

Ein Modell der Fahrzustände einer Fahrradfahrt - die biomechanische Analyse von Alltagsradelnden

Martin Bejarano, Jochen Eckart

Siehe AutorInnenangaben

Abstract

Für die Planung einer nutzerzentrierten Radverkehrsinfrastruktur ist das Verständnis der biomechanischen Eigenschaften von Radfahrenden wichtig, jedoch wurden diese bisher nur wenig erforscht. Um diese Lücke zu schließen wird das biomechanische Verhalten von Alltagsradelnden empirisch erhoben und die Variablen Geschwindigkeit, Leistung und Trittfrequenz analysiert. Hieraus lassen sich verschiedene Phasen einer Fahrradfahrt ableiten, die sich durch jeweils typische Fahrzustände kennzeichnen.

Schlagwörter / Keywords:

Biomechanische Eigenschaften, Fahrverhalten, Alltagsradelnde, Fahrzustände

1. Relevanz der biomechanischen Perspektive

Im Gegensatz zu motorisierten Verkehrsmitteln wird das (konventionelle) Fahrrad durch Muskelkraft betrieben. Die benötigte Energie muss durch die radfahrende Person aufgebracht werden. Der körperliche Leistungsbedarf ist daher eine wesentliche Komfortgröße für das Fahrradfahren. Je geringer die benötigte Leistung zum Erreichen der gewünschten Fahrgeschwindigkeit ist, desto komfortabler wird das Radfahren tendenziell wahrgenommen (Knoflacher 1995; Wilson 2020; Eckart et al. 2022; Menghini et al. 2010; Casello & Usyukov 2014; Broach et al. 2012; Beneke & Di Prampero 2001). Es fehlen jedoch Erkenntnisse zum charakteristischen Fahrverhalten von Alltagsradelnden (Leistungsfähigkeit, Wunschgeschwindigkeit, Trittfrequenz, Beschleunigungs- und Bremsverhalten u.a.) sowie dem Zusammenspiel mit anderen Verkehrsteilnehmenden sowie der Verkehrsinfrastruktur. Das Verständnis zum fahrdynamischen Ablauf ist insbesondere bei Alltagsfahrradfahrten sehr begrenzt und nicht für die Planungspraxis nutzbar.

Um diese Lücke zu schließen, wird derzeit an der Hochschule Karlsruhe (HKA) im F+E-Vorhaben „ModeloRad“, gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr aus Mitteln zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans, zum Fahrverhalten



Abbildung 1: Biomechanische Analyse auf einem Rollenprüfstand mit dem „SensorBike“

von Alltagsradelnden geforscht. Das Ziel des Projektes „ModeloRad“ ist die Entwicklung eines Tools zur hochauflösenden, strecken- und radfahrttypenabhängigen Simulation des Radverkehrs. Dieses soll eine detaillierte Beurteilung der Qualität von Fahrvorgängen für bestehende und zukünftige Radverkehrsinfrastruktur ermöglichen. Die Datenerhebung und die

empirische Analyse des biomechanischen Fahrverhaltens von Alltagsradelnden stellt ein zentrales Ergebnis des Projektes dar. Die Datenerhebung setzt den Einsatz geeigneter Instrumente zur Messung des individuellen biomechanischen Fahrerverhaltens der Radfahrenden voraus, welches durch die fortwährende technologische Weiterentwicklung mobiler Sensoren erst ermöglicht wird und vor allem im Radsport Daten in-Situ, während der Fahrradfahrt erhoben werden können (Temmen, 2022; Joo & Oh 2013; Feizi et al. 2020).

Die Analyse des biomechanischen Verhaltens von Alltagsradelnden mit Hilfe mobiler Sensoren ermöglicht Erkenntnisse über die Fahrdynamik und deren Einfluss auf das Fahrverhalten. Somit kann das Fahrverhalten charakterisiert und Modelle zur Beschreibung einer Fahrradfahrt aus biomechanischer Sicht entwickelt werden.

2. Fahrverhalten von Alltagsradelnden

Das biomechanische Verhalten der Radfahrenden wurde in vier städtischen Routen in der Stadt Karlsruhe untersucht. Die Auswahl der Routen erfolgte unter Berücksichtigung verschiedener Kombinationen von Infrastruktureigenschaften wie bspw. die Geschwindigkeitsvariationen unterschiedlicher Radführungsformen oder die Tretleistung vor und nach lichtsignalisierten Anlagen (LSA) oder Steigungsstrecken.

In die Erhebung wurden 75 Probanden eingebunden (40 Probanden auf den vier städtischen Routen und 35 in spezifischen Fahrzenarien), wobei mehr als 300 Km zurückgelegt wurden. Die Probanden wurden durch Werbung unter Alltagsradelnden akquiriert und umfassten 35 weibliche, 45 männliche, sowie die Altersklassen <18, 18 – 24, 25 – 39, 40 – 59, und >60. Für die Datenerhebung wurde das „Sensor-Bike“ (Abbildung 1 und 2) des Instituts für Verkehr und Infrastruktur der HKA verwendet. Beim Sensor-Bike handelt es sich um ein mit Messtechnik ausgestattetes Fahrrad (Abbildung 2), welches die Erforschung des Radfahrens aus Perspektive der Radfahrenden ermöglicht (Eckart, Merk 2020). Mit Hilfe des

SensorBikes können Daten zur GPS-Position im Routenverlauf, Geschwindigkeit (in km/h), Leistung (in Watt), Trittfrequenz (in rpm) sowie zur Bremsbetätigung gewonnen werden. Die Erhebungsfahrten wurden auf Videos dokumentiert, mit denen anschließend verschiedene Fahrzustände identifiziert werden konnten.

