Fahrrad ist. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass es sich bei den befragten Personen um ambitionierte Hobbysportler\*innen handelt, die auch durch Freunde und Sportkolleg\*innen über Powermeter Bescheid wissen oder sogar selbst einen besitzen.

## Frage 12: Ist für dich das Thema Leistungswattmessung interessant?

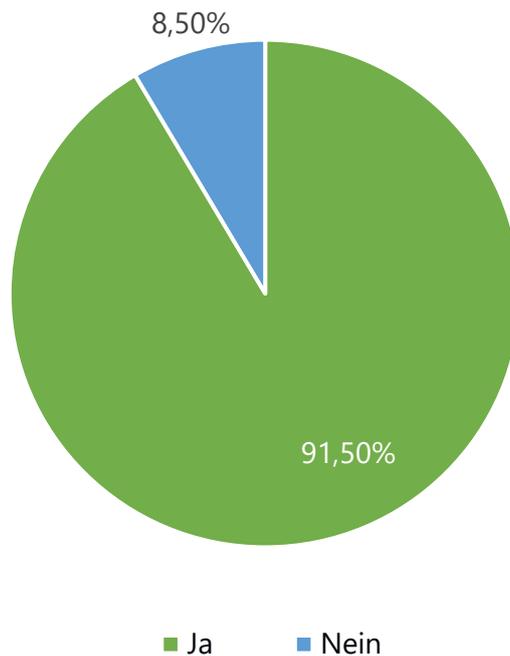


Abb. 112: Frage 12: Interesse an Leistungswattmessung

Bereits für 91,5 Prozent der Befragten, das entspricht 43 Personen, ist das Thema interessant bzw. Gesprächsthema. Lediglich für vier Personen ist das Thema derzeit uninteressant. Interessant zu sehen ist jedoch, dass von den vier Personen, die hier mit nein gestimmt haben, zwei Frauen sind. Daher kann angenommen werden, dass Frauen weniger Interesse an Powermetern aufweisen bzw. nicht so stark daran interessiert sind. Oder besser gesagt noch nicht!

### Frage 13: Besitzt du aktuell ein Leistungswattmesssystem an einem deiner Räder?

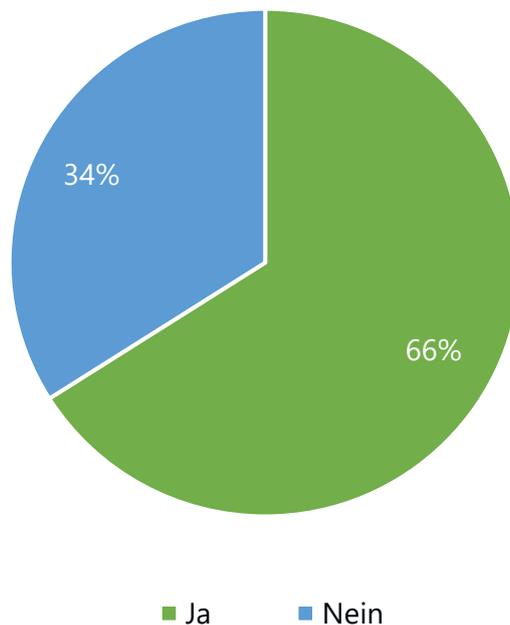


Abb. 113: Frage 13: Leistungswattmessung im Besitz

Bereits 66 Prozent der Befragten besitzen einen Powermeter auf einem oder mehreren Fahrrädern. Dies sind 31 Personen von den 47. 16 Personen besitzen aktuell noch keinen Powermeter. Diese Umfrage zeigt deutlich, wie bedeutend Powermeter heutzutage sind und welchen Stellenwert sie bereits erreicht haben.

Die Detailauswertung zeigte jedoch, dass lediglich eine der sieben Frauen bereits einen Powermeter besitzt. Unter den 16 Personen, die noch keinen Powermeter besitzen, sind demnach 6 Frauen. Es ist daher ein starkes Ungleichgewicht zwischen Männern und Frauen bei dieser Frage zu erkennen.

**Alle Personen, die bei dieser Frage mit Ja geantwortet haben, mussten im Anschluss folgende sieben Fragen zum Thema Leistungswattmessung beantworten. Alle anderen, die mit Nein geantwortet haben, übersprangen die folgenden Fragen zu den Powermetern!**

## **Frage 14: Aus welchem Grund hast du dir ein Leistungswattmesssystem zugelegt?**

Zuerst wurde abgefragt aus welchem Grund sich die Personen einen Powermeter zugelegt haben. Dabei gaben 30 Personen folgende Gründe an:

- Trainingssteuerung
- effizientes Training
- Leistungssteigerung
- aussagekräftiger als Herzfrequenzdaten
- Interesse an den Daten

Die Umfrage zeigt deutlich auf, dass die Hauptgründe für die Anschaffung eines Powermeters primär bei der Verbesserung der eigenen Leistungsfähigkeit liegen. Dies deckt sich auch mit den Vorteilen, die eine Powermeter-Einheit mit sich bringt. Lediglich eine Person gab an „war am gebrauchten Rad montiert“. Alle anderen Personen wissen offensichtlich die Vorteile des effizienteren Trainings damit zu schätzen.

Um einen Überblick zu erhalten, welche Systeme bereits von den Radsportler\*innen in Verwendung sind, wurde dies mit der nächsten Frage abgeklärt. Dies hilft mir dabei um besser einschätzen zu können, welche Systeme bei den Sportler\*innen am populärsten sind.

### Frage 15: Welche Art der Leistungswattmessung besitzt du? (Mehrfachnennung möglich)

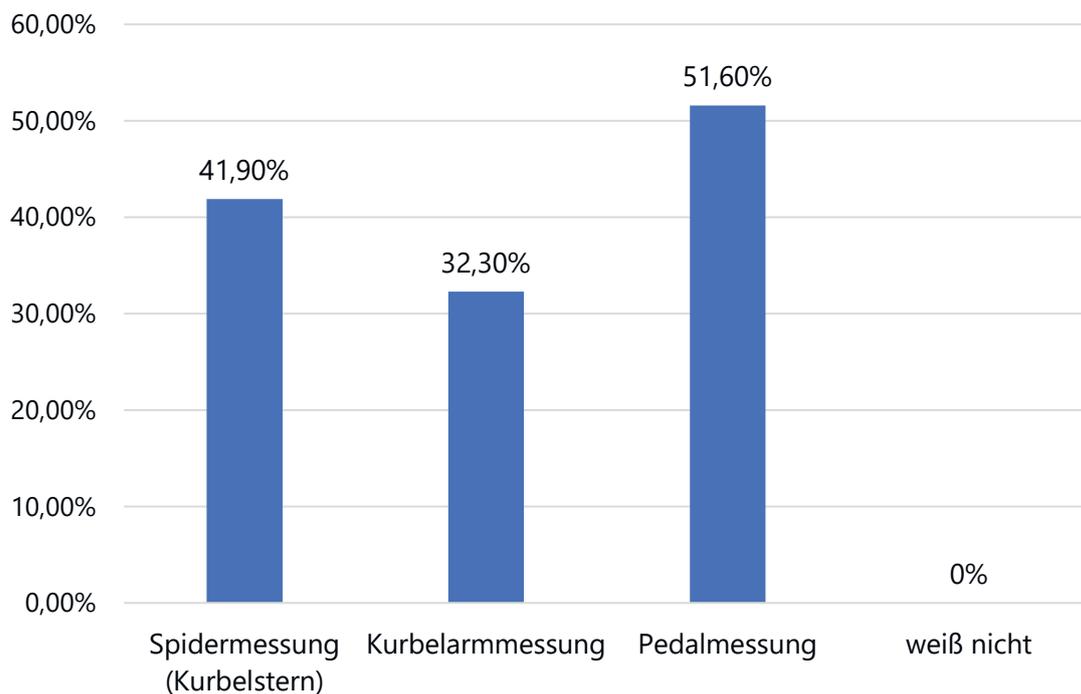


Abb. 114: Frage 15: Arten der Leistungswattmessung

Abgefragt wurden die drei gängigsten Positionen, an denen Powermeter üblicherweise verbaut sind. Mehr als 50 Prozent der 31 Personen besitzen einen Pedalpowermeter. Zirka 40 Prozent besitzen einen Kurbelpowermeter, dies entspricht 13 Personen. Einen Kurbelarm-Powermeter besitzen hingegen nur 10 Personen. Der beliebteste Powermeter ist somit mittlerweile der Pedalpowermeter gefolgt von den Kurbelpowermetern. Dies deckt sich auch mit der Marktrecherche, bei der beide Systeme als größte und beliebteste Gruppe an verfügbaren Powermetern angeführt werden!

Um dies noch genauer einzugrenzen, wurde in der folgenden Frage nach der Marke des verwendeten Systems gefragt, konkret: Von welchem Hersteller ist dein Leistungswattmesssystem?

## Frage 16: Von welchem Hersteller ist dein Leistungswattmesssystem?

Es zeigt sich, dass der Pedalpowermeter von Favero in meiner Stichprobe das beliebteste Powermetersystem ist. Bereits neun Personen von 31 besitzen diesen Powermeter. An zweiter Stelle mit sechs Personen, befindet sich der Kurbelsternpowermeter von Power2max. Auch sehr beliebt die relativ günstige Nachrüstlösung von Stages im Kurbelarm und die Pedale von Garmin und der Kurbelsternpowermeter von Quarq (Sram). Abgeschlagen hingegen der einstige Pionier auf diesem Gebiet, SRM. Diesen besitzen nur zwei Personen in meiner Umfrage.

<b>Hersteller</b>	<b>Position</b>	<b>Abstimmungen</b>
- Favero	Pedal	9
- Power2max	Kurbelstern	6
- Stages	Kurbelarm	6
- Quarq	Kurbelstern	5
- Garmin	Pedal	5
- Rotor	Kurbelarm/Kurbelachse	4
- SRM	Kurbelstern	2
- Infocrank	Kurbelarm	1
- 4iiii	Kurbelarm	1
		<b>39 Abstimmungen</b>
		<b>von 31 Personen</b>

Spannend zu sehen ist, dass 39 Abstimmungen von 31 Personen gezählt wurden. Somit besitzen acht Personen bereits zwei Powermetersysteme auf einen ihrer Fahrräder. Eine Unterscheidung, ob es sich um MTB- oder Rennradpowermeter handelt, kann nicht getroffen werden. Eine Person gab jedoch explizit an, dass es einen Powermeter fürs Rennrad und einen fürs MTB besitzt.

Konkret sieht die Abstimmung wie folgt aus:

<b>Hersteller</b>	<b>Personen</b>
- Favero & Rotor	1 Person
- Power2max & SRM	1 Person
- Power2max & Stages	1 Person
- Stages & 4iiii	1 Person
- Stages & Quarq	1 Person
- Infocrank & Quarq	1 Person
- Garmin & Rotor	1 Person
- Garmin & Stages	1 Person
	<b>8 von 31 Personen</b>

## Frage 17: Wie teuer war dein Leistungswattmesssystem?

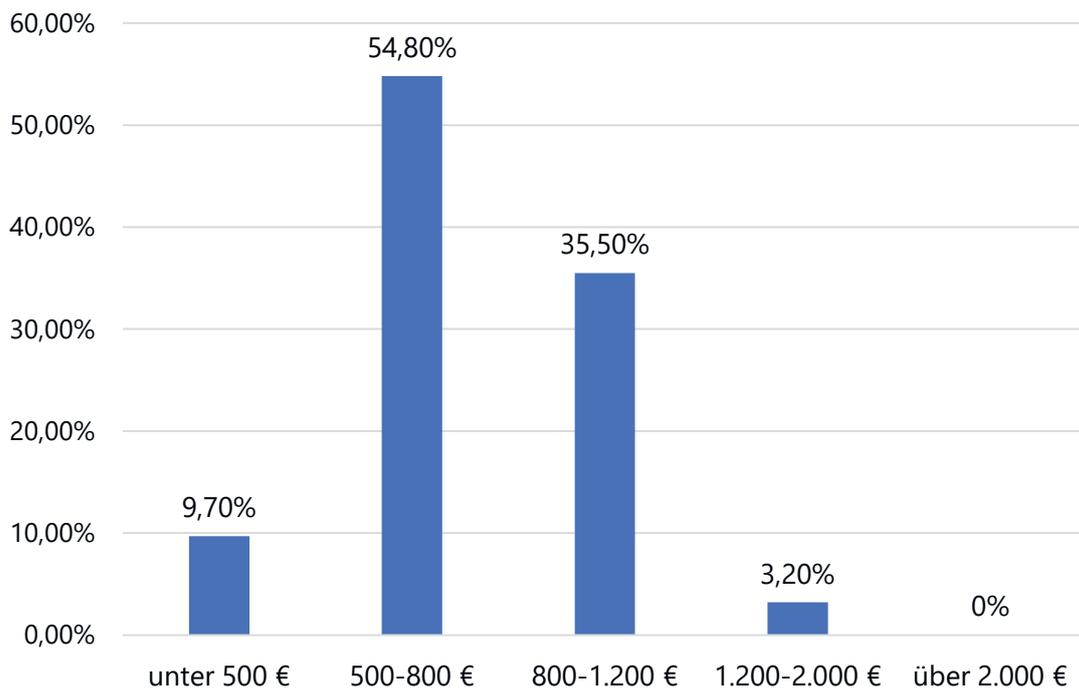


Abb. 115: Frage 17: Preis des Leistungswattmessers

Um eine Einschätzung zu bekommen, wie viel die Nutzer\*innen bereit sind, für aktuelle Powermeter auszugeben, wurde auch der Preis ihrer Systeme erhoben. Mehr als 50 Prozent der Teilnehmer\*innen gaben zwischen 500 und 800 Euro für das System aus. Das entspricht 17 der 31 Personen. 11 Personen gaben zwischen 800 und 1.200 Euro für ihren Powermeter aus. Lediglich drei Personen besitzen einen Powermeter unter 500 Euro. Dies ist dem geringen Angebot geschuldet in diesem niedrigem Preissegment.

Um das Feld der verwendeten Powermeter noch enger eingrenzen zu können, wurde im nächsten Punkt abgefragt, ob das verwendete System nur einseitig oder beidseitig misst.

## Frage 18: Misst dein System beidseitig oder nur auf einer Seite?

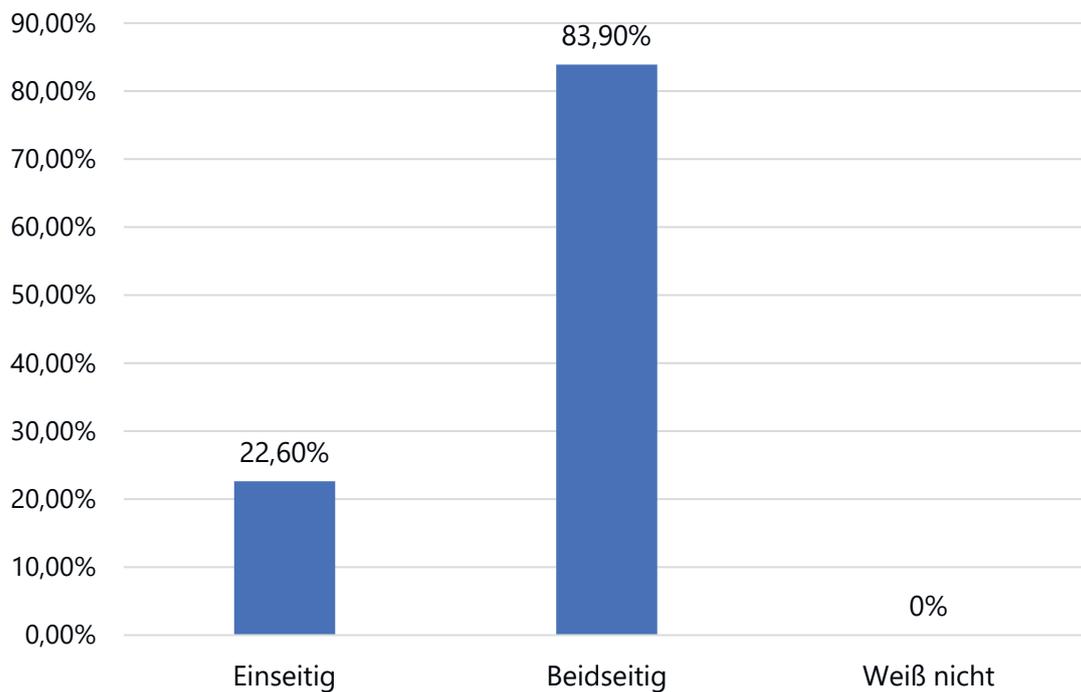


Abb. 116: Frage 18: Einseitiger oder Beidseitiger Leistungswattmesser

Bei dieser Umfrage erfolgte bei „beidseitig“ keine Unterscheidung in beidseitig-getrennte Leistungsmessung oder gemeinsam-beidseitige Leistungsmessung. Da man davon ausgehen muss, dass sich nicht alle Nutzer\*innen dieser Unterscheidung bei den Systemen bewusst sind. Deshalb wurde es in der Abstimmung als beidseitig zusammengefasst. Grundsätzlich besitzen die befragten Personen jedoch mehrheitlich Systeme, die die gesamte Beinkraft bestimmen können. Nur sieben Personen besitzen einen Powermeter, welcher effektiv nur die Kraft aus einem Bein ermitteln kann.

Zum Schluss wurde noch mittels zwei Fragen abgefragt ob es Verbesserungsvorschläge, zusätzliche Funktionen, negative Punkte, etc. der verwendeten Powermeter gibt.

**Frage 19: Würdest du dir noch zusätzliche Funktionen deines Leistungswattmesssystems wünschen? (neben den Wattzahlen) Wenn ja, welche?**

- |                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| - Nein, zufrieden                   | 11 Personen |
| - Genauere Messung                  | 1 Person    |
| - Umdrehungen, Links-rechts Messung | 1 Person    |
| - Integration mit Suunto Uhr        | 1 Person    |

Frage 19 beschäftigte sich damit, ob sich die Teilnehmer noch zusätzliche Funktionen wünschen bzw. vorstellen können. Bei dieser Frage handelt es sich um eine freie Frage, bei der keine Antwortmöglichkeiten vorgegeben waren. 11 der 31 Personen gaben an, durchaus mit dem Funktionsumfang des Powermeters zufrieden zu sein. 17 Personen gaben bei dieser Frage keine Informationen an.

**Frage 20: Stört dich etwas an deinem Leistungswattmesssystems? Wenn ja, was?**

- |   |            |
|---|------------|
| - Nein  | 3 Personen |
| - Batterie, Akku wäre besser                    | 3 Personen |
| - Messgenauigkeit, Vergleichbarkeit mit anderen | 4 Personen |
| - Kompatibilität, Inzellösung                   | 2 Personen |
| - Kalibrierung mühsam                           | 1 Person   |

Einige Befragte äußerten sich zum Thema Energieversorgung. Hier wäre ein Akku anstelle einer Batterie von einigen wünschenswert. Auch die fehlende Kompatibilität sprachen zwei Personen an und eine Person stört sich an dem mühsamen Kalibrierungsprozess, die einige Systeme mit sich bringen. Drei Personen hatten keine negativen Punkte zu äußern und 18 Personen gaben bei dieser Frage keine Angaben an.

Die vorherigen Fragen konnten, wie oben beschrieben nur von Personen beantwortet werden, die bereits einen Powermeter besitzen. Die folgenden und letzten zwei Fragen richteten sich wieder an alle 47 Teilnehmer der Umfrage!

**Frage 21: Wäre ein Leistungswattmesssystem, welches für Rennräder, Zeitfahrräder, MTBs, etc. gleichermaßen geeignet ist, interessant? (Das heißt, dass die Wattmessung für mehrere Räder verwendbar ist.)**

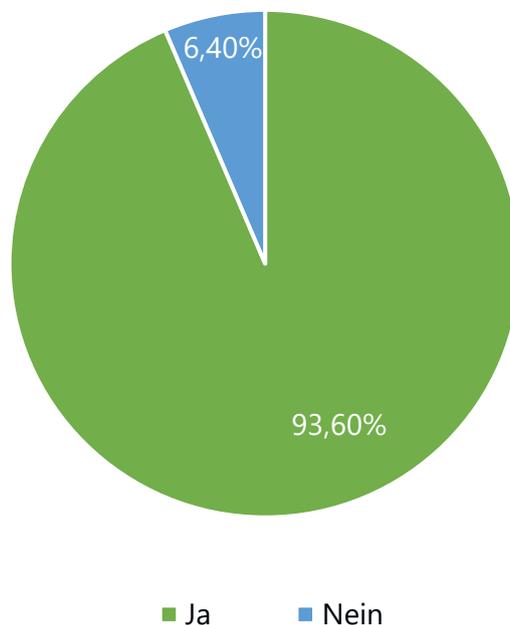


Abb. 117: Frage 21: Interesse an fahrradunabhängigem Leistungswattmesssystem

Die Antwort viel sehr eindeutig aus, 44 der 47 Personen stimmten mit Ja ab und würden einen kompatibleren Powermeter begrüßen. Lediglich drei Personen stimmten mit Nein. Dies zeigt deutlich, dass es potenzielle Käufer\*innen für einen fahrradunabhängigen Powermeter gäbe, wäre dieser am Markt verfügbar.

Da viele Personen einen kompatibleren Powermeter begrüßen würden, wurde in der letzten Frage noch abgefragt, wie viel sie bereit wären, für solch einen Powermeter auszugeben.

## Frage 22: Wie viel würdest du generell für so eine Art von Leistungswattmesssystem ausgeben?

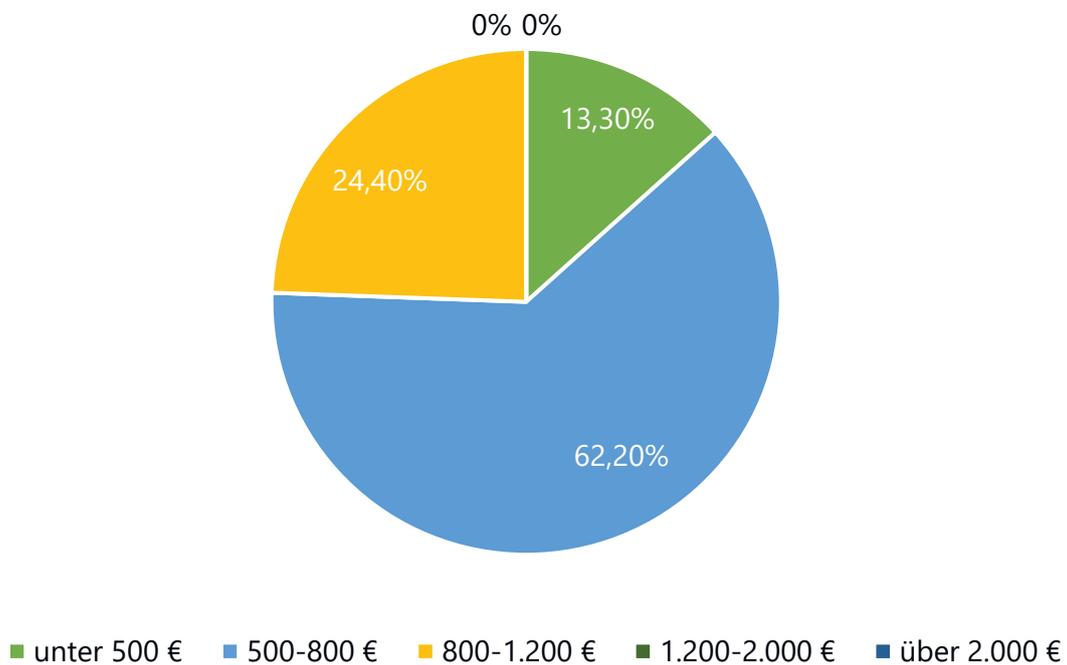


Abb. 118: Frage 22: Preisbereich für fahrradunabhängiges Leistungswattmesssystem

60 Prozent der 47 Befragten wären bereit, zwischen 500 und 800 Euro für solch eine neuartige Lösung auszugeben. 24,4 Prozent würden sogar zwischen 800 und 1.200 Euro dafür ausgeben. 15,6 Prozent wären nur bereit, weniger als 500 Euro dafür auszugeben. In der Detailauswertung zeigte sich, dass Frauen tendenziell bereit sind, weniger Geld, für einen Powermeter auszugeben als Männer. Unter den sieben Personen, die bereit wären, nur weniger als 500 Euro für einen Powermeter auszugeben, sind fünf Frauen. Die anderen beiden Frauen, die bei der Umfrage mitmachten, gaben den Preisbereich von 500-800 Euro an.

Danke für deine Teilnahme!

## 10.1 Detailauswertung einzelner Personen

Um den Ist-Zustand und die Bedürfnisse der einzelnen Teilnehmer\*innen noch exakter darzustellen, werden untenstehend sechs Teilnehmer dieser Umfrage genauer beschrieben. Es wird bei jeder Frage aufgelöst, was die jeweilige Person ausgewählt hat, um eine individuelle Auswertung des Fragebogens zu jeder der sechs Personen zu erhalten. Ausgewählt werden zwei weibliche Teilnehmerinnen und vier männliche Teilnehmer. Die Personen werden so ausgewählt, dass alle vorgegebenen Altersbereiche abgebildet werden.

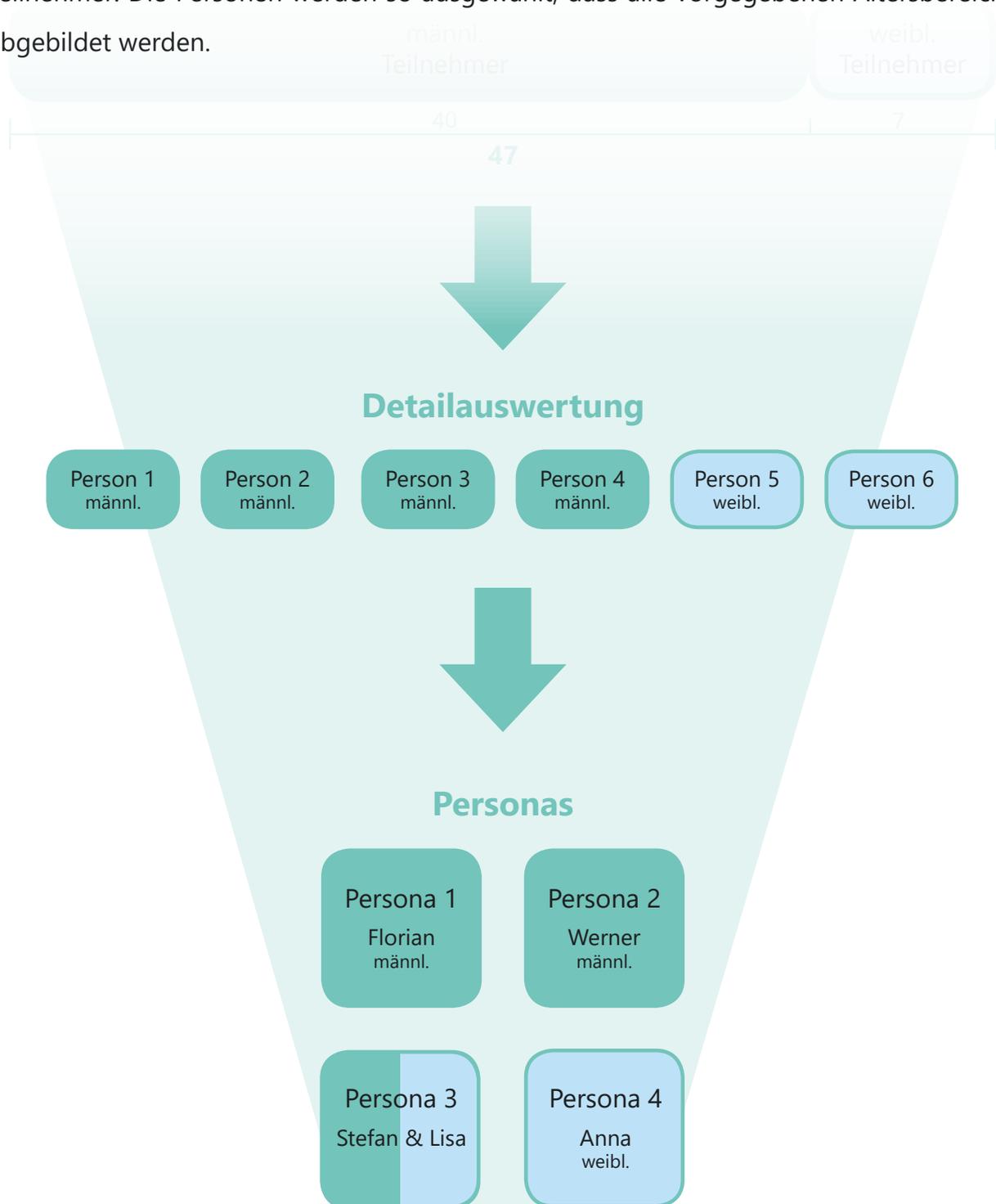


Abb. 119: Detailauswertung einzelner Personen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Umfrage Ergebnis Person 1**

Person 1 ist männlich, zwischen 21 und 30 Jahre alt, besitzt einen Maturaabschluss und ist begeisterter Radsportler. Er besitzt drei Fahrräder: ein Rennrad, mit dem er am liebsten fährt, ein Mountainbike und ein Cityrad. Person 1 fährt zwei bis dreimal wöchentlich mit dem Fahrrad und kommt auf eine Jahreskilometerleistung von 5.000-10.000 Kilometern. Seine Radschuhe hat er im Schnitt drei Jahre in Verwendung, bis zu einer Neuanschaffung. Er besitzt für das gezielte Training ein spiderbasiertes Leistungswattmesssystem von Power2Max, welches die Kraft beider Beine berücksichtigt. Sein Powermeter liegt preislich im Mittelfeld und kostet zwischen 500 und 800 Euro. Generell ist er mit dem Powermeter von Power2Max zufrieden, lediglich die Stromversorgung über die Batterie stört ihn. Hier würde er sich einen Akku wünschen. Er wäre zudem an einer fahrradunabhängigen Powermeter Lösung interessiert und würde dafür auch zwischen 500 und 800 Euro ausgeben.

## **- Umfrage Ergebnis Person 2**

Person 2 ist ebenfalls männlich, zwischen 31 und 40 Jahren alt und hat einen Hochschulabschluss. Zu seinen beliebtesten Ausdauersportarten zählt das Rennradfahren und das Laufen. Er besitzt drei unterschiedliche Fahrradmodelle: ein Rennrad, ein Gravelbike und ein Zeitfahrrad. Insgesamt besitzt er jedoch sogar vier Fahrräder, von denen er mit dem Rennrad und dem Gravelbike am häufigsten unterwegs ist. Durchschnittlich fährt er öfter als fünfmal die Woche mit dem Fahrrad, was eine Jahreskilometerleistung von mehr als 10.000 km ergibt. Seine Fahrradschuhe wechselt er im Schnitt einmal im Jahr nach der Saison. Zudem befasst er sich mit dem Thema Leistungsmessung und besitzt sogar zwei verschiedene Powermetersysteme für zwei seiner Fahrräder. Das spiderbasierte Powermeter von Quarq ist am Rennrad verbaut und der Kurbelarmpowermeter von Infocrank am Zeitfahrrad. Die Systeme sind nicht gerade günstig und kosten zwischen 1.200 und 2.000 Euro. Die effektive Trainingssteuerung, die solch ein System bietet, sieht er als großen Pluspunkt. Er ist mit beiden Systemen sehr zufrieden und kann sich derzeit keine zusätzlichen Funktionen vorstellen. Die Person gibt gerne Geld für den Radsport aus und wäre bereit für einen radunabhängigen Powermeter zwischen 800 und 1.200 Euro zu investieren.

### **- Umfrage Ergebnis Person 3**

Person 3 ist auch männlich, zwischen 41 und 50 Jahren alt und besitzt ebenfalls einen Hochschulabschluss. Er ist begeisterter Radfahrer, Läufer und auch Triathlet. Zu seiner Ausrüstung zählen insgesamt vier Fahrräder: ein Rennrad, ein Mountainbike, ein Triathlonrad und noch ein weiteres. Am häufigsten ist er sogar mit dem Triathlonrad und als Ausgleich auch mit dem Mountainbike unterwegs. Durchschnittlich fährt er einmal pro Woche mit einem seiner Fahrräder. Dies ergibt eine Kilometerleistung von 1.000 bis 2.500 jährlich. Seine Radschuhe fährt er so lange bis diese kaputt gehen oder sie ihm nicht mehr gefallen.

Auch er besitzt bereits einen Powermeter für eins seiner Fahrräder, um ein wattgesteuertes Training absolvieren zu können. Mit dem pedalbasierten, beidseitig messendem Powermeter-Pedal von Favero ist er sehr zufrieden. Das beidseitig messende Pedal kostet zwischen 500 und 800 Euro. Dennoch wäre er an einer kompatibleren Lösung interessiert. Dafür wäre er sogar bereit, mehr Geld auszugeben als für das jetzige System, nämlich zwischen 800 und 1.200 Euro.

### **- Umfrage Ergebnis Person 4**

Person 4 ist männlich und zwischen 41 und 50 Jahren alt. Die Person besitzt einen Hochschulabschluss und fährt am liebsten mit dem Rennrad und dem Mountainbike. Insgesamt besitzt er auch nur diese zwei Fahrräder und fährt im Schnitt einmal pro Woche mit einem seiner Räder. So kommt er auf eine Jahreskilometerleistung zwischen 1.000 und 2.500 Kilometern. Seine Fahrradschuhe fährt er mehrere Jahre.

Person 4 besitzt aktuell keinen Powermeter und das Thema ist für ihn auch derzeit nicht interessant. Einen fahrradunabhängigen Powermeter könnte er sich hingegen vorstellen und wäre bereit dafür zwischen 500 und 800 Euro auszugeben.

### **- Umfrage Ergebnis Person 5**

Person 5 ist weiblich, zwischen 21 und 30 Jahre alt besitzt einen Hochschulabschluss und übt neben dem Rennradfahren, Mountainbiken und Triathlon auch noch andere Sportarten sehr gerne aus. Sie besitzt insgesamt drei Fahrräder: ein Rennrad, ein Mountainbike und ein Triathlonrad. Am häufigsten fährt sie jedoch mit ihrem Rennrad. In der Woche fährt sie zwei- bis dreimal mit dem Fahrrad und kommt so auf eine Jahreskilometerleistung von 2.500 bis 5.000 Kilometer. Die Radschuhe hat sie mit fünf Jahren sehr lange in Verwendung. Für Person 4 ist das Thema Leistungswattmessung interessant, besitzt aktuell jedoch noch kein derartiges System. Sie wäre dennoch an einem radunabhängigeren Powermeter interessiert und würde dafür maximal 500 Euro ausgeben.

### **- Umfrage Ergebnis Person 6**

Person 6 ist ebenfalls weiblich und ebenfalls zwischen 21 und 30 Jahren alt und besitzt ebenfalls einen Hochschulabschluss. Insgesamt besitzt sie ein Fahrrad, genauer ein Mountainbike. Ihre liebste Ausdauersportart ist auch das Mountainbiken. Pro Woche fährt sie durchschnittlich zwischen drei und fünfmal mit ihrem Bike. Im Jahr kommt sie somit zu einer Kilometerleistung zwischen 1.000 und 2.500 Kilometern.

Sie ist die einzige weibliche Teilnehmerin der Umfrage, die bereits einen Powermeter für ihr Fahrrad besitzt. Als Grund dafür gab sie an „um meine Leistungssteigerung nachzuvollziehen“. Sie besitzt einen Pedalpowermeter des Herstellers Garmin. Dieser Powermeter misst beidseitig und kostet zwischen 500 und 800 Euro. Mit der Funktionsweise und dem Funktionsumfang ihres Powermeters ist sie zufrieden. Obwohl Sie derzeit nur ein Mountainbike besitzt, wäre sie an einem fahrradunabhängigen System interessiert und wäre bereit, dafür ebenfalls zwischen 500 und 800 Euro auszugeben.

## 10.2 Fazit und Limitation der Umfrage

Die Umfrage zeigt, dass bereits die große Mehrheit der ambitionierten Sportler\*innen, nämlich 66 Prozent einen oder mehrere Powermeter und auch mehrere Fahrradmodelle besitzen. Insbesondere Rennräder und Mountainbikes bilden die größte Gruppe. Von den sieben Frauen, die mitmachten, besitzt jedoch nur eine bereits einen Powermeter. Die meisten Personen der Umfrage fahren zwischen drei und fünfmal die Woche mit dem Rad und kommen auf eine Jahreskilometerleistung zwischen 5.000 und 10.000 Kilometern. Das Thema Leistungswattmessung ist allen Teilnehmer\*innen ein Begriff und die Mehrheit nutzt diese Systeme für ein gezielteres Training. Spannend, bereits acht Personen haben zwei unterschiedliche Powermeter für zwei verschiedene Fahrräder. Die beliebtesten Powermetersysteme sind jene, die im Pedal und in der Kurbel verbaut sind. Die Mehrheit gibt für einen Powermeter im Schnitt zwischen 500 und 800 Euro aus. Powermeter, die über 1.200 Euro kosten finden nur wenig Akzeptanz unter den Radsportlern/Radsportlerinnen. Zudem werden vorwiegend Systeme gekauft, welche die Kraft aus beiden Beinen berücksichtigen.

Grundsätzlich sind die Nutzer\*innen mit den Powermetern zufrieden, lediglich im Bereich Kompatibilität, Akkus anstelle einer Batterie, und der Messgenauigkeit ist noch Potenzial vorhanden. Zudem wären 93,6 Prozent an einem fahrradunabhängigen Powermeter interessiert, welcher zwischen 500 und 800 Euro kosten darf. Der Großteil der Frauen hingegen wären nur bereit, maximal 500 Euro dafür auszugeben.

Die größten Geschlechterunterschiede zeigen sich dahingehend, dass deutlich mehr Männer als Frauen bereits ein Leistungswattmesssystem besitzen und Männer auch bereit sind, mehr dafür auszugeben.

Anhand der gewonnenen Daten der Teilnehmer und der Detailauswertung von sechs ausgewählten Personen werden im nächsten Kapitel vier Personas erstellt, um mögliche Userszenarien aufzuzeigen.

