
Technische Anforderungen an Fahrradbremseinrichtungen

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Technische Anforderungen an Fahrradbremseinrichtungen

von

Maxim Bierbach
Bryan Bourauel
Patrick Seiniger
Bundesanstalt für Straßenwesen

Impressum

Referat:
Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenzsysteme

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-f1>

Bergisch Gladbach, August 2024

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung – Abstract

Technische Anforderungen an Fahrradbremsseinrichtungen

Im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) hat die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) technische Anforderungen an Fahrradbremsseinrichtungen als mögliche Grundlage für die Regelung in fahrzeugtechnischen Vorschriften erarbeitet. Die Anforderungen sollten technologieneutral formuliert werden und für alle Beladungszustände des Fahrrads bzw. des Gesamtsystems Fahrrad-Anhänger anwendbar sein.

Ausgehend von der analytischen Beschreibung der für Fahrräder möglichen Verzögerung als Funktion der Schwerpunkt Lage, des Radstand, des Reibwertes und der Bremsbetätigung sowie einer Übersicht von im Markt auftretenden Kombinationen von Schwerpunkt Lage, Radstand, Masse und Bremsbauart - bestimmt in einer Messkampagne - konnten mögliche Verzögerungen definiert werden: Für Fahrräder sind Verzögerungen von 5 m/s^2 (Vorderradbremse) und $2,5 \text{ m/s}^2$ (Hinterradbremse) auf Hochreibwert, auch beladen, grundsätzlich problemlos erreichbar.

Eine Analyse der maximalen Systemmassen von Fahrrädern und der Eigenmassen zeigte, dass im Mittel noch eine Anhängemasse von ca. 50 kg (unter Berücksichtigung eines Fahrenden mit ca. 80 kg) zur Verfügung steht. Diese Grenze bietet sich grundsätzlich als maximale Masse von ungebremsten Anhängern an – gebremste Anhänger sollten maximal eine vergleichbare Druckkraft bei Bremsungen ausüben.

Eine Kombibremseanlage sollte erlaubt aber nicht verpflichtend sein, denn gerade für Fahrräder, die häufig auf Niedrigreibwert (Sand, Kies, Waldwege) fahren, sollte eine separate Einstellung der Bremskraftverteilung möglich sein.

Auch Antiblockiersysteme sollten erlaubt, aber nicht verpflichtend sein. Antiblockiersysteme würden Stürze auf Niedrigreibwert verhindern, aber für eine Beurteilung des Nutzens im Unfallgeschehen haben diese Systeme noch nicht genug Marktdurchdringung. In Unfalldatenbanken (GIDAS) finden sich bisher keine entsprechenden Fahrzeuge.

Technical requirements for bicycle braking systems

On behalf of the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), the Federal Highway Research Institute (BASt) has developed technical requirements for bicycle braking systems as a possible basis for vehicle regulations. The requirements should be formulated in a technology-neutral manner and be applicable to all load conditions of the bicycle or of the entire bicycle-trailer combination.

Based on the analytical description of the possible deceleration for bicycles as a function of the centre of gravity position, wheelbase, friction coefficient and brake actuation as well as an overview of combinations of centre of gravity position, wheelbase, mass and brake design occurring on the market - determined in a measurement campaign - possible decelerations could be defined: For bicycles, decelerations of 5 m/s^2 (front wheel brake) and 2.5 m/s^2 (rear wheel brake) at high friction values, even when loaded, are generally achievable without any problems.

An analysis of the maximum system masses of bicycles and their tare masses showed that an average trailer mass of approx. 50 kg (taking into account a rider mass of approx. 80 kg) is still available. This limit is generally suitable as the maximum mass of unbraked trailers - braked trailers should exert a maximum comparable pushing force when braking.

A combined braking system should be permitted but not mandatory, as it should be possible to adjust the brake force distribution separately, especially for bicycles that are frequently ridden on low-friction surfaces (sand, gravel, forest tracks).

Anti-lock braking systems should also be permitted, but not mandatory. Anti-lock braking systems would prevent crashes on low friction surfaces, but these systems do not yet have sufficient market penetration to assess their usefulness in accidents. Accident databases (GIDAS) do not yet contain any corresponding vehicles.

Inhalt

1	Aufgabenstellung	6
2	Methodik	7
2.1	Bestimmung der Schwerpunktlage	7
2.2	Mögliche Verzögerung als Funktion der Schwerpunktlage	8
2.3	Datensammlung	12
2.4	Dosierbarkeit	13
2.5	Anhängerbremsen	13
3	Ergebnisse	15
3.1	Untersuchte Fahrräder bzw. Fahrzeuge	15
3.2	Schwerpunktlage	16
3.3	Maximale Verzögerungen	18
3.4	Rechnung: Verzögerungsfähigkeit mit und ohne Beladung	19
3.5	Verzögerungsfähigkeit mit gebremsten und ungebremsten Fahrradanhängern	20
4	Empfehlungen	23
4.1	Anforderungen an Bremsen	23
4.2	Ungebremste Anhänger	24
4.3	Gebremste Anhänger	24
4.4	Allgemeine Prüfbedingungen	24
5	Zusammenfassung	25
6	Literaturverzeichnis	26

1 Aufgabenstellung

Die BASt wurde mit Erlass Aktenzeichen RV 2-7314.1/01 vom 8.2.2021 unter anderem beauftragt, technische Anforderungen an Fahrradbremseinrichtungen (auch für Anhänger) als Grundlage für die Regelung in fahrzeugtechnischen Vorschriften (beispielsweise in einer Verordnung) zu erarbeiten. Diese Anforderungen sollen technologieneutral (insbesondere: für eine breite Menge an Fahrrädern darstellbar und unabhängig von der konkret verbauten Bremse) sein und für alle Beladungszustände des Gesamtsystems Fahrrad-Anhänger gelten.

In die Überlegungen einbezogen werden sollen Antiblockiersysteme, Abhebeerkenkung, Verbundbremsen mit Bremskraftverteilung sowie die Fahrbahnzustände Nässe (mit eingeschränktem Reibwert) und Trockenheit (mit ausreichendem Reibwert).

2 Methodik

Ziel ist die Ermittlung möglicher Verzögerungen von Fahrrädern unter Berücksichtigung der o.g. Umstände, um daraus Mindestverzögerungen für zukünftige technische Vorschriften ableiten zu können.

Ausgehend von der analytischen Beschreibung der für Fahrräder möglichen Verzögerung als Funktion der Schwerpunktlage (in Bezug auf den Radstand), des Reibwertes und der Bremsbetätigung sowie einer Übersicht von im Markt auftretenden Kombinationen von Schwerpunktlage, Radstand, Masse und Bremsbauart (bestimmt in einer Messkampagne) können mögliche Verzögerungen definiert werden.

Hierfür ist die Schwerpunktlage von typischen Fahrrädern zu ermitteln, die mögliche Bremsverzögerung anhand der Schwerpunktlage zu beschreiben und die Berechnungsverfahren anhand von Verifikationsmessungen zu überprüfen.

2.1 Bestimmung der Schwerpunktlage

Die Bestimmung der Schwerpunktlage erfolgt mit am Vorderrad um die Höhe q angehobenem Fahrrad wie in Bild 1 dargestellt (Weidele, 2018).