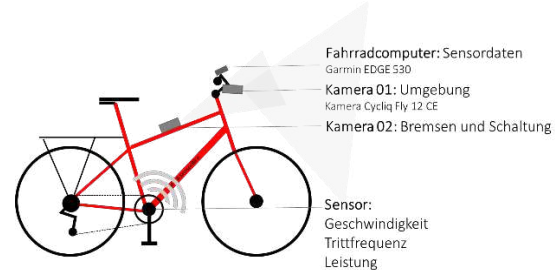


Abbildung 2: Ausstattung des SensorBikes für die Datenerhebung

Eine alltägliche Fahrradfahrt in städtischer Umgebung zeichnet sich durch verschiedene Fahrtabschnitte zwischen Stopps, meist an Kreuzungen, aus. Das Geschwindigkeitsprofil der zurückgelegten Routen weist in den meisten Diagrammen ähnliche Tendenzen auf, aber stellt gleichzeitig Unterschiede zwischen schnelleren und langsameren Teilnehmenden dar (Abbildung 3). Aspekte wie Fahrstrategie, Anpassungen in der Geschwindigkeit oder Vermeidung von anstrengenden Fahrsituationen u.a. werden dadurch nicht deutlich dargestellt. Hierfür ist es notwendig, die biomechanischen Eigenschaften näher zu betrachten.

Die zentralen Größen für die Analyse des biomechanischen Fahrverhaltens bilden die Geschwindigkeit (v), Leistung (p) und Trittfrequenz (f). Die Geschwindigkeits-, Leistungs- und Trittfrequenzprofile über die zurückgelegte Distanz (Abbildung 4 Streckendiagramm oben) ermöglichen die Analyse der Fahrdynamik und Fahrzustände für einen bestimmten Abschnitt. Zudem wird das Verhältnis zwischen den Variablen Geschwindigkeit v und Leistung p in einem Diagramm (Abbildung 4 v/p Diagramm unten) dargestellt, um die Effizienz des Fahrtvorgangs darzustellen. Mit diesen beiden Diagrammtypen können

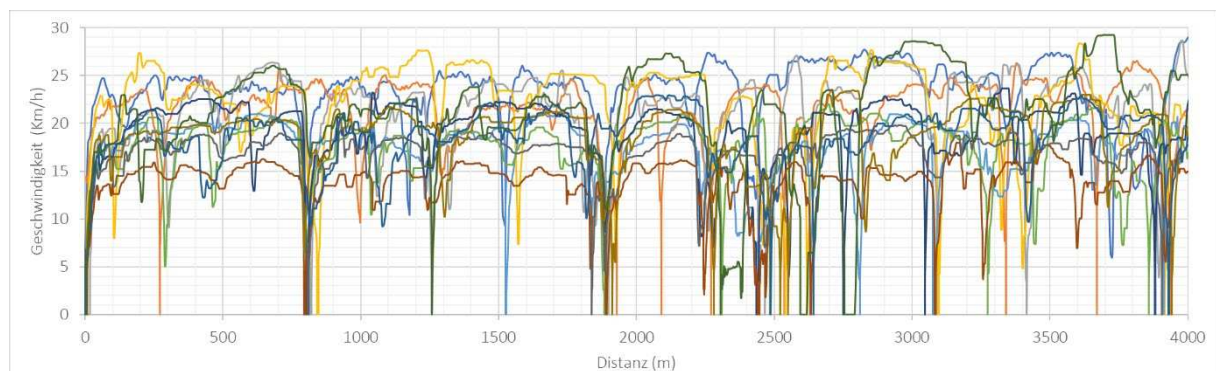


Abbildung 3: Geschwindigkeitsprofil einer städtischen Fahrradroute für 25 Teilnehmer mit den charakteristischen zeitlichen Stopps

die verschiedenen Fahrzustände charakterisiert und beschrieben werden.

Das Beispiel in Abbildung 4 illustriert die übliche Dynamik einer Fahrradfahrt in Abhängigkeit von v , p , f und Gangwahl im Abschnitt zwischen zwei Stopps. Im Streckendiagramm sind drei Phasen zu beobachten (1, 2 und 3), in denen die Schwankungen der Variablen charakteristische Muster aufweisen. Das v/p Diagramm stellt dieselbe Fahrt in Form von Punktwolken mit unterschiedlichen Dichtewerten dar. Die Unterphasen A, B, C und D sind Anpassungen des Fahrtverlaufs durch die Radfahrenden aufgrund verschiedener Interaktionen im Routenverlauf. Die Bereiche (1) und (3) entsprechen jeweils der Beschleunigung bei der Anfahrt und der Annäherung an Stopps.

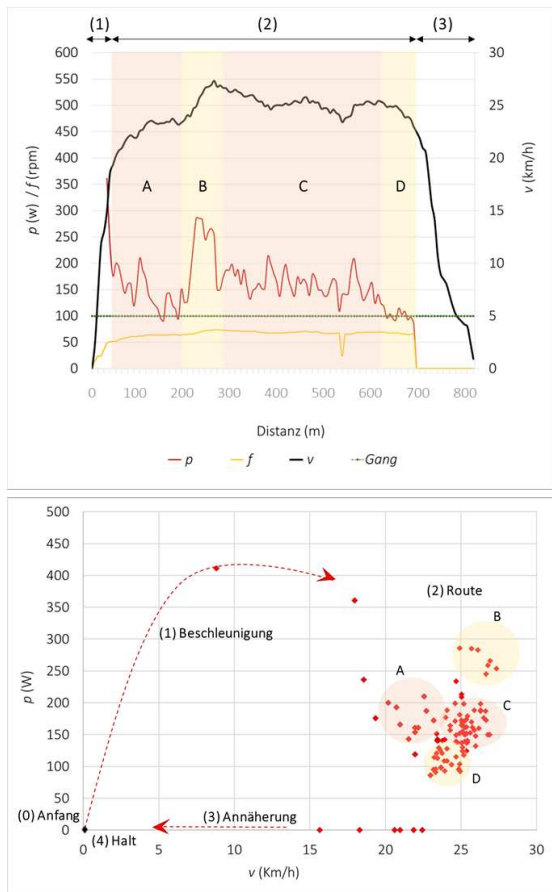


Abbildung 4: Streckendiagramm (oben) und v/p -Diagramm (unten) eine Fahrradfahrt zwischen Stopps

Bei allen Teilnehmenden weisen die erhobenen Daten eine vergleichbare Abfolge von Fahrzuständen (Beschleunigung, Routenfahrt und Annäherung) auf. Im Detail kann das Fahrverhalten abhängig von der jeweiligen Fahrtstrategie variieren.