### **\_ Limitation**

Aufgrund der kleinen Stichprobe (n=47) können die Ergebnisse nicht generalisiert werden. Weiteres können die Teilnehmer\*innen lokal eingegrenzt werden, weshalb die Daten nicht repräsentativ für die österreichische Bevölkerung sind. Die Erhebung wurde im Herbst 2021 durchgeführt.

### 10.3 Personas

Die Personas sollen die typischen Vertreter\*innen der Zielgruppe Radsport veranschaulichen. Personas haben Wünsche und Erwartungen an das Produkt, sowie Ziele und Werte. Die Persona ist der sogenannte „Prototyp“ einer Zielgruppe und soll dabei helfen Annahmen über den/die Kunden/Kundinnen zu treffen. Personas werden mit Merkmalen wie Name, Alter, Wohnort, Einkommen, Beruf, Hobbies, etc. beschrieben. Dadurch sollen Muster im Nutzungsverhalten erkannt werden. Daher ist es auch sinnvoll mehrere Vertreter\*innen einer Zielgruppe als Personas zu beschreiben.

Folgend werden vier Personas anhand der gewonnenen Daten der Umfrage detailliert dargestellt. Aufgrund der mehrheitlich männlichen Teilnehmer der Umfrage und der Tatsache, dass mehr Männer als Frauen den Radsport ausüben werden zwei männliche, ein Pärchen und eine weibliche Persona erstellt.

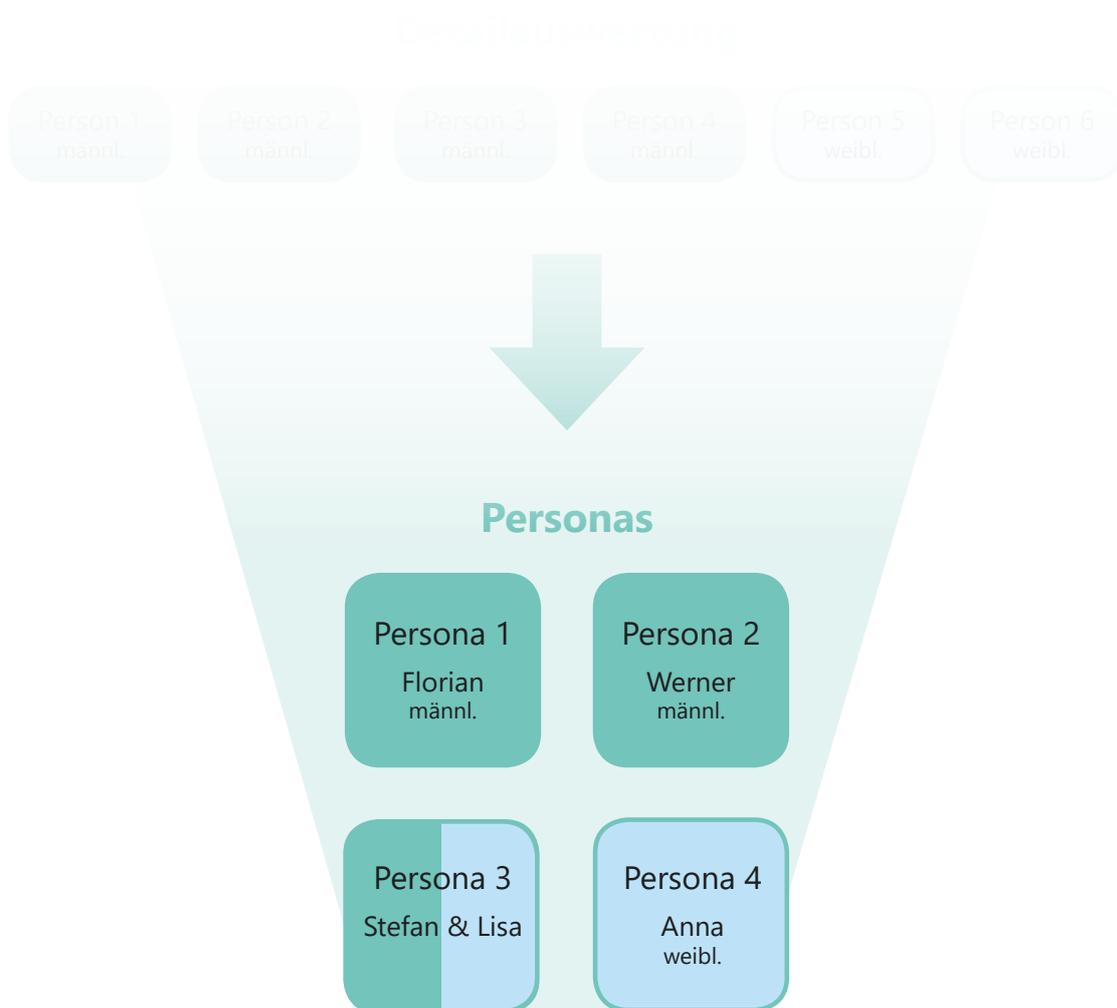


Abb. 120: Erstellung von Personas (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 121: Persona 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

*„der Powermeter hilft mir beim zielgerichteten Training“*

## Persona 1

### Fakten:

<b>Name &amp; Alter:</b>	Florian, 38
<b>Wohnort:</b>	Mauthausen
<b>Beruf:</b>	Bankangestellter
<b>Einkommen:</b>	€ 2.700,- netto
<b>Interessen:</b>	Finanzwelt, Aktien, Technik
<b>Hobbies:</b>	Rennradfahren, Laufen, Lesen

<b>Lieblingssportart:</b>	Rennradfahren
<b>Radtypen:</b>	2x Rennrad, 1x MTB
<b>Radnutzung:</b>	4-5x wöchentl., 12.000km/Jahr
<b>Powermeter:</b>	Ja
<b>Marke:</b>	Favero, Pedalmessung
<b>Preis:</b>	€ 800,-

## Florian, 38 Jahre

*Bankangestellter, begeisterter Rennradfahrer und Läufer*

Florian ist 38 Jahre alt, wohnt in Mauthausen, ist verheiratet und hat zwei Kinder. Er besitzt einen Hochschulabschluss und arbeitet als Bankangestellter in einer Filiale in Linz. Um in die Arbeit zu gelangen fährt er bei Schönwetter mit einem Rennrad, das er sich speziell für seine Pendelstrecke gekauft hat. In seiner Freizeit ist ihm der Sport sehr wichtig und deshalb besitzt er gesamt zwei Rennräder und ein Mountainbike. Das Rennradfahren ist neben dem Laufen jedoch seine absolute Lieblingssportart. Durch seine wöchentliche Pendelstrecke fährt er sehr regelmäßig mit dem Rad und kommt so auf eine sehr hohe Jahreskilometerleistung von 12.000 Kilometer im Jahr. Auf seinem Trainingsrennrad besitzt er einen pedalbasierten Powermeter von Favero. Mit diesem Powermeter ist er aufgrund der einfachen Handhabung, der Zuverlässigkeit und der Preis/Leistung sehr zufrieden. Auch mit seiner Frau fährt er des öfteren eine Rennradausfahrt, vorwiegend am Wochenende.

Er ist ein sehr breit interessierter Mensch und beschäftigt sich gerne mit Zahlen und Daten, auch abseits seines Berufes. Sein treuester Begleiter während dem Training ist immer sein Garmin-Edge Gerät und seine Garmin Uhr beim Laufen. Mit seinen Geräten kennt er sich sehr gut aus und beschäftigt sich akribisch mit den ganzen Zusatzfeatures bezüglich Leistung- und Fitnessmessung. Jedoch hätte er auch gerne beim Laufen eine Funktion der Wattmessung um auch hier seinen Leistungsfortschritt besser nach voll ziehen zu können.



Abb. 122: Persona 2 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

*„nach so vielen Jahren am Bike, würde es mich interessieren wie viel Watt ich noch treten kann“*

## Persona 2

### Fakten:

<b>Name &amp; Alter:</b>	Werner, 55
<b>Wohnort:</b>	Linz
<b>Beruf:</b>	Lagerist bei der Vöest
<b>Einkommen:</b>	€ 1.750,- netto
<b>Interessen:</b>	Freunde treffen, Musik, Schräbergarten
<b>Hobbies:</b>	MTB, Freeride biken, Darts, Eisstockschießen
<b>Lieblingssportart:</b>	Freeride Mountainbiken
<b>Radtypen:</b>	1x MTB, 1x Freeride-Bike
<b>Radnutzung:</b>	3x wöchentl., 2.500km/Jahr
<b>Powermeter:</b>	Nein

## Werner, 55 Jahre

*Lagerist, begeisterter Freeride-Biker*

Werner ist 55 Jahre alt, wohnt in Linz und arbeitet als Lagerist in der Voest. Er ist alleinstehend und hat eine 23-jährige Tochter aus einer früheren Beziehung. Zu seiner Arbeitsstelle fährt Werner mit öffentlichen Verkehrsmitteln, da die Anbindung optimal ist. Gerne würde er zukünftig ab und zu mit dem Rad in die Arbeit fahren, allerdings eignen sich seine derzeit verfügbaren Räder nicht dazu. Werner überlegt deshalb, sich ein Gravelbike anzuschaffen, mit diesem könnte er problemlos in die Arbeit fahren und auch auf Schotterwegen zu seinem Schräbergarten gelangen.

Momentan besitzt Werner ein Mountainbike und ein Freeride-Bike. Freeriden ist seine große Leidenschaft. Wöchentlich fährt er etwa 3x mit dem Rad und kommt jährlich auf rund 2.500 Kilometer. Neben dem Radfahren spielt Werner mit seinen Freunden gerne Darts und im Winter ist er begeisterter Eisstockspieler. Im Sommer verbringt Werner viel Zeit in seinem Schräbergarten in der Nähe von Linz. Werner besitzt derzeit keinen Powermeter, es würde ihn jedoch interessieren, wie viele Watt er treten kann. Für sein zukünftiges Gravelbike wünscht er sich einen Wattmesser, ist jedoch unschlüssig, ob dieser bereits integriert sein soll oder ob eine Pedallösung geeigneter ist. Seine Sorge ist, dass ein Pedalpowermeter bei einem Sturz kaputtgehen könnte oder durch Schmutz in der Funktion beeinträchtigt wird. Sein derzeit bevorzugtes Gravelbike wäre von einem großen Versandhändler, welche schon integrierte Powermeterlösungen anbieten würden.



Abb. 123: Persona 3 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

*„um im Wettkampf die richtige Pace zu finden, würde ich mir in Zukunft gerne einen kostengünstigen Powermeter anschaffen“*

*- Lisa*

## Persona 3

### Fakten:

**Name & Alter:** Stefan, 27 | Lisa, 25

**Wohnort:** Kuchl

**Berufe:** Stadtführer | Diätologin

**Einkommen:** € 1.700,- netto |  
€ 2.100,- netto

**Interessen:** Handwerkliches, Garten |  
ges. Ernährung, Nachhaltigkeit

**Hobbies:** Wandern, Klettern, Radfahren |  
Triathlon, Wandern

**Lieblingssportart:** Wandern | Triathlon

**Radtypen:** 1x MTB, 1x Trekkingbike |  
1x Zeitfahrrad, 1x Rennrad,  
1x MTB

**Radnutzung:** 5x wöchentl., 5.000km/Jahr |  
3x wöchentl., 4.500km/Jahr

**Powermeter:** Nein

## Stefan & Lisa, 27 & 25 Jahre

*Stadtführer, gerne in den Bergen unterwegs | Diätologin, powert sich gerne am Rad aus*

Stefan und Lisa sind seit drei Jahren ein Paar und wohnen im ländlichen Kuchl. Stefan ist 27 Jahre alt und arbeitet fünf Tage pro Woche als Stadtführer in Salzburg. Um in die Arbeit zu gelangen, fährt er mit seinem Trekkingbike bis zum Bahnhof, anschließend mit dem Zug nach Salzburg und wieder mit dem Trekkingbike bis zur Arbeitsstelle. Somit legt er täglich rund 20 Kilometer mit dem Rad zurück. In seiner Freizeit macht er ab und zu Mountainbiketouren, geht jedoch lieber Wandern. Lisa ist 25 Jahre alt und als Diätologin im örtlichen Alten- und Pflegeheim tätig. Sie ist leidenschaftliche Triathletin und besitzt neben einem Mountainbike auch ein Rennrad und ein Zeitfahrrad. Die meisten Kilometer legt sie am Zeitfahrrad zurück, welches sie auch bei Triathlonwettkämpfen immer in Verwendung hat. Neben dem sportlichen Training interessiert sie sich für Nachhaltigkeit und gesunde Ernährung. Stefan verbringt gerne mit Lisa Zeit im Garten und ist hier auch handwerklich tätig.

Lisa hat sich zum Ziel gesetzt, sich ihre Kräfte bei Triathlonbewerben noch besser einzuteilen, um beim abschließenden Laufen noch Power zu haben. Daher möchte sie sich einen Wattmesser für das Zeitfahrrad anschaffen, um nicht schon beim Radfahren zu überpacen. Noch ist sie unschlüssig welches Produkt sie erwerben soll, da sie ein eher kleines Budget dafür eingeplant hat. Weiters fragt sie sich, ob es eine Art Wattmesser auch für das Laufen gibt. Für den Triathlon wäre es eine optimale Lösung, sowohl beim Radfahren, als auch beim Laufen ein Wattmessgerät zu haben.



Abb. 124: Persona 4 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

*„Bekannter meinte: Mit einem Powermeter wirst du noch stärker und cool sind sie auch“*

## Persona 4

### Fakten:

<b>Name &amp; Alter:</b>	Anna, 31
<b>Wohnort:</b>	Weyer
<b>Beruf:</b>	Psychologin im Reha-Zentrum
<b>Einkommen:</b>	€ 3.100,- netto
<b>Interessen:</b>	Lesen, Fotografie, Sport, Katzen
<b>Hobbies:</b>	Rennradfahren, MTB, Wandern, Klettersteig

<b>Lieblingssportart:</b>	Rennradfahren
<b>Radtypen:</b>	1x Rennrad, 1x MTB
<b>Radnutzung:</b>	4x wöchentl., 6.000km/Jahr
<b>Powermeter:</b>	Ja 2x
<b>Marke:</b>	Rotor, Spider (RR) Stages, Kurbelarm (MTB)
<b>Preis:</b>	€ 1.000,- (RR), € 450,- (MTB)

## Anna, 31 Jahre

*Psychologin, gerne in der Natur unterwegs*

Anna ist 31 Jahre alt, wohnt in der kleinen Gemeinde Weyer im Alpenvorland Oberösterreichs. Sie ist klinische Psychologin in der örtlichen Reha Einrichtung und vollzeit berufstätig. Anna ist Single und wohnt mit ihren drei Katzen in einer Wohnung mit kleinem Garten. In ihrer Freizeit beschäftigt sie sich mit Fotografie und liest gerne. Ihr größtes Hobby ist jedoch das Rennradfahren, auch andere sportliche Aktivitäten, wie Klettersteige, betreibt sie im Sommer. Anna besitzt ein Rennrad und ein Mountainbike, wobei beide Räder mit einem Powermeter ausgestattet sind. Ein Bekannter von ihr hat ihr die Nutzung des Powermeters nahegelegt. Anna hat zwei unterschiedliche Wattmesssysteme, wobei ein Produkt 450 Euro und das andere Produkt 1.000 Euro gekostet hat. Beide funktionieren gleich gut und Anna fragt sich, weshalb es so starke Preisunterschiede gibt. Das Rennrad war bereits mit dem teureren Powermeter ausgestattet, als sie es erworben hat. Sie fährt rund viermal wöchentlich mit dem Rad und kommt durch längere Ausfahrten auf ca. 6.000 Kilometer pro Jahr.

Anna hat sich dieses Jahr zum Ziel gesetzt beim Radrennen „King of the Lake“ am Attersee mitzufahren, dafür möchte sie sich einen Zeitfahrer anschaffen. Natürlich hätte sie auch für dieses Rad wieder gerne einen Wattmesser, da sie jedoch schon zwei Produkte besitzt stellt sich für sie die Frage, ob sie einen dritten Powermeter anschaffen muss oder ob es noch andere Lösungen gibt und sie eventuell ein Produkt auf mehreren Rädern verwenden kann.



# **11. Synthèse der Recherche und Analyse**

Powermeter sind mittlerweile zu einem "Must-Have" im Radsport geworden, auch aufgrund der Effektivität in der Trainingssteuerung. Die Marktanalyse ergibt ein breites Spektrum an unterschiedlichen Powermeter-Systemen. Die derzeit beliebtesten Systeme stellen jene dar, welche im Pedal verbaut sind. Fast alle am Markt verfügbaren Powermeter messen im Bereich der Kurbel mittels Dehnungsmessstreifen eine Verformung, da hier die Kraft vom Bein direkt auf den Antrieb übertragen wird. Powermeter finden nicht nur im Radsport Verwendung, sondern mittlerweile auch im Laufsport. Die Anzahl der verfügbaren Powermeter im Laufsport ist jedoch noch gering, auch aufgrund der viel komplexeren Bewegungsabläufe und der Schwierigkeit, diese korrekt zu erfassen und in Watt um zu rechnen.

Anhand meiner durchgeführten Umfrage wird ersichtlich, dass bereits mehr als die Hälfte der Proband\*innen mindestens einen Powermeter besitzen. Einige Sportler\*innen besitzen mehr als einen Powermeter weshalb die Relevanz für einen fahrradunabhängigen Powermeter gegeben ist.

Folgend werden die relevantesten Kriterien für die Entwicklung eines Powermeters aufgelistet. Dabei werden die Punkte in Haupt- und Nebenkriterien unterteilt.

## **11.1 Hauptkriterien**

Die Hauptkriterien stellen die wichtigsten Punkte dar, die es für einen funktionsfähigen Powermeter benötigt. Wird ein Punkt der Hauptkriterien nicht erfüllt, führt dies zu einem nicht funktionsfähigem Powermeter.

### **\_ Position**

Die geeignetste Position stellt jene im Bereich der Kurbel und des Pedals dar, da in diesem Bereich die Kräfte für den Vortrieb erzeugt werden. Die Kräfte beim Pedalieren werden dabei direkt vom Fuß über den Schuh auf das Pedal und den Antrieb (Kurbel) übertragen. Die meisten, derzeit verfügbaren Produkte am Markt befinden sich auch in diesem Bereich. Es macht daher Sinn meinen Entwurf ebenfalls in diesem Bereich zu platzieren. Andere Position sind jedoch auch nicht ausgeschlossen bzw. denkbar, wenn sich daraus weitere Vorteile in Sachen Usability, Messgenauigkeit, etc. ergeben.

## **\_ Messeinheit**

Um die Leistung messen zu können, wird ein Messsensor benötigt. Dieser Kraftsensor besteht aus mehreren Dehnungsmessstreifen die am Bauteil (meist Kurbelarm, Pedalachse, etc...) eine Verformung messen und daraus die Leistung ableiten. Der Messsensor muss unter diversen Temperatur- und Witterungsbedingungen, sowie Fahrsituationen (schnelles und langsames Treten, Bergauf und Bergab fahren, etc.) valide Daten liefern. Daher sind die Dehnungsmessstreifen als Wechselbrückenschaltung aufgebaut, um diverse Temperaturschwankungen aus zu gleichen. Zudem ist darauf zu achten, dass die komplette Messtechnik möglichst klein und leicht ist, damit diese gut in Bauteile integriert werden kann.

Um die Leistung zu berechnen, wird neben einem Kraftsensor auch noch ein Inertialsensor benötigt. Dieser Inertialsensor erfasst die Drehbewegung und daraus die Winkelgeschwindigkeit. Die Berechnung der Leistung erfolgt dann aus den Werten des Kraftsensors und des Inertialsensors. Bei den Inertialsensoren kommt in der Regel ein Gyrosensor und bzw. oder Beschleunigungssensor zum Einsatz.

## **\_ Datenübertragung**

Um die Messwerte der Dehnungsmessstreifen und des Gyrosensors "sichtbar" zu machen, müssen diese an ein externes Anzeigegerät (Fahrradcomputer) übertragen werden. Die gängigen Powermeter am Markt verwenden hierfür das Bluetooth und bzw. oder ANT+ Protokoll. Beide Technologien verbrauchen sehr wenig Energie und sind daher bestens für die Datenübertragung geeignet. Mein Powermeter Entwurf soll daher ebenfalls beide Funkstandards verbaut haben, da sowohl Bluetooth als auch ANT+ über Vor- und Nachteile verfügen und sich zudem eine bessere Kompatibilität zwischen den Systemen ergibt.

## **\_ Energieversorgung**

Damit alle Sensoren ordnungsgemäß arbeiten, bedarf es einer Energieversorgung in Form eines Akkus oder einer Batterie. Bei den meisten Powermetern wird mittlerweile auf eine Energieversorgung mittels Akku gesetzt, da dieser diverse Vorteile wie einfachere Handhabung und längere Laufzeit mit sich bringt. Dabei ist zu achten, dass die Ladebuchse leicht zugänglich ist und zur Gänze vor Nässe geschützt ist. Große Vorteile bieten dabei die sogenannten Magnetstecker, diese benötigen keine separate Abdichtung und das Anstecken der Kabel erfolgt in Sekundenschnelle.

## **11.2 zusätzliche Kriterien**

Die Nebenkriterien stellen jene Punkte dar, die ein Powermeter erfüllen sollte um den Benutzer\*innen ein möglichst angenehmes Nutzererlebnis zu bieten. Diese Kriterien sind nicht unbedingt zwingend notwendig, ich sehe sie jedoch als Voraussetzung für ein gelungenes Produkt.

### **\_ Kompatibilität**

Fast alle derzeitigen Systeme am Markt sind lediglich für ein Fahrrad geeignet, manche Systeme (Pedalpowermeter) lassen sich durch Umschrauben der Pedale auf ein anderes Rad übertragen. Hat man mehrere Fahrräder, werden für jedes Modell ein eigener Powermeter benötigt.

Bei meinem Entwurf soll die Kompatibilität verbessert werden, um eine Verwendung des Powermeters auch auf anderen Fahrrädern ohne großen Arbeitsaufwand zu ermöglichen. Es ist darauf zu achten, dass dieser Powermeter uneingeschränkt für alle Fahrradmodelle geeignet ist. Sozusagen ein fahrradunabhängiger Powermeter!

### **\_ Usability**

Die Kompatibilität des Powermeters muss auch im Einklang mit der Usability stehen. Der entwickelte Powermeter soll innerhalb kürzester Zeit und ohne großen Zeitaufwand von einem auf ein anderes Fahrrad appliziert werden können. Dabei ist zu achten, dass der Wechsel reibungslos vornehmbar ist und eventuelle Griffmulden die Handhabung für den/die Benutzer\*in erleichtern. Das Produkt soll demnach benutzerfreundlich gestaltet

werden und ohne technischen Vorwissen verwendet werden können.

Jedoch nicht nur der "Fahrradwechsel", sondern auch das Aufladen muss einfach funktionieren und gut zu bedienen sein.

### **\_ Material**

Die verwendeten Materialien müssen witterungs- und temperaturbeständig und langlebig sein, sodass der Powermeter auch nach mehreren Jahren voll funktionsfähig bleibt. Besonders die Elektronikeinheit muss aus einem festen Kunststoff bestehen und vollständig vor Wasser abgedichtet werden. Es ist darauf zu achten, dass die Elektronikeinheit in einem nicht abschirmenden Material verbaut wird, da sonst keine Funkübertragung möglich ist.

### **\_ Trittanalyse**

Die meisten verfügbaren Powermeter am Markt sind bereits in der Lage eine Trittanalyse durchzuführen. Dabei wird der "runde Tritt" erkannt und dem/der Benutzer\*in mit Effizienzkennzahlen angezeigt, ob rund oder eher unrund getreten wird. Zudem wird oft auch der Kraftfluss während des Tretzyklus grafisch dargestellt. All diese Parameter sollen dem/der Sportler\*in helfen möglichst effizient zu Pedalieren.

Um diese Parameter messen zu können, müssen die Powermeter jedoch mit weiterer Sensorik wie einem Beschleunigungssensor und eventuell einem Magnetometer ausgestattet sein. Abhängig von der Position meines Powermeter-Entwurfs soll auch dieser in der Lage sein, möglichst viele Werte zum Thema "Tritteffizienz" zu liefern.

Da nun alle relevanten Punkte aufgelistet sind, die es für einen Powermeter benötigt, folgt im nächsten Kapitel der Übergang in die Ideationphase. Dabei werden neuartige und auch konzeptionelle Ideen und Lösungen für einen Powermeter-Entwurf aufgezeigt.



# 12. Ideation

Nach vorangegangener Recherche, Analyse, Exploration der Zielgruppe und Synthese startet mit diesem Kapitel die kreative Phase der Abschlussarbeit, die sogenannte Ideation. Im ersten Schritt werden in der untenstehenden Grafik all jene Bereiche des Rennrades gekennzeichnet, bei denen Kräfte und Verformungen auftreten. Zudem sind mögliche Optionen beschrieben, wo in den jeweiligen Bereichen eine Kraft/Verformung erfasst werden könnte.

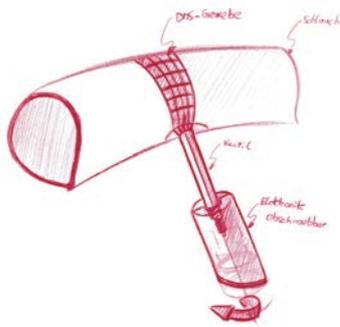


Abb. 125: mögliche Positionen für einen Powermeter am Fahrrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)

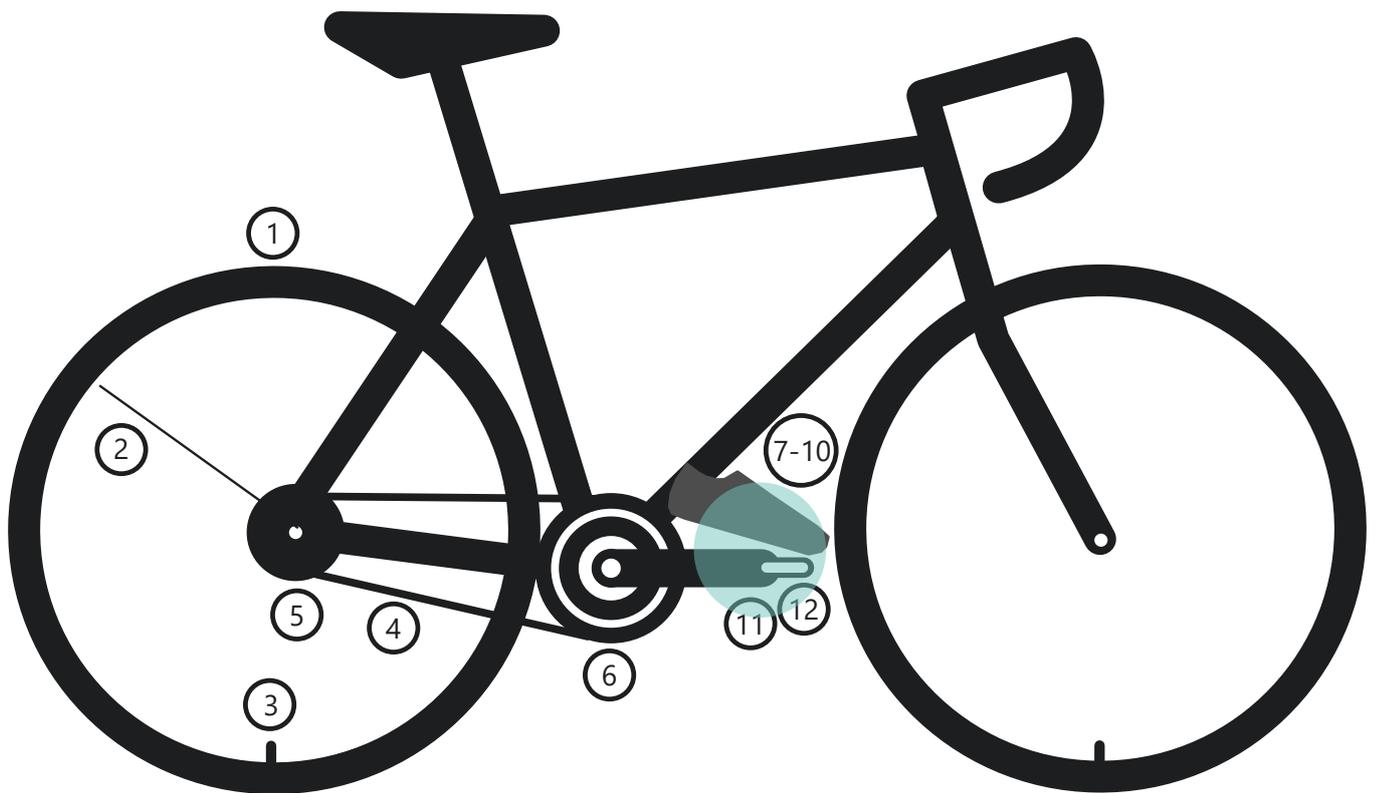
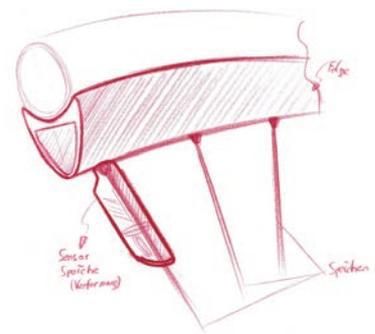
Wie im Kapitel 5 „Powermeter am Fahrrad“ bereits beschrieben, finden sich die gängigen Powermeter-Systeme in den Bereichen, Kurbelarm, Kurbelspider, Pedal, Tretlager und Hinterradnabe. Jedoch auch in den Bereichen der Kette, Felge, Speichen, Achsen, Radschuhe und Sattel treten Kräfte und Verformungen auf. Im nächsten Punkt folgen dazu Ideen, wie ein möglicher Powermeter in diesen Bereichen aussehen könnte und ob eine dieser Bereiche eine Option darstellen würde.



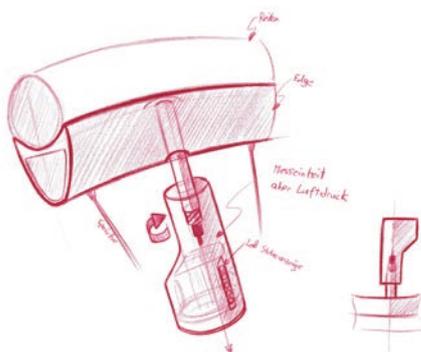
# ① Schlauch



# ② Speiche



# ③ Ventil



# ④ Kettenglied

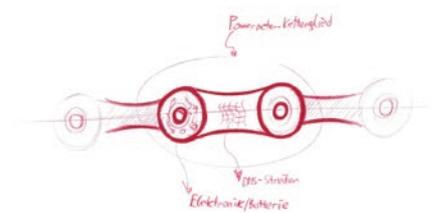
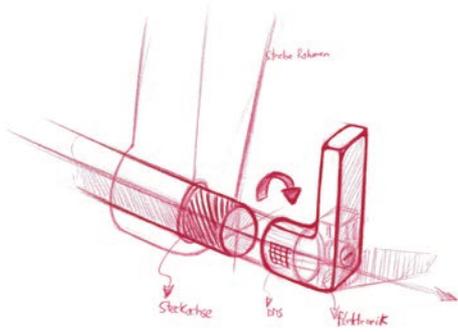
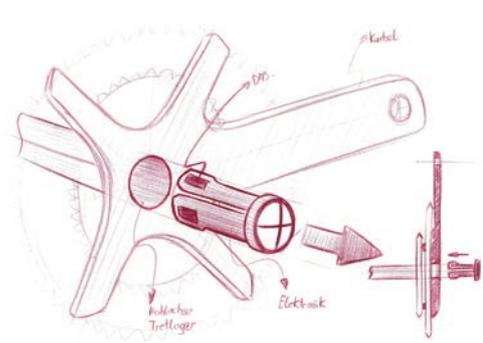


Abb. 127: Übersicht der Ideen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

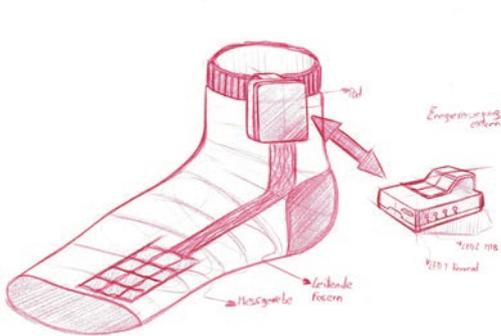
## ⑤ Steckachse



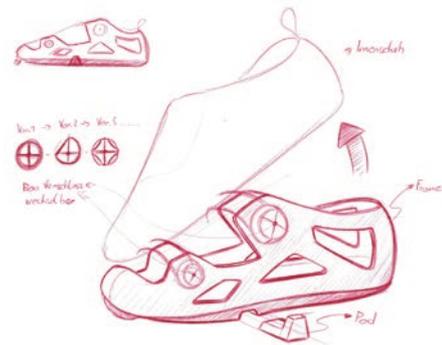
## ⑥ Tretlagerachse



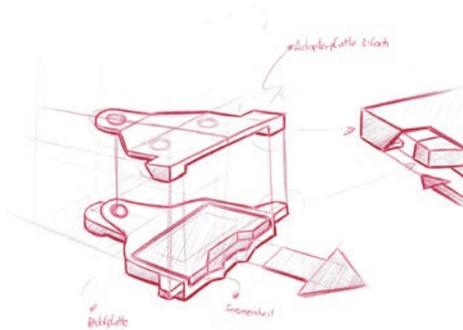
## ⑦ Socke



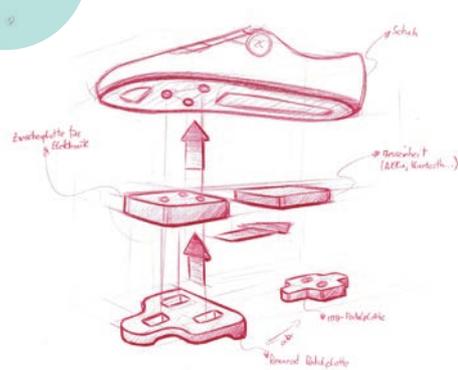
## ⑧ Fahrradschuh



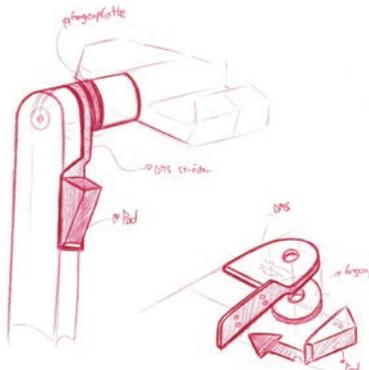
## ⑨ Cleat



## ⑩ Cleatplatte



## ⑪ Pedalachse



## ⑫ Innensohle



## ① Schlauch

Da auch im Bereich des Reifens Verformungen auftreten, könnte man hier ansetzen und ein Messgewebe auf dem Schlauch applizieren. Im Bereich des Ventils könnte ein Dehnungsmessgewebe aufgebracht werden, das die Verformung des Reifens bei jeder Radumdrehung misst und die Signale übers Ventil weiterleitet. Am Ventil könnte die komplette Elektronikeinheit (Akku, Sensoren, etc...) in der die Daten verarbeitet werden, aufgeschraubt werden.

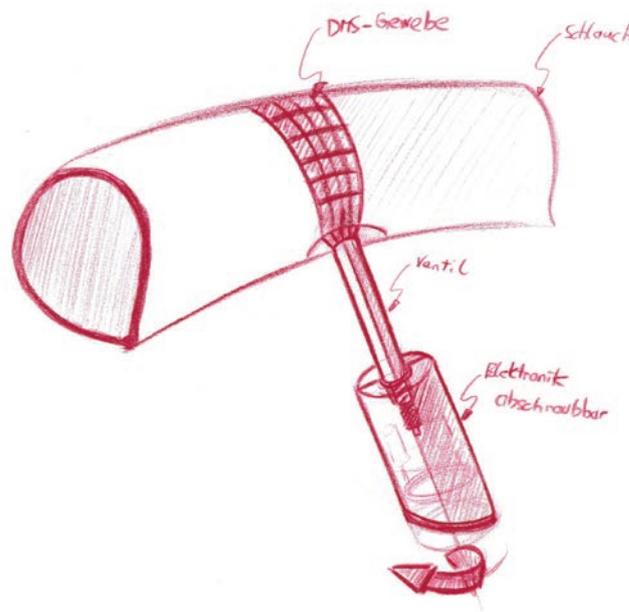


Abb. 128: Skizze Powermeter-Schlauch

### **Vorteile:**

- innovativer Ansatz
- könnte zusätzliche Informationen zum Reifendruck bereitstellen

### **Nachteile:**

- nicht für Tubeless Reifen geeignet
- Ventil müsste aus stromleitenden Material bestehen
- wenn Schlauch kaputt, muss ein neuer gekauft werden (teuer)
- für jedes Fahrrad wird so ein Schlauch benötigt
- schwierige Umsetzung bzw. Berechnung der Wattleistung
- zusätzlicher Sensor für die Trittfrequenz wird benötigt

## ② Speiche

Auch an den Speichen des hinteren Laufrades treten Verformungen beim Pedalieren auf. Ein Ansatz könnte sein, eine Sensoreinheit (Messeinheit, Akku, etc...) auf einer Speiche anzubringen. Die Einheit ist mit einem optischen Sensor bestückt, der in diesem Bereich die winzigen Verformungen der Speiche erfasst und daraus die Leistung berechnet.