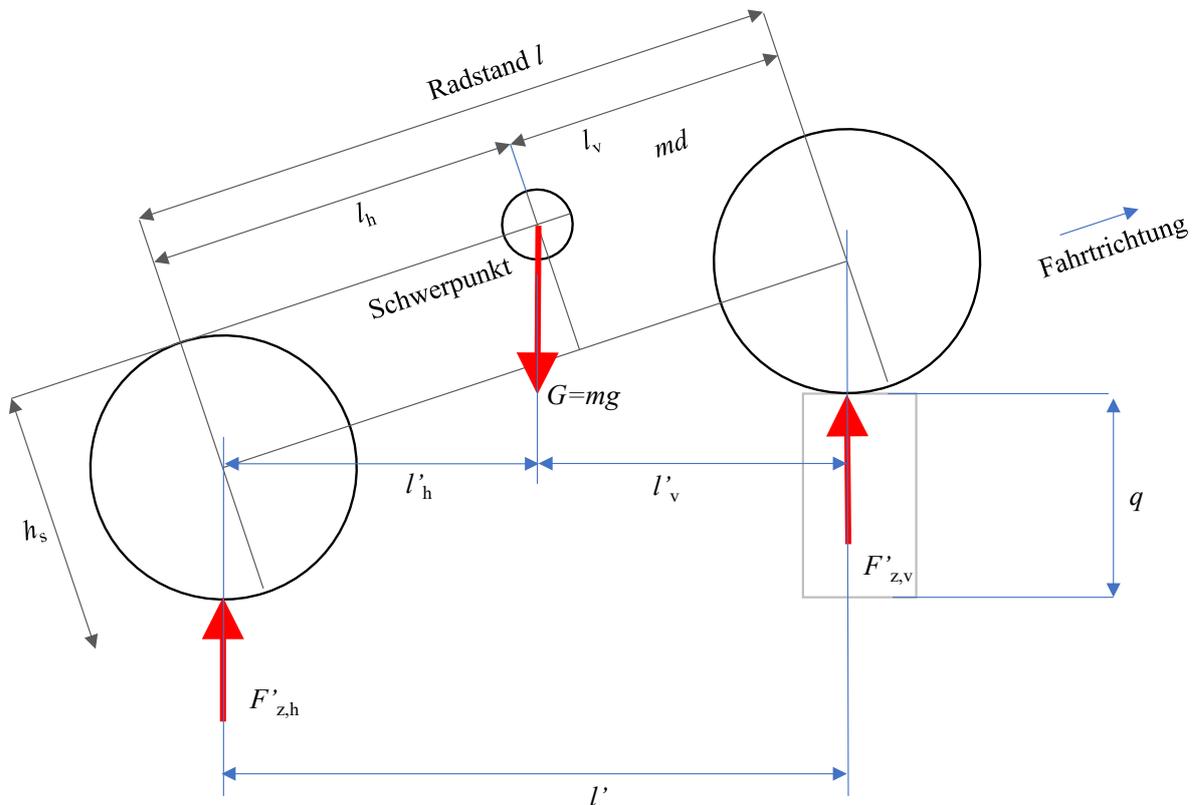


Bild 1: Bezeichnung der Größen zur Ermittlung der Schwerpunktlage am Fahrrad. Größen mit Strich (Beispiel: l') beziehen sich auf den schräggestellten Zustand, ohne auf das Fahrrad in der Ebene.

Die horizontale Schwerpunktlage, angegeben durch l_v und l_h , die Abstände des Schwerpunktes zu vorderem und hinterem Radaufstandspunkt, ergibt sich bereits ohne Schrägstellen des Fahrrades durch Wiegung der statischen Radlasten $F_{z,v}$ (vorne) und $F_{z,h}$ (hinten) sowie Messung des Radstandes l zu:

$$l_v = \frac{F_{z,h}}{F_{z,h} + F_{z,v}},$$

$$l_h = l - l_v.$$

Die Höhe des Schwerpunkts ergibt sich aus dem in die Ebene projizierten Radstand l' , dem projizierten Abstand Schwerpunkt – hinterer Radaufstandspunkt l_h , der Erhöhung des Vorderrades bei der Wiegung q sowie dem Raddurchmesser am Hinterrad d_h zu:

$$h_s = \frac{d_h}{2} + \left(l_h - \frac{l \cdot l_h'}{l'} \right) \cdot \frac{l'}{q}.$$

Die Schwerpunktlage eines aus mehreren Teilkörpern bestehenden Systems (Beispiel: Fahrrad, Fahrer, Gepäck) ergibt sich im Allgemeinen zu

$$x_s = \frac{\sum x_i \cdot m_i}{\sum m_i}.$$

2.2 Mögliche Verzögerung als Funktion der Schwerpunktlage

Die Schwerpunktlage (des Gesamtsystems, bestehend aus Fahrrad, Fahrer und ggf. Gepäck/Beladung) in Verbindung mit Reibwert und Radstand bestimmt, welche Verzögerungen durch ein Fahrzeug bei Bremsung mit der vorderen Achse (dem vorderen Rad), der hinteren Achse (dem hinteren Rad) oder beiden Achsen erreichbar sind, bevor einerseits Räder blockieren oder andererseits das Fahrzeug sich überschlägt.

Vereinfachend wird ein ungefedertes System angenommen; die Einflüsse der Geometrieänderung durch Federung sind sicher kleiner als die Messgenauigkeit der Schwerpunktlage.

In Bild 2 dargestellt ist die geometrische Situation eines beliebigen Fahrzeugs, mit den Kenngrößen Radstand l , Schwerpunktlage in Bezug auf Vorderrad und Hinterrad l_v , l_h , Bremskraft vorne und hinten $F_{B,v}$, $F_{B,h}$, Radlasten $F_{z,h}$, $F_{z,v}$, Gewichtskraft G und Schwerpunkthöhe h_s .

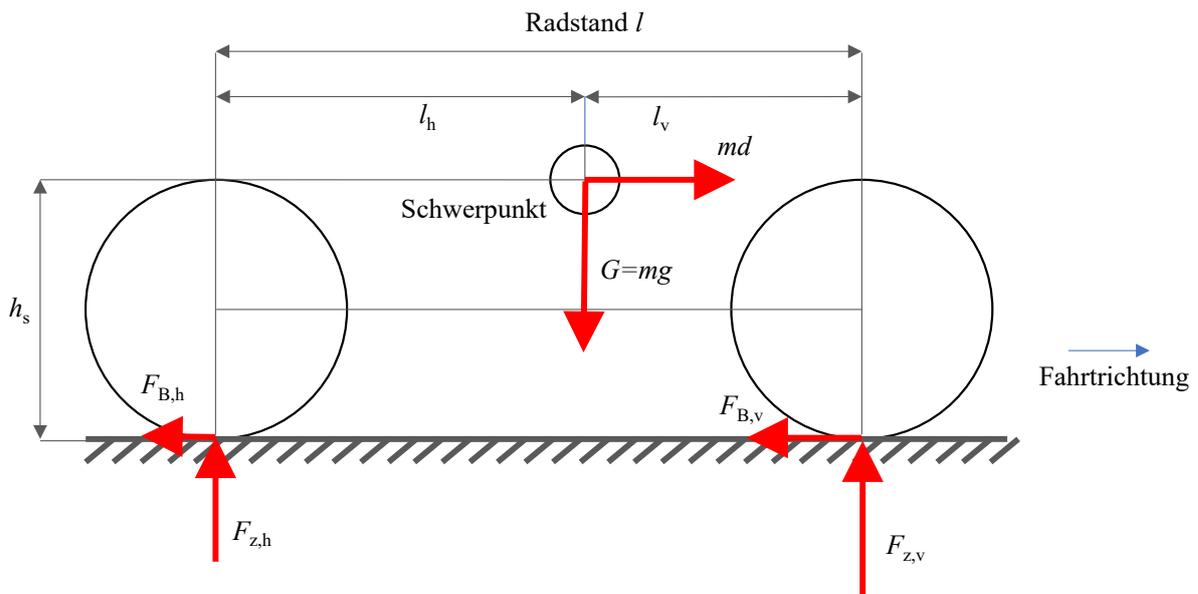


Bild 2: Größen am bremsenden Fahrrad

Es ergeben sich folgende Kräftegleichgewichte:

$$m \cdot \ddot{x} = -F_{B,v} - F_{B,h} \quad (1)$$

$$m \cdot g = F_{z,h} + F_{z,v} \quad (2)$$

Vereinfachend wird die Verzögerung d für die negative Beschleunigung eingeführt:

$$\ddot{x} = -d \quad (3)$$

Damit wird das Kräftegleichgewicht in x -Richtung zu

$$m \cdot d = F_{B,v} + F_{B,h} \quad (4)$$

Momentengleichgewichte um vorderen und hinteren Radaufstandspunkt führen zu den Radlasten für konstante Verzögerung:

$$F_{z,h} = m \cdot g \cdot \frac{l_v}{l} - m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (5)$$

$$F_{z,v} = m \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} + m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (6)$$

Die mögliche Bremskraft am jeweiligen Rad ergibt sich aus dem Reibwert als Funktion des Schlupfs $\mu(s)$, vereinfacht zunächst konstant gehalten. Unterschiedliche Reibwerte werden zum Modellieren unterschiedlicher Bremsbetätigung angesetzt.

$$F_{B,v} = \mu_v \cdot F_{z,v} \quad (7)$$

$$F_{B,h} = \mu_h \cdot F_{z,h} \quad (8)$$

Die Verzögerung als Funktion des Reibwertes ist dann (7 und 8 eingesetzt in 4):

$$m \cdot d = \mu_v \cdot F_{z,v} + \mu_h \cdot F_{z,h} \quad (9)$$

Für den Reibwert gilt, dass die beiden Radreibwerte nicht größer sein können als Kraftschluss:

$$\mu_i \leq \mu_0 \quad (10)$$

Vereinfacht lässt sich für das Bremskraftverteilungsdiagramm schreiben:

$$\mu_0 = \frac{d}{g} \quad (11)$$

Einsetzen von (11) in (5) und (6) liefert die Gleichungen für die ideale Bremskraftverteilung in Abhängigkeit von der Verzögerung:

$$\frac{F_{B,h}}{\mu_0} = m \cdot g \cdot \frac{l_v}{l} - m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l}$$

$$\frac{F_{B,v}}{\mu_0} = m \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} + m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l}$$

⇔

$$F_{B,h} = d \cdot m \cdot \frac{l_v}{l} - m \cdot \frac{d^2}{g} \cdot \frac{h_s}{l}$$

$$F_{B,v} = m \cdot d \cdot \frac{l_h}{l} + m \cdot \frac{d^2}{g} \cdot \frac{h_s}{l}$$

⇔

$$\frac{F_{B,h}}{m \cdot g} = \frac{d}{g} \cdot \frac{l_v}{l} - \frac{d^2}{g^2} \cdot \frac{h_s}{l} \quad (12)$$

$$\frac{F_{B,v}}{m \cdot g} = \frac{d}{g} \cdot \frac{l_h}{l} + \frac{d^2}{g^2} \cdot \frac{h_s}{l} \quad (13)$$

Ein erstes Zwischenergebnis ist die maximale Verzögerung, wenn nur am Hinterrad gebremst wird.

Ausgangspunkt ist (5):

$$F_{z,h} = m \cdot g \cdot \frac{l_v}{l} - m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (5)$$

Die Bremskraft wirkt nur noch am Hinterrad, Gleichung 4 ändert sich entsprechend:

$$m \cdot d = F_{B,h} \quad (14)$$

Die Bremskraft ist maximal dem Reibwert am Hinterrad:

$$m \cdot d = \mu \cdot F_{z,h}$$

$$\Leftrightarrow \frac{m \cdot d}{\mu} = F_{z,h} \quad (15)$$

Einsetzen 15 in 5 liefert:

$$\frac{m \cdot d}{\mu} = m \cdot g \cdot \frac{l_v}{l} - m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (16)$$

Umformen führt zur maximalen Verzögerung für diesen Fall:

$$\frac{d}{\mu} = g \cdot \frac{l_v}{l} - d \cdot \frac{h_s}{l}$$

$$\Leftrightarrow d = \mu \cdot g \cdot \frac{l_v}{l} - \mu \cdot d \cdot \frac{h_s}{l}$$

$$\Leftrightarrow d + \mu \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} = \mu \cdot g \cdot \frac{l_v}{l}$$

$$\Leftrightarrow d(1 + \mu \cdot \frac{h_s}{l}) = \mu \cdot g \cdot \frac{l_v}{l}$$

$$\Leftrightarrow d = \frac{\mu \cdot g \cdot \frac{l_v}{l}}{1 + \mu \cdot \frac{h_s}{l}} \quad (17)$$

Für den Fall, dass nur am Vorderrad gebremst wird, ergibt sich:

Ausgangspunkt ist (6):

$$F_{z,v} = m \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} + m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (6)$$

Die Bremskraft wirkt nur noch am Vorderrad, Gleichung 4 ändert sich entsprechend:

$$m \cdot d = F_{B,v} \quad (18)$$

Die Bremskraft ist maximal dem Reibwert am Vorderrad:

$$\begin{aligned} m \cdot d &= \mu \cdot F_{z,v} \\ \Leftrightarrow \frac{m \cdot d}{\mu} &= F_{z,v} \quad (19) \end{aligned}$$

Einsetzen von 19 in 6:

$$\frac{m \cdot d}{\mu} = m \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} + m \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \quad (20)$$

Umformen führt zur maximalen Verzögerung für diesen Fall:

$$\begin{aligned} \frac{d}{\mu} &= g \cdot \frac{l_h}{l} + d \cdot \frac{h_s}{l} \\ \Leftrightarrow d &= \mu \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} + \mu \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} \\ \Leftrightarrow d - \mu \cdot d \cdot \frac{h_s}{l} &= \mu \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} \\ \Leftrightarrow d(1 - \mu \cdot \frac{h_s}{l}) &= \mu \cdot g \cdot \frac{l_h}{l} \\ \Leftrightarrow d &= \frac{\mu \cdot g \cdot \frac{l_h}{l}}{1 - \mu \cdot \frac{h_s}{l}} \quad (21) \end{aligned}$$

Grafisch lassen sich die Verhältnisse im Bremskraftverteilungsdiagramm darstellen:

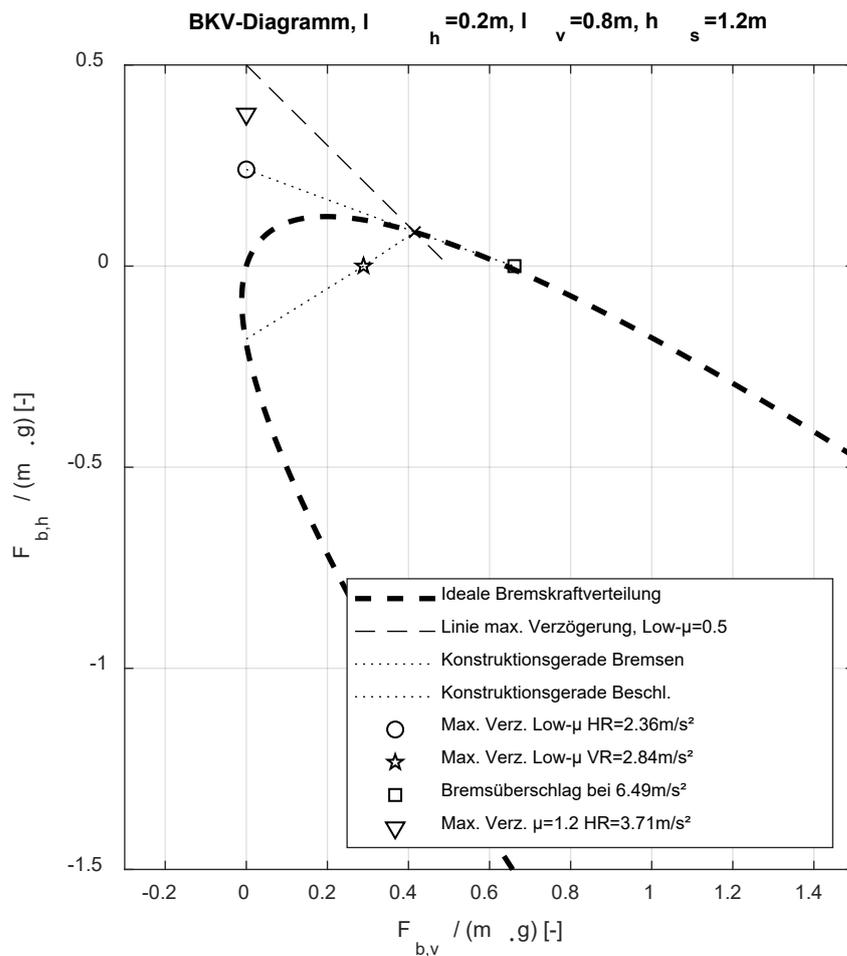


Bild 3: Bremskraftverteilungsdiagramm

2.3 Datensammlung

In einer Messkampagne (mit Unterstützung eines Fahrradhändlers mit ausreichend großem Sortiment) werden die Messgrößen Radstand, Schwerpunktlage vorne/hinten, Schwerpunkthöhe, Masse und – für die spätere Berechnung der Schwerpunktlage mit Fahrendem – Position von Sitz und Lenker bestimmt.

Die Schwerpunktlage in Längsrichtung und Höhe kann ausreichend genau bestimmt werden durch Wiegen der Radlasten im ebenen Zustand und mit erhöhtem Vorderrad. Radstand und Position von Lenker und Sitzplatz können mit einem Metermaß gemessen werden, es wird ein Foto für die Dokumentation angefertigt.

Im Fahrversuch wird die Verzögerung nur mit Vorderradbremse und nur mit Hinterradbremse bestimmt, vereinfacht gemessen durch ein Handy mit Beschleunigungssensorik in geeigneter Handyhalterung. Auf diese Weise konnten Schwerpunktlagen und Bremsverzögerungen für 14 verschiedene, fabrikneue Fahrräder bestimmt werden. Da die Bremsbeläge – weil fabrikneu – noch nicht eingefahren sind, verfügte die Vorderradbremse noch nicht über die finale Leistungsfähigkeit; die Hinterradbremse zwar auch nicht, aber aufgrund der begrenzten Kraftübertragung am

Hinterrad konnte dennoch die maximale Verzögerung nur mit der Hinterradbremse ermittelt werden.

Mit Abschluss dieser Messungen existiert eine große Datenbasis an Maßen, Massen und Schwerpunktlagen von Fahrrädern sowie sich daraus ergebender möglichen Verzögerungen und in der Praxis gemessener Verzögerungen.

Da die Positionen von Sattel, Lenker und Gepäckträger bekannt sind, können die Schwerpunktlagen eines beliebigen Gesamtsystems, bestehend aus Fahrrad, Fahrendem und Beladung, berechnet werden.

2.4 Dosierbarkeit

Die Dosierbarkeit von Fahrradbremsen beschreibt die Charakteristik der Kraftübertragung zwischen Eingabe (Bremshebel, Pedale) und Ausgabe (Bremsmoment). Hystereseeffekte und zeitliche Verzögerung zwischen Eingabe und Ausgabe sind ungeeignet, und auch stark schwankende Übersetzungsverhältnisse können die Dosierbarkeit einschränken.

Eine Identifikation von Einflüssen der genannten Effekte auf die Sicherheit im Rahmen von Probandenversuchen wäre denkbar, geht aber weit über den Rahmen der hier beschriebenen Forschungsarbeiten hinaus.

Insofern wurde in Absprache mit dem Auftraggeber entschieden, keine konkreten formelmäßigen Anforderungen an die Dosierbarkeit zu erarbeiten, sondern allgemeine Vorgaben zu machen:

Die Bremse muss so konstruiert sein, dass eine Übertragung der Bedienkraft ohne spürbare Verzögerung und Hysterese und weitgehend linear übertragen wird. Das entsprechende Übersetzungsverhältnis soll insbesondere an der Vorderachse linear vom Belagreibwert abhängen, beispielsweise in der Form, dass Servotrommelbremskonstruktionen dort nicht vorkommen.

2.5 Anhängerbremsen

Ungebremste Anhänger müssen vom ziehenden Fahrrad mitgebremst werden und belasten es bei Bremsungen mit einer Druckkraft in Fahrtrichtung. Für Fahrräder wird in aller Regel vom Hersteller eine maximal zulässige Systemmasse (in kg) angegeben, die im Betrieb nicht zu überschreiten ist und auf die unter anderem die Fahrradbremsen ausgelegt werden. Zusätzlich zum Fahrenden und zur Beladung müsste daher folgerichtig ein gezogener, ungebremster Anhänger ebenso im Systemgewicht berücksichtigt werden.

Ungebremste Anhänger sollten daher nur so schwer sein, dass sie bei typischen Fahrenden- und Systemmassen nicht zu einer Überlastung des Fahrrads bzw. der Fahrradbremseinrichtung führen; bei höheren Massen des Anhängers sollte er daher gebremst sein.

Für die Festlegung einer empfohlenen Schwelle für die maximale Masse ungebremster Anhänger wird auf eine Übersicht der Fahrradleermassen und der zulässigen Systemmassen zurückgegriffen. Unter der Annahme eines Fahrenden mit 80 kg kann dann für jedes Fahrrad eine maximale ungebremste Anhängemasse angegeben werden. Diese Verteilung erlaubt die Definition einer plausiblen Massengrenze für ungebremste Anhänger.

Schwerere, gebremste Anhänger sollten dann so ausgelegt sein, dass sie im Falle einer Bremsung nicht mehr als die dieser Massengrenze entsprechende Druckkraft auf das Fahrrad ausüben; der darüber hinausgehende Anteil also durch die eigene Bremsanlage verzögert wird.