Allgemein zeichnet sich eine Fahrradfahrt zwischen zwei Stopps durch folgende Merkmale aus:

- Eine Leistungsspitze am Beginn des Fahrtvorgangs in der Beschleunigungsphase
- Anpassung von p zur Erreichung der Wunschgeschwindigkeit v
- Intervalle mit weitgehend konstanter Wunschgeschwindigkeits- und Wunschleistung
- Anpassungen von v und p aufgrund von Interaktionen im Streckenverlauf
- Reduktion von p und v am Ende des Fahrtvorgangs

3. Zyklus beim Radfahren

Das beobachtete Fahrverhalten der Radfahrenden auf städtischen Routen lässt sich in Form eines Zyklus mit Phasen als Fahrzustände darstellen, welche sich durch charakteristische Eigenschaften von v , p und f kennzeichnen. Dieses Modell ist mit dem Fahrtzyklusmodell für Kfz zur Abgasmessung (Braess & Seifert 2013) vergleichbar. Für den Radverkehr wurden solche Fahrtzyklusmodelle bisher noch nicht dargestellt. Die Fahrradfahrt wird als Phasen von Fahrzuständen, die in einem Zyklus verbunden sind beschrieben. Eine Fahrradfahrt lässt sich dabei in drei Fahr-Phasen sowie eine Warte-Phase unterteilen, die einen Zyklus von Halt zu Halt bilden. Für die Phasen lassen sich charakteristische v , p und f beschreiben, weshalb eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Phasen möglich ist (Abbildung 6).

Ein Zyklus umfasst die Abfolge folgender Phasen:

1. Eine Beschleunigungsphase, in der die Radfahrenden auf Ihre Wunschgeschwindigkeit beschleunigen und eine hohe Leistung erbringen müssen.
2. Eine Routenphase, in der die Radfahrenden ihre Wunschgeschwindigkeit und Wunschleistung halten wollen, aber aufgrund von Fahrtwiderständen, Interaktionen oder Störungen Anpassungen vornehmen müssen.
3. Eine Annäherungsphase, in der die Leistung üblicherweise 0 ist und die Geschwindigkeit durch Bremsen reduziert wird, bevor ein Halt stattfindet.
4. Eine Warte-Phase, in der v , p und f 0 sind.

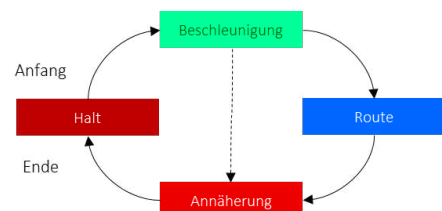


Abbildung 5: Zyklus einer Fahrradfahrt mit Phasen von Fahrzuständen

4. Beschreibung der Phasen einer Fahrradfahrt

weiter an. Das nachfolgend dargestellte Beispiel bezieht sich auf diese Dynamik sowie den Einfluss der

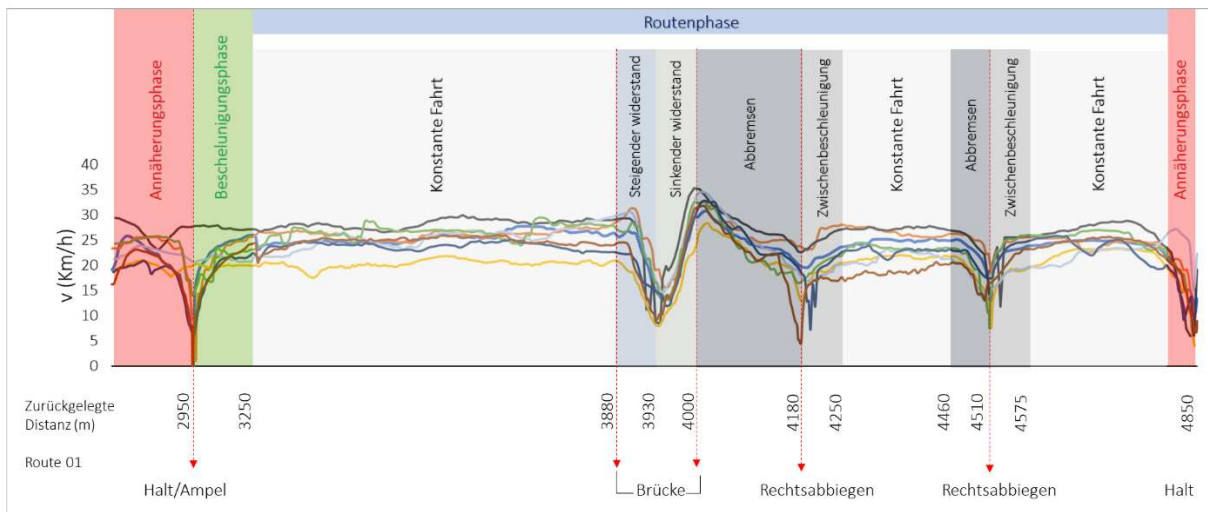


Abbildung 6: Geschwindigkeitsprofil einer Strecke für 8 Teilnehmende mit Abgrenzung der Phasen