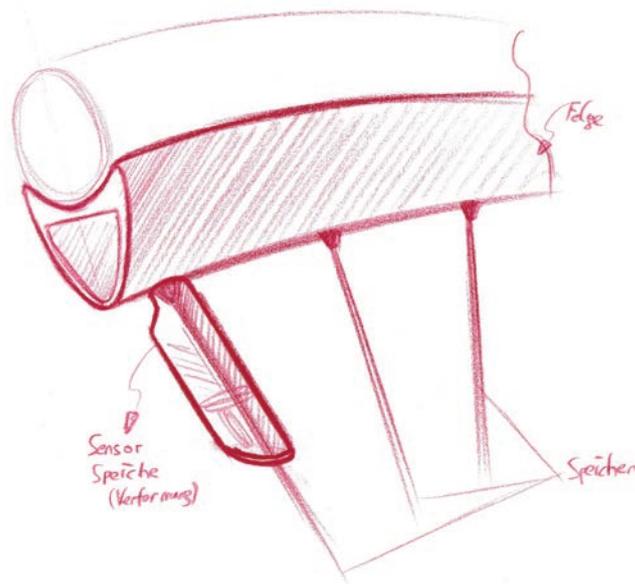


Abb. 129: Skizze Powermeter-Speiche

### **Vorteile:**

- innovativer Ansatz
- Plug&Play Prinzip
- auf allen Laufrädern anwendbar

### **Nachteile:**

- schwierige Umsetzung bzw. Berechnung der Wattleistung
- unterschiedliche Speichentypen
- unterschiedliche Speichenmaterialien
- zusätzlicher Sensor für die Trittfrequenz wird benötigt
- eventuell eine Unwucht an der Felge

### ③ Ventil

Ein Ansatz könnte sein, über die auftretenden Druckschwankungen während des Radfahrens im Reifen die Leistung zu berechnen. Über einen speziellen Ventilaufsatz, der auf das Ventil des hinteren Laufrades aufgeschraubt wird, könnten die Drücke im Reifen erfasst und in Wattleistung umgerechnet werden. Je stärker der/die Fahrer\*in in die Pedale tritt, desto größer werden die Druckschwankungen im Hinterreifen. Im Laufe der Recherche zeigte sich jedoch, dass es bereits einen Powermeter (Arofly) gibt, der nach diesem Prinzip misst.

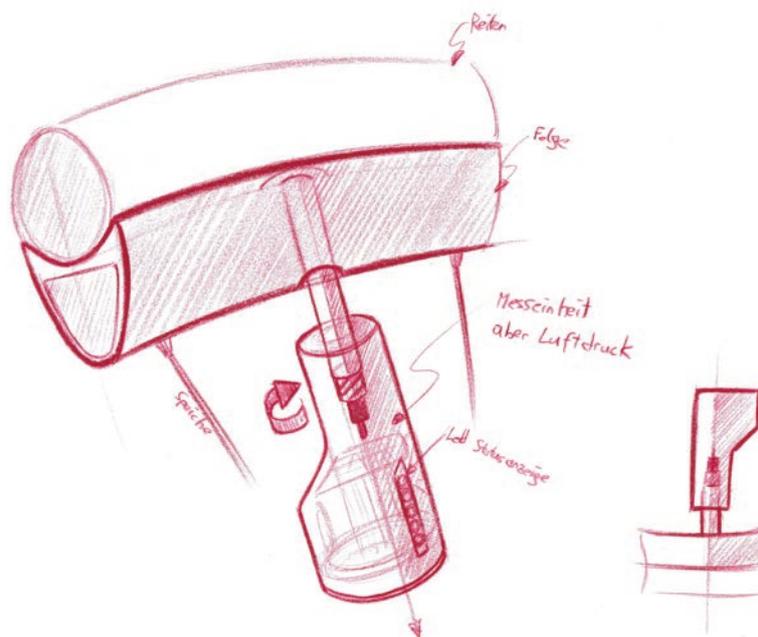


Abb. 130: Skizze Powermeter-Ventil

#### **Vorteile:**

- Plug&Play Prinzip
- auf allen Ventilen anwendbar
- klein und leicht

#### **Nachteile:**

- dieses Produkt ist bereits am Markt (Arofly)
- zusätzlicher Sensor für die Trittfrequenz wird benötigt

## ④ Kettenglied

Ein Kettenglied ausgestattet als Powermeter! Dieses spezielle Kettenglied, bestückt mit Dehnungsmessstreifen und der gesamten Elektronik könnte die Kräfte, die beim Treten auftreten und als Zugkräfte auf die Kette übertragen werden, erfassen und daraus die Leistung berechnen. Dafür müsste ein Kettenglied der Kette durch solch ein smartes Glied ersetzt werden.

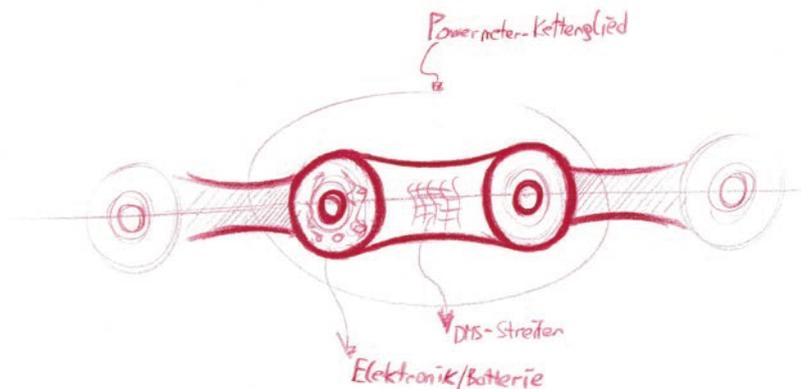


Abb. 131: Skizze Powermeter-Kettenglied

### **Vorteile:**

- innovativer Ansatz

### **Nachteile:**

- Umsetzbarkeit
- sehr geringer Bauraum
- Verschleiß der Kette
- nur für ein Fahrrad anwendbar
- unterschiedliche Ketten
- Einbau und Ausbau des Glieds

## ⑤ Steckachse

Neue Fahrräder sind ausschließlich mit den neuen Steckachsen-System ausgestattet. Hier könnte der Hebel dieser Steckachse als Powermeter-Einheit ausgeführt sein. Bestückt mit Sensoren im Bereich des Gewindes und mit einem Akku könnten die auftretenden Verformungen die beim Radfahren entstehen, an der Achse des hinteren Laufrades messen und in Leistung umrechnen.

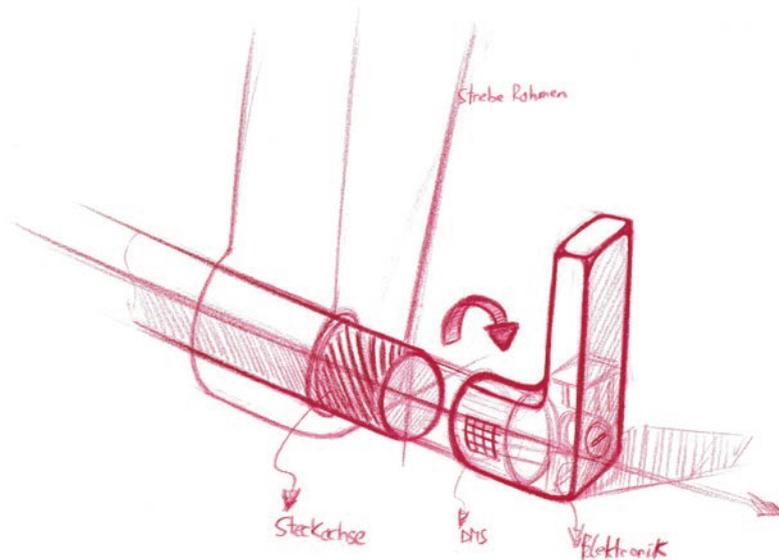


Abb. 132: Skizze Powermeter-Steckachse

### **Vorteile:**

- auf allen neuen Fahrrädern möglich
- neuartiger Ansatz

### **Nachteile:**

- Umsetzbarkeit der Messstelle in dem Bereich
- nicht für ältere Fahrräder geeignet
- zusätzlicher Sensor für die Trittfrequenz wird benötigt

## ⑥ Tretlagerachse

Eine Powermeter-Einheit für die Hohlachse des Tretlagers. Für diesen Ansatz gibt es bereits Konzepte diverser kleiner Start-ups, jedoch noch kein Serienprodukt. Die Messeinheit inklusive dem Akku könnte in einem kleinen Zylinder verbaut sein, der in die Hohlachse eingesteckt wird und dort die Verformung während des Tretens mittels Dehnungsmessstreifen misst. Dies wäre ein ähnliches Messprinzip wie jenes der Kurbelachs-Powermeter.

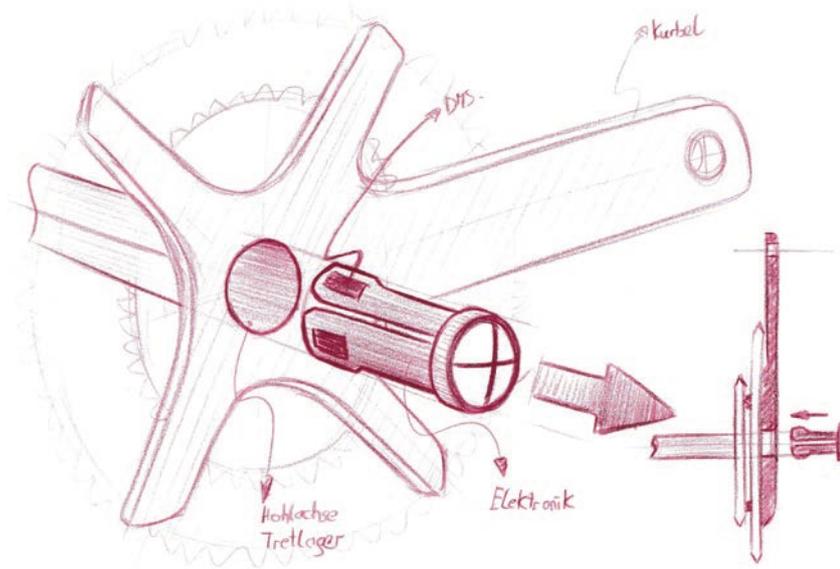


Abb. 133: Skizze Powermeter-Tretlagerachse

### **Vorteile:**

- Plug&Play Ansatz
- rascher Wechsel zwischen Fahrrädern möglich

### **Nachteile:**

- unterschiedliche Durchmesser der Hohlachsen
- nicht alle Kurbeln sind mit Hohlachsen ausgestattet

## ⑦ Socke

Ein textiler Powermeter in Socken als Wearables! Solche Socken, ausgestattet mit leitfähigen Fasern und textilen Drucksensoren im Bereich des vorderen Zehenballens, könnten die Pedalkräfte dort sehr gut erfassen. Die Elektronikeinheit inklusive der Stromversorgung müsste im Bereich oberhalb des Knöchels seitlich am Socken angebracht sein. Die Recherche zeigte, dass es bereits solche smarte Socken für den Laufsport gibt.

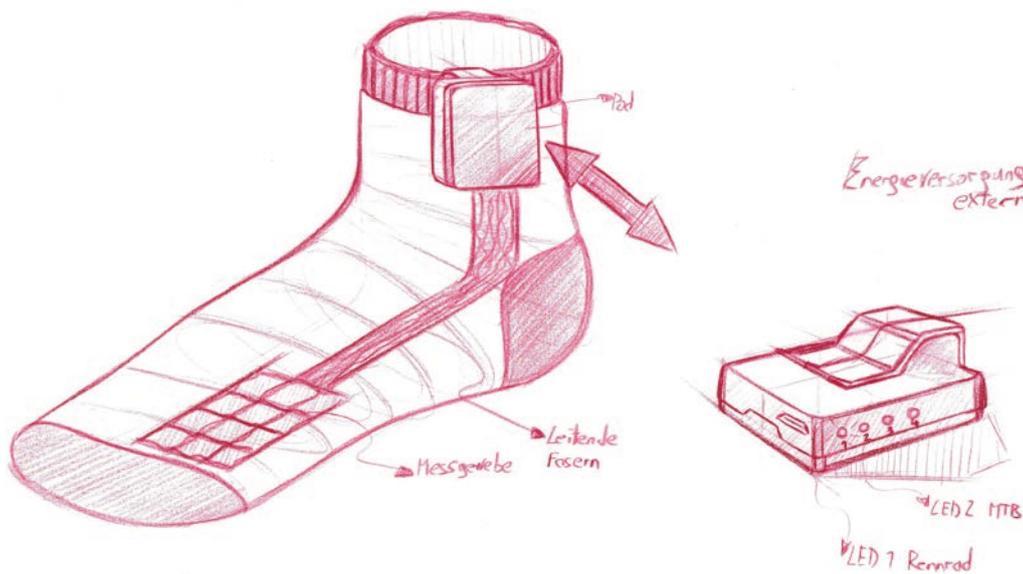


Abb. 134: Skizze Powermeter-Socke

### **Vorteile:**

- innovatives Textilprodukt
- für jeden Fahrradtyp geeignet
- auch für andere Sportarten geeignet
- so ein ähnliches Produkt gibt es schon für den Laufsport (Sensoria)

### **Nachteile:**

- Vielfahrer würden mehrere Socken benötigen (teuer)
- viele Radfahrer\*innen bevorzugen bestimmte Socken
- Triathlet\*innen tragen während des Wettkampfes keine Socken

## ⑧ Fahrradschuh

Angedacht ist ein Fahrradschuh, in dem der komplette Powermeter in der Carbonsohle untergebracht ist. Design als modular aufgebauter Carbonkäfig, bei dem der Innenschuh herausgenommen werden kann und verschiedene Verschlüsse und Innenschuhe verwendet werden können. Ein "build your own shoe" Konzept!

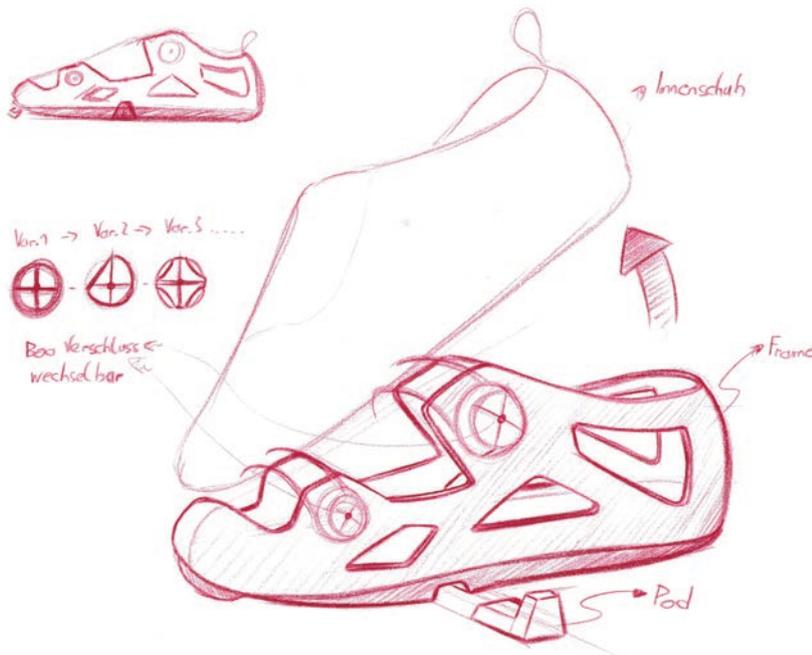


Abb. 135: Skizze Powermeter-Fahrradschuh

### **Vorteile:**

- große Individualisierbarkeit
- geeignet für mehrere Fahrräder des gleichen Radtyps
- geeignet auch bei einem Leihrad beim Trainingslager
- Position genau dort, wo Kraft vom Bein übers Pedal übertragen wird

### **Nachteile:**

- nicht Fahrradtypen übergreifend möglich
- teuer, da im kompletten Schuh verbaut
- durchschnittliche Radschuhnutzung nur 3-5 Jahre

Möglich wäre auch eine Option, dass alle großen Radschuhhersteller in der Carbonsohle die Messeinheit nach einheitlichen Standards verbauen und jeder beliebige Powermeterpod angesteckt werden kann. Somit wäre jeder neue Radschuh bereits mit einer Powermeter-Vorbereitung ausgestattet und der/die Nutzer\*in kauft sich nur einmal den Powermeterpod, in dem sämtliche Elektronik und der Akku verbaut sind dazu und kann diesen an jeden seiner Schuhe anbringen und somit zum Powermeter-Schuh aufrüsten.

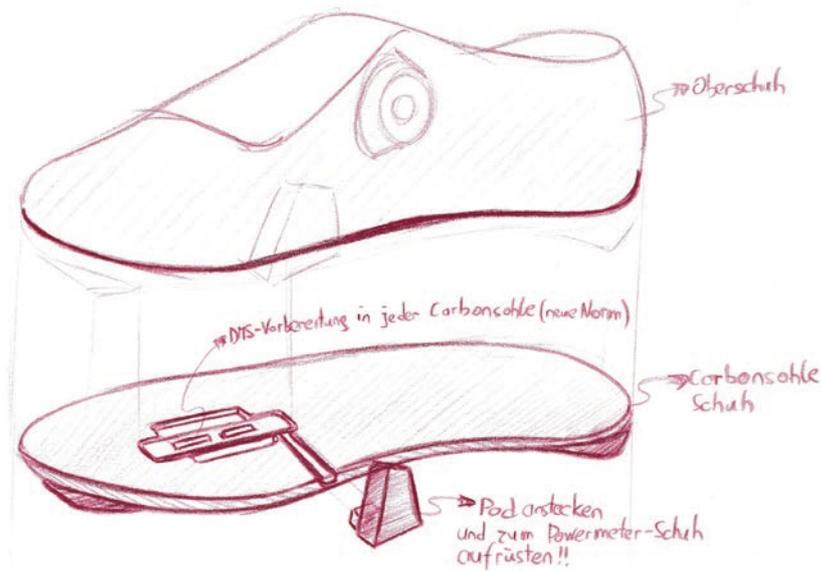


Abb. 136: Skizze Powermeter-Schuhsohle

### **Vorteile:**

- neuer einheitlicher Sohlen-Standard
- jeder Schuh mit Powermeter-Vorbereitung ausgestattet
- Powermeterpod kann von jedem Hersteller verwendet werden

### **Nachteile:**

- schwierig in der Umsetzbarkeit
- Schuhhersteller müssten sich auf einheitliche Standards einigen
- Schuhe werden teurer
- für jeden unterschiedlichen Fahrradtyp wird ein Schuh benötigt

## ⑨ Cleat

Eine Möglichkeit wäre auch, eine Messeinheit im Inneren des Cleats zu platzieren. In diesem speziell konzipierten Cleat müssten die Dehnungsmessstreifen, die Sensoren und der Akku untergebracht sein. Diese Dehnungsmessstreifen könnten in diesem Bereich die Kräfte sehr gut erfassen, da diese genau über der Pedalachse liegt und direkt aufs Cleat überträgt.

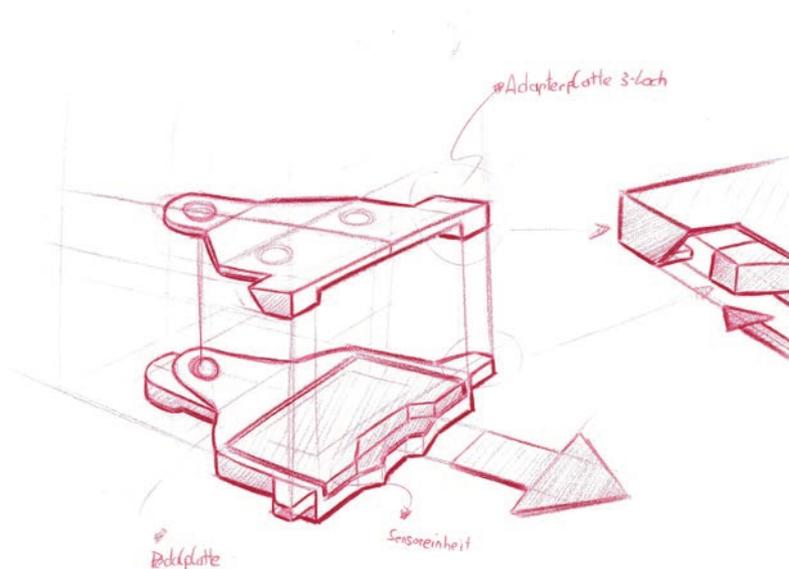


Abb. 137: Skizze Powermeter-Cleat

### **Vorteile:**

- Stelle genau dort, wo die Kraft aufs Pedal übertragen wird

### **Nachteile:**

- die Cleats nützen sich schnell ab, hoher Verschleiß
- sehr kleiner Bauraum
- unterschiedliche Cleatstandards

## ⑩ Cleatplatte

Die Möglichkeit eines speziellen Cleats, brachte mich zu der Idee eine eigene Cleatplatte zu entwerfen, die mit den Dehnungsmessstreifen ausgestattet ist und zwischen Cleat und Schuhsohle mitgeschraubt wird. Die restliche Elektronik könnte in einem Pod untergebracht sein, der mit der Cleatplatte verbunden ist und am Radschuh befestigt wird.

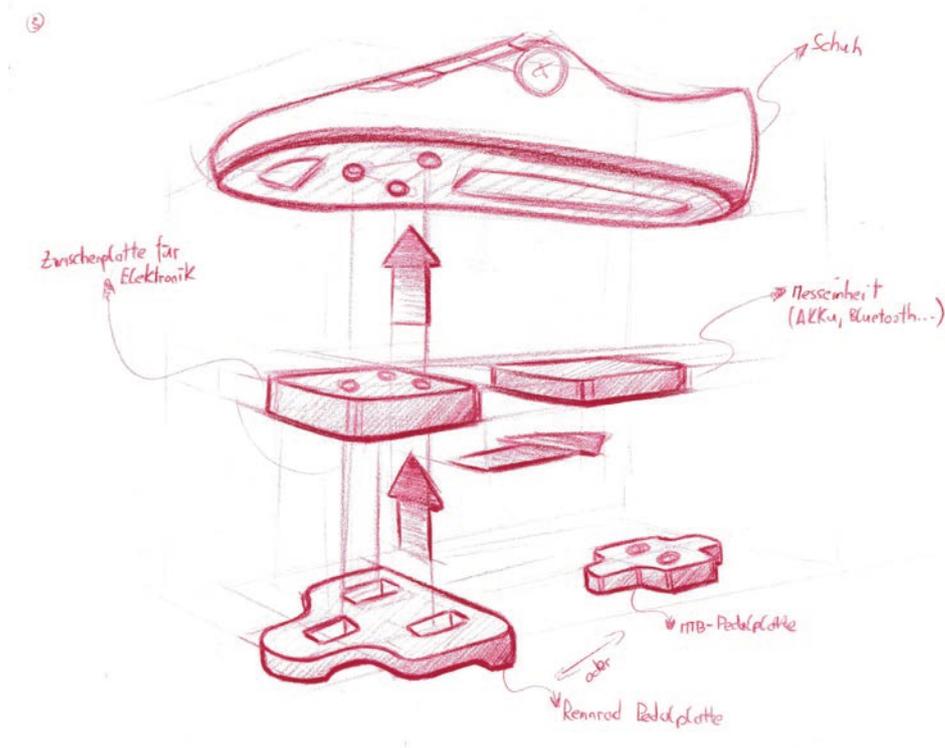


Abb. 138: Skizze Powermeter-Cleatplatte

### **Vorteile:**

- Stelle genau dort, wo die Kraft aufs Pedal übertragen wird
- für jedes Fahrrad geeignet
- diesen Ansatz gab es schon einmal bei einem Produkt

### **Nachteile:**

- unterschiedliche Lochstandard zwischen Rennrad- und Mountainbikeschuhen
- für jeden Schuh wird eine Cleatplatte benötigt
- enger Bauraum im Sohlenbereich der MTB-Schuhe

## 11 Pedalachse

Ein innovativer Ansatz wäre, eine Platte zwischen Pedalachse und Kurbelarm anzubringen. Diese Platte ist mit Dehnungsmessstreifen bestückt und wird mit dem Pedal an die Kurbel geschraubt. Bei jedem Pedaltritt misst die Platte die Verformung zwischen Pedal und Kurbelarm. An der Platte ist ein Pod angebracht, in dem die Elektronik verbaut ist. Dieser Pod kann abgenommen werden und auf ein anderes Fahrrad, an dem die Platte bereits montiert ist, angebracht werden. Dies wäre ein genialer Plug&Play Ansatz, der für jedes Fahrrad geeignet wäre.

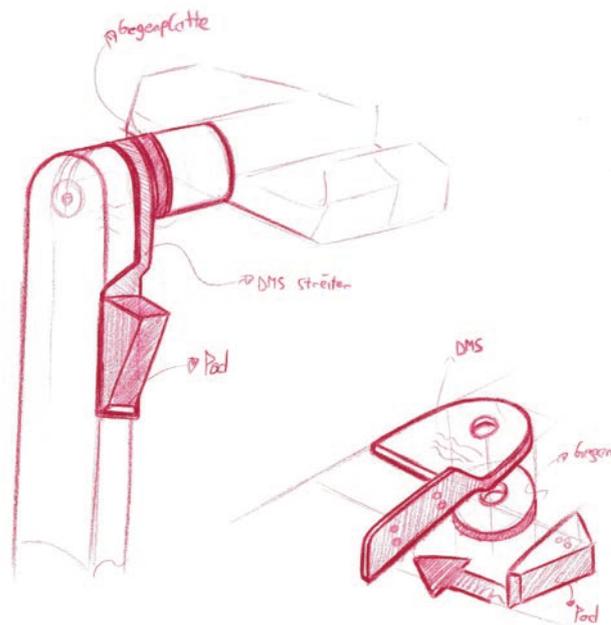


Abb. 139: Skizze Powermeter-Pedalachse

### **Vorteile:**

- Stelle annähernd dort, wo die Kraft aufs Pedal übertragen wird
- Plug&Play, der Pod wird zwischen den Fahrrädern gewechselt
- für jedes Fahrrad geeignet

### **Nachteile:**

- sehr kleine Messstelle
- bei einem Sturz könnte es sehr leicht beschädigt werden
- an jedem Fahrrad müsste die Messplatte befestigt werden

## 12 Innensohle

Möglich wäre eine Messung der Kraft im Vorderfußbereich der Innensohle mittels Dehnungsmessstreifen, also in jenem Bereich wo die Kraft direkt auf Pedal übertragen wird. In dieser speziellen Innensohle wäre die komplette Mess- und Elektronikeinheit inklusive Akku untergebracht. Dies würde ein einfaches Wechseln der Sohle zwischen mehreren Schuhen und in Folge auch Fahrrädern ermöglichen.

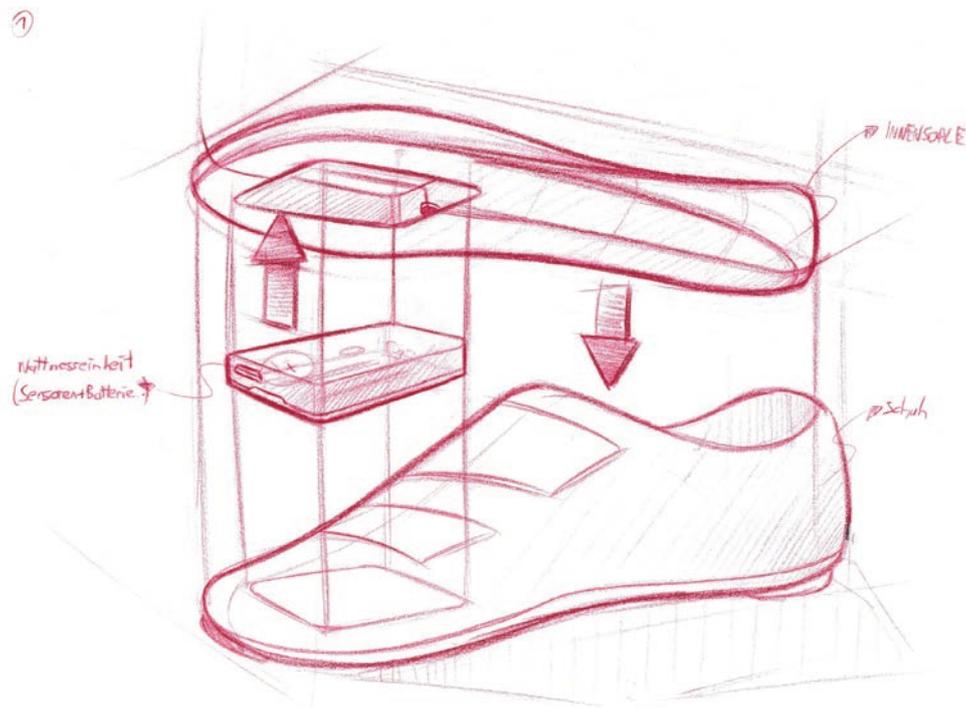


Abb. 140: Skizze Powermeter-Innensohle

### **Vorteile:**

- fahrradunabhängige bzw. radsportunabhängige Gestaltung
- Kompatibel mit Rennrad-, Mountainbikeschuhen, etc.
- sekundenschneller Wechsel der Sohlen in einen anderen Schuh
- Position genau dort wo Kraft vom Bein übers Pedal übertragen wird
- Möglichkeit als Customized Sohle anzubieten
- zusätzliche Parameter zur Fußstellung könnten mitgemessen werden

### **Nachteile:**

- wenig Bauraum
- Sohle müsste dicker sein als eine Standardsohle, um die Messeinheit unterzubringen
- verschiedene Größen müssen geboten werden





# 13. Konzepte

## 13.1 Konzept 1 Cleatplatte

Eine Cleatplatte als Powermeter! Auf einer eigens konstruierten Cleatplatte, die zwischen Carbonsohle und Cleat mitgeschraubt wird, sind mehrere Dehnungsmessstreifen angebracht, um die Verformung während des Pedalierens zu erfassen. Diese Cleatplatte besitzt sowohl den 3-Lochstandard für Rennradschuhe als auch den 2-Lochstandard für Mountainbikeschuhe und kann daher auf jeden Radschuh problemlos montiert werden. Die Elektronikeinheit mit den Inertialsensoren und dem Akku ist in einem separaten Pod untergebracht. Dieser Pod ist über einen Bügel zur Schuhoberseite oder einer seitlichen Schnittstelle an der Schuhaußenseite mit der Cleatplatte verbunden. Dieser Pod kann jederzeit abgenommen werden und an einem anderen Schuh, an dem bereits eine Cleatplatte angebracht ist, aufgesteckt werden.

Die erste Idee sah eine Einschublösung des Pods in die Cleatplatte vor. Dies wurde jedoch verworfen, da dies in Sachen Usability problematisch ist und sich die Bauhöhe dramatisch erhöhen würde. Hat man mehrere Fahrradschuhe, werden für jeden Schuh eine Cleatplatte mit der Messeinheit benötigt, jedoch nur ein Pod, da dieser von Fahrrad bzw. Schuh zu Schuh gewechselt werden kann. Somit ist dieser Powermeter nach dem Plug and Play-Prinzip aufgebaut. Dieses System ist daher bestens für Nutzer\*innen geeignet, die auf allen Fahrrädern, die sie besitzen, mit einem Powermeter unterwegs sein möchten.

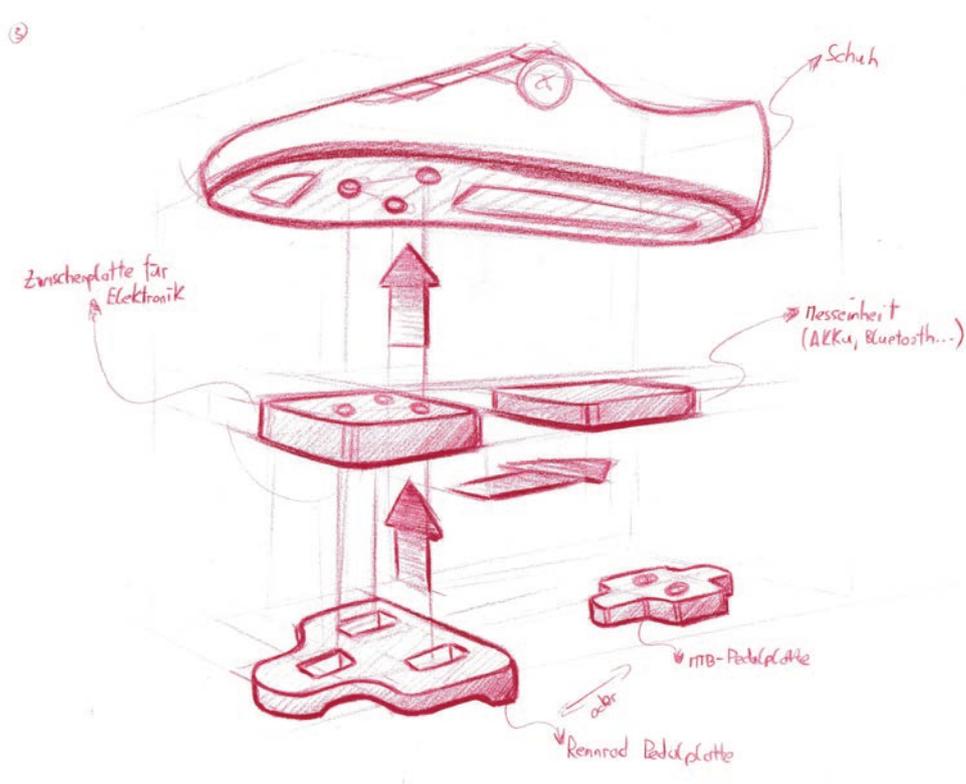


Abb. 142: Prinzipskizze Konzept 1

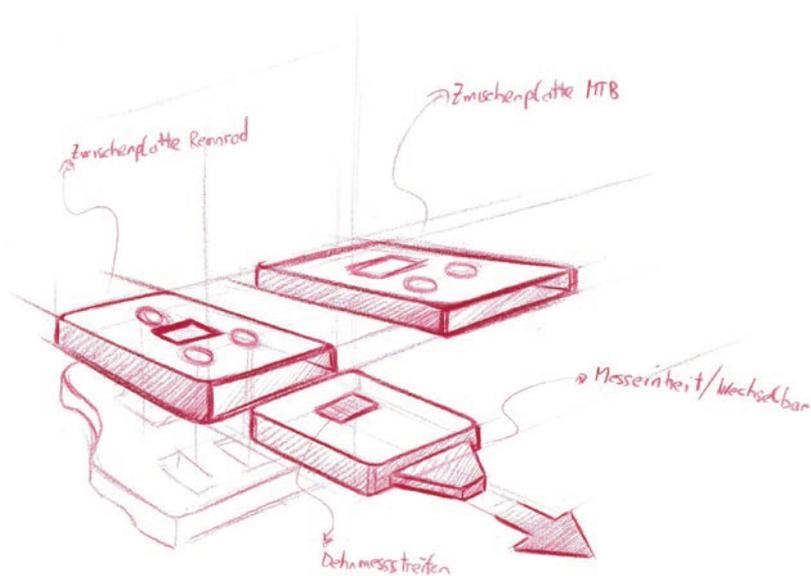


Abb. 143: Detailskizze Cleatplatte

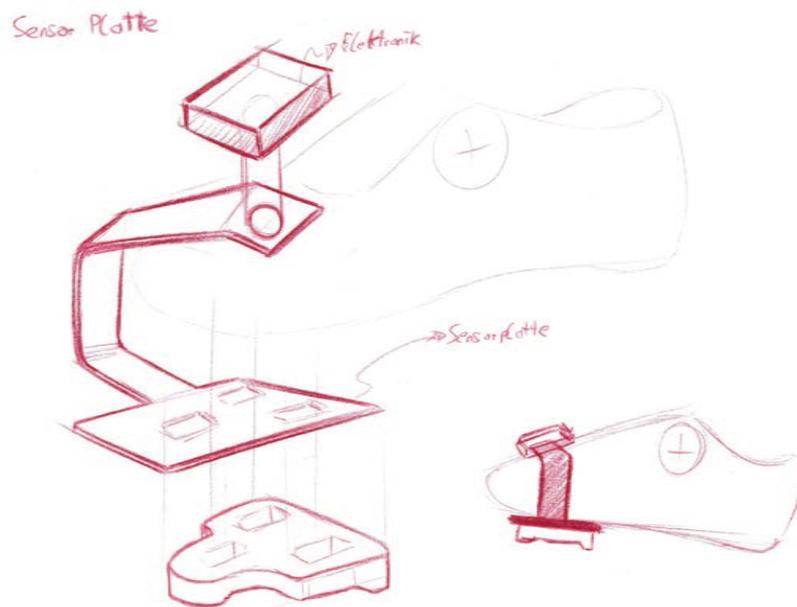


Abb. 144: Detailskizze Halterung des Pods

### **Welche Vorteile bietet es?**

Die Position der Kraftmessung befindet sich in jenem Bereich, wo die Kraft vom Bein aufs Pedal übertragen wird, also im optimalen Bereich. Zudem ist diese Lösung für jeden Fahrradtyp geeignet und der Pod ist sekundenschnell ummontierbar.

Weiterer Vorteil ist auch, dass es so ein ähnliches Produkt schon gegeben hat, jedoch aufgrund der Stand der Technik vor einigen Jahren es Probleme mit der Serienreife gab, es jedoch mittlerweile umsetzbar ist.

### **Welche Nachteile bietet es?**

Größter Nachteil ist, dass für jeden Fahrradschuh eine Cleatplatte mit Messeinheit benötigt wird, dies kann zu erhöhten Kosten führen. Desweiteren ist der Bauraum in diesem Bereich stark begrenzt, vor allem aufgrund beider Lochstandards (2 und 3 Loch) und die Position am Pedal verschiebt sich leicht nach oben aufgrund der Materialstärke der Cleatplatte. Zudem kann dieses System nur an Schuhen mit Cleats montiert werden, also nicht an normalen Sportschuhen.

#### **13.1.1 Mockup Cleatplatte**

Um ein Gefühl für die Form und die Proportionen zu bekommen, wurde ein simples Karton-Mockup an einem Rennradschuh angebracht. Der Karton soll die Cleatplatte inklusive Arm für die Halterung des Pods an der Schuhoberseite darstellen. Der schwarze Kartoncubus soll die Elektronikeinheit inklusive dem Akku darstellen. Die Elektronikeinheit kann von dem Arm abgenommen werden und an einen anderen Schuh aufgesteckt werden, an dem sich ebenfalls diese Cleatplatte mit der Armhalterung befindet.



Abb. 145: Mockup Cleatplatte an Rennradschuh (Schaden-Handstanger, P.,



Abb. 146: Mockup Cleatplatte und Pod an Rennradschuh (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## **\_ Erkenntnisse aus dem Mockup**

Ein Hindernis könnte der Bügel darstellen, denn die Schuhe sind alle unterschiedlich hoch und breit geschnitten. Dies würde die Bügelführung um den Schuh herum erschweren. Außerdem wäre der Powermeter recht markant am Schuh zu sehen und es ist fraglich, ob das die Sportler\*innen begrüßen würden.