3 Ergebnisse

3.1 Untersuchte Fahrräder bzw. Fahrzeuge

Die untersuchten Fahrzeuge (Bild 4) gliederten sich in u.a. in die konventionelle Bauform mit 5 Fahrrädern ohne Hilfsantrieb bzw. 4 Pedelecs 25 sowie 4 Lastenfahrräder (mit Hilfsantrieb). Zusätzlich wurde ein Pedelec 45 mit Antiblockiersystem getestet. Die geometrischen Kenngrößen sind in Tabelle 1 dargestellt

Tabelle 1: Übersicht vermessene Fahrräder

Fahrrad-Nummer	Fahrrad-Name	Antrieb	Rahmen	Radstand l [cm]	zul. Gesamt-masse [kg]
1	Solero 7	Bio	City, Tiefeinstieg	120	135
2	Agattu XXL 8R	Bio	City, Tiefeinstieg	115	170
3	Mammut Retro	Bio	Holland, Tiefeinstieg	115	unbek.
4	Gazelle Aroyo C7	Pedelec	City, Tiefeinstieg	107	130
5	Bulls Black Adder	Bio	MTB, Dämpfer vorn	112	125
6	KTM Macina Premium	Pedelec	City, Tiefeinstieg	115	147
7	Pegasus Premio EVO 10 light	Pedelec	City, Tiefeinstieg	119	135
8	I:SY E5ZRRT	Pedelec	Kompact (20")	108	140
9	Stromer ST7	Pedelec	Speedpedelec	110	150
10	Riese und Müller Multicharger	Pedelec	Long-Tail	125	175
11	Babboe Curve	Pedelec	Cargo, Box 3 Rad	130	270
12	Riese und Müller Long-John	Pedelec	Long-John	205	220
13	Stevens	Bio	Diamant	105	130
14	Riese und Müller Multilinker Vario	Pedelec	Long-Tail	130	200



Bild 4: Versuchsfahrräder

3.2 Schwerpunktlage

Die relevanten Maße der Fahrräder in Bezug auf Bild 1, ergänzt durch Bild 5 sind in Tabelle 2 angegeben.



Bild 5: Referenzpunkte für die Messung von Lenker, Sattel und Gepäckträger

Tabelle 2: Messwerte der einzelnen Fahrräder

Fahrrad- Nummer	Rad- stand l [cm]	Spur- weite vorne wv [cm]	Rad- durch- messer v [cm]	Rad- durch- messer h [cm]	Abstand Sattel - RAP hinten ls [cm]	Abstand Lenker - RAP hinten ll [cm]	Abstand Gepäck- fläche - RAP hinten lg [cm]	Höhe Lenker hl [cm]	Höhe Sattel hsa [cm]	Höhe Gepäck- träger hg [cm]
1	120	0	73	73	36	88	0	110	95	77
2	115	0	72	72	30	100	0	112	100	77
3	115	0	70	70	27	95	0	105	91	76
4	107	0	66	66	24	87	0	103	95	78
5	112	0	74	74	35	100	n.v.	100	100	n. v.
6	115	0	72	72	23	87	0	129	117	94
7	119	0	72	72	28	98	0	116	90	76
8	108	0	52	52	28	87	0	105	88	61
9	110	0	72	72	23	100	0	103	102	73
10	125	0	68	68	42	107	0	108	100	71
11	130	72	51	67	24	76	130	116	96	33
12	205	0	51	70	27	82	133	110	90	37
13	105	0	68	68	24	100	0	97	100	75
14	130	0	52	52	35	105	0	114	92	67

Anhand der Gleichungen aus Abschnitt 2.1 ergeben sich aus diesen Messwerten die in Tabelle 3 dargestellten Schwerpunktlagen (nur des Fahrrades).

Tabelle 3: Schwerpunktlagen der einzelnen Fahrräder

Fahrrad-Nummer	lh [cm]	lv [cm]	hs [cm]	Radstand l [cm]
1	53,33	66,67	54,28	120
2	51,45	63,55	54,85	115
3	48,79	66,21	52,36	115
4	35,67	71,33	49,15	107
5	53,33	58,67	49,71	112
6	56,53	58,47	55,42	115
7	54,62	64,38	53,97	119
8	41,54	66,46	42,25	108
9	48,57	61,43	54,15	110
10	58,33	66,67	48,78	125
11	99,87	30,13	47,87	130
12	102,50	102,50	58,49	205
13	46,67	58,33	46,38	105
14	54,46	75,54	41,85	130

3.3 Maximale Verzögerungen

Unter Anwendung der Gleichungen aus Abschnitt 2.2, der Schwerpunktlagen, die unter Verwendung der Gleichungen aus 2.1 und der Messwerte aus Abschnitt 3.2 ermittelt wurden, sowie aus der Annahme, dass der Fahrendenschwerpunkt (hier: 82 kg) 10 cm über dem Sattelreferenzpunkt liegt, lässt sich die maximale Verzögerung je gebremster Achse berechnen. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung (basierend auf den gemessenen Schwerpunktlagen und den Messungen (drei Messungen je Fahrrad) zumindest für Bremsung nur mit der Hinterradbremse. Da die Bremsbeläge der Fahrräder im Allgemeinen fabrikneu und nicht eingefahren sind, wird die maximale Bremskraft am Vorderrad (begrenzt durch den Bremsüberschlag beziehungsweise die Radblockade) nicht in jedem Fall erreicht. Für die Bremse am Hinterrad gilt dies zwar auch, aber da die übertragbare Bremskraft deutlich geringer ist, wurde die Radblockade und damit das maximale Verzögerungsvermögen nur mit Hinterradbremse dennoch erreicht. Es wird aufgrund der Übereinstimmung der modellierten und der im Test ermittelten Verzögerung durch die Hinterradbremse generell von einer guten Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ausgegangen.

Mögliche Verzögerungen alleine mit der Vorderradbremse liegen rechnerisch auf Hochreihwert (trockener Fahrbahn) stets $> 6 \text{ m/s}^2$, ohne dass es zum Bremsüberschlag käme. Verzögerungen alleine mit der Hinterradbremse liegen in allen Fällen um 3 m/s^2 auf Hochreihwert. Es wird daher davon ausgegangen, dass Fahrräder diese Werte stets erreichen können.