Der Zyklus des Fahrtvorgangs sowie die einzelnen Phasen einer Fahrradfahrt bilden den Rahmen für die strukturierte Auswertung der empirisch erhobenen Daten. Im Folgenden werden die charakteristischen Eigenschaften von v , p und f der verschiedenen Phasen für eine städtische Fahrradfahrt dargestellt

4.1. Beschleunigungsphase

Die Beschleunigung bildet die erste Phase einer Radfahrt. Diese Phase zeichnet sich in allen Fällen durch die Steigerung von p und f , als Voraussetzung zur Erreichung der gewünschten v aus. Daraus ergibt sich eine Spitze für p , die für alle Fahrradfahrten charakteristisch ist. Nach der ausgeprägten Beschleunigungsspitze werden insgesamt drei Fälle (Unterzustände) in Bezug auf die beobachteten Tendenzen von p und f beobachtet:

- Weiterfahrt ohne Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden (sinkende p und steigende f)
- Überholvorgänge (steigende p und steigende f)
- Weiterfahrt mit Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden (schwankende p und steigende f)

Die Darstellung der Beschleunigung (Abbildung 7) ermöglicht die Betrachtung der Spitze von p und der Zunahme von f beim Anfahren. Eine Herausforderung bei der empirischen Erhebung mit dem Sensorbike war, dass die eingesetzten handelsüblichen Leistungsmessensoren erst mit einer Verzögerung von ca. 2 Sekunden aufzeichnen und daher häufig die Leistungsspitzen nicht korrekt erfassen. Daher wurden diese Leistungsspitzen beim Anfahren zusätzlich auf einem Rollenprüfstand erhoben (Helms et al. 2023). Beim häufigsten Fahrzustand (ohne Interaktionen) sinkt anschließend p und f steigt progressiv

Schaltstrategie zur Reduzierung von f (Hochschalten, Bereiche C und D), insbesondere nach Erreichen der Spitze. Das v/p -Verhältnis lässt in diesem Fall eine gleichmäßige Punktdichte erkennen, die dem gewünschten v/p -Bereich sehr nahe kommt (Bereiche A und B).

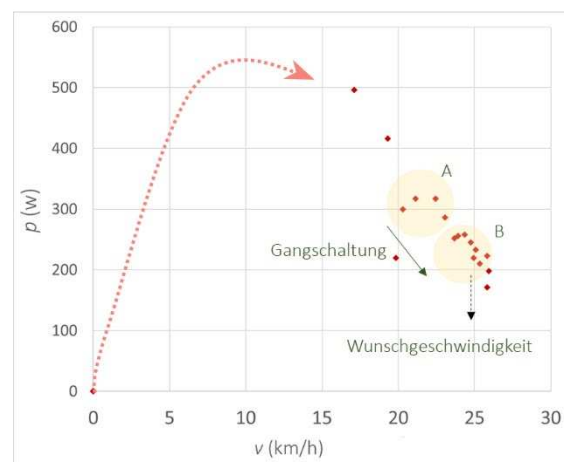
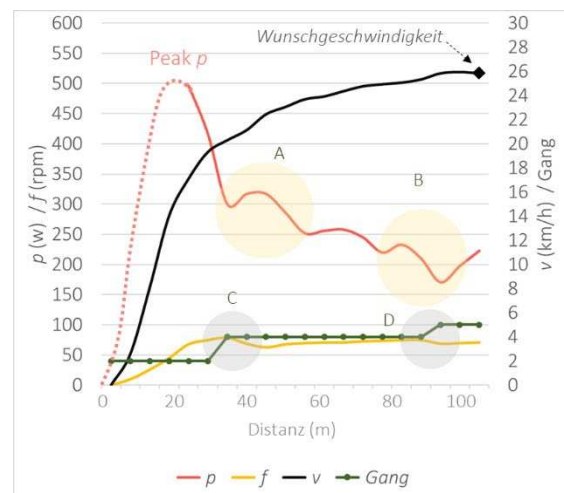


Abbildung 7: Beschleunigung eines Teilnehmenden als Streckendiagramm (oben) und v/p Diagramm (unten)

4.2. Routenphase

Bei der Beschreibung des Fahrtablaufs sind Interaktionen, Störungen und Änderungen der Fahrwiderstände wichtig, weshalb die Routenphase in vier Unterphasen unterteilt wird.

Konstante Fahrt (KF): Die Unterphase mit der höchsten Relevanz in Bezug auf die Ermittlung des gewünschten Verhältnis v/p ist die konstante Fahrt. Während der Routenphase bestehen Fahrabschnitte, in denen die Radfahrenden ein gleichmäßiges Verhältnis zwischen v , p und f halten (Beispiel in Abbildung 8, Bereiche I, IV, VI und IX). Dies ist meistens der Fall, wenn keine Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden, weitere Störungen oder Änderungen der Fahrwiderstände vorhanden sind. Dies zeigt sich durch einen annähernd linearen Verlauf von v und p im Streckendiagramm sowie enge Punktwolken im v/p Diagramm. Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden beeinflussen die Fahrradfahrt, wodurch p und f schwanken. Eine interaktionsfreie Strecke zeichnet sich durch einen konstanten Verlauf von f aus. Die konstante Fahrt ist der günstigste Fahrtzustand für die Radfahrenden bezüglich des Energieverbrauchs und der Möglichkeit diesen zu regulieren. Bei Strecken mit konstanter Fahrt wird das gewünschte Verhältnis v/p erreicht und gehalten.