Das größte Problem zeigte sich jedoch bei der Verwendung von Mountainbike-Schuhen. Bei Mountainbike-Schuhen kommt es zu Problemen bei der Anbringung der Cleatplatte am Schuh. Aufgrund des Noppenprofils der MTB-Schuhe ist es nahezu nicht möglich, einen Bügel seitlich wegzuführen. Zudem ist der Bauraum bei diesen Schuhen erheblich kleiner als bei Rennradschuhen.

Weiterer Nachteil ist, dass dieses System den Witterungsbedingungen zur Gänze ausgesetzt ist, vor allem im Gelände, wenn der Dreck von unten auf den Pedalbereich spritzt.

All diese Erkenntnisse führten dazu, dass dieses Konzept nicht weiter ausgearbeitet wurde.



Abb. 147: Unterseite einer MTB-Schuhsohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 13.2 Konzept 2 Pedalachse

Ein Powermeter an der Pedalachse! Das Konzept besteht aus einem Pod für die Elektronikeinheit und aus zwei Platten, die zwischen Pedalachse und Kurbelarm mit dem Pedal mitgeschraubt werden. Auf einer der beiden Platten (Messplatte) sind Dehnungsmessstreifen angebracht, die andere Platte soll als vergrößerter Klemmbereich dienen, um so die Messplatte fest an den Kurbelarm zu drücken. Dadurch können in diesem Klemmbereich minimale Verformungen, die beim Pedalieren entstehen, gemessen werden. Die Messplatte ist so geformt, dass auf der Schmalseite oder der Innenseite des Kurbelarms der kleine Pod angebracht werden kann. Im Pod verbaut sind wieder die Inertialsensoren und der Akku. Dieser Pod ist abnehmbar und kann auch auf einem anderen Fahrrad aufgesteckt werden, vorausgesetzt, dieses Fahrrad ist bereits mit den beiden Platten ausgestattet. Dies wäre wieder ein Plug&Play Ansatz, der für jedes Fahrradmodell geeignet wäre, egal ob mit Klickpedal ausgerüstet oder nicht. Dieses Konzept ist daher bestens für Nutzer\*innen geeignet, die eine Powermeter-"Vorbereitung" auf all ihren Fahrrädern besitzen möchten.

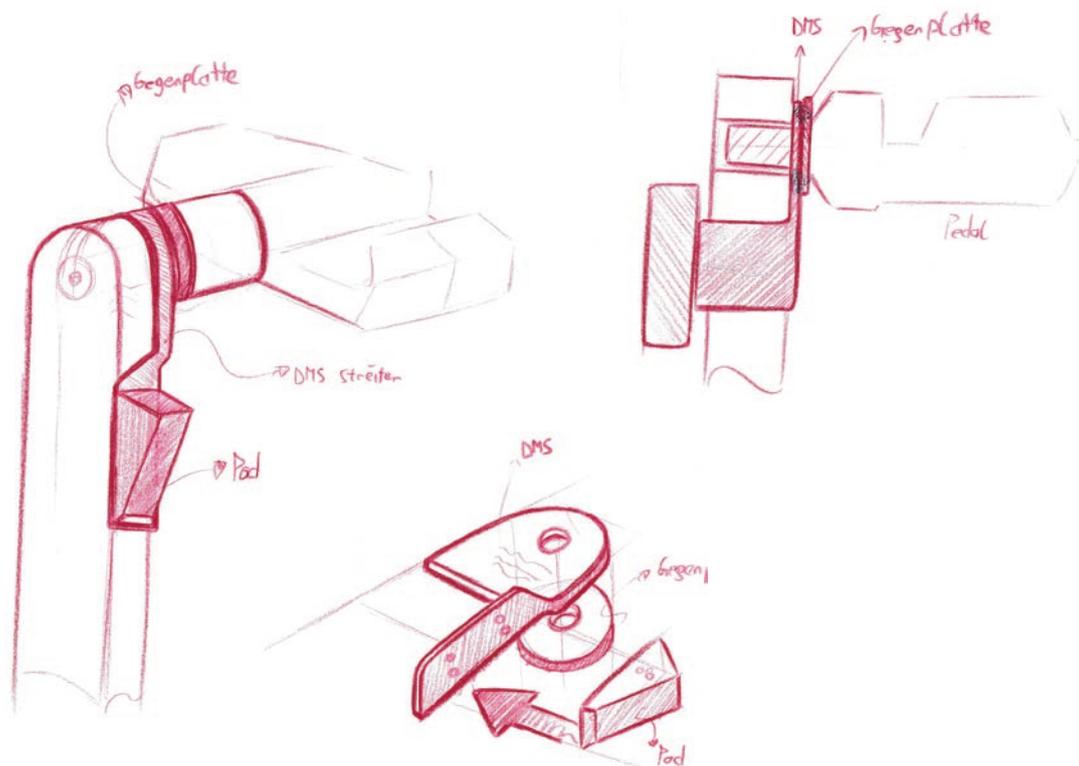


Abb. 148: Prinzipskizze Konzept 2

Ein "Do it yourself" Powermeter! Eine weitere Idee dieses Konzeptes war auch, dieses System als Eigeninstallations-Lösung anzubieten (untenstehende obere Skizze). Dafür klebt man zuhause selbst die mitgelieferten Dehnungsmessstreifen auf die zuvor mit einem Schleifpapier aufgeraute Stelle an der Kurbel auf. Anschließend wird der Pod über die Dehnungsmessstreifen angebracht. Der Pod ist mit einem Bügel ausgestattet, welcher sich um das Ende des Kurbelarms legt, um die optimale Position am Kurbelarm zu definieren.

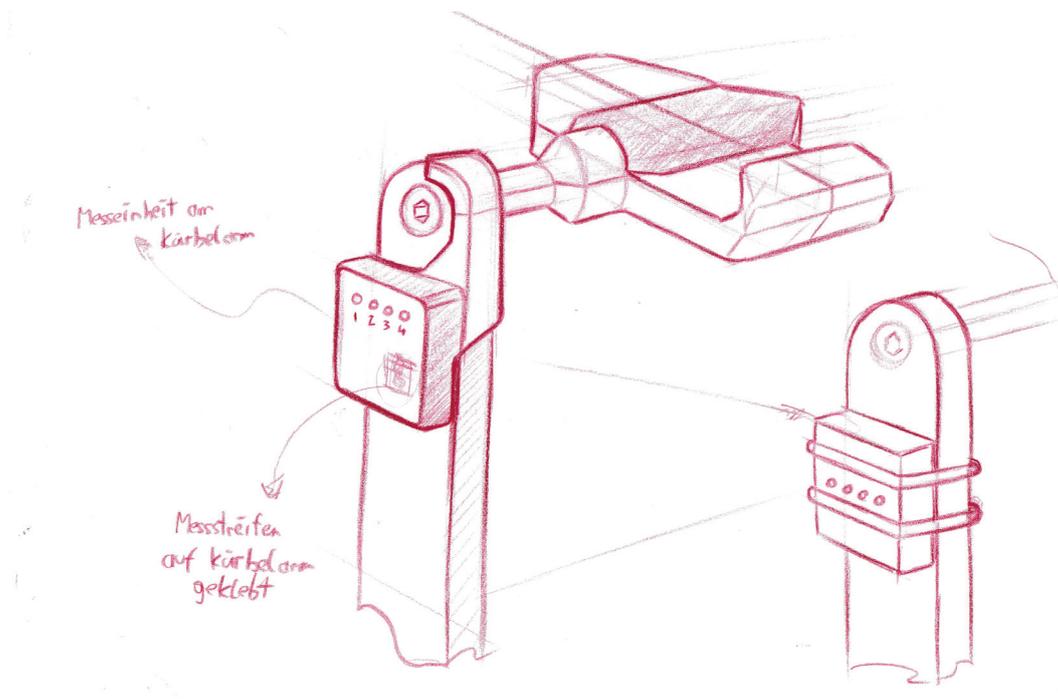


Abb. 149: Skizze "Do it yourself" Powermeter

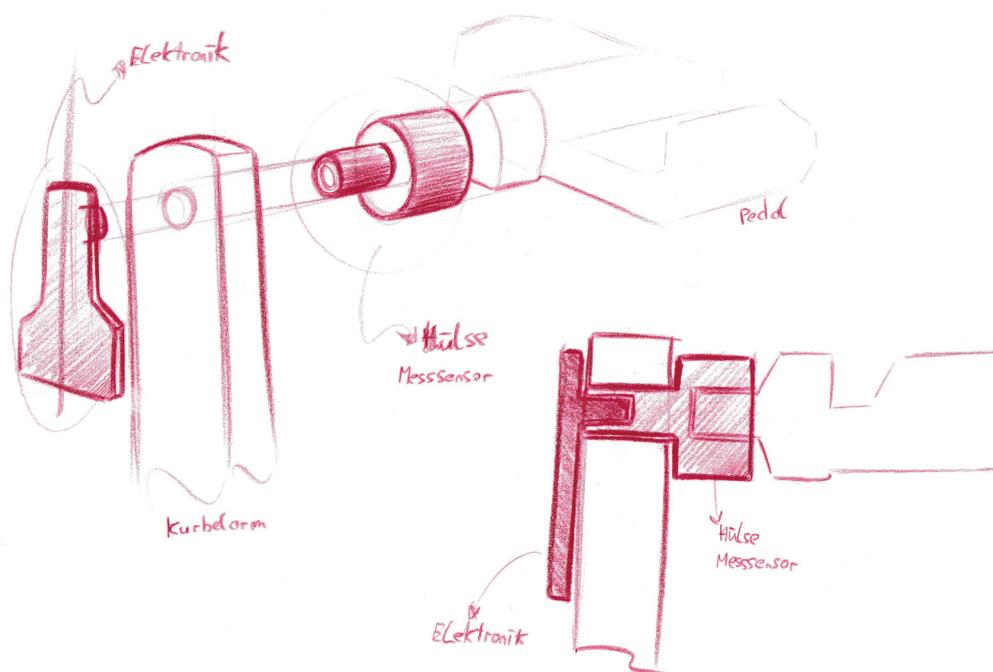


Abb. 150: Skizze Pedalhülse-Powermeter

Ein dritter Ansatz war, die Messplatte nicht als Platte sondern als Hülse, die mit dem Pedal auf den Kurbelarm geschraubt wird, auszuführen (untere Skizze Seite zuvor). Der Pod wird in die Achse der Hülse an der Kurbelinnenseite gesteckt und kann wiederum abgenommen werden. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch aufgrund des extrem kleinen Bauraums und die Veränderung der Position des Pedals in Richtung Außenseite. Zudem gab es so ein ähnliches Produkt schon mal, das jedoch gescheitert ist.

### ***Welche Vorteile bietet es?***

Die Position befindet sich annähernd in dem Bereich, wo die Kraft direkt aufs Pedal übertragen wird. Zudem ist dieses Konzept für jeden Fahrradtyp anwendbar und der Pod ist sehr schnell von Fahrrad zu Fahrrad wechselbar (Plug&Play). Außerdem ist es unabhängig davon, ob ein Klickpedal oder ein Standardpedal montiert ist.

### ***Welche Nachteile bietet es?***

Größter Nachteil ist sicherlich, dass wieder an jedem Fahrrad die Messplatte bzw. die Messhülse montiert sein muss, dies könnte wieder erhöhte Kosten verursachen. Zudem ist die Messstelle baulich sehr begrenzt und den Witterungsbedingungen zur Gänze ausgesetzt. Auch die Veränderung der Pedalposition in Richtung Außenseite aufgrund der beiden geklemmten Platten ist nicht zu vernachlässigen. Es sind zwar nur wenige Millimeter, jedoch spürbar beim Pedalieren. Des weiteren könnte der Powermeter bei einem Sturz sehr leicht beschädigt werden. All diese Punkte führen dazu, dass die Nachteile gegenüber der Vorteile überwiegen.

## **13.2.1 Mockup Pedalachse**

Um ein Gefühl für die Proportionen zu bekommen, wurde ein Karton-Mockup an einem Rennradpedal und in weiterer Folge am Rennrad angeschraubt. Der Karton soll die beiden Platten darstellen. Der schwarze Kartoncubus soll die Elektronikeinheit inklusive dem Akku darstellen. Die Elektronikeinheit kann von der Platte abgenommen werden und an einem anderen Fahrrad aufgesteckt werden, an dem ebenfalls diese beiden Platten montiert sind.



Abb. 151: Mockup Pedalachse-Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 152: Mockup am Rennrad montiert (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### **\_ Erkenntnisse aus dem Mockup**

Ein Problem könnten die unterschiedlichen Formen der Pedale sein. Denn je nachdem wie das Pedal ausgeformt ist, ist eine bessere oder schlechtere Klemmung der Platten möglich, dies könnte zu größeren Messfehlern führen. Dieser Punkt und die zuvor erwähnten Nachteile ergaben, dass auch dieses Konzept zu viele Fehlerquellen bereithält und deshalb nicht weiter als Entwurf ausgeführt wird.

### 13.3 Konzept 3 Innensohle

Ein Powermeter in der Innensohle! Dieses Konzept bzw. die "Option eins" besteht aus einer speziell konstruierten Schuhinnensohle die mit der nötigen Mess- und Elektronikeinheit ausgestattet ist, um die Pedalkräfte zu erfassen. Die Dehnungsmessstreifen sind dabei im Bereich der Zehenballen angebracht, also in jenem Bereich in dem die Kraft direkt auf das Pedal übertragen wird. Die Elektronikeinheit samt Akku kann weiter hinten angebracht werden und sollte nicht zu groß ausfallen, damit die Materialstärke der Sohle nicht zu dick wird. Die Elektronikeinheit müsste wieder mit diversen Inertialsensoren ausgestattet sein, um die Drehbewegung beim Pedalieren zu erfassen und daraus die Trittfrequenz zu berechnen.

Dieses Sohlenkonzept würde ein einfaches Wechseln des Powermeters bzw. der Sohle zwischen mehreren Schuhen und in Folge auch Fahrrädern ermöglichen und wäre damit an kein Fahrrad gebunden. Dabei ist es unbedeutend, ob es sich um Rennrad-, Mountainbike- oder andere Sportschuhe handelt.

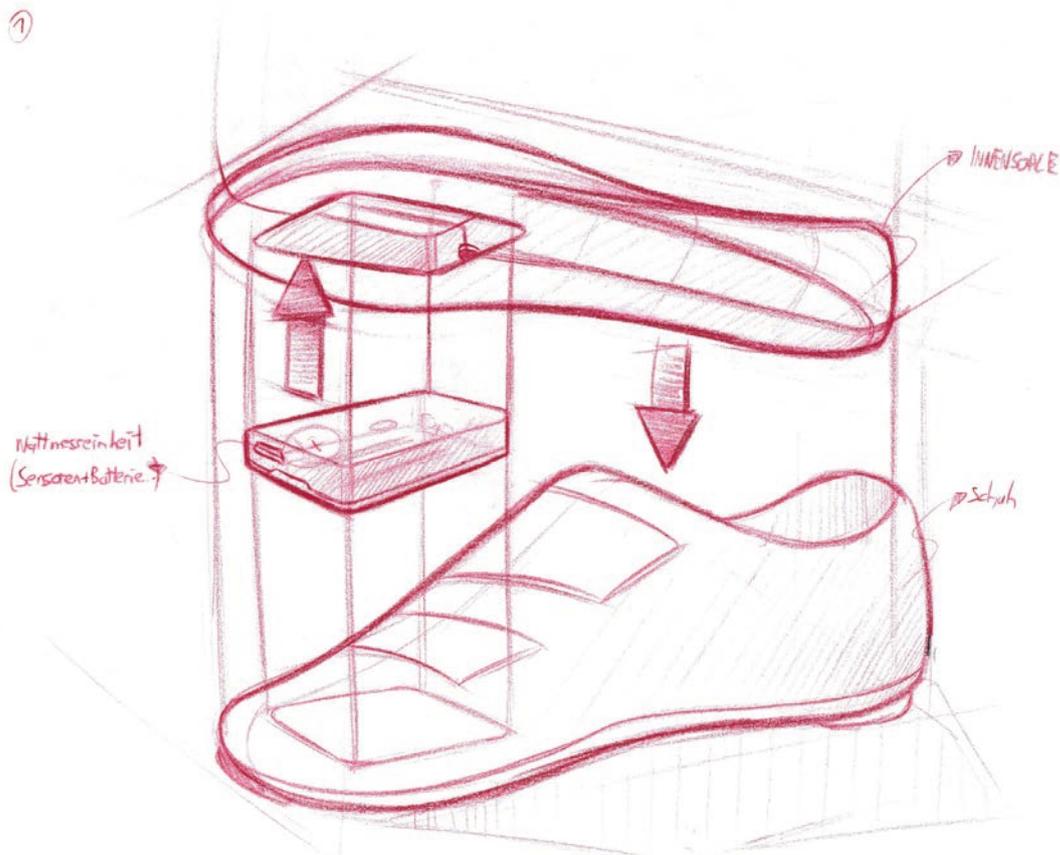


Abb. 153: Prinzipskizze Konzept 3

Eine weitere Option wäre, die Elektronikeinheit von der Sohle zu trennen und an der Schuhaußenseite mit einem speziellen Klipp zu befestigen. Dabei wäre die Position im Knöchelbereich oder im Schnürbereich des Schuhs denkbar. Die sauberste Lösung wäre jedoch, wenn man alles direkt in der Sohle unterbringen könnte, so wie in Option eins beschrieben.

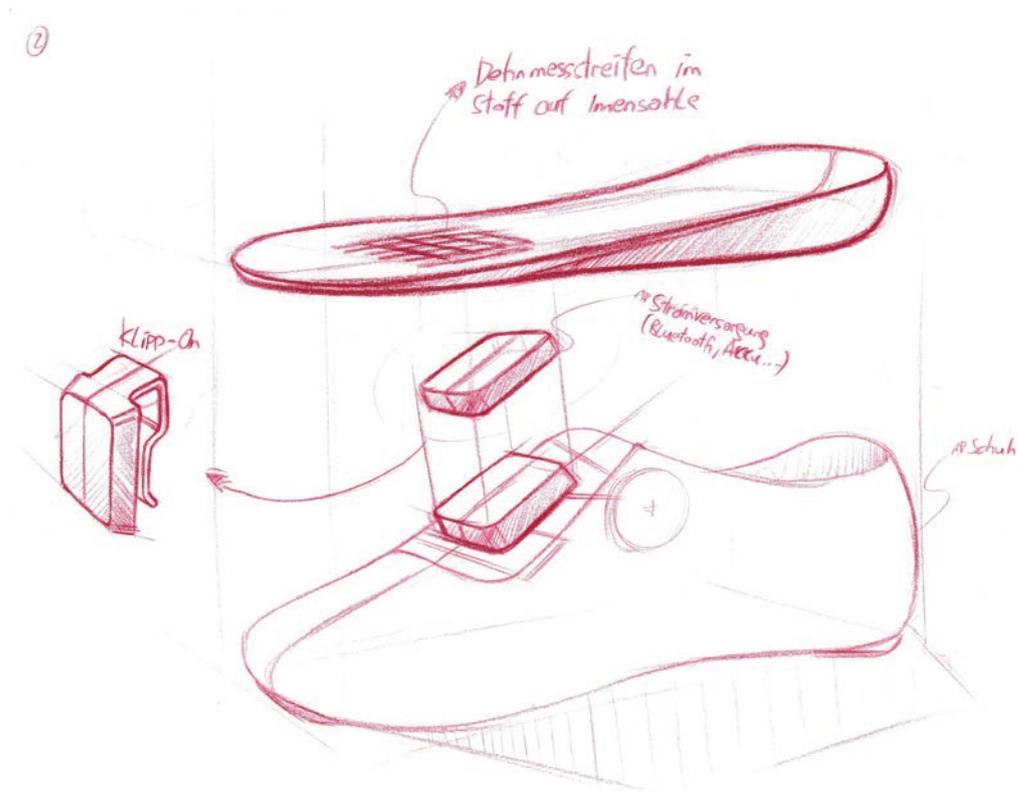


Abb. 154: Skizze Messeinheit in der Sohle, Pod am Schuh

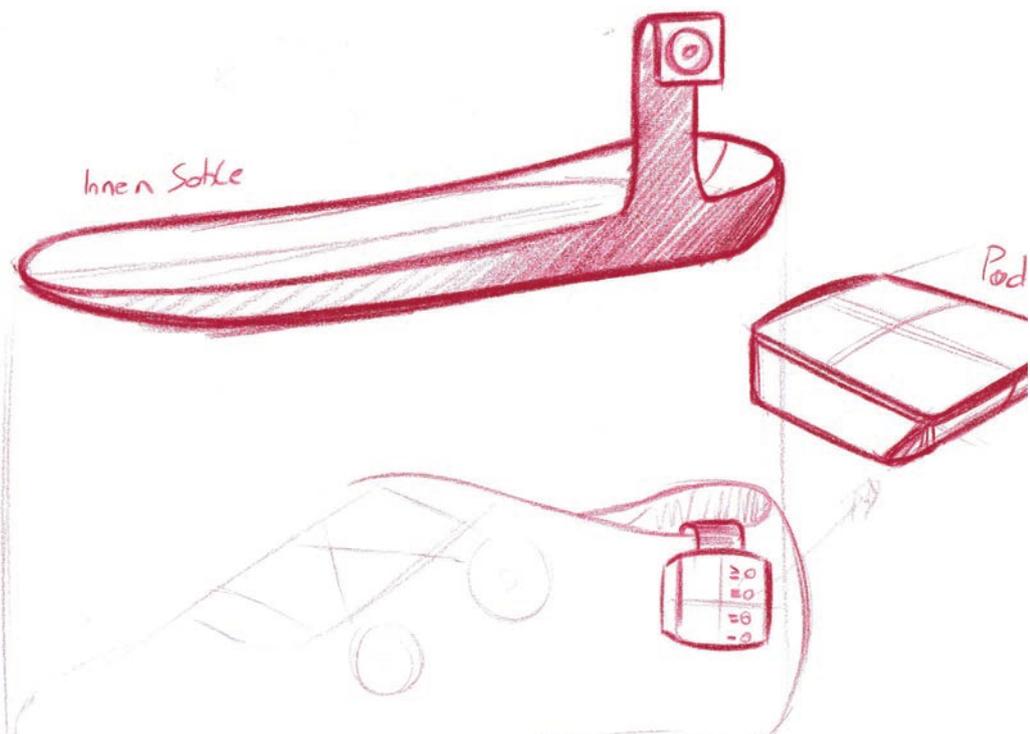


Abb. 155: Skizze Pod im Bereich des Knöchels

### ***Welche Vorteile bietet es?***

Das Konzept wäre zu 100 Prozent fahrradunabhängig und in weiterer Folge eventuell sogar radsportunabhängig. Zudem wäre es mit jedem erdenklichen Schuh, bei dem die Innensohle entnommen werden kann, kompatibel und in sekundenschnelle gewechselt. Die Sohle bietet zudem den großen Vorteil, dass diese als Customized Sohle angeboten werden kann. Somit hat man auch direkt einen zusätzlichen Mehrwert mit dem Produkt geschaffen und aufgrund der Position der Messsensoren könnten zusätzliche Parameter zum runden Tritt und der Fußstellung bereit gestellt werden. Des Weiteren ist der Powermeter nicht direkt sichtbar und stört daher die Ästhetik des Fahrrades oder der Komponenten in keinster Weise.

### ***Welche Nachteile bietet es?***

Größter Nachteil dieses Konzept ist sicherlich, dass für jede Schuhgröße ein eigener Powermeter angefertigt bzw. angeboten werden muss. Zudem darf die Sohle nicht viel dicker werden als eine Standardsohle, da der Fußraum in den meisten Fahrradschuhen relativ begrenzt ist.

### **13.3.1 Mockups Innensohle**

Um zu überprüfen, ob ein Sohlenkonzept Sinn macht, wurden etliche Karton-Mockups erstellt. Die Mockups befassten sich mit dem Thema Aufbau/Konstruktion und mit dem Thema Komponenten. Wie können die Komponenten angeordnet werden und wie könnte die Messeinheit aufgebaut werden. Die Kartonmodelle wurden mit einem Gummiband auf die Originalsohle des Radschuhes angebracht, um ein Gefühl für die Proportionen und die Materialstärken zu bekommen.



Abb. 156: Diverse Mockups von Innensohlen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### **\_ Erkenntnisse aus den Mockups**

Ein Problem könnte sein, die Sohle bezüglich Proportionen so zu gestalten, dass diese problemlos in jeden Schuh passt. Zudem wurde ersichtlich, dass es zum Thema Aufbau der Sohle viele verschiedenen Möglichkeiten gibt. Bei den ersten Mockups spielten Usability und Material noch keine Rolle. Was jedoch zum Problem wurde, ist, dass die Kartonmodelle nur 2D-Abbildungen einer Sohle sind und eine echte Sohle komplex dreidimensional ausgeformt ist. Da dies jedoch essenziell bei einer Sohle ist, wurden anschließend alle drei Konzepte nach Abwägen aller Vor- und Nachteile miteinander verglichen.

Im nächsten Punkt folgt daher die Evaluierung des Konzeptes.

## 13.4 Evaluierung des Konzepts Innensohle

Nach Abwägen aller Vor- und Nachteile der Konzepte fiel die Entscheidung auf das Konzept „Innensohle“. Dieses Konzept bietet die meisten Vorteile, insbesondere auf Kompatibilität, Funktionsumfang und Anmutung. Zudem gibt es sehr viele Überschneidungen mit den derzeit sehr populären Pedalpowermetern.

### Pedal versus Konzept Innensohle

#### Pedal

##### Vorteile

- preiswert
- ideal als Nachrüstlösung, auch für sehr alte Räder
- kompatibel mit allen Kurbelarmen
- für mehrere Räder mit gleichem Cleat-Standard verwendbar
- große Auswahl an Anbietern
- Möglichkeit ob einseitig oder beidseitige Messung
- nachträgliches Aufrüsten auf beidseitige Messung möglich
- auch auf einem Leihrad sehr schnell montierbar
- relativ leicht
- zusätzliche Funktionen wie Trittanalyse
- spezielle Systeme auch fürs MTB
- meist Stromversorgung mit Akku
- Anmutung: sieht aus wie ein Standardklickpedal

##### Nachteile

- verschiedene Cleat-Standards, nicht für jeden Fahrradtyp geeignet
- bei Sturz kann es leicht beschädigt werden

Abb. 157: Vor- und Nachteile von Pedal versus Konzept Innensohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

In der Untenstehenden Grafik sind die Vor- und Nachteile der Pedalpowermeter und des Konzepts „Innensohle“ gegenübergestellt. Dabei wird ersichtlich, warum die Wahl auf eine „Powermetersohle“ gefallen ist.

Im nächsten Kapitel folgt die Ausarbeitung des Konzeptes Innensohle zum Entwurf.

## **Konzept: Innensohle**

---

- preiswert
  - ideal als Nachrüstlösung, auch für sehr alte Räder
  - kompatibel mit allen Schuhen
  - für mehrere Räder verwendbar
  - Fahrrad und Komponenten (Kurbel, Pedal) unabhängig
  - Möglichkeit ob einseitig oder beidseitige Messung
  - nachträgliches Aufrüsten auf beidseitige Messung möglich
  - auch auf einem Leihrad nutzbar
  - relativ leicht
  - zusätzliche Funktionen wie Trittanalyse möglich
  - evtl. Einsatzmöglichkeit bei anderen Sportarten (Laufen, Wandern)
  - Stromversorgung mit Akku möglich
  - keine Veränderung der Anmutung
  - keine Beschädigung bei einem Sturz
- 
- Sohle wird dicker als Standardsohle (geringer Bauraum)
  - verschiedene Größen aufgrund verschiedener Fußgrößen
  - Schuhformen sind unterschiedlich geschnitten (breit, schmal, etc.)



# 14. Entwurf

Der Entwurfsprozess startet mit der Detaillierung der Konzeptidee, wobei sich dabei die Punkte Aufbau/Konstruktion der Sohle, die Entnahme der Sohle und das Thema Lademöglichkeit als wichtigste Punkte, darstellen. Die Herausforderung besteht darin, all diese Punkte optimal in einem Entwurf zu vereinen und daraus ein erstes 3D-Druck Modell und in weiterer Folge einen ersten funktionierenden Prototyp aufzubauen. Dieser Prototyp soll erste verwertbare Messdaten liefern.

## **14.1 Ideationphase**

Das Kapitel startet erneut mit einer Ideationphase, um für die Themen Aufbau/Konstruktion, Usability und Lademöglichkeit Lösungen zu finden. Die Favoriten sind dabei jeweils mit einem farbigem Rahmen gekennzeichnet. In weiterer Folge wird daraus ein Package definiert. Ist das Package definiert wird in einer zweiten Gestaltungsphase der Entwurf finalisiert.

### **14.1.1 Aufbau/Konstruktion**

Wie kann eine Powermetersohle aufgebaut sein? Dazu finden sich auf der rechten Seite zahlreiche Überlegungen dazu. Die Detaillierung dazu folgt auf den nächsten Seiten.

Es gibt Ideen in Richtung einer Dreischicht-Sandwichbauweise. Die oberste Schicht ist die weiche Innensohle, die mittlere Schicht die Messplatte und die unterste Schicht für die restlichen Elektronikkomponenten. Ausgangsidee dazu war, alle Bauteile voneinander einfach trennen zu können. Nachteil ist jedoch, dass dieses Schichtprinzip die Sohle um einiges verdicken würde als eine Standardsohle. Deshalb gibt es auch Überlegungen, eine Sohle zu gestalten, in der die Messplatte und die Elektronikeinheit von unten eingesteckt wird. Sozusagen ein steckbarer Zweischicht-Aufbau. Dies hat zur Folge, dass die Sohle nicht zu dick wird und die Elektronikeinheit trotzdem entfernt werden kann, falls die Sohle nach Jahren verschlissen ist.

Auch die Messplatte stellt eine essentielle Komponente dar. Die ersten Ideen sahen noch Messplatten über die gesamte Sohlenlänge vor. Da stellt sich jedoch heraus, dass dies nicht möglich ist, da die Radschuhe eine leichte Wölbung nach oben besitzen. Deshalb muss die Messplatte möglichst klein und unter dem Druckpunkt der Zehenballen platziert werden. Damit passt sich diese auch der Wölbung der Radschuhe an.

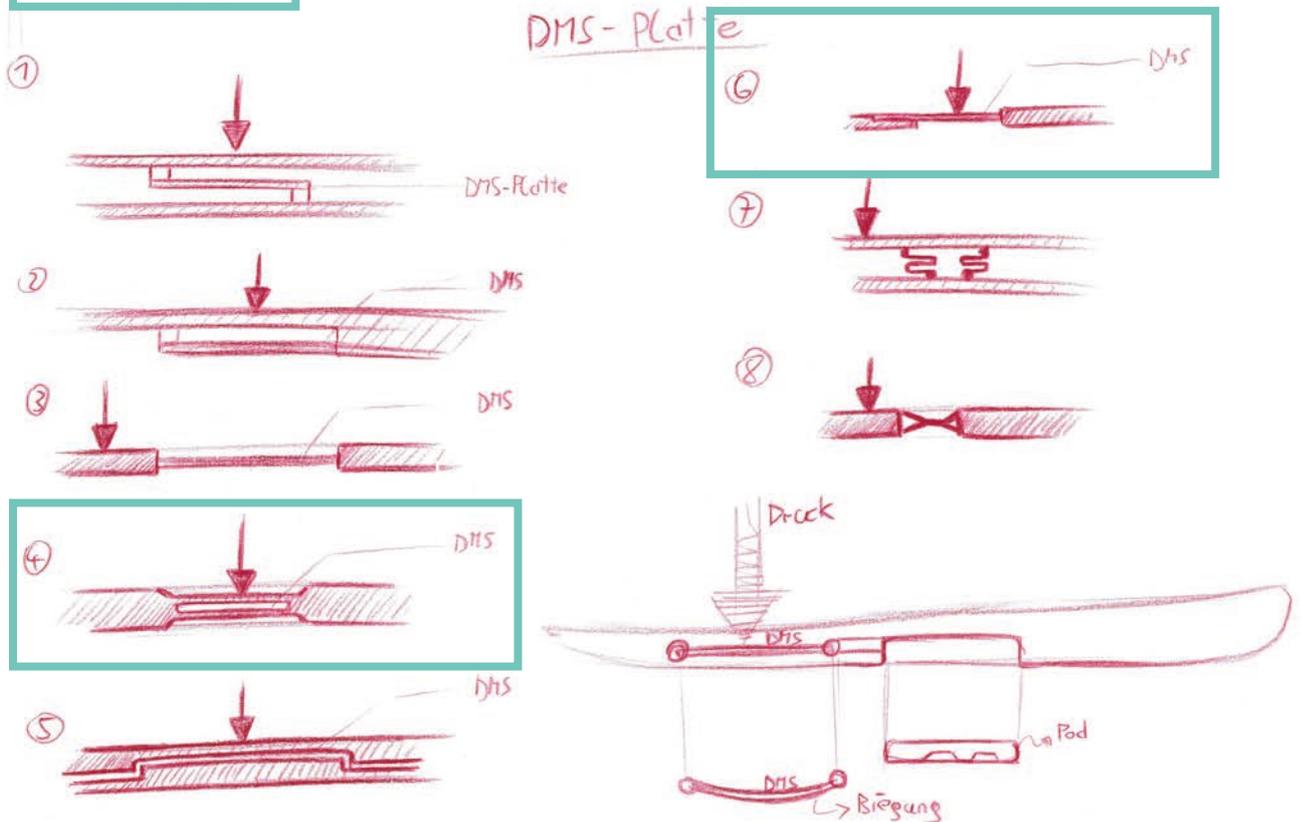
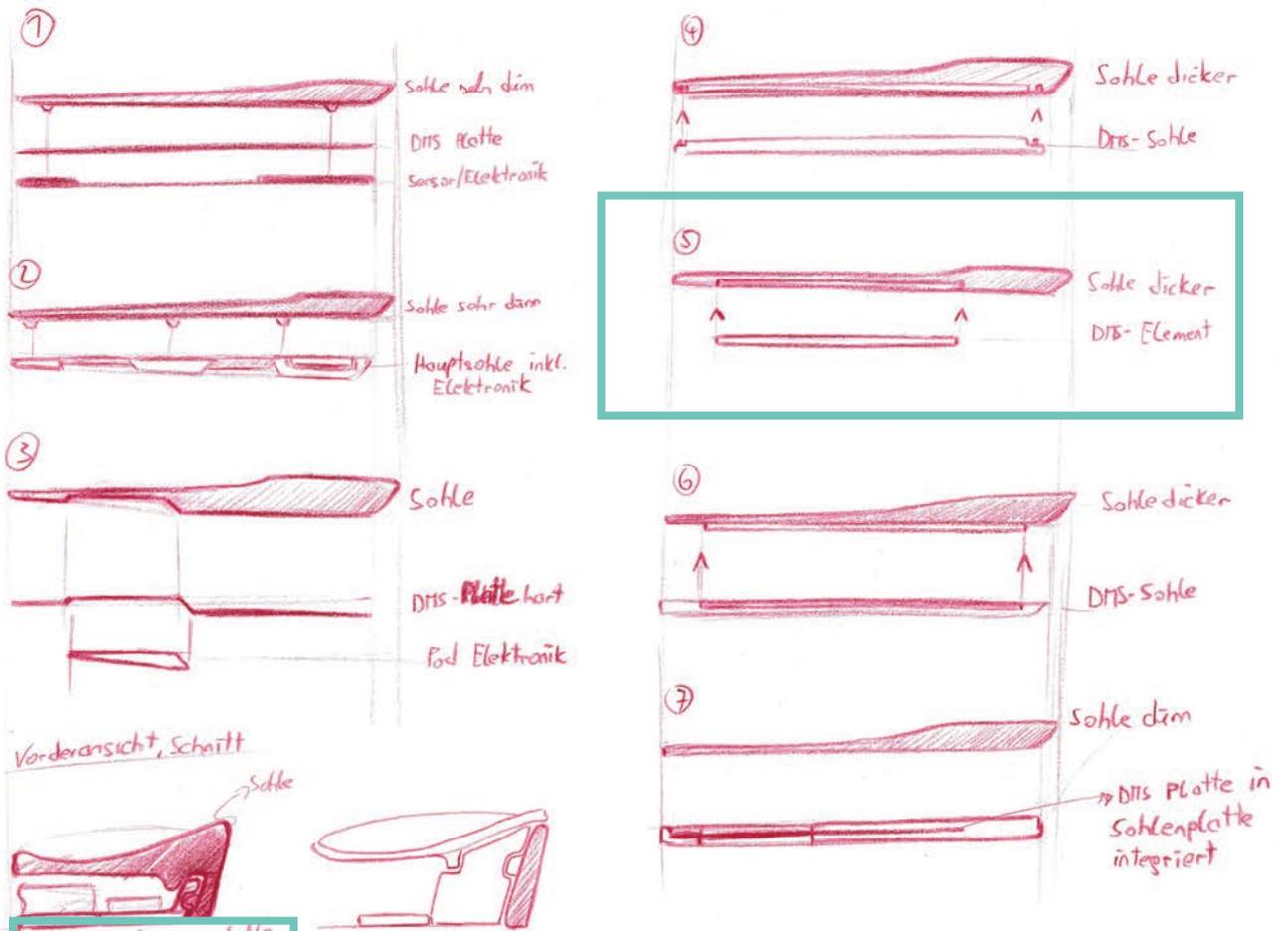


Abb. 158: Skizzen des Aufbaus

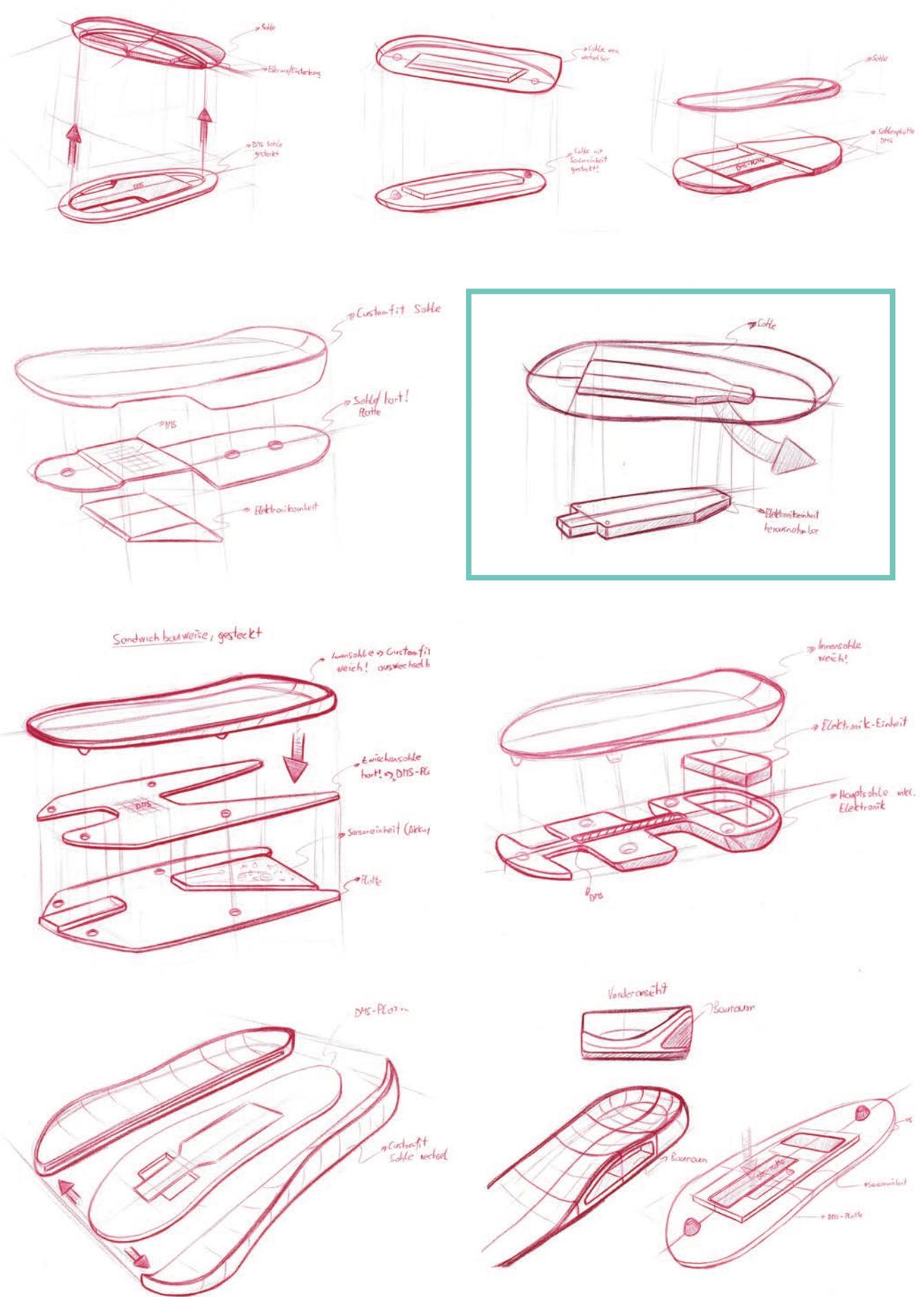


Abb. 159: Explosionsdarstellungen des Aufbaus

### 14.1.2 Usability

Um ein problemloses Einsetzen der Sohle in einen Schuh zu ermöglichen, werden einige Lösungsansätze in Richtung Lasche und Band verfolgt. Dabei steht stets die einfache Handhabung im Vordergrund. Es gilt zuerst die optimale Position im Schuh dafür zu finden. Angedacht ist der hintere Knöchelbereich und der seitliche Ristbereich. Es zeigt sich jedoch, dass ein Band sehr unangenehm ist, da es sich leicht verdreht und im Fahrtwind flattern kann. Daher wird auch angedacht, ob dieses abnehmbar ist, wenn dies der/die Nutzer\*in wünscht.