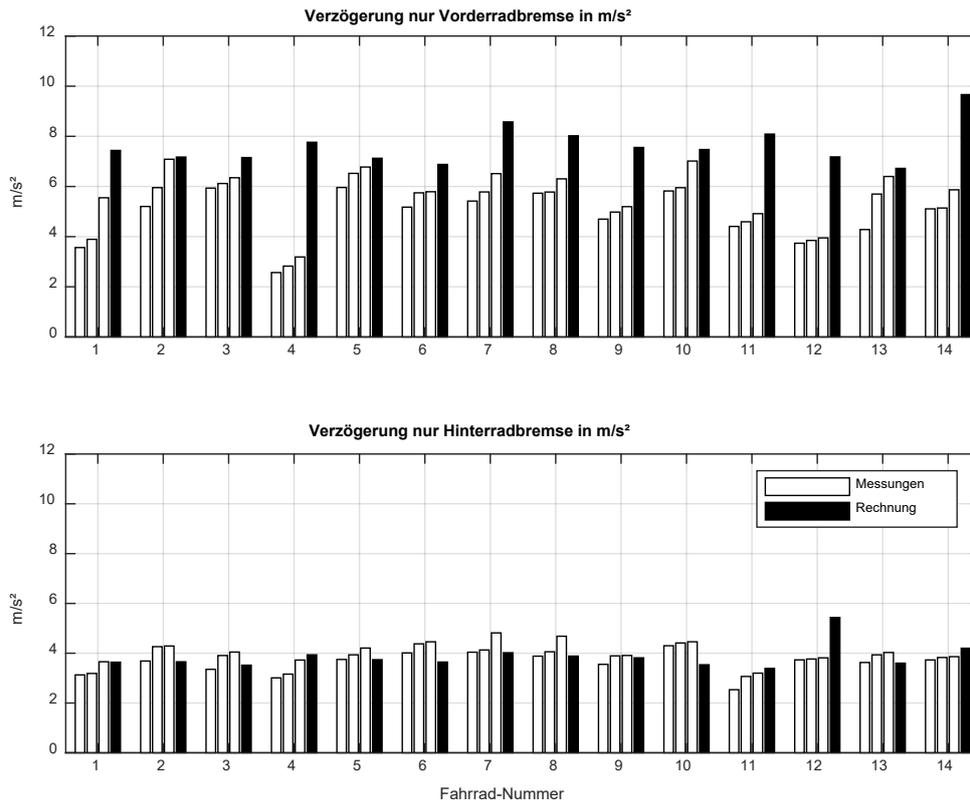


Bild 6: Maximale Verzögerung in Rechnung und Messungen je Fahrrad-Nummer

3.4 Rechnung: Verzögerungsfähigkeit mit und ohne Beladung

Nachdem sich das Berechnungsmodell bewährt hat, kann es genutzt werden, um den Beladungseinfluss zu simulieren. Für Fahrräder, die einen Gepäckträger haben (alle außer Fahrrad Nummer 5), wurde – unabhängig von der maximalen Systemmasse! – die maximale Verzögerung bei einer Beladung von 20 kg und 50 kg im Vergleich zum unbeladenen Zustand errechnet, die Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt.

Es zeigt sich, dass Beladung stets die Gesamtschwerpunkthöhe senkt (weil der Gepäckträger stets unter der Sattelhöhe ist) und in aller Regel den Gesamtschwerpunkt nach hinten verschiebt (Ausnahme: Fahrrad Nummer 11, mit Ladefläche über der Vorderachse). Beide Effekte verbessern das rechnerische Bremsvermögen.

Vorausgesetzt, die Fahrradbremsen sind in der Lage, die Energie aufzunehmen, ohne in der Bremswirkung nachzulassen (davon kann zumindest bei Beladung unter der maximalen Systemmasse ausgegangen werden), ist die Beladung also kein fahrdynamischer Extremfall; die in Abschnitt 3.3 angegebenen Mindestwerte der Verzögerung gelten also auch im Falle der Beladung.

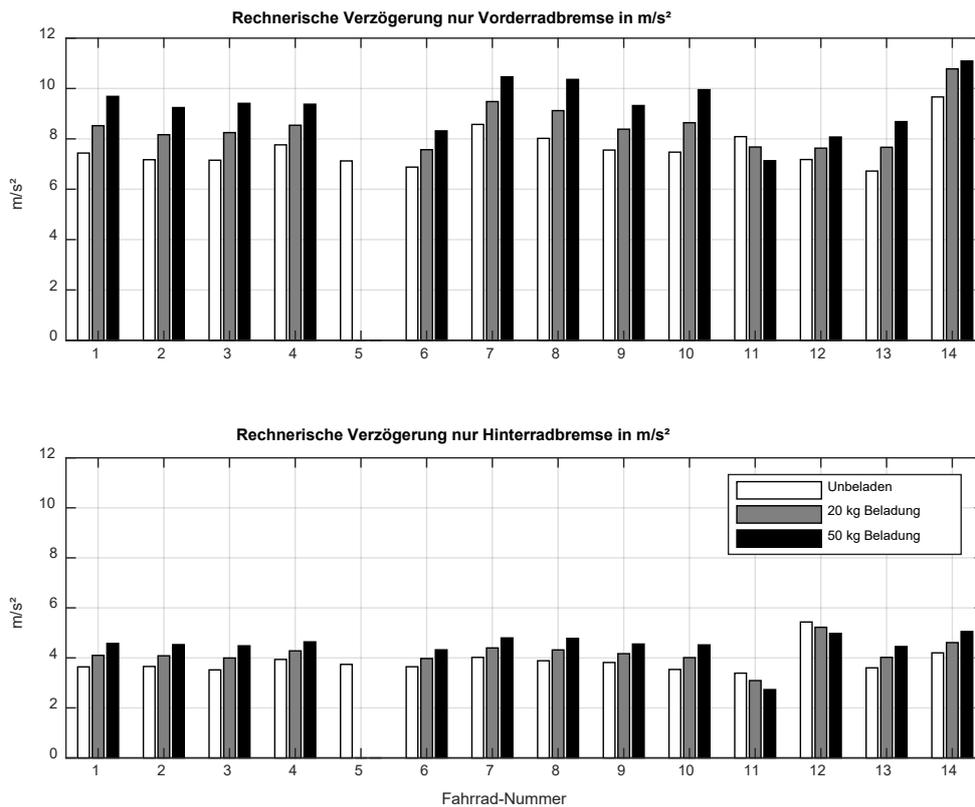


Bild 7: Verzögerungsfähigkeit rechnerisch in verschiedenen Beladungszuständen

3.5 Verzögerungsfähigkeit mit gebremsten und ungebremsten Fahrradanhängern

Um die Verzögerungsfähigkeit einer Fahrrad-Anhänger-Kombination zu ermitteln, wird zunächst die angegebene maximal zulässige Gesamtmasse eines Fahrrads betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass das zulässige Gesamtgewicht eines Fahrrads die Masse ist, welche das Fahrrad mit seinen Bremseinrichtungen maximal abbremsen kann (vgl. Kapitel 2.5). Somit kann bei diesem Ansatz das Gewicht einer zulässigen Zuladung (definiert als zulässiges Gesamtgewicht abzüglich Eigengewicht des Fahrrads sowie Masse des Fahrenden) als mögliches Anhänger­gewicht eines ungebremsten Fahrradanhängers angenommen werden, da die Fahrrad-Anhänger-Kombination ausschließlich mit der Bremseinrichtung des Fahrrads abgebremst werden können muss.

Im Folgenden wird für die in Kapitel 3.1 untersuchten Fahrräder eine Berechnung der möglichen zulässigen Zuladung durchgeführt, um eine Verteilung der Größenordnung des derzeitigen Stand der Technik zu erhalten. Zur Betrachtung einer möglichen Zuladung wird für jedes einzelne Fahrrad das Eigengewicht des Fahrrads und die Masse eines Fahrenden (angenommen 80 kg) vom zulässigen Gesamtgewicht abgezogen:

$$m_{\text{zul. Zuladung}} = m_{\text{zul. Gesamtgewicht}} - m_{\text{Fahrrad}} - m_{\text{Fahrender}}$$

Eine Übersicht der verwendenden Daten der 13 untersuchten Fahrräder aus Kapitel 3.1 ist in Tabelle 4 sowie die Verteilung der möglichen Zuladung in Bild 8 zu sehen. Der Mittelwert der möglichen Zuladung beträgt 51,8 kg.