Zwischenbeschleunigung (ZB): Die Zwischenbeschleunigung ergibt sich häufig nach Verlangsamung von v wenn die Radfahrenden durch Interaktionen oder Störungen zum Abbremsen gezwungen werden. Nachdem v reduziert wurde, steigt anschließend p in Form einer kleinen Leistungsspitze an, um das gewünschte v wieder zu erhöhen (Beispiel in Abbildung 8, Bereiche III, V und VII). f hängt von der Schaltstrategie ab.

Ein zweiter Fall der Zwischenbeschleunigung ergibt sich aus dem Wunsch der Radfahrenden zum Errei-

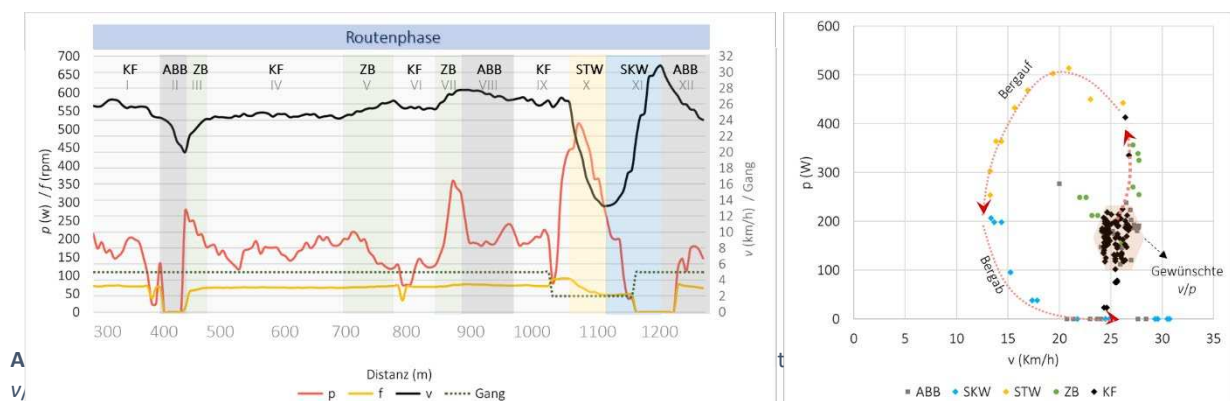
chen einer höheren v . Die in den Erhebungen erfassten Abschnitte über 200 m wurden häufig mit zwei Wunschgeschwindigkeiten befahren. Nach einer gewissen Distanz mit einer konstanten v erhöhen zahlreiche Radfahrende p um schneller zu fahren. Dieser Wunsch der Geschwindigkeitssteigerung lässt sich teilweise auf das Überholen langsamerer Verkehrsteilnehmender zurückführen, teils ist der Anlass nicht zu identifizieren.

Abbremsen (ABB): Das Abbremsen ist das Ergebnis von Interaktionen oder von dem Wunsch der Radfahrenden, mit einem niedrigeren v/p -Verhältnis fortzufahren (Beispiel in Abbildung 8, Bereiche II, VIII und XII). Vielfach hören Radfahrende auf zu treten mit einer f von 0, bis die gewünschte reduzierte v erreicht wird. Aber auch der Einsatz der Bremsen ist zu beobachten. Auslöser für das Abbremsen sind überwiegend folgende sechs Situationen:

- Vor LSA
- Vor Links- oder Rechtsabbiegen
- Bei Rechts-vor-links-Knoten
- Bei Interaktionen in Fußgängerzonen
- Bei Interaktionen mit anderen Verkehrsmitteln, insbesondere Kfz
- Bei Geschwindigkeitsanpassungen nach einer bergab Fahrt

Steigender (STW) und sinkender Widerstand (SKW): Steigende Widerstände lassen sich anhand anstrengender Leistungssituationen erkennen. Insbesondere Steigungswiderstände aber auch steigende Rollwiderstände bei sich änderndem Oberflächenbelag sind zu beobachten. Die Abschnitte mit steigenden Widerständen zeigen für begrenzte Zeiträume eine akzeptierte höhere p (mit eingeschränkter niedrigerer f), bis abhängig von der Schaltstrategie die Leistungsgrenze von Radfahrenden erreicht wird (Beispiel in der Abbildung 8, Bereiche X). Ein erhöhter Widerstand durch Steigungen ist bestimmend für das Fahrverhalten der Radfahrenden.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen mit steigenden Fahrwiderständen lassen sich in weiteren Situationen sinkende Widerstände durch Strecken mit



Gefälle beschreiben. Beim Überschreiten des höchsten Punktes eines Anstiegs, wird p deutlich reduziert und eine hohe v durch das Herabrollen erreicht (Beispiel in Abbildung 8, Bereiche XI). Abhängig vom subjektiven Sicherheitsempfinden der Radfahrenden wird hierbei teilweise gebremst, um die individuelle Höchstgeschwindigkeit nicht zu überschreiten.

4.3. Annäherungsphase

Die letzte Phase im Zyklus ist durch die Reduzierung von v bis zum endgültigen Anhalten gekennzeichnet. Um v zu reduzieren senken die Radfahrenden zunächst p , hören dann auf zu treten $f=0$ bevor Sie kurz vor dem Stopp die Bremse betätigen. (Abbildung 9). Das Verhalten ist von Faktoren wie die Einsehbarkeit der Lichtsignalanlage (LSA) oder Interaktionen mit Verkehrsteilnehmenden abhängig.