Nach zahlreichen Selbstversuchen stellte sich aber heraus, dass der Bereich im Ristbereich sich am besten für eine kleine Lasche eignen würde, da diese Stelle leicht zugänglich ist und man dadurch mit zwei Fingern die Sohle rasch anheben und herausziehen kann. Zudem ist die Lasche in diesem Bereich nicht am Fuß spürbar. Diese Lasche darf jedoch nicht zu weich sein, damit sie beim Hineinschlüpfen in den Schuh nicht umgeknickt wird und zudem soll diese eine leichte Ausformung für die Finger aufweisen.

Des weiteren darf die Sohle in den Randbereichen nicht zu steif sein, um ein einfaches einfädeln, in den Schuh zu garantieren. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass die Randbereiche nicht mit Elektronikkomponenten bestückt sind, sondern nur im Bereich der Mitte. Dies stellt eine enge Gratwanderung zwischen Usability und der Unterbringung aller Elektronikkomponenten in der Sohle dar.

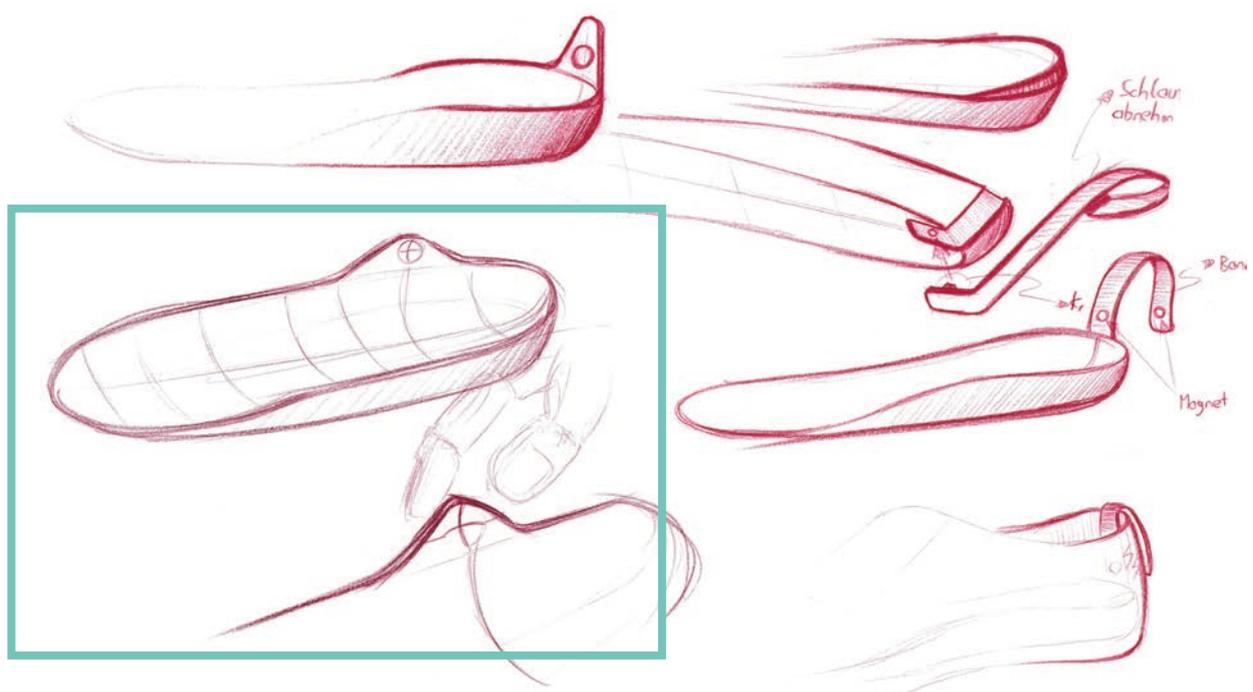


Abb. 160: Skizzen zur Sohlenentnahme

### 14.1.3 Lademöglichkeit

Für die Energieversorgung wird ein Akku anstelle einer Batterie verwendet. Die erste Idee sieht vor, die Sohle im Schuh zu belassen und über eine Öffnung im Fersenbereich der Sohle zu laden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass im Fersenbereich die Sohle eine Öffnung aufweisen muss, was am Fuß unangenehm werden kann. Auf Basis weiterer Interview Fragen in meiner Fahrrad-Community ergab sich, dass die Entnahme der Sohle aus dem Schuh für den Ladevorgang bevorzugt wird. So muss nicht der komplette Schuh, könnte ja auch schmutzig sein, zur Steckdose gebracht werden, sondern nur die Innensohle. Deshalb wird die Ladebuchse an der Unterseite der Sohle im Bereich der Elektronikeinheit angebracht.

Im nächsten Punkt werden nun die Erkenntnisse zu einem Package zusammengefasst.

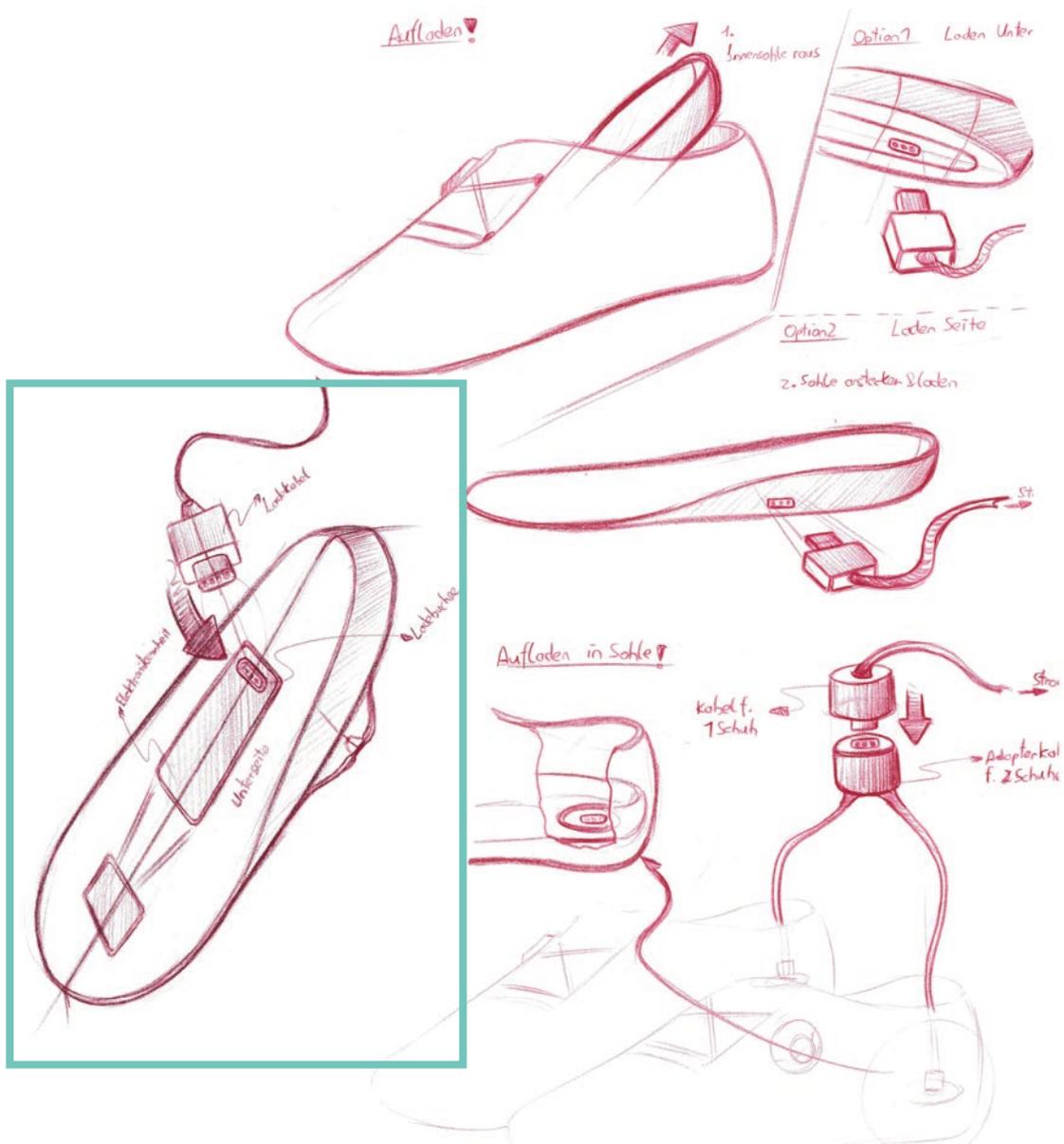


Abb. 161: Skizzen zur Lademöglichkeit

## 14.2 Package

Anhand der vorangegangenen Ideen im Gestaltungsprozess, der Marktanalyse und der technischen Expertise von Herrn DI Stephan Selinger von der Fachhochschule Hagenberg, können diese in einem Package zusammengefasst werden. Grob kann das Package für eine Powermeter-Sohle in eine Sohle, eine Elektronikeinheit mit integrierten Inertialsensoren und Akku und einer Messeinheit mit Dehnungsmessstreifen mit angeschlossenen Analog-Digital-Umsetzer unterteilt werden. Die untenstehende Grafik zeigt schematisch die erforderlichen Komponenten, die im Anschluss detaillierter beschrieben werden.

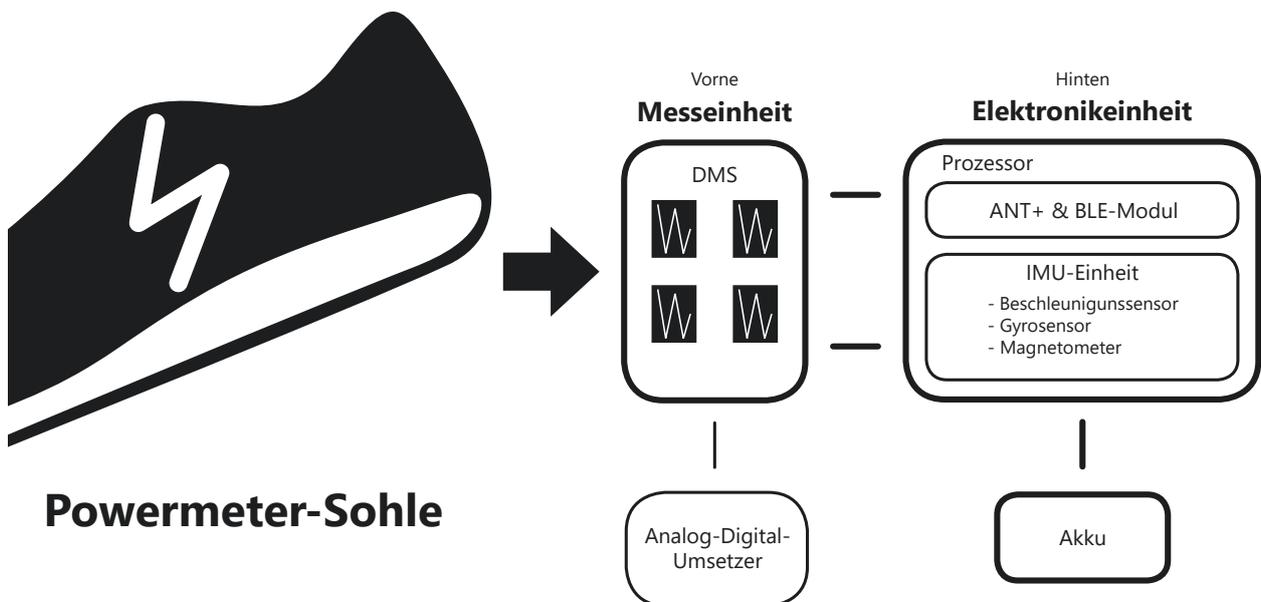


Abb. 162: Package der Powermeter-Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### **14.2.1 Messeinheit**

Um die auftretenden Kräfte messen zu können, bedarf es mehrerer Dehnungsmessstreifen auf einer Platte, die die Verformung erfassen können, um anhand dieser Spannungsunterschiede die Leistung ermitteln zu können.

#### **\_ Dehnungsmessstreifen**

Die Dehnungsmessstreifen müssen auf einer Platte in der Innensohle im Bereich des Druckpunktes über der Pedalachse verbaut sein. Also im Bereich der Zehenballen. Diese Platte muss so ausgelegt sein, dass sie sich bei jeglicher Krafteinwirkung beim Treten minimalst verformt. Die dadurch auftretenden Spannungen können von den Dehnungsmessstreifen erfasst und daraus die erbrachte Wattleistung beim Pedalieren erhoben werden. Es müssen mindestens zwei Dehnungsmessstreifen an der Unterseite und mindestens zwei an der Oberseite der Platte angebracht sein. Diese sind in Form einer Brückenschaltung angeordnet, um mögliche Temperaturunterschiede optimal auszugleichen und valide Werte zu bekommen. Diese sogenannte „Wheatstone bridge“ ist ein elementarer Bestandteil jeglicher Powermeter-Systeme.

#### **\_ Analog-Digital-Umsetzer**

Der Analog-Digital-Umsetzer dient zur Umsetzung analoger Eingangssignale in digitale Datenströme. Dieser wird benötigt, um die Signale der Dehnungsmessstreifen digital umzuwandeln, um für den Radcomputer „lesbare“ Daten zu generieren.

### **14.2.2 Elektronikeinheit**

Die Elektronikeinheit ist in einer kleinen Box verbaut und mit der Messeinheit und dem Akku verbunden und besteht aus einer Platine an der eine IMU-Einheit, ein BLE-Modul und ANT+-Modul angebracht sind.

#### **\_ IMU-Einheit (Gyrosensor, Beschleunigungssensor, Magnetometer)**

IMU-Einheit steht für „inertial measurement unit“ und wird benötigt um Beschleunigung, Drehbewegung und Lage der Sohle bzw. des Powermeters zu bestimmen. Die IMU-Einheit besteht aus einem Gyrosensor, Beschleunigungssensor und Magnetometer. All

diese Sensoren sind notwendig, um die Drehbewegung und die Lage der Sohle im Raum jederzeit bestimmen zu können. Aus diesen Informationen können Daten zum runden Tritt, Drehmomenteffektivität und der Pedalglätte bereitgestellt werden. All diese Daten sollen dem/der Sportler\*in dabei helfen effektiver und effizienter zu Pedalieren. Zudem kann die Pedalkraft in die Tangentialkräfte aufgeschlüsselt werden. Diese Tangentialkräfte sind bedeutend für das Aufbringen des Drehmoments und dem daraus resultierenden effektiven Vorankommen beim Pedalieren.

### **\_ BLE- und ANT+Modul**

Die beiden Funkmodule sind an der Platine angebracht und notwendig für den Datenaustausch bzw. der Kommunikation zwischen dem Powermeter und dem Fahrradcomputer, an dem die Leistungswerte ausgegeben werden. Durch die Verwendung zweier verschiedener Funkstandards kann vom Benutzer der bevorzugte Standard ausgewählt werden. Zudem ermöglicht dies eine uneingeschränkte Kompatibilität zu allen Fahrradcomputern und Smartphones.

### **\_ Akkumulator**

Die Energieversorgung des Systems soll mit einem Lithium-Polymer Akku realisiert werden. Dieser Akku-Typ bietet den Vorteil, dass die Zellen flach angeordnet und bis zu einem gewissen Punkt auch in eine bestimmte Form gebracht werden können. Durch die sehr dünne Bauform ist dieser Akku bestens für die Positionierung in einer Schuhsohle geeignet. Der Akku soll eine Kapazität von ca. 150mah aufweisen und so für eine Laufzeit von mindestens 100 Stunden ausgelegt sein.

### **\_ Aufladebuchse**

Der Akku soll über eine Magnetbuchse, bzw. den dazu passenden Magnetstecker aufgeladen werden. Der Magnetstecker bietet gegenüber einem herkömmlichen Ladekabel einige Vorteile wie z.B. ein einfaches An- und Abstecken und besserer Schutz der Buchse gegen Eindringen von Wasser. Es soll ein passender Magnetstecker-Adapter für den USB-C Standard im Lieferumfang enthalten sein, um ein Aufladen mittels herkömmlichen Ladekabel zu ermöglichen. Dies hat den Vorteil, dass kein separates Ladekabel mit angeboten werden muss.

Untenstehend das Package für die Powermetersohle noch einmal zusammengefasst:

### **Elektronikkomponenten:**

- Mindestens 4 DMS; aufgebaut in einer Wechselbrückenschaltung
- Analog-Digital-Umsetzer
- IMU-Einheit (Gyrosensor, Beschleunigungssensor, Magnetometer)
- Lithium-Polymer Akku mit 150mah (Laufzeit mind. 100 Stunden)
- BLE und ANT+ Modul
- Magnetladebuchse mit Ladeadapter, passend für USB-C- und Lightning-Ladekabel
- Ladeadapter ausgestattet mit Status-LED um die Leer- und Vollladung anzuzeigen
- Elektronikkomponenten müssen Wasser- und Staubgeschützt sein, Schutzklasse IP 57

### **Funktionen:**

- Ladestandanzeige wird über Radcomputer erfolgen
- Schuh-Erkennung automatisch über Radprofil-Auswahl am Radcomputer
- Powermetermessung startet automatisch wenn eine Kreis/Drehbewegung erkannt wird
- Pedalglätte und Drehmomenteffektivität (runder Tritt)
- Effizienzkennzahl fürs Pedalieren
- Momentane, durchschnittliche Leistung, etc. anzeigen
- Leistungsunterschiede von linkem und rechtem Bein aufzeigen bei beidseitiger Variante
- PCO (Platform center offset)
- Darstellung über Kraftvektoren

### **Allgemeines:**

- Individuelle Sohlengeometrie (custom-fit)
- Von Größe 36 bis maximal 47
- MTB-, Rennradschuh und in weiterer Folge Laufschuh, Wanderschuh kompatibel
- Sohle im vorderen Bereich gelocht für bessere Durchlüftung und Wasserabtransport (Triathlon)
- Elektronikeinheit entnehmbar, um Sohle wechseln zu können, wenn diese verschlissen
- Lasche im Ristbereich zur leichten Entnahme der Sohle mittels zwei Fingern

### 14.3 Mockups

Um das Ergebnis aus der Gestaltung und dem Package zu bündeln werden erneut zwei Karton-Mockups angefertigt. Beide Mockups sollen einen möglichen Aufbau der Sohle darstellen.

Das erste Mockup weist die Mess- und Elektronikeinheit in einem länglichen Element auf. Dieses Element wird von unten in die Sohle nach vorne hineingeschoben. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Sohle mit diesem großen Element nicht der gebogenen Schuhform anpasst und somit nicht flächig aufliegt.

Deshalb kam ich zu der Lösung, die beiden Einheiten getrennt von einander zu platzieren und mit einem Kabel mit einander zu verbinden. Das Messelement ist dabei möglichst klein, um sich der leicht gebogenen Schuhform anzupassen. Die Elektronikeinheit befindet sich im hinteren Bereich und kann nach hinten herausgezogen und entnommen werden. Dieses zweite Mockup dient als Grundlage für die erste Entwurfsphase. Diese folgt im nächsten Punkt.



Abb. 163: Mockup 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 164: Mockup 2 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 14.4 Entwurfsphase 1

Anhand des Mockups werden die Entwürfe untenstehend dargestellt.



Abb. 165: Entwürfe 1 der Sohlenunterseite

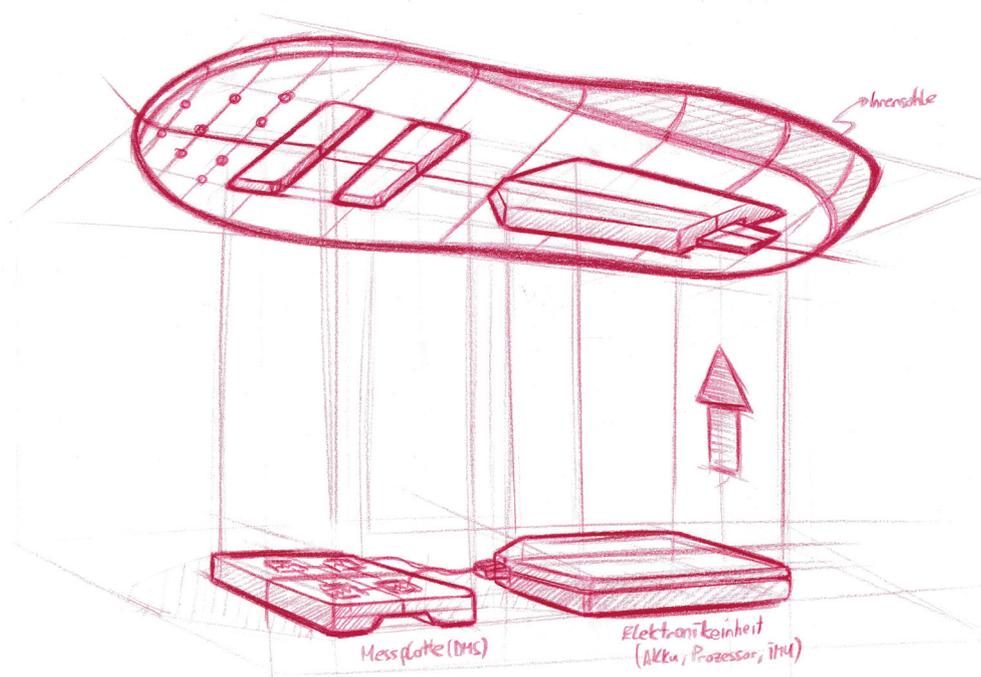


Abb. 166: Explosionsansicht Entwurf Sohle

### 14.4.1 3D-Druck Modelle

Anhand dieser Entwürfe werden erste 3D-Druck Modelle angefertigt. Dazu wird eine Innensohle mit einem 3D-Scanner abgescannt, um ein CAD-Modell der Sohle zu erhalten. Diese gescannte Sohle dient als Basis für den Aufbau meines Entwurfs als CAD-Modell im Programm "Fusion 360". Anschließend wird das CAD-Modell auf einem FDM-Drucker gedruckt.

Bei dem verwendeten 3D-Scanner handelt es sich um den tragbaren Scanner "EinScan Pro 2X Plus", von der Marke "Shining 3D". Dieser Scanner ist für kleine bis mittelgroße Objekte geeignet. Für den Scanvorgang wird zunächst, das zu scannende Objekt (Schuhinnensohle), mit einem weißen Entspiegelungsspray besprüht, damit der Scanner die Form des Objekts besser erfassen kann. Anschließend wird die Innensohle auf einem Drehteller platziert und der Scanner auf einem Tripod aufgesteckt. Nun wird die Innensohle auf dem Drehteller während des Scanvorgangs einmal um 360 Grad gedreht und dabei von allen Seiten gescannt. Das Ergebnis des Scans, ist eine stl-Datei der Innensohle, welche anschließend in einem CAD-Programm noch nachbearbeitet werden muss.

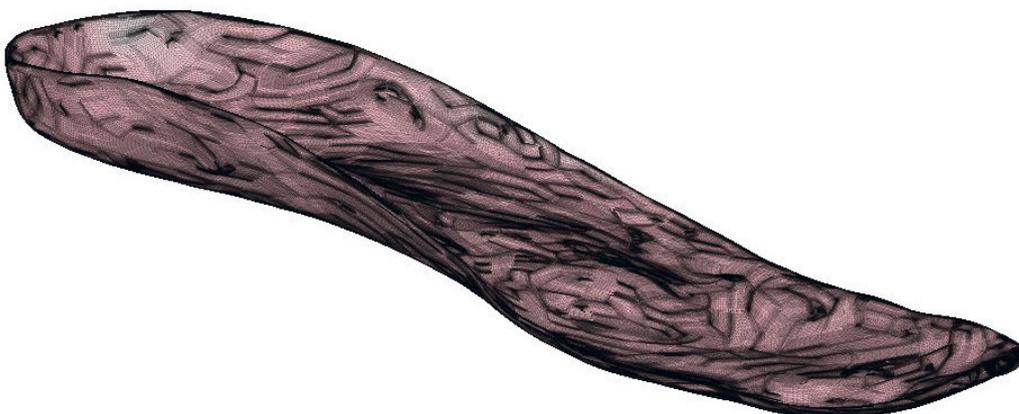


Abb. 167: 3D-Modell der gescannten Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Im ersten Schritt wird eine Sohle aus thermoplastischen Kunststoff auf einem FDM-3D Drucker gedruckt. Diese Sohle wird aus zwei Teilen gedruckt, um die Elektronikeinheit und die Messeinheit einsetzen zu können. Dieses erste Designmodell dient als erste Referenz in Bezug auf Maße und Proportionen.

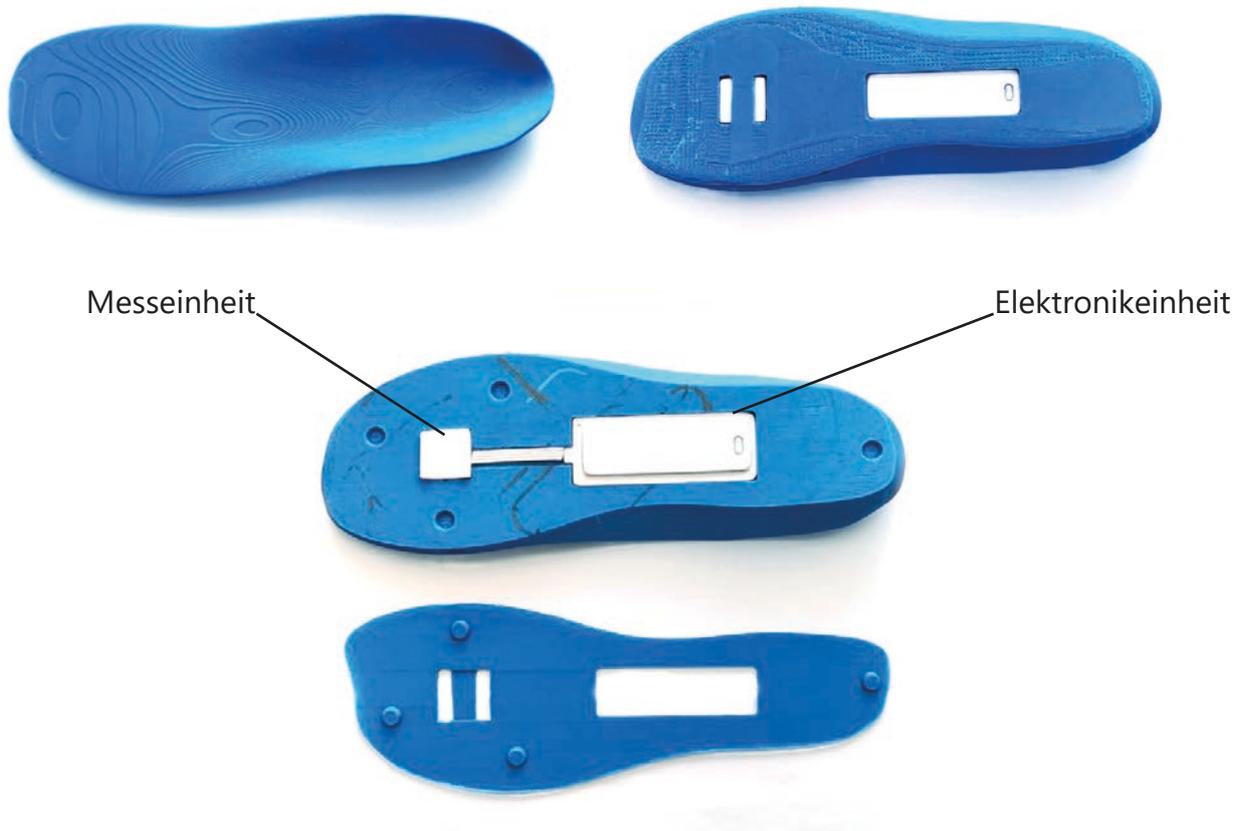


Abb. 168: erste 3D-Druck Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Im zweiten Schritt wird eine leicht abgeänderte Version des ersten Modells ebenfalls mit dem FDM-Druckverfahren ausgedruckt. Anders als der erste Druck wird dieser mit einem elastischerem thermoplastischen Polyurethan (TPU) gedruckt. Dieses Material ist flexibel und passt sich somit der Form der Schuhe an. Des weiteren wird eine Lasche und eine Griffmulde im Bereich der Elektronikeinheit hinzugefügt, um erste Usability Tests durchzuführen.

Dieses Modell dient als Grundlage für die finalen Optimierungen zum fertigen Entwurf und als Basis für einen Funktionsprototypen, um erste Messungen an einem Smarttrainer durchzuführen.

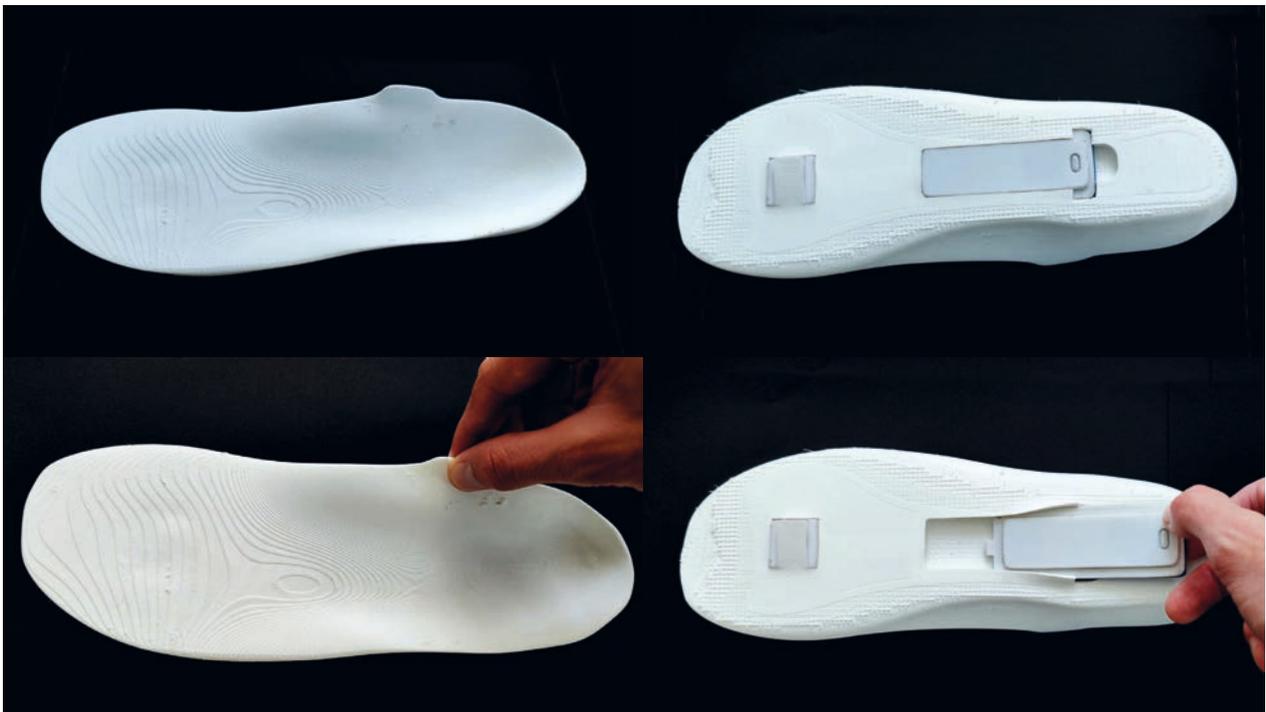


Abb. 169: zweite 3D-Druck Sohle aus elastischem TPU (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 170: Sohle inklusive Elektronikeinheit (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 14.5 Entwurfsphase 2

In Entwurfsphase 2 werden die Entwürfe aus der ersten Entwurfsphase verfeinert und schließlich ein finaler Entwurf ausgewählt.



Abb. 171: Entwürfe 2 der Sohlenunterseite



Abb. 172: finales Mockup (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Zudem wird wieder ein Karton-Mockup angefertigt, um die Usability zu prüfen und die Proportionen der Elektronikeinheit zu definieren.

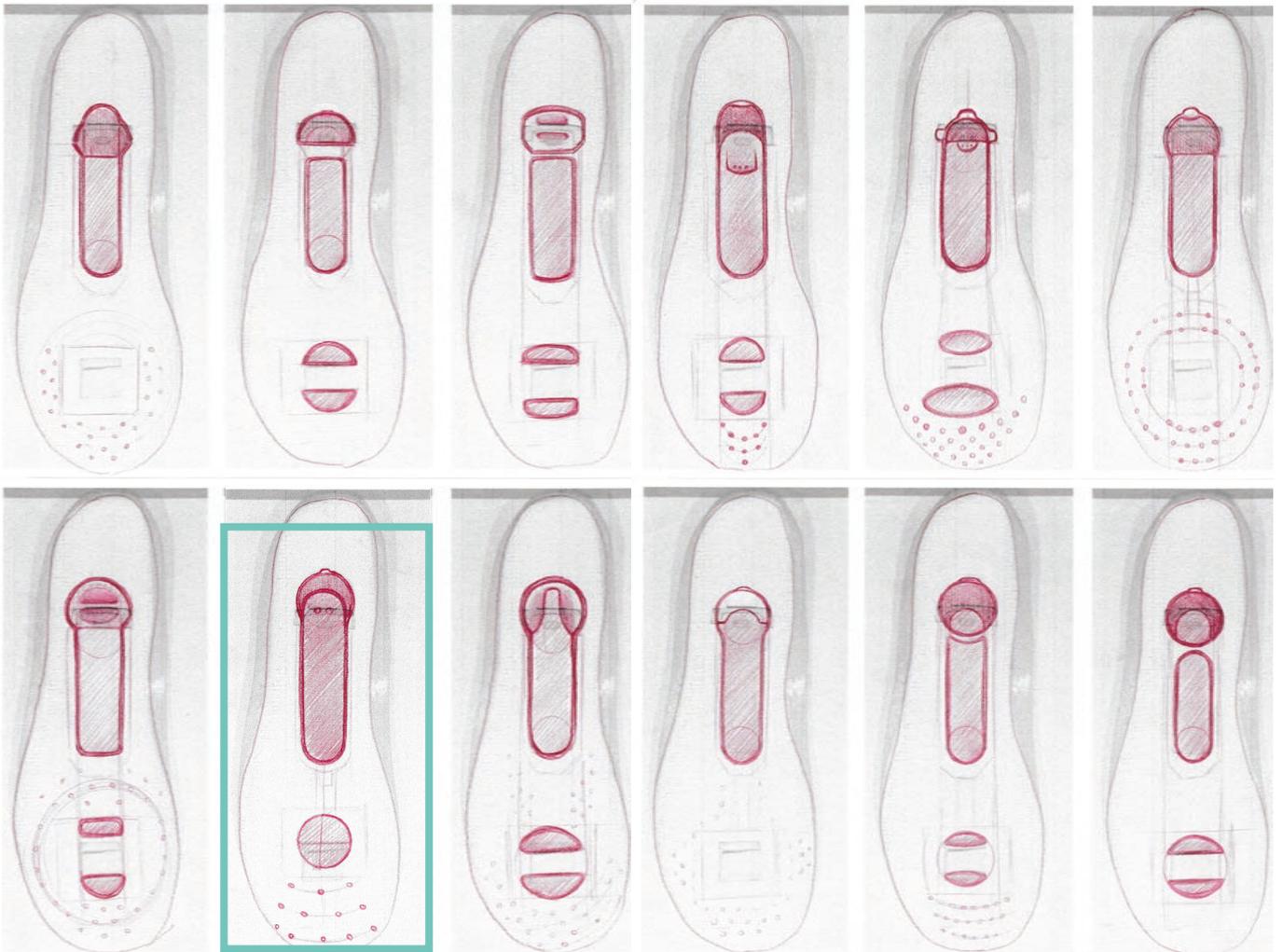


Abb. 173: Entwürfe 3 der Sohlenunterseite



Abb. 174: Entnahme der Elektronikeinheit am Mockup (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### 14.5.1 DLP-Druck Modell

Der im vorherigen Punkt gezeigte Entwurf, wird nun mittels DLP-Druckverfahren, gedruckt. Mit diesem Druckverfahren können noch flexiblere Materialien, als im FDM-Druckverfahren, gedruckt werden. Als Druckmaterial wird ein Elastomermaterial ausgewählt. Dieses Material (Loctite 3D 8195) weist eine hohe Dehnung und eine Shore-Härte von 60A auf und bietet ein sehr exzellentes Oberflächenfinish. Durch diese Flexibilität passt sich die Sohle optimal der Radschuhform an. Auch das finale Präsentationsmodell wird mit diesem Material gedruckt werden.