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Fahrräder zur Berechnung der zulässigen Zuladung bei Fahrergewicht von 80 kg

Fahrrad-Nummer	Fahrrad-Name	Gewicht Fahrrad [kg]	zulässiges Gesamtgewicht [kg]	zulässige Zuladung bei 80 kg Fahrergewicht [kg]
1	Solero 7	18	135	37
2	Agattu XXL 8R	19	170	71
4	Gazelle Aroyo C7	25,5	130	24,5
5	Bulls Black Adder	10,5	125	34,5
6	KTM Macina Premium	29,5	147	37,5
7	Pegasus Premio EVO 10 light	30,5	135	24,5
8	I:SY E5ZRRT	26	140	34
9	Stromer ST7	38,5	150	31,5
10	Riese und Müller Multicharger	30	175	65
11	Babboe Curve	75,5	270	114,5
12	Riese und Müller Long-John	60	220	80
13	Stevens	13,5	130	36,5
14	Riese und Müller Multilinker Vario	37	200	83

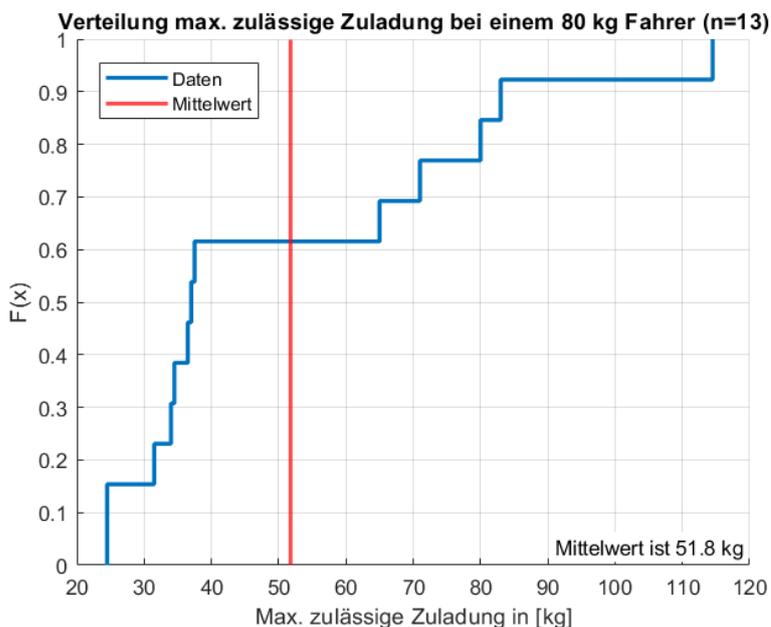


Bild 8: Verteilung maximal zulässige Zuladung bei einem Fahrergewicht von 80 kg

Es wird aufgrund der Verteilung von möglichen Zuladungen bei den untersuchten Fahrrädern (s. Bild 8) eine zulässige Gesamtmasse für einen ungebremsten Fahrradanhänger von grundsätzlich maximal 50 kg empfohlen. Sollte der Hersteller des Fahrrades selbst weitere Einschränkungen bezüglich der Masse eines ungebremsten Anhängers vorgeben (auf Werte unter 50 kg), wären diese bei der Verwendung ungebremsster Anhänger zu beachten.

Überträgt man diese Empfehlung auf einen gebremsten Anhänger, so sollte die in Fahrtrichtung wirkende Druckkraft durch den Anhänger auf das Fahrrad nach Abbremsen durch die Bremsenrichtung betrachtet werden (s. Bild 9). Die empfohlenen 50 kg eines ungebremsten Anhängers entsprechen bei einer Verzögerung (d) von 5 m/s^2 (vgl. Kapitel 4.1) einer Druckkraft (F) von ca. 250 N:

$$F = m * d \quad (22)$$

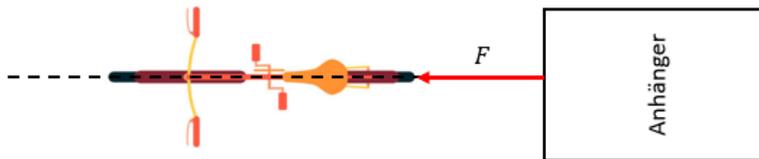


Bild 9: Druckkraft wirkend vom Fahrradanhänger auf das Fahrrad

Für gebremste Fahrradanhänger sollte somit gelten, dass auch höhere Anhängermassen möglich sind, wenn der Fahrradanhänger über ein Bremssystem verfügt, das die geforderte Druckkraftgrenze von maximal 250 N in Fahrtrichtung einhalten kann. Dies ist im Einklang mit den Ergebnissen aus dem Projekt „Technische Anforderungen an elektrisch angetriebene Anhänger“ (Bourauel, et al., 2022).

4 Empfehlungen

In der Beauftragung wurden neben der reinen Bremsverzögerung die Themen Kombibremisanlage (Bedienung zweier Achsen mit einem Bedienelement), Antiblockiersysteme und Abhebeerkenkung angesprochen.

Eine Kombibremisanlage sollte aus Gründen der Fahrsicherheit nicht verpflichtend vorgeschrieben werden, weil Fahrräder oft auch auf Niedrigreibwert (Sand, Kies, Waldwege) fahren, unter diesen Bedingungen eine Blockade des Vorderrades unbedingt verhindert werden muss und dafür eine Einstellung der Bremskraftverteilung sinnvoll ist. Kombibremisanlagen sollten aber möglich bleiben.

Antiblockiersysteme würden Stürze auf Niedrigreibwert verhindern, aber für eine Beurteilung des Nutzens im Unfallgeschehen haben diese Systeme noch nicht genug Marktpenetranz. In Unfalldatenbanken (GIDAS) finden sich bisher keine entsprechenden Fahrzeuge. Antiblockiersysteme sollten daher nicht verpflichtend vorgeschrieben werden aber möglich sein.

Systeme mit Abhebeerkenkung des Hinterrads wären sinnvoll bei leichten Fahrrädern mit hohem und weit vorne liegendem Schwerpunkt. Solche Räder haben aber in der Regel keine ausreichende elektrische Energie verfügbar. Fahrräder mit elektrischer Energie wiederum haben oft keine starke Tendenz zum Bremsüberschlag. Abhebeerkenkung sollte daher nicht verpflichtend vorgeschrieben werden aber möglich sein.

Basierend auf den Forschungsergebnissen können daher folgende Empfehlungen gegeben werden:

4.1 Anforderungen an Bremsen

Basierend auf den in Kapitel 3 dargestellten Ergebnissen resultieren Empfehlungen für technische Anforderungen an die Bremsen an Fahrrädern.

Ein Fahrrad sollte mit zwei voneinander unabhängigen Bremsen im Sinne des § 65 Absatz 1 Satz 1 der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung ausgerüstet sein.

Eine auf die Vorderachse wirkende Bremsanlage sollte in der Lage sein, das Fahrrad mit 5 m/s^2 zu verzögern. Für die Hinterachse sollte entsprechend $2,5 \text{ m/s}^2$ gelten.

Kombibremens, die auf mehrere Achsen wirken sind grundsätzlich möglich, solange der jeweils der höhere Wert erfüllt wird.