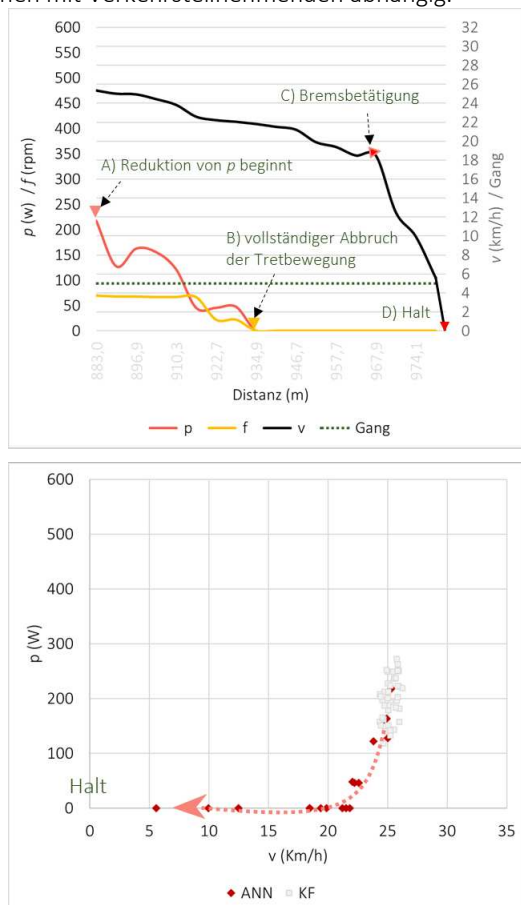


Abbildung 9: Fahrzustand „Annäherung“ eines Teilnehmenden im Streckendiagramm (oben) und v/p Diagramm (unten)

5. Auswertung der Phasen

Die Fahrten von 40 Teilnehmenden auf vier städtischen Routen (ca. 292 zurückgelegte Kilometer) wurden in (die) Phasen und Unterphasen unterteilt und einzeln ausgewertet. Hierfür wurde jede Fahrt in mehrere Zyklen sowie in Phasen und Unterphasen eingeteilt. In die Auswertung fließen damit mehr als 4800 Fahrsituationen aus Phase und Unterphase ein

(Tabelle 1). Die Kenngrößen der Auswertung sind in der Tabelle 2 zusammengefasst und im Folgenden ausgeführt.

Tabelle 1: Anzahl von Fahrsituationen je Phase

Beschleunigungsphase		402
	KF	2069
Routenphase	ZB	741
	ABB	1289
Annäherungsphase		385
Fahrsituationen		4886

Beschleunigungsphase: Im Durchschnitt benötigten die Probanden 45 m, um ihre Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Diese lag im Schnitt bei 16,9 km/h. Die Kurve der Endgeschwindigkeiten als Funktion der zurückgelegten Distanzen zeigt eine exponentielle Tendenz (Abbildung 10). Das 85. Perzentil liegt bei einem Distanzwert von 73,5 m und einer Endgeschwindigkeit (E- v) von 23,8 km/h. Als zusätzliche Angabe wurde die Beschleunigung (a) (Geschwindigkeitsdifferenz über Zeitdifferenz) ermittelt, die im Durchschnitt einen Wert von $2,0 \text{ m/s}^2$ aufwies.

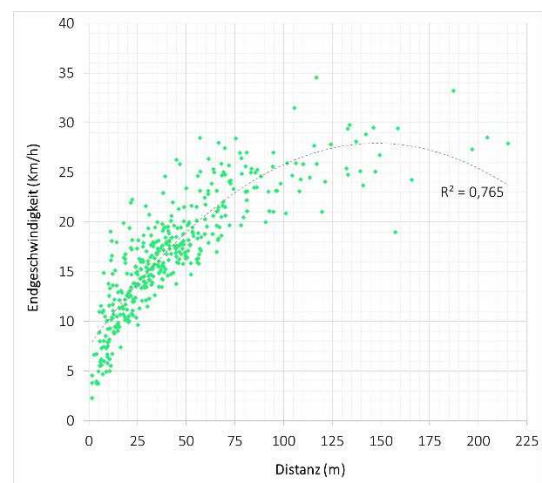


Abbildung 10: Werte der Beschleunigungsphasen für alle Teilnehmenden mit erkennbarer Endgeschwindigkeit und zurückgelegter Strecke

Routenphase: Zentrale Kenngröße der Routenphase ist die Durchschnittsgeschwindigkeit von 20,4 km/h bei konstanter Fahrt. Die Darstellung der durchschnittlichen v/p -Werte für jede konstante Fahrsituation ergibt eine Punktwolke mit steigender Tendenz (Abbildung 11). Das heißt, je höher v , desto höher p . Da die Fahrtwiderstände im Quadrat von der Geschwindigkeit abhängen (Gressmann 2022) ist der Zusammenhang zwischen v und p nicht linear sondern ansteigend.

Tabelle 2: Statistische Kenngrößen der Analyse der Fahrtzustände

Phase	Beschleunigungsphase			Routenphase						Annäherungsphase			
	a	Distanz	E-v	v	p	f	Distanz	Delta	Distanz	Delta	A-v	Distanz	a
Statistische Kennwerte	(m/s ²)	(m)	(Km/h)	(Km/h)	(Watts)	(RPM)	(m)	(Km/h)	(m)	(Km/h)	(Km/h)	(m)	(m/s ²)
P85	2,8	73,5	23,8	25,2	181	73	45,3	9,2	29,8	-0,9	23,8	73,5	-2,8
Mittelwert	2,0	45,3	16,9	20,4	127	61	34,7	5,6	18,1	-4,3	17,9	41,3	-2,5
Standardfehler	0,1	1,8	0,3	0,1	1	0	1,7	0,1	0,3	0,1	0,3	1,6	0,1
Median	1,6	37,2	16,8	20,7	121	63	25,5	4,5	14,1	-3,0	18,0	36,0	-1,9
Standardabweichung	1,3	35,6	5,9	4,4	52	15	49,5	3,4	12,7	3,9	5,5	30,9	2,0
Maximum	10,1	215,3	34,5	33,5	520	134	727,7	19,6	97,6	-0,5	34,1	199,4	-0,4
Konfidenzniveau (95%)	0,1	3,4	0,6	0,2	2	1	3,3	0,2	0,7	0,2	0,5	3,1	0,2