Abb. 175: DLP-Druck Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 14.6 Finaler Entwurf

Anhand der finalen Entwürfe wird die Sohle anschließend erneut als CAD-Modell aufgebaut und als finales 3D-Druckmodell angefertigt.

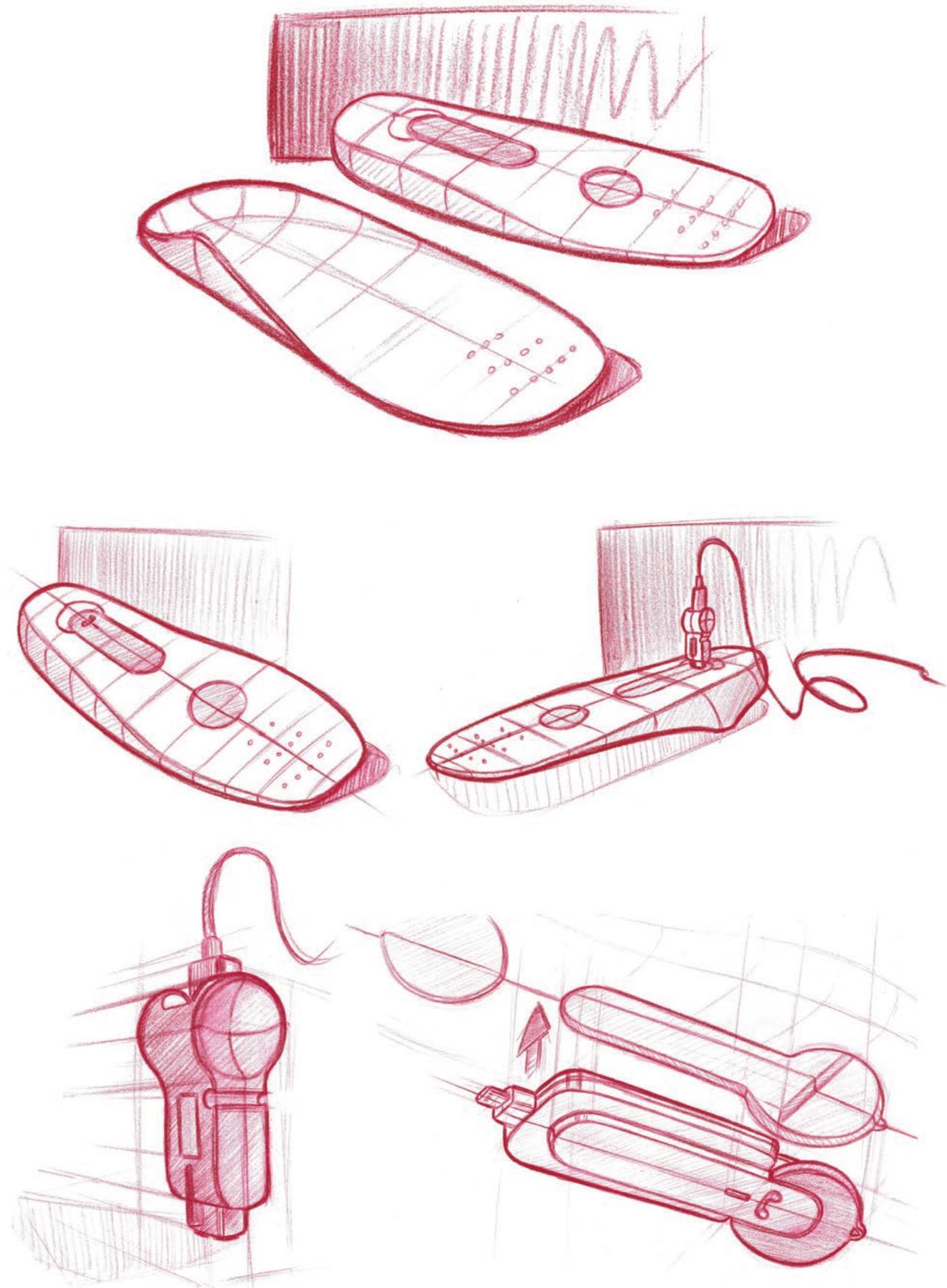


Abb. 176: finaler Entwurf

### 14.6.1 Entwurfsbeschreibung

Der Powermeter ist in einer speziellen "custom-fit" Innensohle für die Schuhe untergebracht. Die Sohle wird anhand des eigenen Fußabdruckes speziell für den/die Sportler\*in angefertigt. Eine detaillierte Beschreibung folgt im Punkt "User Story". Im vorderen Bereich der Sohle, im Bereich des Pedaldruckpunktes, sind vier Messsensoren (Dehnungsmessstreifen) auf einer kleinen Messeinheit (Platte) angeordnet, um die auftretenden Pedalkräfte möglichst exakt in dem Bereich, in dem sie ans Pedal weitergeleitet werden, zu erfassen. Diese Platte muss eine hohe Festigkeit aufweisen, damit diese beim Pedalieren nicht zu stark verformt wird, denn dies würde das Messergebnis verfälschen. Angedacht ist ein Kunststoff mit einer hohen Shore-Härte oder ein sehr hochfestes Metall.

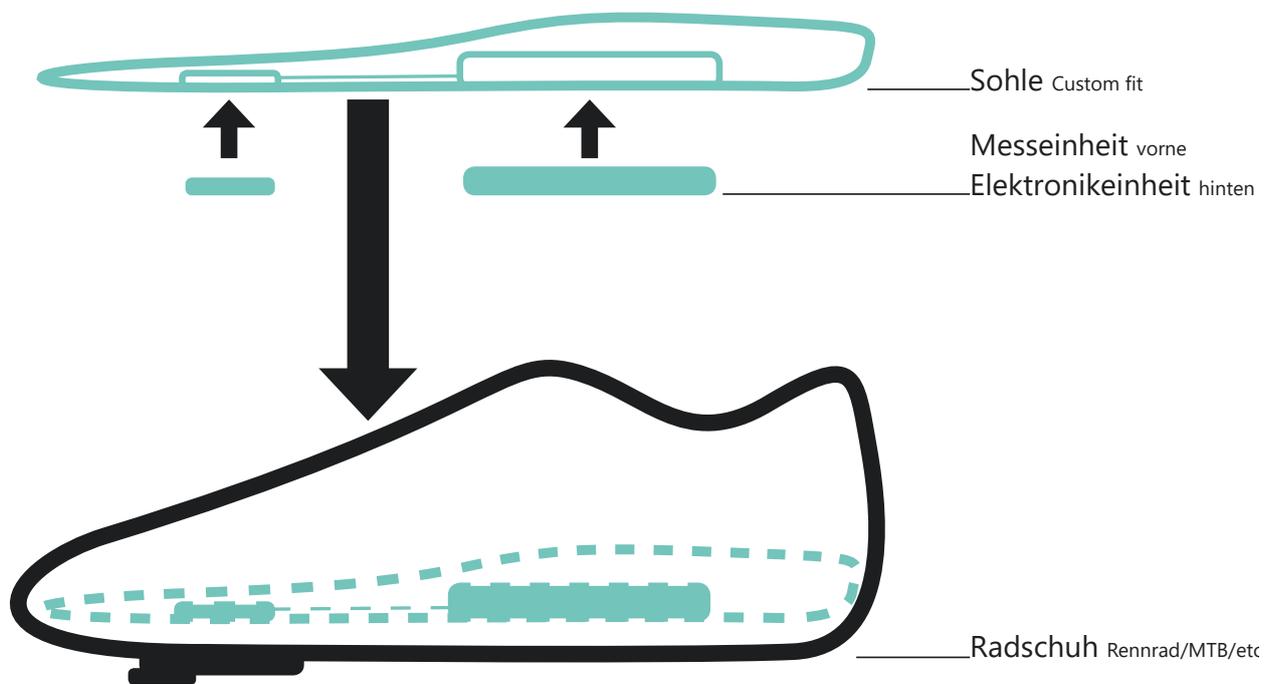


Abb. 177: Schematischer Aufbau der Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Im hinteren Bereich der Sohle befindet sich eine Aussparung für die Elektronikeinheit, die in einer kleinen Box verbaut ist. Diese Elektronikeinheit ist mit der Messeinheit im vorderen Bereich über einen flachen Kanal, in dem ein sehr dünnes Flachbandkabel verläuft, miteinander verbunden. In dieser Box ist die IMU-Einheit, der Analog-Digital-Umsetzer und der Akku verbaut. Diese Box ist rundherum mit einer Gummilippe zweifach abgedichtet und zusätzlich verschraubt, um ein Eindringen gegen Wasser zu

verhindern. Zudem kann die Box, falls eine Elektronikkomponente kaputt wird, aus der Sohle entnommen und im Anschluss aufgeschraubt werden, um das betroffene Bauteil zu ersetzen. Desweiteren kann dadurch auch die Sohle nach Jahren, wenn diese stark verschlissen ist, leicht durch eine Neue ersetzt werden. Dafür wird ebenfalls einfach die Box mit der Elektroneinheit entnommen und in eine "neue" Powermetersohle wieder eingesetzt. Dadurch muss nicht der komplette Powermeter entsorgt werden sondern nur die Sohle.

An der Unterseite der Box befindet sich die Magnetladebuchse zum Aufladen des Akkus. Dazu muss die Sohle aus dem Schuh entnommen und mittels mitgelieferten Ladeadapters an das Stromnetz angeschlossen werden.

Um das Herausnehmen der Sohle aus dem Schuh zu erleichtern, ist diese an der Innenseite mit einer kleinen Lasche ausgestattet. Diese Lasche ermöglicht ein sekundenschnelles Herausnehmen aus dem Schuh mittels Daumen und Zeigefinger.

Bevorzugt man eine beidseitig-getrennte Leistungsmessung, muss sowohl die linke als auch rechte Sohle mit den Elektronikkomponenten ausgestattet sein. Entscheidet man sich hingegen nur für die einseitige Messoption, ist die Sohle für den anderen Fuß ohne jegliche Elektronikkomponenten ausgestattet. Dabei ist es dem/der Nutzer\*in selbst überlassen, ob ein linksseitiges oder ein rechtsseitiges Messsystem bevorzugt wird.

Im nächsten Kapitel folgen die Prototypentests der Sohle, am Smarttrainer.

## 14.7 Prototypentests

Um aufzuzeigen, dass eine Leistungsmessung in einer Schuhinnensohle möglich ist, wurden dafür Tests mit einem Funktionsprototypen durchgeführt. Diese Tests führte Herr DI Stephan Selinger von der Fachhochschule Hagenberg mit mir durch. Zudem war Herr Sellinger auch für den Aufbau dieses Prototyps zuständig, da er als Professor für Softwaretechnik über die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten für dieses Vorhaben verfügt.

### 14.7.1 Testaufbau und Komponenten

Der Testaufbau bestand aus einem Rennradschuh mit einer Standard-Rennradinnensohle die zu einem Funktionsprototypen umgebaut wurde, und aus einem Wahoo Kickr Smarttrainer an dem ich pedalierte und der Test durchgeführt wurde. Ausgewertet wurden die Daten auf einem Windows Computer.

An der Innensohle wurde im Bereich des vorderen Zehenballens eine 1mm dünne Aluminium Platte (50x40mm), die mit vier Dehnungsmessstreifen an der zuvor aufgerauten Ober- und Unterseite bestückt wurde, mit Epoxidharz aufgeklebt. Die Dehnungsmessstreifen sind in Form einer Wheatstone-Brücke angeordnet. Die Größe der Platte orientierte sich an der Auftrittsfläche eines Look-Klickpedals (siehe Bild). Diese Aluminium Messplatte ist über ein Kabel mit der Elektronikeinheit verbunden. Diese Elektronikeinheit, bestehend aus einem Microcontroller, einem Messverstärker und einer IMU-Einheit, wurde an der Außenseite des Rennradschuhes befestigt. Für die Energieversorgung kam eine Powerbank zum Einsatz, diese wurde ebenfalls am Rennradschuh befestigt.

- Windows Computer; Empfangs- und Auswertesoftware in Python geschrieben
- Rennrad eingespannt am Smarttrainer Wahoo Kickr
- Rennradschuh mit der modifizierten Innensohle & auch mit gedruckter DLP-Innensohle
- 1mm Alumessplatte bestückt mit 4 Dehnungsmessstreifen (Youmile BF120-3AA, 120ohm)
- Microcontroller (Wemos D1 mini ESP8266)
- Messverstärker (HX711)
- IMU-Einheit (MPU6050)
- Powerbank 5V

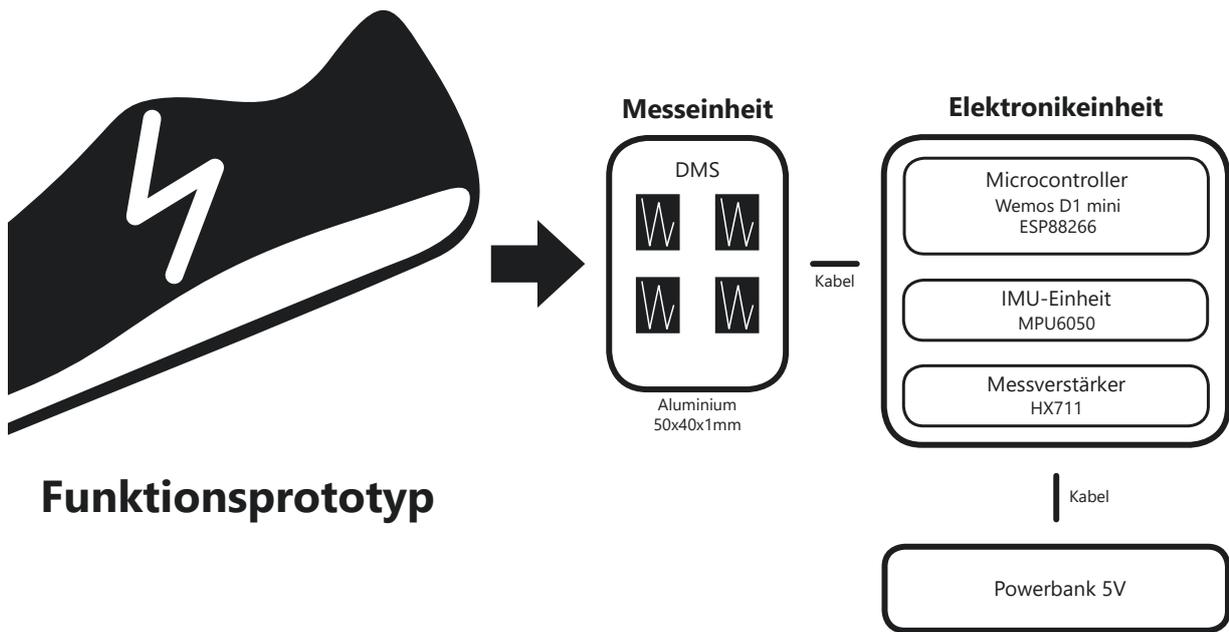


Abb. 178: Schematischer Aufbau des Prototyps (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 179: Prototyp-Standardinnensohle (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 180: Größenvergleich der Aluminium-Messplatte (Schaden-Handstanger, P., 2022)

### 14.7.2 Funktionsweise Software

Der Microcontroller ist mit einem Wifi- und Bluetooth-Modul ausgestattet auf dem ein Webserver (https) läuft, der als Access-point im WLAN-Netz fungiert. Dieser Access-point wird am Computer angezeigt und es wird eine Verbindung zwischen Computer und Rennradschuh (Prototyp) hergestellt. Dem Microcontroller ist zudem ein Messverstärker angeschlossen, um die Widerstandsänderungen der Dehnungsmessstreifen zu erfassen und auf dem Webserver zur Verfügung zu stellen. Sobald der Controller über die Powerbank mit Strom versorgt wird, kalibriert sich die Sohle auf Null und die Messung kann starten.

Der Computer fragt nun während der Tretbewegung kontinuierlich die Messwerte der Dehnungsmessstreifen vom Microcontroller ab und stellt diese in einem Diagramm als Graphen am Computer dar. Diese Werte werden im Anschluss in einer CSV-Datei abgelegt und gespeichert.

Zur Auswertung werden im Anschluss an die Testfahrt die CSV-Dateien gelesen und die Messwerte die proportional zur Kraft sind quadriert, um Zug- und Druckbelastungen gleichermaßen ab zu bilden.

Die Trittfrequenz wird über eine Frequenzanalyse aus den Messwerten bestimmt. Im Anschluss daran kann daraus die Leistung ermittelt werden.

### 14.7.3 Testablauf

Getestet wurde an zwei Testtagen an einem Wahoo Kickr Smarttrainer jeweils nach einem vordefinierten Stufentest, den Ich (ca. 75kg) absolvierte. Beim ersten Testtag wurde noch mit einer wesentlich dünneren und kleineren Stahl Messplatte getestet. Diese war 0,75mm dick und 18x45mm groß. Diese lieferte jedoch keine plausiblen Messdaten, da die Platte zu weich und klein war. Daher wurde die Messplatte adaptiert (dicker und größer) und wie oben beschrieben in einem 1mm Aluminium ausgeführt. Diese wurde an Testtag 2 am selben Setup getestet.



Abb. 181: Prototypentest am Smarttrainer (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)

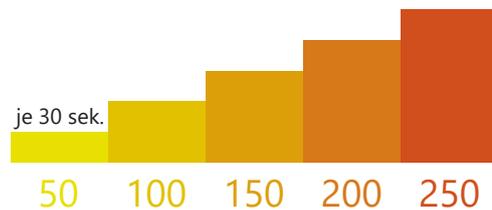


Abb. 182: Prototyp (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)

An den Testtagen wurden einige Stufentests nach Wattzahlen, mit unterschiedlicher Trittfrequenz durchgeführt. Dafür pedalierte ich am Smarttrainer diverse vorab eingestellte Wattstufen. Beginnend bei 50 Watt, in 50 Watt Steigerungen bis 300 Watt. Dabei wurde jede Wattstufe 30 Sekunden lang getreten, ehe auf die nächste Wattstufe gesteigert wurde. Durchlaufen wurden daher sechs Wattstufen, da jeweils um 50 Watt erhöht wurde. Beschrieben werden zwei der aussagekräftigsten Testläufe auf der nächsten Doppelseite:

### Testtag 1

Stahl Messplatte  
18x45x0,75mm

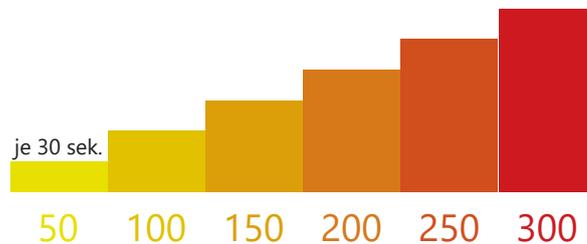


Wattstufen (Watt)  
(vorgegeben)

Testlauf 1 | ————— 90 ————— | Umdrehungen (U/min)

### Testtag 2

Alu Messplatte  
50x40x1mm



Wattstufen (Watt)  
(vorgegeben)

Testlauf	1	2	3	4	5	6	Umdrehungen (U/min)
1	80-90						
2	50	60	70	80	90	100	
3	50	50	70	70	90	90	
4	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	
5	80						

Abb. 183: durchgeführte Testläufe (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Des Weiteren wurde auch der finale Entwurf, in Form der gedruckten DLP-Innensohle an weiteren Testtagen nach dem selben Schema getestet (siehe links). Dabei wurde die Messplatte nicht mehr auf die Unterseite der Innensohle appliziert sondern in die dafür vorgesehene Vertiefung im vorderen Bereich eingelegt (siehe Bild unten). Dabei zeigte sich keinerlei Messveränderung im Vergleich zur adaptierten Standardinnensohle, an den Testtagen zuvor. Daher kann bereits gesagt werden, dass es nicht ausschlaggebend ist ob die Messplatte in die Sohle eingearbeitet ist oder an der Unterseite angebracht wird.



Abb. 184: Prototyp DLP-Innensohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Nachfolgend die beiden Testläufe, an denen an der X-Achse die Umdrehungen und an der Y-Achse die Werte des Rohsignals abgelesen werden können.

Bei Testlauf Eins wurde versucht mit einer konstanter Trittfrequenz von 80 U/min und ohne Frequenzanalyse den Stufentest zu absolvieren.

Da die Trittfrequenz nicht konstant gehalten wurde, ist dieser Versuch am Ende (Testlauf Fünf) noch einmal wiederholt worden. Dieses mal mit ziemlich konstanten 80 Umdrehungen. Dieser Versuch diente der Erwartungshaltung und der Beobachtung ob das Messsignal (Rohsignal) der DMS, mit steigenden Wattstufen auch proportional ansteigt, was es auch tat! Es ist daher ein Zusammenhang zwischen den Wattstufen und dem Rohsignal feststellbar. Des weiteren gut ersichtlich, dass die Umdrehungen (Trittfrequenz) relativ konstant gehalten werden konnte. Da der Versuch mit konstanten Umdrehungen das erhoffte Ergebnis brachte, wurde bei weiteren Testläufen mit variabler Trittfrequenz getestet.

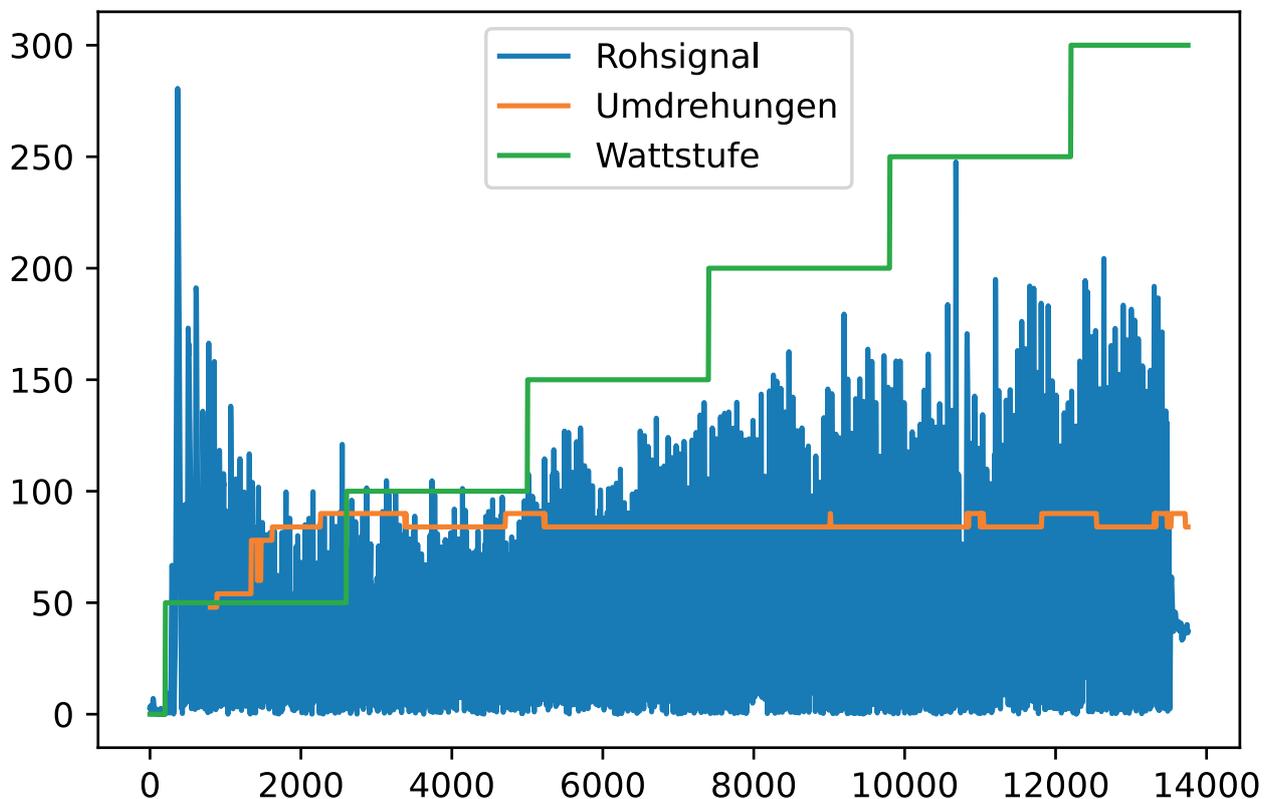


Abb. 185: Testlauf mit konstanter Trittfrequenz (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)

Bei Testlauf vier wurde bei den ersten drei Wattstufen (50, 100, 150W) mit 50 Umdrehungen pedaliert und bei den letzten drei Wattstufen (200, 250, 300W) mit 90 Umdrehungen. Dieser Versuch mit variabler Trittfrequenz wurde absolviert, um aufzeigen zu können, dass bei Erhöhung der Trittfrequenz von einer zur nächsten Wattstufe weniger Kraft gemessen wird. In diesem Beispiel bei dem Wechsel der Wattstufe von 150W auf 200W. Bei Wattstufe 250 steigt das Rohsignal wieder, da nun ja weiterhin mit 90 Umdrehungen pedaliert wird. Bei der letzten Wattstufe hingegen klappte die Messung nicht sehr gut, da das Rohsignal fälschlicherweise abfiel. Dies ist vermutlich auf die zu "weiche" Aluminium-Messplatte zurückzuführen. Jedoch sehr gut erkennbar ist, dass die beiden gefahrenen Trittfrequenzen relativ genau gehalten werden konnten und die Wattstufen wieder mit dem Rohsignal zusammenhängen, außer eben bei der letzten Wattstufe. Zu erwähnen ist noch, dass die Sohle vor jedem Versuch erneut auf den Nullwert kalibriert werden musste, um etwaige Messungenauigkeiten, die durch einen unterschiedlich fest geschnallten Schuh entstehen, zu eliminieren.

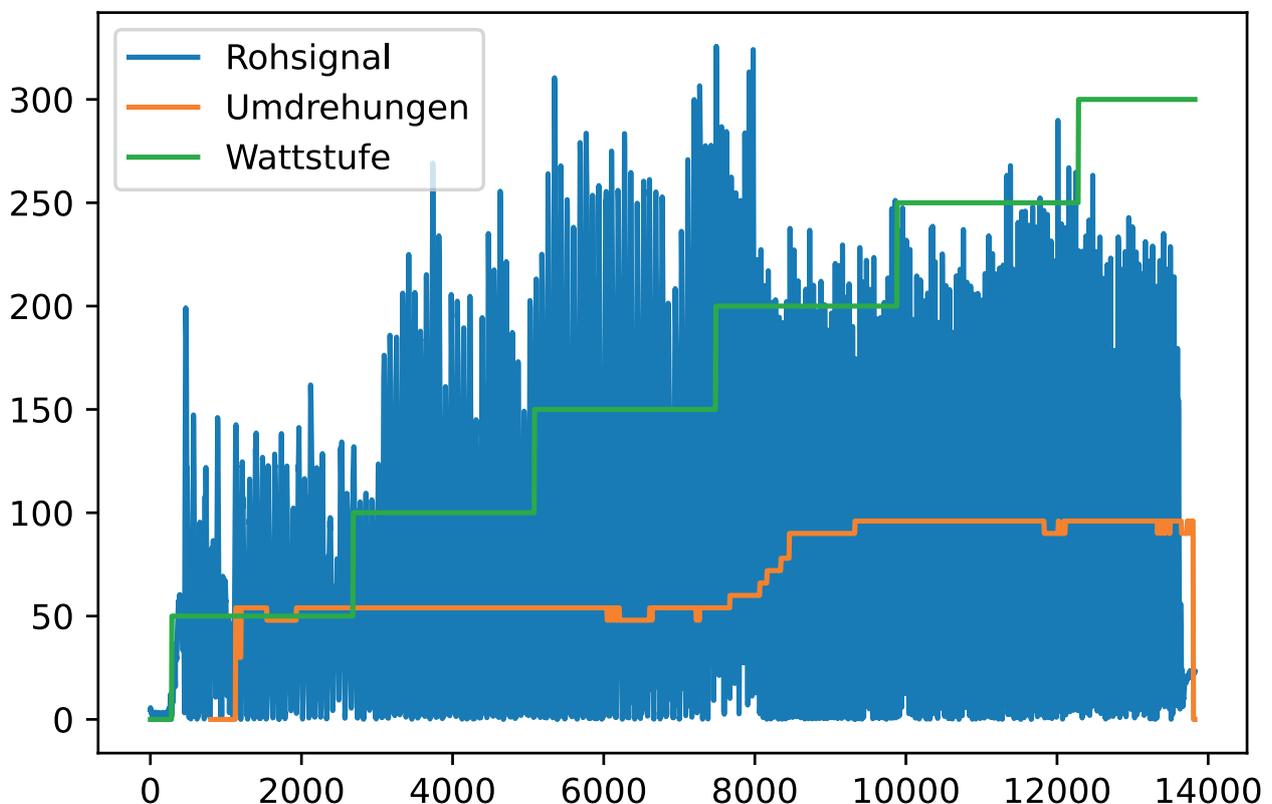


Abb. 186: Testlauf mit variabler Trittfrequenz (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)

#### 14.7.4 Erkenntnisse und Ausblick

Der erste Testtag zeigte, dass bei geringer Wattzahl die Wattwerte des Prototyps sehr stark schwanken und es sehr genau darauf angekommen ist wie sauber bzw. rund in die Pedale getreten wurde. Deshalb wurde die Messplatte für den zweiten Messtag in Größe und Materialstärke adaptiert. Dies führte dazu, dass die neuen Tests über einen größeren Wattbereich konstant gehalten wurden. Zudem konnte beobachtet werden, dass bei konstanter Trittfrequenz und Erhöhung der Wattstufe auch die Kraft bzw. die Rohdaten an der Messplatte anstiegen. Auch konnte beobachtet werden, dass beim Losfahren die Kraftkurve stark ausschlug (Bild 186), da beim Anfahren zuerst mit erhöhtem Kraftaufwand die Trägheitskraft überwinden werden muss. Dies deckt sich mit den Messdaten bereits vorhandener Powermeter.

Zudem waren die Messdaten bei den beiden unterschiedlichen Sohlen (Standardinnensohle und gedruckte DLP-Sohle) ident.

Bei den Testläufen wurden immer Wattstufen vorgegeben. Die dabei benötigte Kraft, um diese Wattstufe zu treten, wurde anschließend am Computer als Rohwert für die Verformung der Messplatte ausgegeben. Wurde mehr Kraft aufs Pedal aufgewendet, weil die vorgegebene Wattstufe erhöht wurde, stieg auch das Rohsignal an. Dieses Rohsignal konnte zum jetzigen Stand jedoch noch nicht zufriedenstellend ausgewertet werden, um daraus die Kraft bzw. die Wattwerte zu bestimmen. Diese Auswertung muss jetzt noch korrekt bestimmt werden, damit bei weiteren Tests, anstelle der Rohwerte, die Wattwerte angezeigt werden. Diesen Vorgang sollte in Zukunft direkt der Microcontroller vornehmen, um die Leistungswerte direkt in der Sohle zu ermitteln und anschließend an ein Anzeigegerät (Radcomputer) anzuzeigen.

Zudem müssten unzählige Tests folgen, mit unterschiedlichen Schuhen und Fahrer\*innen um eine breite Datenbasis zu schaffen um korrekte Leistungswerte sicher zu stellen.

Des weiteren sollte die Hauptkalibrierung für jeden Fahrrad- bzw. Schuhtyp in einer App vorab erfolgen.

Die Kalibrierung vor jeder Radfahrt sollte hingegen automatisch erfolgen, sobald der/die Fahrer\*in den Radschuh anzieht und ein paar Schritte zum Fahrrad macht. Dabei erkennt die IMU-Einheit die Schrittbewegung und kalibriert sich automatisch auf den jeweiligen Schnüorzustand der Radschuhe.

Auch ist die Frage des geeigneten Materials für die Messplatte an der die Dehnungsmessstreifen befestigt sind noch nicht geklärt. Es sollte ein Material gewählt werden, das über einen großen Temperaturbereich die gleichen Materialeigenschaften bietet. Getestet wurde mit Aluminium, aber eine Stahl- oder Carbon-Platte ist auch denkbar und wäre Form stabiler. Dies müsste bei unzähligen Testläufen noch weiter erforscht werden.

Im nächsten Kapitel folgen nun drei verschiedene User Storys, in denen diverse Szenarien im Umgang mit der Powermetersohle, aufgezeigt werden.

## 14.8 User Story

Anhand von User Storys soll vermittelt werden, wie der Bestellvorgang der "customized" Powermetersohle von statten geht. Des weiteren wird gezeigt, wie die Kalibrierung für unterschiedliche Fahrradschuhe funktioniert und wie der Sohlenwechsel von einem Fahrradschuh zum Anderen abläuft.

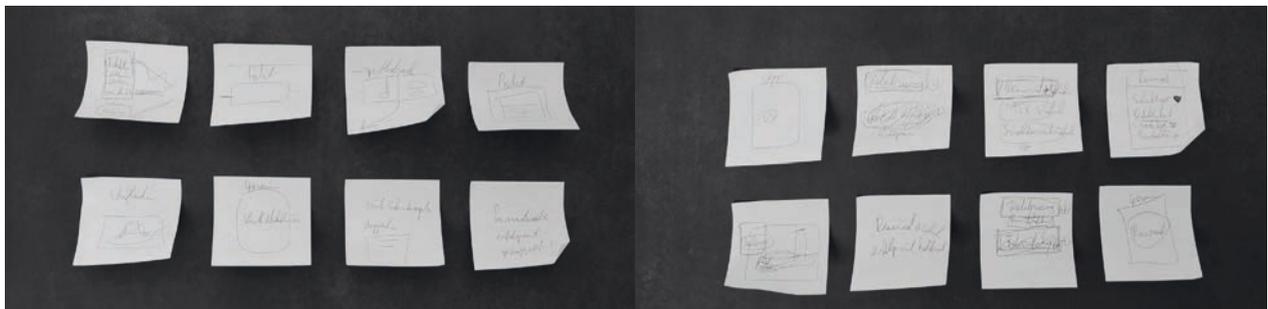


Abb. 187: Ideation User Storys (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 14.8.1 Bestellvorgang

### 1. Webshop oder Fachhandel, etc. aufsuchen

Sportfachhandel,  
Bikefitter, etc.

oder

Webshop Hersteller

bestellen

### 2. Trittschaum wird zugesendet



an Hersteller senden

Die Powermetersohle wird online über den Hersteller bestellt oder ein autorisierter Fachhändler, Bikefitter, etc., wird aufgesucht.

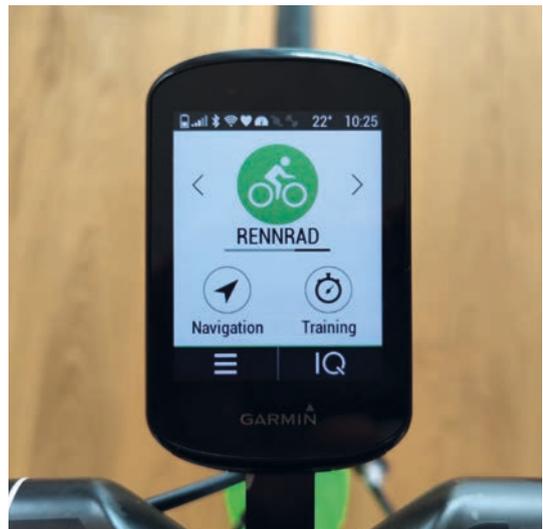
Wird die Powermetersohle online bestellt, wird der Trittschaum nach Hause gesendet, um den eigenen Fuß abzuformen.

### 5. Sohle aufladen



Nach dem Auspacken zunächst die Sohle mit dem beiliegenden Ladestecker aufladen.

### 6. Radcomputer einschalten



Nun folgt die Koppelung der Sohle mit dem Radcomputer mittels Bluetooth.