Ein mehrspuriges Fahrrad sollte mit einer fest angebrachten Einrichtung ausgerüstet sein, die das Fahrrad festzustellen vermag.

Für den Anhängerbetrieb sollte zwischen gebremsten und ungebremsten Anhängern unterschieden werden (siehe 4.2 und 4.3).

4.2 Ungebremste Anhänger

Fahrräder, die vom Hersteller für den Anhängerbetrieb freigegeben sind, müssen in der Lage sein, die ungebremste Anhängelast gemäß der in dem Kapitel 4.1 beschriebenen Anforderungen mit zu verzögern.

Die zulässige Gesamtmasse von ungebremsten Anhängern beträgt maximal 50 kg, unter Beachtung einer ggf. vom Fahrradhersteller angegebenen geringeren Masse für ungebremste Anhänger.

4.3 Gebremste Anhänger

Gebremste Anhänger sollten im Betrieb eine Rest-Druckkraft auf das ziehende Fahrrad von nicht mehr als 250 N ausüben dürfen. Dies gilt mit eingefahrenen Bremsen, ausreichendem Reibwert und in allen freigegebenen Beladungszuständen (*einschließlich Gefälle*).

4.4 Allgemeine Prüfbedingungen

Die Überprüfungen der Anforderungen sollen unter den folgenden Bedingungen stattfinden.

Die Prüfungen sollen auf einer Fahrbahn mit ebener, trockener und griffiger Beton- oder Asphaltoberfläche mit ausreichenden Reibwert durchgeführt werden. In Längsrichtung sollte die Prüfstrecke keine größere Steigung als 1 % und keine größere Schrägneigung als 3 % aufweisen.

Die Umgebungstemperatur sollte zwischen 0 °C und 45 °C liegen.

Die Prüfungen dürfen nur stattfinden, wenn die Ergebnisse nicht vom Wind beeinflusst werden.

Bei Luftreifen sollte vor den Prüfungen der vom Hersteller für den normalen Betrieb vorgesehene Fülldruck eingestellt werden.

Die Masse des Fahrrads und ggf. des (gebremsten) Anhängers sollte der Masse in fahrbereitem Zustand entsprechen. Dabei sind alle vom Hersteller freigegebenen Beladungszustände mit zu berücksichtigen. Dies betrifft die Masse der fahrenden und ggf. zu befördernden Person(en), An- und Aufbauten sowie Ladung samt Anhängelast.

Bei den Prüfungen ist eine Person mit einer Masse von 70 kg bis 100 kg als Fahrradaufsasse vorzusehen.

Die Bremsprüfung ist mit eingefahrenen Bremsen und wiederholt vorzunehmen.

5 Zusammenfassung

Die BAST wurde mit Erlass Aktenzeichen RV 2-7314.1/01 vom 8.2.2021 unter anderem beauftragt, technische Anforderungen an Fahrradbremseinrichtungen (auch für Anhänger) als Grundlage für die Regelung in fahrzeugtechnischen Vorschriften (beispielsweise in einer Verordnung) zu erarbeiten. Diese Anforderungen sollen technologieneutral (insbesondere: für eine breite Menge an Fahrrädern darstellbar und unabhängig von der konkret verbauten Bremse) sein und für alle Beladungszustände des Gesamtsystems Fahrrad-Anhänger gelten.

Ausgehend von der analytischen Beschreibung der für Fahrräder möglichen Verzögerung als Funktion der Schwerpunkt Lage (in Bezug auf den Radstand), des Reibwertes und der Bremsbetätigung sowie einer Übersicht von im Markt auftretenden Kombinationen von Schwerpunkt Lage, Radstand, Masse und Bremsbauart (bestimmt in einer Messkampagne) konnten mögliche Verzögerungen definiert werden: Für Fahrräder sind Verzögerungen von 5 m/s^2 (Vorderradbremse) und $2,5 \text{ m/s}^2$ (Hinterradbremse) auf Hochreibwert, auch beladen, problemlos erreichbar.

Eine Analyse der maximalen Systemmassen von Fahrrädern und der Eigenmassen zeigt, dass im Mittel eine Anhängemasse von ca. 50 kg (unter Berücksichtigung eines Fahrenden mit ca. 80 kg) zur Verfügung steht. Diese Grenze bietet sich grundsätzlich als maximale Masse von ungebremsten Anhängern an – gebremste Anhänger sollten maximal eine vergleichbare Druckkraft bei Bremsungen ausüben.

In der Beauftragung wurden die Themen Kombibremseanlage (Bedienung zweier Achsen mit einem Bedienelement), Antiblockiersysteme und Abhebeerkenner angerechnet.

Eine Kombibremseanlage sollte aus Gründen der Fahrsicherheit nicht verpflichtend vorgeschrieben werden, weil Fahrräder oft auch auf Niedrigreibwert (Sand, Kies, Waldwege) fahren, unter diesen Bedingungen eine Blockade des Vorderrades unbedingt verhindert werden muss und dafür eine Einstellung der Bremskraftverteilung sinnvoll ist. Kombibremseanlagen sollten aber möglich bleiben.

Antiblockiersysteme würden Stürze auf Niedrigreibwert verhindern, aber für eine Beurteilung des Nutzens im Unfallgeschehen haben diese Systeme noch nicht genug Marktpenetranz. In Unfalldatenbanken (GIDAS) finden sich bisher keine entsprechenden Fahrzeuge. Antiblockiersysteme sollten daher nicht verpflichtend vorgeschrieben werden, ihr Einbau aber erlaubt sein.

Systeme mit Abhebeerkenner des Hinterrads wären sinnvoll bei leichten Fahrrädern mit hohem und weit vorne liegendem Schwerpunkt. Solche Räder haben aber in der Regel keine ausreichende elektrische Energie verfügbar. Fahrräder mit elektrischer Energie wiederum haben oft keine starke Tendenz zum Bremsüberschlag. Eine Abhebeerkenner sollte daher nicht verpflichtend vorgeschrieben werden aber verbaut werden dürfen.

6 Literaturverzeichnis

Bourauel, B., Sander, D., Seiniger, P. & Gail, J., 2022. *Technische Anforderungen an elektrisch angetriebene Fahrradanhänger*, Bergisch Gladbach: s.n.

Weidele, A., 2018. *Skriptum Motorradtechnik*. Darmstadt: s.n.

Bilder

Bild 1: Bezeichnung der Größen zur Ermittlung der Schwerpunktlage am Fahrrad. Größen mit Strich (Beispiel: /') beziehen sich auf den schräggestellten Zustand, ohne auf das Fahrrad in der Ebene.	7
Bild 2: Größen am bremsenden Fahrrad.....	9
Bild 3: Bremskraftverteilungsdiagramm	12
Bild 4: Versuchsfahrräder.....	16
Bild 5: Referenzpunkte für die Messung von Lenker, Sattel und Gepäckträger	17
Bild 6: Maximale Verzögerung in Rechnung und Messungen je Fahrrad-Nummer.....	19
Bild 7: Verzögerungsfähigkeit rechnerisch in verschiedenen Beladungszuständen	20
Bild 8: Verteilung maximal zulässige Zuladung bei einem Fahrergewicht von 80 kg.....	21
Bild 9: Druckkraft wirkend vom Fahrradanhänger auf das Fahrrad.....	22