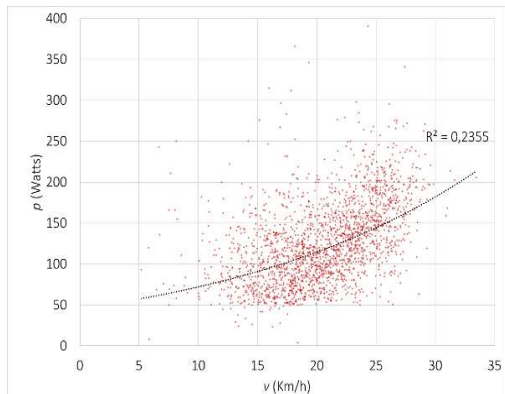


Abbildung 11: Einzelwerte p/v-Verhältnis bei konstanter Fahrt für alle Teilnehmenden

Die Darstellung mit dem Durchschnittswert von v/p für jeden Teilnehmenden bei konstanter Fahrt ergibt eine Exponentiallinie mit einer hohen Korrelation (Abbildung 12). Diese Darstellung ermöglicht die Analyse von Unterschieden zwischen den Teilnehmenden, indem niedrige und hohe Werte im Verhältnis v/p als Indikator für die Effizienz des Fahrtvorgangs betrachtet werden.

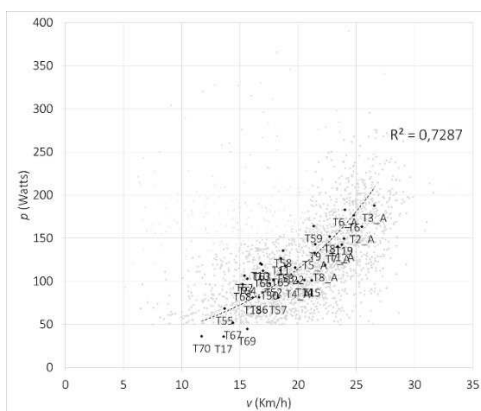


Abbildung 12: Durchschnittliche Werte p/v-Verhältnis bei konstanter Fahrt für alle Teilnehmenden

Zusätzlich wurden die Werte von v , p und f für verschiedene Distanzintervalle analysiert. Ein leichter Anstieg der mittleren v -Werte mit der zurückgelegten Distanz ist zu verzeichnen. So scheinen die Radfahrenden bei längeren Strecken ein höheres Tempo

anzustreben als bei kurzen Abschnitten. Die Werte von p und f sind annähernd konstant

Tabelle 2: Mittelwerte von v , p , und f für die Distanzintervalle bei konstanter Fahrt

Zurückgelegte Distanz (m)	v (Km/h)	p (Watts)	f (rpm)
0 - 25	18,3	125	57
26 - 50	21,3	133	62
51-75	21,4	127	62
76 - 100	21,0	120	60
101 - 125	21,4	121	62
126 - 150	21,9	122	63
151 - 175	22,5	122	64
176 - 200	22,8	140	64
201 - 225	22,0	122	63
> 225	19,9	114	60

Bei der Zwischenbeschleunigung benötigen die Teilnehmenden im Durchschnitt 35 m, um einen v -Anstieg von 6 km/h zu erzielen. Beim Abbremsen werden durchschnittlich 18 m benötigt, um v um 4 km/h zu verringern.

Annäherung: Die Teilnehmenden legten durchschnittlich 41 m zurück, um v von der Ausgangsgeschwindigkeit auf 0 km/h zu reduzieren. Die durchschnittliche Ausgangsgeschwindigkeit bei Eintritt in die Annäherungsphase lag bei 17,9 km/h. Die Kurve der Ausgangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den zurückgelegten Distanzen bis zum Halt zeigt einen exponentiellen Verlauf mit einer hohen Korrelation (Abbildung 13). Die Entschleunigung wies einen Durchschnittswert von $-2,5$ m/s² auf.

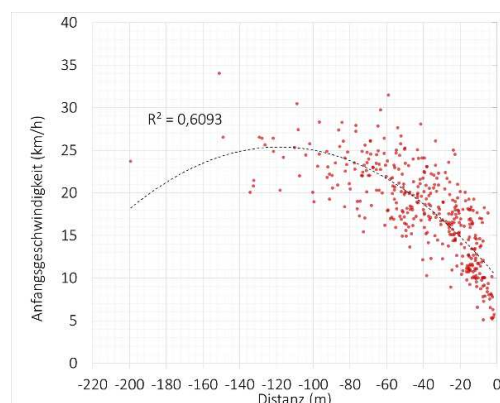


Abbildung 13: Werte der Annäherungsphasen für alle Teilnehmenden Abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit und zurückgelegter Distanz bis zum Stopp

5. Hinweise zur nutzerzentrierten Gestaltung der Radverkehrsinfrastruktur

Um das biodynamische Verhalten von Alltagsradelnden bei städtischen Fahrradfahrten zu beschreiben, wurde ein Modell von Fahrtzyklen mit verschiedenen Phasen als Fahrtzustände entwickelt. Die städtischen Fahrradfahrten werden dabei als eine zyklische Abfolge von Fahrtzuständen zwischen Stopps (meist zwischen Kreuzungen) beschrieben. Dieses Modell ermöglicht eine strukturierte Analyse der biomechanischen Faktoren v , p und f für diese Fahrradfahrten. Die verschiedenen Phasen und Unterphasen einer städtischen Fahrradfahrt lassen sich durch charakteristische Eigenschaften eindeutig beschreiben.