Abb. 188: User Story 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)

## 2. bzw. 3. Abformen des Fußes



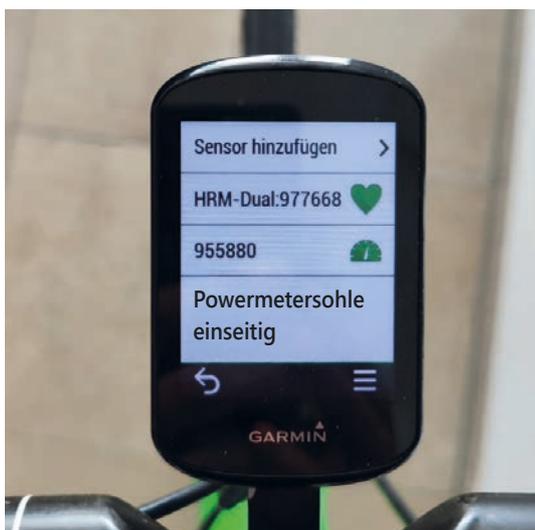
Man steigt mit beiden Füßen in den Trittschaum, anschließend wird der Trittschaum an den Hersteller zurückgesendet.

## 4. Powermetersohle wird zugesendet



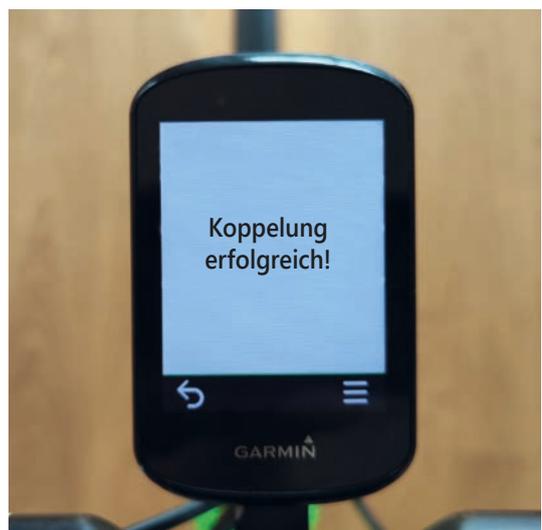
Die maßgeschneiderte Powermetersohle wird nach Hause zugesendet. Die Position der Messplatte befindet sich unter den Zehenballen.

## 7. Sohle mit Radcomputer koppeln



Die Powermetersohle unter "Sensoren" hinzufügen. Damit erfolgt die Koppelung!

## 8. Koppelung erfolgreich!



Die Koppelung war erfolgreich. Anschließend erfolgt die Kalibrierung des Powermeters mittels App.

## 14.8.2 Erstinstallation und Kalibrierung

### 1. Powermeter-App starten



Um die Powermetersohle zu kalibrieren, muss die dazugehörige App am Smartphone installiert werden.

### 2. Kalibrierung durchführen



In der App kann die Kalibrierung für das Fahrrad und den Schuh vorgenommen werden.

### 5. Auf Körpergewicht kalibrieren



Für die Kalibrierung des Körpergewichts, muss der Schuh angezogen werden.

### 6. Schuh mit eingelegerter Sohle anziehen



Es wird auf die Cleatplatte gestiegen und anschließend auf "kalibrieren" in der App gedrückt.

### 3. Fahrradtyp für Kalibrierung auswählen



Fahrradtyp und Schuh für die Kalibrierung auswählen.

### 4. Parameter eingeben



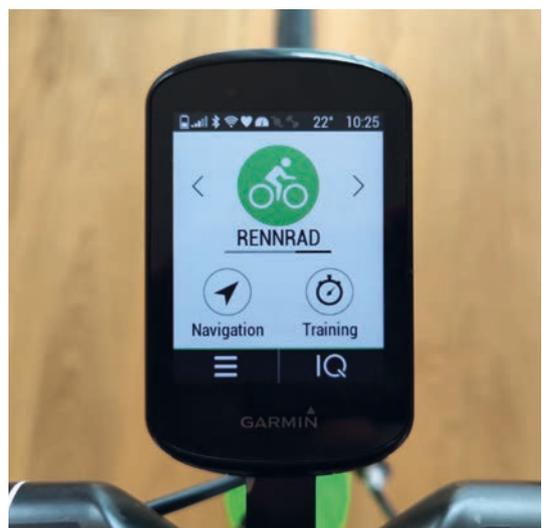
Diverse Parameter wie Kurbellänge, Pedalstandard, etc. eingeben.

### 7. Kalibrierung erfolgreich durchgeführt



Nun ist bereits die erste Kalibrierung in der App bzw. am Powermeter hinterlegt.

### 8. Kalibrierung am Radcomputer hinterlegt



Am Radcomputer kann nun die Kalibrierung bei den "Fahrradprofilen" aktiviert werden. Die Powermetersohle ist nun einsatzbereit!

### 14.8.3 Sohlenwechsel zwischen verschiedenen Schuhen

#### 1. Powermetersohle in Schuh einlegen



Originale Innensohle des Fahrradschuhs entfernen und die Powermetersohle in den Rennradschuh einlegen.

#### 2. auf das Rennrad aufsteigen



Auf das Rennrad aufsteigen und den Radcomputer einschalten. Die Sohle verbindet sich bei Bewegungserkennung automatisch mittels Bluetooth mit dem Radcomputer.

#### 5. Powermetersohle in MTB-Schuh einlegen



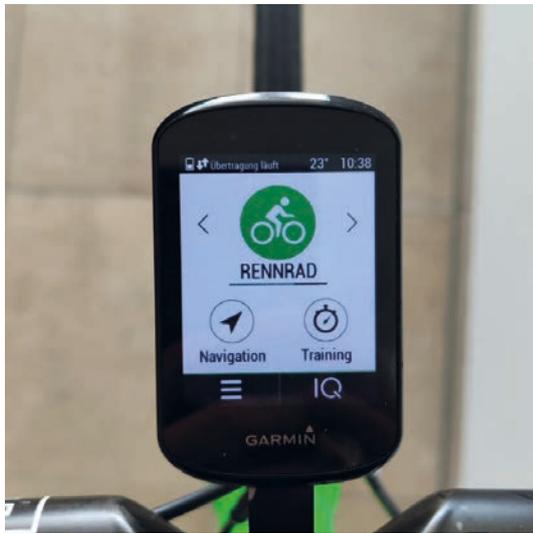
...und in die MTB-Schuhe eingelegt werden.

#### 6. auf das MTB aufsteigen



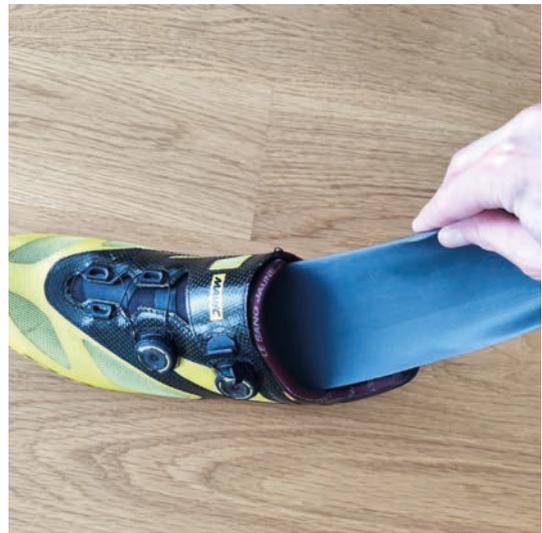
Nun wieder auf das MTB aufsteigen und Radcomputer einschalten.

### 3. Rennrad-Ausfahrt starten



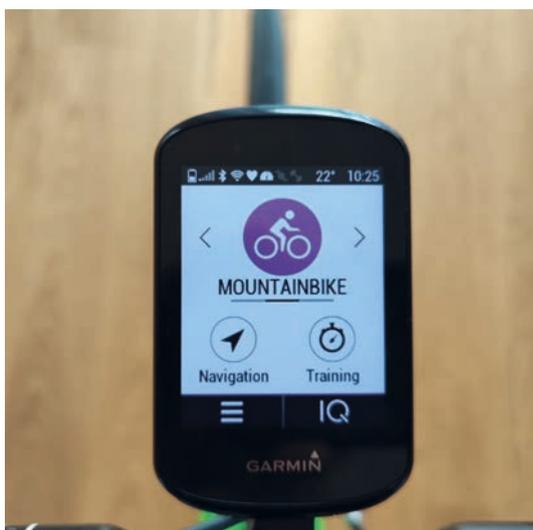
Rennrad-Profil auf dem Radcomputer auswählen und die Rennradausfahrt starten. Es wird die vorangegangene hinterlegte Kalibrierung der Sohle verwendet.

### 4. Sohle aus Rennradschuh entfernen



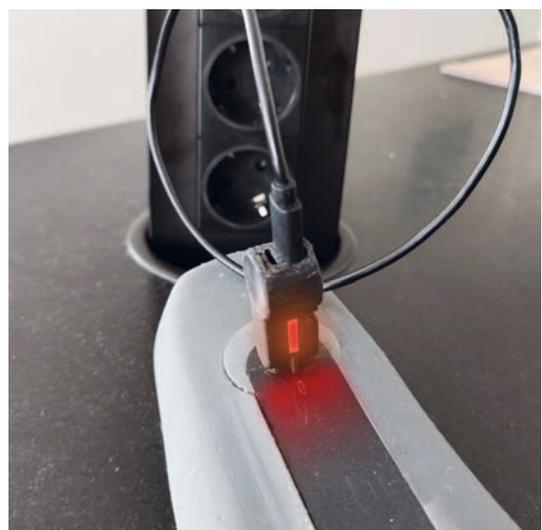
Möchte man nun eine MTB-Ausfahrt machen, muss die Sohle aus dem Schuh entnommen werden...

### 7. MTB-Ausfahrt starten



Nun das MTB-Profil am Radcomputer auswählen. Dann wird die MTB-Kalibrierung der Sohle angewendet.

### 8. nach Ausfahrt Sohle evtl. aufladen



Wenn die Akkustandsanzeige der Sohle am Radcomputer sehr niedrig ist, die Sohle aus dem Schuh entfernen und aufladen.



# 15. Ergebnisse

## \_ Ansichten



Abb. 191: Powermetersohle hellgrau (Schaden-Handstanger, P., 2022)



Abb. 192: Powermetersohle dunkelgrau (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Die finale Powermetersohle wird in zwei Standardfarben angeboten, in hellgrau und in dunkelgrau. Das Design weist im vorderen Fußbereich mehrere kleine Belüftungslöcher auf, dadurch ist ein Wassertransport aus der Sohle möglich. Diese Funktion ist besonders für Triathlet\*innen wichtig. Des weiteren kann eine optimale Luftzirkulation im Fußbereich gewährleistet werden.

Auf der Innenseite der Sohle befindet sich eine kleine Lasche, welche den Sohlenwechsel zwischen mehreren Schuhen erleichtert. Auf der Unterseite der Sohle im Mittelfußbereich befindet sich die Einschuböffnung für die Elektronikeinheit.

Am Ende der Elektronikeinheit befindet sich eine Lasche aus flexiblen Material, um das Herausnehmen der Elektronikeinheit zu erleichtern. Die Herausnahme der Einheit ist bei einer Neuanschaffung der Sohle ohne Elektronikeinheit notwendig, beispielsweise wenn diese verschlissen ist und erneuert werden muss. Unter der kreisförmigen Vertiefung im Vorderfußbereich befindet sich die Messplatte mit den Dehnungsmessstreifen. Diese ist fix in der Sohle integriert, damit diese immer exakt unter dem Bereich der Zehenballen sitzt und so dauerhaft korrekte Messwerte liefert.

## \_ Einseitige-/Beidseitige-Variante



Abb. 193: einseitige- und beidseitige-Variante (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Typ	einseitig - Kurbelarm - Pedal	- Kurbelstern - Hinterradnabe - Gegenkraftmes.	beidseitig - Kurbelarm - Kombi Arm/Achse - Pedal	einseitig / beidseitig - Sohle
<b>Messsensor</b>	Einer	Einer	Zwei	Einer / Zwei
<b>Messposition</b>	Links	„Mittig“	Links <sup>1</sup> & Rechts	Links / Links & Rechts
<b>Leistung L+R erfassen</b>	Schätzung	Ja	Ja	Schätzung / Ja
<b>Balance L/R erfassen</b>	-	Schätzung <sup>2</sup>	Ja	- / Ja
<b>PCO<sub>(Platform Center Offset)</sub> erfassen</b>	- <sup>3</sup>	-	- <sup>3</sup>	Ja / Ja

<sup>1</sup>Mittig & Rechts bei Kombi Arm/Achse

<sup>2</sup>bei Gegenkraftmessung nicht möglich

<sup>3</sup>bei Pedalpowermeter wird es erfasst

Abb. 194: Vergleichsmatrix der Powermeter-Systeme (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Die Powermetersohle wird sowohl als einseitig als auch beidseitig messende Variante angeboten. In der einseitig messenden Variante befindet sich die Elektronik- und Messeinheit entweder in der linken oder in der rechten Sohle. Dies kann von den Kund\*innen selbst ausgewählt werden. Bei der beidseitigen Variante ist in beiden Sohlen die Elektronik- und Messeinheit verbaut.

## \_ custom-made



Abb. 195: custom-made Farben (Schaden-Handstanger, P., 2022)

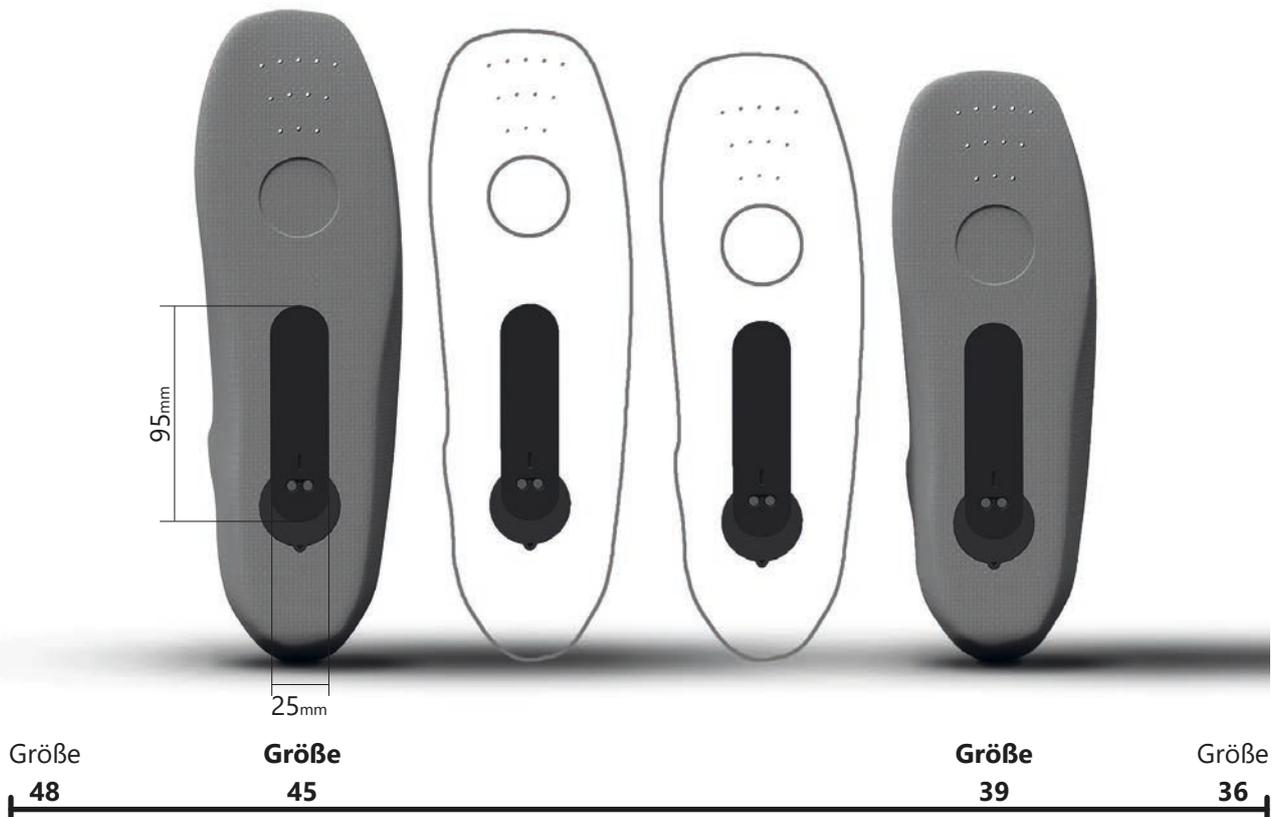


Abb. 196: Übersicht der Sohlengrößen (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Durch das custom-fit-Konzept kann neben den beiden Standardfarben (hellgrau und dunkelgrau), auch aus diversen weiteren Farben, ausgewählt werden. Die Sohlen werden individuell an den Fuß des/der Kunden/Kundin angepasst und schließlich passgenau angefertigt. Die Sohlen können zwischen Größe 36 und 48 gefertigt werden. Die Elektronikeinheit wird in einer Einheitsgröße gefertigt und passt in jede individuell gefertigte Sohle.

## \_ Aufladen



Abb. 197: Aufladevorgang der Powermetersohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Um den Powermeter aufzuladen muss die Sohle aus dem Schuh entnommen werden. An der Unterseite befindet sich die Magnetladebuchse, an welcher der mitgelieferte Ladestecker angesteckt werden kann, um die Sohle an der Steckdose zu laden. Am Ladestecker kann sowohl ein USB-C-Kabel als auch ein Lightning-Kabel angeschlossen werden. Der Ladevorgang wird mittels einer LED am Ladestecker visualisiert. Solange der Akku nicht vollständig geladen ist leuchtet die LED rot. Die Vollladung wird durch eine grüne LED dargestellt.

## \_ Explosionsdarstellung



Abb. 198: Explosionsdarstellung (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Die Powermetersohle besteht aus einer linken und rechten Sohle, einer Messplatte mit Dehnungsmessstreifen, der Elektronikeinheit und dem mitgeliefertem Ladestecker. In der Elektronikeinheit befindet sich der Akku, und die Platine mit den Sensoren. Die Elektronikeinheit besteht aus einer Box, einem Deckel und einer runden Lasche und ist rundherum abgedichtet und mit fünf Schrauben verschraubt. Diese Konstruktion ermöglicht ein problemloses Recyclen der Elektronikkomponenten bzw. aller Bauteile. Im mittleren Bereich der Sohle ist der Stecker, welcher die Messplatte mit der herausnehmbaren Elektronikeinheit verbindet, verbaut.

## \_ Sohlenfertigung

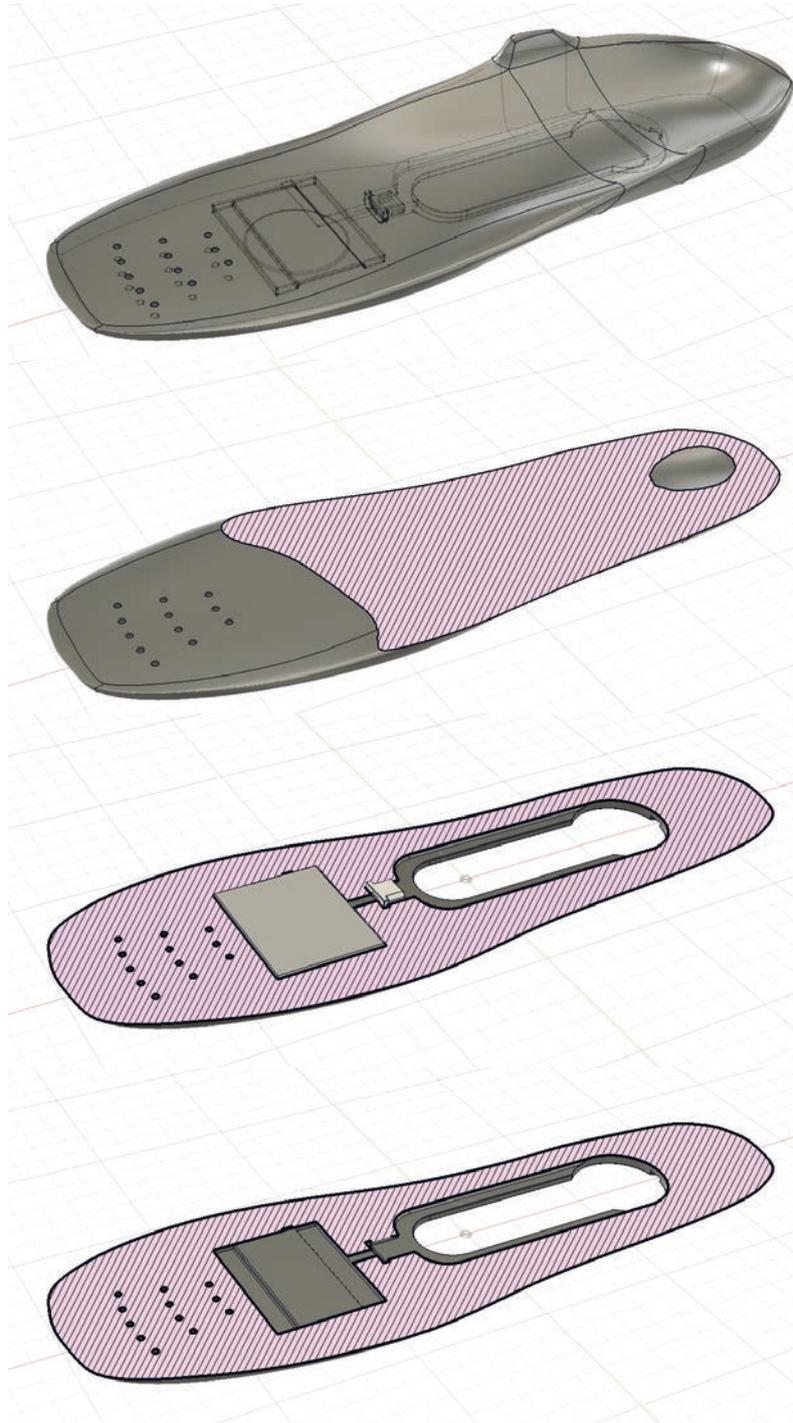


Abb. 199: mögliches Fertigungsverfahren (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Dargestellt, ein mögliches Fertigungsverfahren mittels 3D-Druckverfahren. Die Innensohle soll mittels geeignetem Druckverfahren Schicht für Schicht aufgebaut werden. Im ersten Schritt wird die unterste Schicht gedruckt. Im Anschluss daran wird die bestückte Messplatte mit den Dehnungsmessstreifen und der kleine Stecker, welcher mit der Messplatte verbunden ist, in die gedruckte Schicht eingelegt. Im Anschluss daran wird die Sohle fertig gedruckt.

## \_ Modell



Abb. 200: gedrucktes Modell (Schaden-Handstanger, P., 2022)

Abgebildet ist die gedruckte DLP-Sohle der einseitig messenden Variante mit Elektronikeinheit und Ladestecker.



# 16. Diskussion



Folgend werden die relevantesten Ergebnisse des vorliegenden Projekts diskutiert und mit der Theorie in Verbindung gesetzt, um anschließend die Forschungsfragen zu beantworten.

Die Entscheidung fiel auf einen Powermeter welcher in einer Innensohle für Schuhe integriert ist. Diese Innensohle lässt sich rasch in unterschiedlichste Fahrradschuhe einsetzen und ist daher für diverse Fahrradtypen uneingeschränkt geeignet. Zudem ist die Position des Powermeters in diesem Bereich ideal, da hier die Kraft vom Fuß direkt aufs Pedal und die Sohle übertragen wird somit ist eine genau Messung der Wattleistung möglich.

Anhand der Marktrecherche zeigt sich, dass derzeit fast alle Powermeter-Systeme mithilfe von Dehnungsmessstreifen Verformungen messen und anhand dieser, in Kombination mit der Trittfrequenz, die Wattleistung bestimmen. Aufgrund dieser Erkenntnisse und der Expertise von Herrn DI Stephan Selinger habe ich mich auch für das Anwenden von Dehnungsmessstreifen im Entwurf bzw. im Prototyp entschieden.

Folgend wird auf die dritte Forschungsfrage eingegangen. Derzeit gibt es noch keinen Powermeter am Markt, der den Tretablauf analysiert und daraus konkrete Maßangaben für die passende Sitzposition angibt. Daher wurde für dieses Projekt der Versuch unternommen, ob es möglich ist, einen Powermeter mit genau dieser Funktion zu entwerfen. Im Laufe des Designprozesses wurde allerdings ersichtlich, dass es eine Vielzahl an Parametern benötigt, um die Sitzposition korrekt zu erheben. In einem weiteren Schritt wäre es jedoch möglich, dass der Powermeter anhand der Erkennung des Tretablaufs jedoch Empfehlungen abgibt, beispielsweise einen/eine Bikefitter\*in aufzusuchen oder, dass der runde Tritt forciert werden sollte. Um diese Funktion anbieten zu können wäre eine umfangreiche Versuchs-Kontrollstudie notwendig.

Des weiteren ist zu überlegen, mit welchen Fertigungsmethoden die custom-fit Sohlen, möglichst kostengünstig, angefertigt werden können. Die derzeit präferierte Methode wäre, mittels 3D-Druck-Verfahren die Sohlen herzustellen, da so eine Individualisierung leicht umsetzbar ist.



# **17. Zusammenfassung und Ausblick**

Die Beliebtheit des Radsports steigt seit Jahren kontinuierlich an und auch die Verwendung von Sportuhren und Sport-Apps zur Aufzeichnung und Interpretation physiologischer Daten steigt. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Powermeters, welcher für unterschiedliche Fahrradtypen verwendbar ist, da die derzeitigen verfügbaren Systeme immer an ein Fahrrad gebunden sind.

Eine durchgeführte Umfrage zeigt, dass die meisten Sportler\*innen mehr als ein Fahrrad besitzen und auch Interesse an einem Powermeter für mehrere Räder besteht. Anhand der Marktanalyse wird ersichtlich, dass derzeit der Pedalpowermeter am Beliebtesten ist und dieser viele relevante Vorteile mit sich bringt.

Im theoretischen Teil der Arbeit wird ein Überblick über den Fahrradmarkt gegeben und Motive für den Fahrradsport aufgezeigt. Des Weiteren wird das System und die Funktionsweise eines Leistungswattmesssystems erklärt und aufgezeigt, weshalb dieses System für das Training von Vorteil ist. Mehrere Powermeter von verschiedenen Anbietern werden verglichen und die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgezeigt. Ein weiteres Kapitel befasst sich mit den Kräften und Widerständen, welche beim Radfahren vorherrschen. Zudem wird auf den "runden Tritt" und die Phasen des Tretzyklus eingegangen.

Anhand der vorangegangenen Erkenntnisse wurden erste Konzeptideen für einen Powermeter dargestellt und nach anschließender Evaluierung zu einem Entwurf ausgearbeitet.

Das Ergebnis des Entwurfs ist ein Powermeter, welches sich in einer Innensohle befindet. Im Bereich des Zehenballen sind Dehnungsmessstreifen in der Sohle angebracht, um die auftretenden Verformungen beim Pedalieren zu messen und daraus die Wattleistung zu berechnen.

Die Idee, mithilfe des entwickelten Powermeters die korrekte Sitzposition zu bestimmen, konnte aufgrund der Komplexität nicht umgesetzt werden.

Abschließend erfolgt ein kurzer Ausblick über weitere Schritte die es noch zu optimieren gibt:

Um valide Messergebnisse zu erhalten, müssen diverse Schuhmodelle bezüglich Maße und Proportionen analysiert werden, um zu gewährleisten, dass die Messung mittels Powermeter in der Innensohle bei allen unterschiedlichen Schuhmodellen funktioniert. Dadurch kann sich der/die Nutzer\*in darauf verlassen, dass die Wattwerte sowohl beim Rennrad, als auch beim Mountainbike etc. vergleichbar sind. Um diese Vergleichbarkeit zu prüfen, wären weitere Tests notwendig. Zudem müsste noch die Form und die Materialität der Messplatte anhand weiterer Untersuchungen definiert werden.

Zudem soll eine App entwickelt werden, um eine jeweilige Kalibrierung für das Fahrradmodell vornehmen zu können. Denn aufgrund verschiedener Maße und Proportionen der Fahrräder, muss der Powermeter für jedes Rad eigens kalibriert werden. In dieser App kann auch der Individualisierungsprozess integriert werden, welcher in Folge auch noch entwickelt und optimiert werden muss.



# **18. Literaturverzeichnis**

- Alger, K. (2018). Arion smart insoles review. *Wearable*: <https://www.wearable.com/running/arion-smart-insoles-review-6361>, abgerufen am 23.03.2022
- Allen, H., Coggan, A. & McGregor, S. (2020). *Wattmessung im Radsport und Triathlon* (8. Aufl.). Delius Klasing & Co. KG.
- Barzel, P., Bollschweiler, M. & Smolik, C. (2008). *Die neue Fahrradtechnik* (2. Aufl.). BVA Bielefelder Verlag.
- Bergfreunde (2022). *Wattzahl & gewichtsbezogene Leistung auf dem Rennrad*. <https://www.berg-freunde.at/wattzahl-rennrad-rechner/>, abgerufen am 19.03.2022
- Brett, M. (2018). Just In: Avio's £199 PowerSense powermeter. *Road.cc*: <https://road.cc/content/tech-news/252499-just-avios-ps199-powersense-powermeter>, abgerufen am 28.09.2022
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2013). *Radverkehr in Zahlen Daten, Fakten und Stimmungen* (2. Aufl.). BMVIT Wien: [https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss\\_radverkehr/publikationen/riz.html](https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html), abgerufen am 12.02.2022
- DC Rainmaker (2012). *PowerTap PowerCal in- depth review*. <https://www.dcrainmaker.com/2012/11/cycleops-powercal-in-depth-review.html>, abgerufen am 08.03.2022
- DC Rainmaker (2014). *Brim Brothers announces Zone power meter production, my first ride impressions*. <https://www.dcrainmaker.com/2014/09/brothers-announces-production.html>, abgerufen am 09.03.2022
- DC Rainmaker (2015). *The Ashton Instruments powermeter: An early look*. <https://www.dcrainmaker.com/2015/04/ashton-instruments-early.html>, abgerufen am 08.03.2022
- DC Rainmaker (2016a). *PowerPod in- depth review*. <https://www.dcrainmaker.com/2016/03/powerpod-depth-review.html>, abgerufen am 05.03.2022
- DC Rainmaker (2016b). *A Look at Luck's Cycling Shoe Power Meter*. <https://www.dcrainmaker.com/2016/09/lucks-cycling-power-meter-shoe.html>, abgerufen am 06.03.2022
- DC Rainmaker (2018a). *The Power Meter Buyers Guide – 2018 Edition*. <https://www.dcrainmaker.com/2018/11/power-meter-buyers-2018.html>, abgerufen am 18.02.2022
- DC Rainmaker (2018b). *First Look: The IQ2 149€ Power Meter*. <https://www.dcrainmaker.com/2018/04/iq2-149eur-first-power-meter.html>, abgerufen am 18.02.2022
- DC Rainmaker (2018c). *Hands-on: WatTeam's new Gen3 PowerBeat power meter*. <https://www.dcrainmaker.com/2018/07/hands-on-watteams-new-gen3-powerbeat-power-meter.html>, abgerufen am 08.03.2022
- Europa-Fachbuchreihe für elektrotechnische, elektronische und informationstechnische Berufe (2008). *Tabellenbuch Elektrotechnik*, 23. neu bearb. und erweiterte Auflage (A). FS-Fachbuch Verlag und Vertriebsgesellschaft m.b.H.
- Excelsior (2022). *Das Fahrrad als Statussymbol – Welcher Fahrrad-Typ bist du?*, <https://www.excelsior-fahrrad.de/2020/03/20/das-fahrrad-als-statussymbol-welcher-fahrrad-typ-bist-du/>, abgerufen am 04.04.2022
- Favero Electronics (2022a). *Advantages of the IAV Power System*. <https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/whats-iaav-power>, abgerufen am 02.03.2022
- Favero Electronics (2022b). *Data measured by the Assioma Power Meter Pedal*. <https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma>, abgerufen am 10.08.2022
- Foszczynski, M. (2019). 3 Gründe, warum Rennradfahren der beste Sport der Welt ist. *Bergwelten*. <https://www.bergwelten.com/a/warum-rennradfahren-der-beste-sport-der-welt-ist>, abgerufen am 04.04.2022
- Fraunhofer IIS (2021). *Energy Harvesting – Autarke Energieversorgung*, <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/iot-system/tech/energy-harvesting.html>, abgerufen am 05.05.2021
- Friel, J. (2013). *Praxishandbuch Wattmessung*. spomedis GmbH.
- Garmin (2022). <https://www.garmin.com/de-AT/c/sports-fitness/cycling-bike-computers-bike-radar-power-meter-headlights/?series=20780>, abgerufen am 28.02.2022
- Garmin Support (2022a). *Was sind Cycling Dynamics?*, <https://support.garmin.com/de-AT/?faq=SsrDdlSRAf7AWa86cmNBs7>, abgerufen am 15.05.2022
- Garmin Support (2022b). *Wie werden die Garmin-Laufleistungsdaten berechnet?*, <https://support.garmin.com/de-AT/?faq=QRiQOEq5d09foNiH1DzUt5>, abgerufen am 22.03.2022
- Generation Robots (2021). *IMU und Robotertechnik: Was Sie wissen sollten*. [https://www.generationrobots.com/blog/de/imu-und-robotertechnik-was-sie-wissen-sollten-2/#:~:text=Eine%20inertiale%20Messeinheit%20\(engl.,Gyroskopen%20und%20Magnetometern%20gemessen.,](https://www.generationrobots.com/blog/de/imu-und-robotertechnik-was-sie-wissen-sollten-2/#:~:text=Eine%20inertiale%20Messeinheit%20(engl.,Gyroskopen%20und%20Magnetometern%20gemessen.,) abgerufen am 18.12.2022

- Giesecke, P. (2017). Smarter Funkstandard: ANT+ verbindet deine Fitnessgeräte – aber nicht nur. *Trendblog*. <https://trendblog.euronics.de/mobile-web/smarter-funkstandard-ant-verbindet-deine-fitnessgeraete-nicht-nur-46916/>, abgerufen am 04.05.2021
- Grengs, S. & Schmit, J. P. (2014). *Leistungsmesseinrichtung für pedalbetriebene Fahrzeuge* (DE 11 2014 001 500 T5). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d5/35/01/26d50d2d02bdda/DE112014001500T5.pdf>, abgerufen am 12.07.2021
- Gressmann, M. (2017). *Fahrradphysik und Biomechanik. Technik. Formeln. Gesetze.* (12., Aufl.). Delius Klasing & Co. KG.
- Hawkins, H. M. & Lyle, M. A. & Collins, B. J. (2021). *System and method for controlling a bicycle trainer* (US 11,090,542 B2). United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/ae/d2/31/5389065b7be981/US11090542.pdf>, abgerufen am 15.03.2022
- Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (2021). *Messen mit Dehnungsmessstreifen: So vermeiden Sie unerwünschte Temperatureinflüsse auf Ihr Messergebnis*, <https://www.hbm.com/de/6725/temperaturkompensation-bei-dehnungsmessstreifen-messungen/>, abgerufen am 27.04.2021
- Infocrank (2022). *6 Gründe, warum Sie mit dem Infocrank Radsport-Leistungsmesser fahren sollten*. <https://infocrank.cc/why-infocrank>, abgerufen am 23.02.2022
- Interlink Electronics (2022). <https://www.interlinkelectronics.com/force-sensing-resistor>, abgerufen am 18.12.2022
- Jellinek, R. (2013). *Präsentation E-Mobilitäts-Workshop des BMVIT*.
- Kühnen, R. (2021). Wie war ich?. *Tour, 2021, 2*, 80-85.
- Lenertz, H. (2021). Was bringt die Wattmessung beim Laufen?. *Runner's World*: <https://www.runnersworld.de/lauftraining/wattmessung-beim-laufen/>, abgerufen am 22.03.2022
- Lull, A. P. & Warner, P. A. (2020). *Apparatus, system and method for power measurement at a crank axle and crank arm* (US 10,571,349 B2). United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/e5/09/88/9704b32ba4d5c8/US10571349.pdf>, abgerufen am 12.07.2021
- Lull, A. P. & Golesh, E. (2018). *Apparatus, system and method for power measurement* (US 10,076,681 B2). United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/bd/f2/15/75ae9720e4d25e/US10076681.pdf>, abgerufen am 12.07.2021
- Michael Konczer (2022). *Wattrechner Fahrrad (Rennrad, MTB)*. <https://www.michael-konczer.com/de/training/rechner/rennrad-leistung-berechnen>, abgerufen am 19.03.2022
- Nassef, H. R. (2015). *Energy Harvesting power output measurement apparatus and methods for cycling* (US 9,063,026 B2). United States Patent. <https://patentimages.storage.googleapis.com/5c/e6/fd/bd4e4676a5e04/US9063026.pdf>, abgerufen am 12.07.2021
- Nowak, F. (2017). Komponenten: Wettkampftest: 2InPower – Volle Kraft voraus!. *Velomotion*: <https://www.velomotion.de/magazin/2017/07/wettkampftest-rotor-2inpower-volle-kraft-voraus/>, abgerufen am 25.02.2022
- Pfeiffer, M. (2021). Alles, was Sie über Rennrad-Pedale wissen sollten. *RoadBike*. <https://www.roadbike.de/ergonomie-special-kontaktpunkt-pedale/>, abgerufen am 15.04.2021
- power2max (2022). *Powermeter für Fahrräder: Basiswissen – Teil 1*, <https://www.power2max.com/de/2018/09/cycling-power-meter-basics-1/>, abgerufen am 25.02.2022
- Preß, W. (2016). Statt Pulsmessung: Wie Watt-Training für leistungsorientierte Hobbyradler funktioniert. *Sport aktiv*: <https://www.sportaktiv.com/statt-pulsmessung-wie-watt-training-fuer-leistungsorientierte-hobbyradler-funktioniert>, abgerufen am 12.07.2021
- radsport-news.com (2016). *Brim Brothers: erster tragbarer Leistungsmesser „Zone DPMX“*, [https://www.radsport-news.com/markt/marktnews\\_97423.htm](https://www.radsport-news.com/markt/marktnews_97423.htm), abgerufen am 05.03.2021
- RoadcyclingDE (2021). *Klickpedale – Tipps & alles was du wissen musst*, <https://roadcycling.de/rennrad-ausruestung/tests/komponenten/rennrad-pedale/klickpedale-ratgeber-tipps/2>, abgerufen am 04.05.2021
- RoadcyclingDE (2022). *Smart-Trainer – Der große Ratgeber*, <https://roadcycling.de/ratgeber/smart-trainer-der-grosse-ratgeber>, abgerufen am 16.03.2022
- Rottenberg, T. (2021). Wie sich das Bild des Radsports ändert. *Der Standard*: <https://www.derstandard.at/story/2000125900720/wie-sich-das-bild-des-radsports-aendert>, abgerufen am 04.04.2022