Die detaillierten Fahrstrategien (Nutzung der Gangschaltung, Bremshäufigkeit, Erholungszeit beim Treten u.a.), die Identifikation verschiedener Radfahrendentypologien und der detaillierte Einfluss der unterschiedlichen Gestaltung der Radverkehrsinfrastruktur (Auslöser für Abbremsen und Zwischenbeschleunigen, Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmenden u.a.) werden gegenwärtig noch ausgewertet. Jedoch lassen sich bereits erste Hinweise für eine aus biomechanischer Perspektive nutzerzentrierten Gestaltung von Radverkehrsinfrastruktur (vgl. Eckart et al. 2022) ableiten:

- Die Anzahl und Dichte der Stopps bei städtischen Fahrradfahrten ist prägend für die erreichte Geschwindigkeit und erforderliche Leistung der Radfahrenden. So erfordert jeder Stopp erneut eine leistungsaufwendige Beschleunigungsphase; sind bei kurzen Distanzen zwischen Stopps die Geschwindigkeiten niedriger; und kommt es zu Leistungsverlust in der Annäherungsphase. Bei den Stopps kommt es daher nicht allein auf die Zeitverluste an, sondern vielmehr darauf, diese im Fahrtverlauf soweit wie möglich zu vermeiden.
- Von den Radfahrenden wird der Fahrtzustand der konstanten Fahrt im Bereich ihrer Wunschgeschwindigkeit und Wunschleistung angestrebt. Insbesondere Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden haben die Fahrtzustände „Zwischenbeschleunigung“ und „Abbremsen“ zur Folge, die mit einem hohen Leistungsbedarf verbunden sind. Eine konstante Fahrradfahrt kann durch eine eigenständige Infrastruktur für Radfahrende (Radfahrstreifen, eigenständiger Radweg, Fahrradstraße etc.) unterstützt werden.

- Sobald Steigungen auftreten, führen diese zu niedrigeren Geschwindigkeiten und einem höheren Leistungsbedarf der Radfahrenden. Steigungen in der Radverkehrsinfrastruktur sind daher möglichst zu vermeiden, steile Steigungen sollten völlig vermieden werden.

Die Systematisierung der Fahrzustände auf Basis der empirischen Daten bildet die Basis für die Entwicklung eines Tools zur Mikrosimulation des biomechanischen Verhaltens von Radfahrenden. Das Simulationstool richtet sich an die kommunale Verwaltung, Ingenieurbüros sowie an alle Akteure, welche in die Radverkehrsplanung und Radverkehrsförderung involviert sind. Es bietet eine Entscheidungsunterstützung für in Planung befindliche Trassenvarianten für Radinfrastruktur (Identifikation der Variante zur Minimierung von Reisezeit, Leistungsbedarf usw.). Zudem ermöglicht es die Identifikation von Optimierungsbedarfen an bestehenden und zu planenden Radinfrastrukturen im Hinblick auf Geschwindigkeit, Zeitverluste und Leistung. Durch die Simulation kann die Perspektive der Radfahrenden bei der Planung der Radverkehrsinfrastruktur verstärkt berücksichtigt werden.

Literatur

Casello, J. M., & Usyukov, V. (2014): Modeling cyclists' route choice based on GPS data. *Transportation Research Record*, 2430(1), 155-161.

Braess, H., & Seiffert, U. (2013): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 32-33. Springer-Verlag. Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01691-3>

Broach, J., Dill, J., & Gliebe, J. (2012): Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(10), 1730-1740.

Beneke, R. und Di Prampero, P. E. (2001): Mechanische und methabolische Belastung beim Radfahren: eine Analyse aus physiologischer und biomechanischer Sicht. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52(1):29_32

Feizi, A., Oh, J. S., Kwigizile, V., & Joo, S. (2020): Cycling environment analysis by bicyclists' skill levels using instrumented probe bicycle (IPB). *International journal of sustainable transportation*, 14(9), 722-732

Wilson, D.; Schmidt, T. (2020): *Bicycling Science*. The MIT Press, Cambridge.

Eckart, J.; Merk, J. (2020): Die Vermessung der Radfahrenden. Analyse des Radverkehrs mit einem

SensorBike mit ubiquitären Sensoren. Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn.

Eckart Jochen, Temmen Martin, Hauenstein Jan, Rabes Max, Welz Christoph (2022): Kräftig reintreten - Die Effizienz verschiedener Führungsformen des Radverkehrs, in Transforming Cities.

Knoflacher, Hermann (1995): Fußgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien. Böhlau Verlag, Wien.

Gressmann, M. (2022): Fahrradphysik und Biomechanik. Delius Klasing & Co. KG, Bielefeld.

Helms S, Rauch Y, Bejarano M, Kettner M, Eckart J (2023) Investigation of the Performance of Electric Bicycles in Interaction with Cyclists' Driving Behaviour in Driving Cycles on a Chassis Dynamometer. In: SAE Technical Papers, 8 <http://dx.doi.org/10.4271/2023-01-1816>).

Joo, S., & Oh, C. (2013): A novel method to monitor bicycling environments. Transportation research part A: policy and practice, 54, 1-13.

Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., & Axhausen, K. W. (2010): Route choice of cyclists in Zurich. Transportation research part A: policy and practice, 44(9), 754-765.

Temmen, M. (2022): Messen mit SensorBikes – Wie der Alltagsradverkehr von der Digitalisierung im Radsport profitieren kann, in Konferenzproceedings Fahrradlabor Hochschule.

AutorInnenangaben

Martin Bejarano
Akademischer Mitarbeiter
Hochschule Karlsruhe
Baden-Württemberg Institut für nachhaltige Mobilität (BWIM)
Hoffstraße 3
76133 Karlsruhe

E-Mail: martin.bejarano@h-ka.de

Prof. Dr. Jochen Eckart
Professor für Verkehrsökologie
Hochschule Karlsruhe
Hoffstraße 3
76133 Karlsruhe

E-mail: jochen.eckart@h-ka.de