- Rotor (2021). *Powermeter ja – aber welchen?*, <http://wattmessung.de/powermeter/>, abgerufen 04.04.2021
- Rotor (2022). <https://rotorbike.com/powermeter/>, abgerufen am 28.08.2022
- Sandig, D. (2015). Leistungsmesser: Mehr Daten, mehr Power?. *RennRad Das Magazin*: <https://www.radsport-rennrad.de/test-teile/leistungsmesser-wie-sinnvoll-ist-er-wie-anwenden/>, abgerufen am 04.05.2021
- Sawh, M. (2018). Runvi's smart insole for runners plays nice with your Apple Watch. *Wearable*: <https://www.wearable.com/running/runvi-smart-insoles-kickstarter>, abgerufen am 23.03.2022
- Shimano (2022). <https://bike.shimano.com/de-DE/technologies/component/details/power-meter/function.html>, abgerufen am 30.08.2022
- Sensoria (2022). <https://www.sensoriafitness.com/technology>, abgerufen am 23.03.2022
- Sinner, M. (2021). Powermeter – Wattmesser Marktübersicht. *Velo Nerd*: <https://www.velonerd.cc/powermeter-wattmesser/#comments>, abgerufen am 13.02.2022
- Sinner, M. (2017). Fahrrad Klickpedale Übersicht. *Velo Nerd*: <https://www.velonerd.cc/fahrrad-klickpedale/>, abgerufen am 05.03.2022
- SRM-Power (2021). <http://www.srm.de/de/home/>, abgerufen am 12.03.2021
- Stages Cycling (2021). So funktioniert Stages Cycling, <https://stagescycling.com/de/technology/#:~:text=Die%20Elektronik%20des%20Stages%20Powermeters,Generation.&text=Diese%20stellen%20sicher%2C%20dass%20Leistungsdaten,und%20den%20Verbindungsaufbau%20zur%20Leseinheit.,> abgerufen am 04.05.2021
- Steinhardt, I. (2017). Samplingverfahren. *Hypothesen*. <https://sozmethode.hypothesen.org/156>, abgerufen am 16.04.2022
- Stevenson, J., (2017). Watteam PowerBeat. *road.cc*. <https://road.cc/content/review/231696-watteam-powerbeat>, abgerufen am 08.03.2022
- Stryd (2022). <https://www.stryd.com/eu/de/store>, abgerufen am 23.03.2022
- Technische Universität Darmstadt (2020). *WP2002 Bikefitting*, <http://wiki.ifs-tud.de/biomechanik/projekte/ss2020/wp2002>, abgerufen am 22.05.2022
- Tour Magazin (2015). Powermeter von Pioneer im TOUR-Test - Pioneer Cyclo-Sphere und Leistungsmessgeräte im Check. *Tour*: <https://www.tour-magazin.de/kaufberatung-komponenten-kurbeln/artikel/powermeter-von-pioneer-im-tour-test-pioneer-cyclo-sphere-und-leistungsmessgeraete-im-check/>, abgerufen am 12.02.2022
- TriathlonTipps (2021). *Watt-Leistungsmessung: So funktioniert Trainingssteuerung auf dem Rad*, <https://www.triathlon-tipps.de/watt-leistungsmessung-rennrad.html>, abgerufen am 04.04.2021
- Tri It Fit (2021). *Wattmessung auf dem Rad – Alles was Du wissen musst!*, <https://tri-it-fit.de/wattmessung-auf-dem-rad-alles-was-du-wissen-musst/#:~:text=Gegen%3BCber%20der%20Pulsmessung%20besitzt%20die,Du%20wirklich%20im%20Moment%20gibst.,> abgerufen am 04.05.2021
- Velocomp (2022). <https://velocomp.com/pages/the-tech>, abgerufen am 14.03.2022
- VeloNews (2022). *Arofly, the worlds's smallest power meter?*. <https://www.velonews.com/gear/arofly-worldss-smallest-power-meter/>, abgerufen am 07.03.2022
- VSSÖ (2022). *Fahrradverkaufszahlen 2020: Absatz auf Rekordkurs, E-Bike Anteil erstmals bei über 40 Prozent, E-Lastenräder haben sich verdoppelt*, <https://www.vssso.at/fahrradverkaufszahlen-2020/>, abgerufen am 15.03.2022
- Wilson, J. S. (2005). *Sensor Technology Handbook*. Elsevier.
- Zweirad-Industrie-Verband (2021). *Pressemitteilung Zahlen – Daten – Fakten zum deutschen Fahrrad- und E-Bike Markt 2020*, [https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM\\_2021\\_10.03.\\_Fahrrad-\\_und\\_E-Bike\\_Markt\\_2020.pdf](https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2021_10.03._Fahrrad-_und_E-Bike_Markt_2020.pdf), abgerufen am 20.04.2021
- Zweirad-Industrie-Verband (2022). *Marktdaten Fahrräder und E-Bikes 2021*, [https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV\\_Marktdatenpraesentation\\_2022\\_fuer\\_Geschaeftsjahr\\_2021.pdf](https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf), abgerufen am 18.07.2022





# **19. Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Übersicht Fahrradtypen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	28
Abb. 2: Rennrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)	32
Abb. 3: Triathlonrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)	33
Abb. 4: Mountainbike (Schaden-Handstanger, P., 2022)	34
Abb. 5: Marktanteil Fahrradtypen Deutschland (vgl. Zweirad-Industrie-Verband, 2021) <a href="https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2016_08-03-2016_Praesentation.pdf">https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2016_08-03-2016_Praesentation.pdf</a> <a href="https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2021_10.03._ZIV-Praesentation_10.03.2021_mit_Text.pdf">https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2021_10.03._ZIV-Praesentation_10.03.2021_mit_Text.pdf</a> <a href="https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf">https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/ZIV_Marktdatenpraesentation_2022_fuer_Geschaeftsjahr_2021.pdf</a> abgerufen am 22.11.2022	36
Abb. 6: Altersverteilung nach Fahrradtyp (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 254)	37
Abb. 7: 3. Generation des SRM-Powermeter aus 1992 <a href="http://www.srm.de/de/ueber-uns/geschichte/">http://www.srm.de/de/ueber-uns/geschichte/</a> abgerufen am 22.11.2022	42
Abb. 8: Komponenten für Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)	44
Abb. 9: Positionen für Powermeter am Fahrrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)	45
Abb. 10: Übersicht der Messoptionen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	46
Abb. 11: Powermeter Aufbau (Schaden-Handstanger, P., 2022)	48
Abb. 12: Darstellung am Fahrradcomputer bei Garmin <a href="https://www8.garmin.com/manuals/webhelp/edge1030/DE-DE/GUID-AEA5BC72-9B27-4F4A-8E44-68E24DDC57D0.html">https://www8.garmin.com/manuals/webhelp/edge1030/DE-DE/GUID-AEA5BC72-9B27-4F4A-8E44-68E24DDC57D0.html</a> abgerufen am 22.11.2022	53
Abb. 13: Darstellung bei Shimano <a href="https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html">https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html</a> abgerufen am 22.11.2022	54
Abb. 14: Darstellung bei Cyclo-Sphere <a href="https://steprimo.com/iphone/us/app/1268906683/Cyclo-Sphere-Analysis/">https://steprimo.com/iphone/us/app/1268906683/Cyclo-Sphere-Analysis/</a> abgerufen am 22.11.2022	54
Abb. 15: Zusammenhang von Wattleistung und anderen Parametern (vgl. Friel, J., 2013, S. 23)	56
Abb. 16: Dauerleistung am Fahrrad/Ergometer (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 260) <a href="https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html">https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html</a> abgerufen am 22.11.2022	60
Abb. 17: Marktüberblick der Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)	64
Abb. 18: Kurbel-Powermeter SRM Power Road <a href="http://www.srm.de/de/produkte/powermeter/campagnolo/">http://www.srm.de/de/produkte/powermeter/campagnolo/</a> abgerufen am 22.11.2022	68
Abb. 20: MTB-Kurbel-Powermeter Quarq Eagle <a href="https://www.sram.com/en/sram/models/pm-xx-1-b2">https://www.sram.com/en/sram/models/pm-xx-1-b2</a> abgerufen am 18.10.2022	68
Abb. 19: Kurbel-Powermeter Quarq D Zero <a href="https://www.sram.com/en/quarq/models/pm-dz-spdr-d1">https://www.sram.com/en/quarq/models/pm-dz-spdr-d1</a> abgerufen am 22.11.2022	68
Abb. 21: Kettenblatt-Powermeter PowerTap C1 <a href="https://www.tour-magazin.de/fitness/indoortraining/fahrtst-neue-eistungsmessgeraete-von-powertap/">https://www.tour-magazin.de/fitness/indoortraining/fahrtst-neue-eistungsmessgeraete-von-powertap/</a> abgerufen am 14.10.2022	69
Abb. 22: Kettenblatt des PowerTap C1 <a href="https://www.dcrainmaker.com/2015/12/powertap-chainring-review.html">https://www.dcrainmaker.com/2015/12/powertap-chainring-review.html</a> abgerufen am 14.10.2022	69
Abb. 23: Kurbelarme Infocrank BCD <a href="https://infocrank.cc/power-meter/infocrank-110bcd-24mm-compact">https://infocrank.cc/power-meter/infocrank-110bcd-24mm-compact</a> abgerufen am 05.07.2022	71
Abb. 24: Kurbelarm-Powermeter Infocrank BCD <a href="https://www.dcrainmaker.com/2015/11/verve-infocrank-review.html">https://www.dcrainmaker.com/2015/11/verve-infocrank-review.html</a> abgerufen am 05.07.2022	71
Abb. 25: Kurbelarm-Powermeter StagesCycling <a href="https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/campagnolo/super-record-12s.html">https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/campagnolo/super-record-12s.html</a> abgerufen am 12.09.2022	72

Abb. 26: Kurbelarm-Powermeter beidseitig "Factory Install" StagesCycling <a href="https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/shimano-ultegra-r8000-factory-install.html">https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/shimano-ultegra-r8000-factory-install.html</a> abgerufen am 27.09.2022	73
Abb. 27: Kurbelarm-Powermeter einseitig "Factory Install" StagesCycling <a href="https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/shimano-ultegra-r8000-factory-install.html">https://www.stagescycling.eu/de/power-meter/shimano-ultegra-r8000-factory-install.html</a> abgerufen am 27.09.2022	73
Abb. 28: Fertigungsprozess bei StagesCycling <a href="https://stagescycling.com/en_us/product/power-meters/factory-installed">https://stagescycling.com/en_us/product/power-meters/factory-installed</a> abgerufen am 27.09.2022	73
Abb. 29: Kurbelarm-Powermeter Shimano <a href="https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html">https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html</a> abgerufen am 10.10.2022	74
Abb. 30: Messeinheit Shimano <a href="https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html">https://bike.shimano.com/de-DE/product/component/dura-ace-r9200/FC-R9200-P.html</a> abgerufen am 10.10.2022	74
Abb. 31: Kurbelarm-Powermeter Avio PowerSense <a href="https://road.cc/content/tech-news/252499-just-avios-ps199-powersense-powermeter">https://road.cc/content/tech-news/252499-just-avios-ps199-powersense-powermeter</a> abgerufen am 22.11.2022	75
Abb. 32: Selbstinstallation Avio PowerSense <a href="https://road.cc/content/tech-news/252499-just-avios-ps199-powersense-powermeter">https://road.cc/content/tech-news/252499-just-avios-ps199-powersense-powermeter</a> abgerufen am 22.11.2022	75
Abb. 33: Kurbelachs-Powermeter Rotor InPower <a href="https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/in-power-road/inpower-dm-road.html">https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/in-power-road/inpower-dm-road.html</a> abgerufen am 04.10.2022	77
Abb. 34: Kurbelachs-Powermeter-Set Rotor InPower <a href="https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/in-power-road/inpower-dm-road-crankset-kit.html">https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/in-power-road/inpower-dm-road-crankset-kit.html</a> abgerufen am 04.10.2022	77
Abb. 35: Achs- und Kurbelarm-Powermeter Rotor 2InPower <a href="https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/2inpower-dm-road/2inpower-dm-road.html">https://rotorbike.com/catalog/default/rotor/road/powermeters/2inpower-dm-road/2inpower-dm-road.html</a> abgerufen am 04.10.2022	78
Abb. 36: Tretstil Erkennung beim Favero Assioma <a href="https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/whats-iav-power">https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/whats-iav-power</a> abgerufen am 18.09.2022	80
Abb. 37: Pedal-Powermeter Favero Assioma Uno <a href="https://cycling.favero.com/shop/single-sided-powermeter-assioma-uno">https://cycling.favero.com/shop/single-sided-powermeter-assioma-uno</a> abgerufen am 05.11.2022	80
Abb. 38: Pedal-Powermeter Garmin Rally RK <a href="https://www.garmin.com/de-AT/p/699171">https://www.garmin.com/de-AT/p/699171</a> abgerufen am 05.11.2022	80
Abb. 39: Pedal-Powermeter Wahoo Powrlink Zero <a href="https://de-eu.wahoofitness.com/devices/pedals/powrlink">https://de-eu.wahoofitness.com/devices/pedals/powrlink</a> abgerufen am 17.10.2022	81
Abb. 40: Übersicht Pedalsysteme (Schaden-Handstanger, P., 2022)	82
Abb. 42: Pedalkörper Garmin Rally RK für Rennrad <a href="https://www.garmin.com/de-AT/p/659833/pn/010-12900-02">https://www.garmin.com/de-AT/p/659833/pn/010-12900-02</a> abgerufen am 05.10.2022	84
Abb. 41: Achskit des Pedal-Powermeter Favero Assioma Duo <a href="https://cycling.favero.com/shop/assioma-duo-shi">https://cycling.favero.com/shop/assioma-duo-shi</a> abgerufen am 05.10.2022	84
Abb. 43: Pedalkörper Garmin Rally XC für MTB <a href="https://www.garmin.com/de-AT/p/659833/pn/010-12900-02">https://www.garmin.com/de-AT/p/659833/pn/010-12900-02</a> abgerufen am 05.10.2022	84
Abb. 44: Test zwischen Pedal- und Kurbelpowermeter (Kühnen, R., 2021, S. 85)	85
Abb. 45: Hinterradnaben-Powermeter PowerTap <a href="https://www.cyclocross-store.de/de/naben-u.-zubehoer/powertap-naben/powertap-nabe-g3">https://www.cyclocross-store.de/de/naben-u.-zubehoer/powertap-naben/powertap-nabe-g3</a> abgerufen am 22.7.2022	86
Abb. 46: Gegenkraftmesser Velocomp PowerPod <a href="https://velocomp.com/collections/power-meters/products/power-pod-v5">https://velocomp.com/collections/power-meters/products/power-pod-v5</a> abgerufen am 10.10.2022	88
Abb. 47: Lenkermontage Velocomp PowerPod	

https://velocomp.com/collections/power-meters/products/power-pod-v5 abgerufen am 10.10.2022	88
Abb. 48: Ventil-Powermeter Arofly Link-A1 https://www.arofly.com/main/arofly-link-en/ abgerufen am 22.11.2022	89
Abb. 49: Package Arofly Link-A1 https://www.arofly.com/main/arofly-link-en/ abgerufen am 22.11.2022	89
Abb. 50: Brustgurt PowerCal https://www.dcrainmaker.com/2012/11/cycleops-powercal-in-depth-review.html abgerufen am 19.09.2022	90
Abb. 51: Powermeter IQ2 am Rad montiert https://www.dcrainmaker.com/2018/04/iq2-149eur-first-power-meter.html abgerufen am 19.09.2022	91
Abb. 52: Powermeter IQ2 https://www.dcrainmaker.com/2018/04/iq2-149eur-first-power-meter.html abgerufen am 19.09.2022	91
Abb. 53: Selbstmontage PowerBeat https://www.dcrainmaker.com/2018/07/hands-on-watteams-new-gen3-powerbeat-power-meter.html abgerufen am 22.11.2022	92
Abb. 54: Powermeter WatTeam PowerBeat https://www.dcrainmaker.com/2018/07/hands-on-watteams-new-gen3-powerbeat-power-meter.html abgerufen am 22.11.2022	92
Abb. 55: Powermeter Ashton Instruments https://www.dcrainmaker.com/2015/04/ashton-instruments-early.html abgerufen am 18.09.2022	93
Abb. 57: Powermeter Dyno Velo https://www.dcrainmaker.com/2015/09/hands-power-meter.html abgerufen am 07.09.2022	93
Abb. 56: Montage Ashton Instruments https://www.dcrainmaker.com/2015/04/ashton-instruments-early.html abgerufen am 19.09.2022	93
Abb. 58: Powermeter-Schuh Luck Racer 3.0 https://www.dcrainmaker.com/2016/09/lucks-cycling-power-meter-shoe.html abgerufen am 17.10.2022	94
Abb. 59: Schuhsohle mit Elektronik Luck Racer 3.0 https://roadcycling.de/rennrad-ausruestung/tests/komponenten/ radcomputer-powermeter/powermeter-schuhe-luck abgerufen am 17.10.2022	94
Abb. 60: Powermeter Brim Brothers Zone DPMX https://www.dcrainmaker.com/2014/09/brothers-announces-production.html abgerufen am 17.10.2022	95
Abb. 61: Montageprozedere an der Sohle https://www.dcrainmaker.com/2014/09/brothers-announces-production.html abgerufen am 17.10.2022	95
Abb. 62: Montage an der Schuhsohle https://www.dcrainmaker.com/2014/09/brothers-announces-production.html abgerufen am 17.10.2022	96
Abb. 63: Pod am Schuh https://www.dcrainmaker.com/2014/09/brothers-announces-production.html abgerufen am 17.10.2022	96
Abb. 64: Smarttrainer von Tacx https://roadcycling.de/rennrad-ausruestung/tests/trainingsgeraete/7-top-smart-trainer abgerufen am 19.10.2022	99
Abb. 65: Vor- und Nachteile der Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)	100
Abb. 66: Übersicht der wichtigsten Punkte (Schaden-Handstanger, P., 2022)	102
Abb. 67: Verschiedene Sensorpositionen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	105
Abb. 68: Stryd Laufsensoren https://www.stryd.com/eu/de/store abgerufen am 19.11.2022	109
Abb. 69: Position am Laufschuh https://www.dcrainmaker.com/2021/04/stryd-launches-subscription-platform.html	

abgerufen am 19.11.2022	109
Abb. 70: Garmin Brustgurt HRM und Laufuhr <a href="https://www.dcrainmaker.com/2020/09/garmin-hrm-pro-chest-strap-depth-review.html">https://www.dcrainmaker.com/2020/09/garmin-hrm-pro-chest-strap-depth-review.html</a>	
abgerufen am 19.11.2022	110
Abb. 71: Arion Laufsohle <a href="https://www.arion.run/product/arioncoach/">https://www.arion.run/product/arioncoach/</a>	
abgerufen am 12.10.2022	111
Abb. 72: Pod am Laufschuh <a href="https://www.arion.run/product/arioncoach/">https://www.arion.run/product/arioncoach/</a>	
abgerufen am 12.10.2022	111
Abb. 73: Smarte Sohle Runvi <a href="https://www.wearable.com/running/runvi-smart-insoles-kickstarter">https://www.wearable.com/running/runvi-smart-insoles-kickstarter</a>	
abgerufen am 24.10.2022	112
Abb. 74: Smarte Socken Sensoria <a href="https://store.sensoriafitness.com/">https://store.sensoriafitness.com/</a>	
abgerufen am 24.10.2022	113
Abb. 75: Pod für den Socken <a href="https://store.sensoriafitness.com/">https://store.sensoriafitness.com/</a>	
abgerufen am 22.10.2022	113
Abb. 76: Widerstände beim Radfahren (Schaden-Handstanger, P., 2022)	117
Abb. 77: Übersicht der Fahr- und Fahrradwiderstände (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 55)	118
Abb. 78: Widerstände an Steigungen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	121
Abb. 79: Parameter für die Berechnung der Steigleistung (Schaden-Handstanger, P., 2022)	122
Abb. 80: Tabelle für die Gesamtleistung bei dem Anstieg "Weißen am Sattel" (Schaden-Handstanger, P., 2022)	125
Abb. 81: Tabelle für die Relative Leistung bei dem Anstieg "Weißen am Sattel" (Schaden-Handstanger, P., 2022)	125
Abb. 82: Reifenverformung von schmalen und breiten Reifen (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 57)	128
Abb. 83: Rollwiderstandsleistung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 64)	129
Abb. 84: Widerstände in Abhängigkeit zur Fahrgeschwindigkeit (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 261) <a href="https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html">https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html</a>	
abgerufen am 22.11.2022	131
Abb. 85: Widerstände in Abhängigkeit zur Steigung (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013, S. 261) <a href="https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html">https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/fuss_radverkehr/publikationen/riz.html</a>	
abgerufen am 22.11.2022	132
Abb. 86: Kräfte und Momente beim Pedalieren (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 185)	133
Abb. 87: Kräfte am Pedal und Tretlager (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 186)	134
Abb. 88: Tangentialer Kraftanteil beim Pedalieren (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 187)	135
Abb. 89: Kräfte und Momente am Pedal (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 35)	138
Abb. 90: Drehmomenterkennung beim Favero Pedal <a href="https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma">https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma</a>	
abgerufen am 22.11.2022	141
Abb. 91: Phasen des Tretzyklus (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 189)	142
Abb. 92: geschätzter Prozentanteil an Vortriebskräften (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 191)	144
Abb. 93: Pedalglätte-Funktion beim Favero Pedal <a href="https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma">https://cycling.favero.com/blog/tech-tests/data-measured-favero-assioma</a>	
abgerufen am 22.11.2022	145
Abb. 94: 3D Motion Capture Bikefitting Triathlonrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)	146
Abb. 95: Kniewinkel und Vorderfußwinkel bei Fahrradtypen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	147
Abb. 96: Pedalstellung während einer vollen Umdrehung (vgl. Gressmann, M., 2017, S. 214)	148
Abb. 97: Folien-DMS <a href="https://www.me-systeme.de/de/technik-zuerst/dehnungsmessstreifen">https://www.me-systeme.de/de/technik-zuerst/dehnungsmessstreifen</a>	
abgerufen am 12.01.2023	152
Abb. 98: piezoelektrischer Kraftsensor <a href="https://www.kistler.com/DE/de/cp/piezoelektrische-kraftsensoren-slimline-kraftmessringe-maximalkraefte-fz-3-kn-bis-80-kn-913xc/P0000607">https://www.kistler.com/DE/de/cp/piezoelektrische-kraftsensoren-slimline-kraftmessringe-maximalkraefte-fz-3-kn-bis-80-kn-913xc/P0000607</a>	
abgerufen am 12.01.2023	153
Abb. 99: FSR-Sensor <a href="https://www.flexkpd.com/pressure-sensor-thin-film-tactile-sensor-flexible-sensor-p00143p1.html">https://www.flexkpd.com/pressure-sensor-thin-film-tactile-sensor-flexible-sensor-p00143p1.html</a>	
abgerufen am 12.01.2023	154

Abb. 100: IMU-Einheit <a href="https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module">https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module</a> abgerufen am 12.01.2023	156
Abb. 101: Exploration der Zielgruppe (Schaden-Handstanger, P., 2022)	163
Abb. 102: Frage 2: Alter	164
Abb. 103: Frage 3: abgeschlossene Schulbildung	165
Abb. 104: Frage 4: Ausdauersportarten	166
Abb. 105: Frage 5: Fahrräder in Besitz	167
Abb. 106: Frage 6: Fahrradmodelle in Besitz	168
Abb. 107: Frage 7: Fahrradnutzung	169
Abb. 108: Frage 8: Häufigkeit der Fahrradnutzung	170
Abb. 109: Frage 9: Fahrradnutzung in Kilometer pro Jahr	171
Abb. 110: Frage 10: Fahrradschuh-Nutzung in Jahren	172
Abb. 111: Frage 11: Kenntnis über Leistungswattmesssystem	173
Abb. 112: Frage 12: Interesse an Leistungswattmessung	174
Abb. 113: Frage 13: Leistungswattmessung im Besitz	175
Abb. 114: Frage 15: Arten der Leistungswattmessung	177
Abb. 115: Frage 17: Preis des Leistungswattmessers	180
Abb. 116: Frage 18: Einseitiger oder Beidseitiger Leistungswattmesser	181
Abb. 117: Frage 21: Interesse an fahrradunabhängigem Leistungswattmesssystem	183
Abb. 118: Frage 22: Preisbereich für fahrradunabhängiges Leistungswattmesssystem	184
Abb. 119: Detailauswertung einzelner Personen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	185
Abb. 120: Erstellung von Personas (Schaden-Handstanger, P., 2022)	191
Abb. 121: Persona 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	192
Abb. 122: Persona 2 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	193
Abb. 123: Persona 3 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	194
Abb. 124: Persona 4 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	195
Abb. 125: mögliche Positionen für einen Powermeter am Fahrrad (Schaden-Handstanger, P., 2022)	204
Abb. 126: Sammlung diverser Skizzen aus der Ideation	205
Abb. 127: Übersicht der Ideen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	206
Abb. 128: Skizze Powermeter-Schlauch	208
Abb. 129: Skizze Powermeter-Speiche	209
Abb. 130: Skizze Powermeter-Ventil	210
Abb. 131: Skizze Powermeter-Kettenglied	211
Abb. 132: Skizze Powermeter-Steckachse	212
Abb. 133: Skizze Powermeter-Tretlagerachse	213
Abb. 134: Skizze Powermeter-Socke	214
Abb. 135: Skizze Powermeter-Fahrradschuh	215
Abb. 136: Skizze Powermeter-Schuhsohle	216
Abb. 137: Skizze Powermeter-Cleat	217
Abb. 138: Skizze Powermeter-Cleatplatte	218
Abb. 139: Skizze Powermeter-Pedalachse	219
Abb. 140: Skizze Powermeter-Innensohle	220
Abb. 141: Übersicht der vielversprechendsten Ideen	221
Abb. 142: Prinzipskizze Konzept 1	224
Abb. 143: Detailskizze Cleatplatte	225
Abb. 144: Detailskizze Halterung des Pods	225
Abb. 145: Mockup Cleatplatte an Rennradschuh (Schaden-Handstanger, P., 2022)	226
Abb. 146: Mockup Cleatplatte und Pod an Rennradschuh (Schaden-Handstanger, P., 2022)	226
Abb. 147: Unterseite einer MTB-Schuhsohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	227
Abb. 148: Prinzipskizze Konzept 2	228
Abb. 149: Skizze "Do it yourself" Powermeter	229
Abb. 150: Skizze Pedalhülse-Powermeter	229
Abb. 151: Mockup Pedalachse-Powermeter (Schaden-Handstanger, P., 2022)	231
Abb. 152: Mockup am Rennrad montiert (Schaden-Handstanger, P., 2022)	231
Abb. 153: Prinzipskizze Konzept 3	232
Abb. 154: Skizze Messeinheit in der Sohle, Pod am Schuh	233
Abb. 155: Skizze Pod im Bereich des Knöchels	233
Abb. 156: Diverse Mockups von Innensohlen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	235
Abb. 157: Vor- und Nachteile von Pedal versus Konzept Innensohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	236
Abb. 158: Skizzen des Aufbaus	241

Abb. 159: Explosionsdarstellungen des Aufbaus	242
Abb. 160: Skizzen zur Sohlenentnahme	243
Abb. 161: Skizzen zur Lademöglichkeit	244
Abb. 162: Package der Powermeter-Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	245
Abb. 163: Mockup 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	249
Abb. 164: Mockup 2 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	249
Abb. 165: Entwürfe 1 der Sohlenunterseite	250
Abb. 166: Explosionsansicht Entwurf Sohle	250
Abb. 167: 3D-Modell der gescannten Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	251
Abb. 168: erste 3D-Druck Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	252
Abb. 169: zweite 3D-Druck Sohle aus elastischem TPU (Schaden-Handstanger, P., 2022)	253
Abb. 170: Sohle inklusive Elektronikeinheit (Schaden-Handstanger, P., 2022)	253
Abb. 171: Entwürfe 2 der Sohlenunterseite	254
Abb. 172: finales Mockup (Schaden-Handstanger, P., 2022)	254
Abb. 173: Entwürfe 3 der Sohlenunterseite	255
Abb. 174: Entnahme der Elektronikeinheit am Mockup (Schaden-Handstanger, P., 2022)	255
Abb. 175: DLP-Druck Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	256
Abb. 176: finaler Entwurf	257
Abb. 177: Schematischer Aufbau der Sohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	258
Abb. 178: Schematischer Aufbau des Prototyps (Schaden-Handstanger, P., 2022)	261
Abb. 179: Prototyp-Standardinnensohle (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)	261
Abb. 180: Größenvergleich der Aluminium-Messplatte (Schaden-Handstanger, P., 2022)	262
Abb. 181: Prototypentest am Smarttrainer (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)	263
Abb. 182: Prototyp (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)	263
Abb. 183: durchgeführte Testläufe (Schaden-Handstanger, P., 2022)	264
Abb. 184: Prototyp DLP-Innensohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	265
Abb. 185: Testlauf mit konstanter Trittfrequenz (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)	266
Abb. 186: Testlauf mit variabler Trittfrequenz (Selinger, S. & Schaden-Handstanger, P., 2022)	267
Abb. 187: Ideation User Storys (Schaden-Handstanger, P., 2022)	269
Abb. 188: User Story 1 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	270
Abb. 189: User Story 2 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	272
Abb. 190: User Story 3 (Schaden-Handstanger, P., 2022)	274
Abb. 191: Powermetersohle hellgrau (Schaden-Handstanger, P., 2022)	278
Abb. 192: Powermetersohle dunkelgrau (Schaden-Handstanger, P., 2022)	279
Abb. 193: einseitige- und beidseitige-Variante (Schaden-Handstanger, P., 2022)	280
Abb. 194: Vergleichsmatrix der Powermeter-Systeme (Schaden-Handstanger, P., 2022)	280
Abb. 195: custom-made Farben (Schaden-Handstanger, P., 2022)	281
Abb. 196: Übersicht der Sohlengrößen (Schaden-Handstanger, P., 2022)	281
Abb. 197: Aufladevorgang der Powermetersohle (Schaden-Handstanger, P., 2022)	282
Abb. 198: Explosionsdarstellung (Schaden-Handstanger, P., 2022)	283
Abb. 199: mögliches Fertigungsprozedere (Schaden-Handstanger, P., 2022)	284
Abb. 200: gedrucktes Modell (Schaden-Handstanger, P., 2022)	285



## **20. Danksagung**



Mein Dank gilt zunächst Univ.-Prof.<sup>in</sup> Mag.art. Elke Bachlmair und Univ.-Prof. Mag.art. Mario Zeppetzauer für die umfassende Betreuung dieser Masterarbeit. Die regelmäßigen Meetings an der Universität und das konstruktive Feedback, haben mich im gesamten Gestaltungsprozess unterstützt, um aus der Arbeit das bestmögliche heraus zu holen.

Weiters möchte ich mich bei FH-Prof. DI Stephan Selinger von der Fachhochschule Hagenberg für die tolle Zusammenarbeit und Unterstützung, während des gesamten Arbeitsprozesses bedanken, sowie für den Testaufbau des Funktionsprototypen und der Generierung erster Messdaten der Powermetersohle.

Bei der Firma Genera Printer GmbH bedanke ich mich für die finalen 3D-Druckmodelle, welche auf dem DLP-Drucker angefertigt wurden.

Mein Dank gilt auch Jochen und Elias, welche mir die privaten 3D-Drucker zum Drucken diverser Prototypen zur Verfügung gestellt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau für die Unterstützung während des gesamten Jahres bedanken.



# **21. Anhang**

## 21.1 Fragebogen

### Umfrage zum Thema Leistungswattmessung am Fahrrad

Mein Name ist Paul Schaden-Handstanger und ich studiere Industriedesign an der Kunstuni in Linz. Im Rahmen meiner Masterarbeit beschäftige ich mich mit dem Thema Leistungswattmessung fürs Fahrrad.

Die Umfrage richtet sich an alle, die Radfahren. Es können sowohl Freizeitfahrer\*innen, Hobbyfahrer\*innen, als auch ambitionierte Wettkampfsportler\*innen teilnehmen.

Das Ausfüllen des Fragebogens dauert ca. 5 Minuten.

Ich freue mich auf deine Teilnahme!

1. Geschlecht:

- männlich
- weiblich
- divers

2. Alter:

- unter 20 Jahre
- 21-30 Jahre
- 31-40 Jahre
- 41-50 Jahre
- 51-60 Jahre
- 61-70 Jahre
- über 70 Jahre

3. Höchste abgeschlossene Schulbildung:

- Hauptschulabschluss
- Lehre
- Matura
- Universität/FH

4. Welche Ausdauersportarten betreibst du am häufigsten? (Mehrfachnennungen möglich)

- Rennradfahren
- Mountainbiken
- Triathlon
- Laufen
- Schwimmen
- Andere

5. Wie viele Räder besitzt du insgesamt? (inkl. City Bike)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- mehr als 5

6. Welche Art von Rädern besitzt du? (Mehrfachnennungen möglich)

- Rennrad
- MTB/Fully
- Gravel Bike
- Zeitfahrrad/Triathlonrad
- City Bike
- E-Mountainbike/Fully
- E-Rennrad
- Andere

7. Welches Rad fährst du am häufigsten? (max. 2 auswählen)

- Rennrad
- MTB/Fully
- Gravel Bike
- Zeitfahrrad/Triathlonrad
- City Bike
- E-Mountainbike/Fully
- E-Rennrad
- Andere

8. Wie regelmäßig fährst du mit dem Rad?

- weniger als 1x pro Woche
- 1x pro Woche
- 2-3x pro Woche
- 3-5x die Woche
- öfter als 5x pro Woche

9. Wie viele km fährst du ca. pro Jahr mit deinen Rädern?

- unter 500 km
- 500-1.000 km
- 1.000-2.500 km
- 2.500-5.000 km
- 5.000-10.000 km
- über 10.000 km

10. Wie lange fährst du im Durchschnitt mit einem Fahrradschuh, bis zur nächsten Neuanschaffung?

11. Weißt du was ein Leistungswattmesssystem für das Fahrrad ist?

- Ja
- Nein

12. Ist für dich das Thema Leistungswattmessung interessant?

- Ja
- Nein

13. Besitzt du aktuell ein Leistungswattmesssystem an einem deiner Räder?

- Ja
- Nein

**Folgende Fragen (14-20) richten sich nur an jene Personen, die bei der Frage 13 Ja gewählt haben und bereits ein Leistungswattmesssystem besitzen. Für alle die Nein gewählt haben geht es gleich mit Frage 21 weiter!**

14. Aus welchem Grund hast du dir ein Leistungswattmesssystem zugelegt?

15. Welche Art der Leistungswattmessung besitzt du?

- Spidermessung (Kurbelstern)
- Kurbelarmmessung
- Pedalmessung
- weiß nicht

16. Von welchem Hersteller ist dein Leistungswattmesssystem?

17. Wie teuer war dein Leistungswattmesssystem?

- unter 500 €
- 500-800 €
- 800-1.200 €
- 1.200-2.000 €
- über 2.000 €

18. Misst dein System beidseitig oder nur auf einer Seite?

- einseitig
- beidseitig
- weiß nicht

19. Würdest du dir noch zusätzliche Funktionen deines Leistungswattmesssystems wünschen? (neben den Wattzahlen) Wenn ja, welche?

20. Stört dich etwas an deinem Leistungswattmesssystem? Wenn ja, was?

**Fragen, die wieder an alle gerichtet sind:**

21. Wäre ein Leistungswattmesssystem, welches für Rennräder, Zeitfahrräder, MTBs, etc. gleichermaßen geeignet ist, interessant? (Das heißt, dass die Wattmessung für mehrere Räder verwendbar ist).

- Ja
- Nein

22. Wie viel würdest du generell für so eine Art von Leistungswattmesssystem ausgeben?

- unter 500 €
- 500-800 €
- 800-1.200 €
- 1.200-2.000 €
- über 2.000 €

Danke für deine Teilnahme!



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name Paul Schaden-Handstanger, BSc  
Geburtsdatum/ -ort 06.06.1994, Wels  
Familienstand verheiratet  
E-Mail Adresse paul.handstanger@hotmail.com  
Führerschein B, C, D, E, F



## Schulbildung

10/2018 - 01/2023 Universität für künstlerische und industrielle Gestaltung Linz, Master Programm: Industrial Design  
10/2014 - 09/2018 Universität für künstlerische und industrielle Gestaltung Linz, Bachelor Programm: Industrial Design  
09/2008 - 06/2013 HTBLuVA für Maschineningenieurwesen St. Pölten (Matura), Ausbildungsschwerpunkt: Industriedesign  
Diplomarbeitsthema „Schaltschrankdesign mit Wiedererkennungswert“

## Praktische Erfahrungen

02/2018 - 07/2018 Designpraktikum bei Edera Safety, 8403 Lebring  
07/2013 - 10/2017 Angestellt im Familienbetrieb (Rad- & Kulturreisen Handstanger)  
11/2013 - 07/2014 Angestellter bei Metallbau Sonnleitner, 3071 Böheimkirchen (Technischer Zeichner, Autodesk Inventor)  
07/2011 Praktikum bei Metallbau Sonnleitner, 3071 Böheimkirchen  
08/2010 Praktikum bei Metallbau Sonnleitner, 3071 Böheimkirchen  
08/2009 Praktikum bei Metallbau Sonnleitner, 3071 Böheimkirchen

## Kenntnisse & Eigenschaften

Sprache Deutsch, Englisch  
EDV MS Office, Adobe Photoshop/Illustrator/InDesign, KeyShot, Autodesk Fusion 360, Autodesk Inventor, SolidWorks, Rhino  
Eigenschaften engagiert, teamfähig, flexibel, genau, räumliche Vorstellung  
Freizeitaktivitäten Rennrad fahren, Laufen, Ski fahren, Skitouren, Langlaufen



CC BY-NC-ND 4.0 International  
Namensnennung - Nicht-kommerziell - Keine Bearbeitung 4.0 International