

## Bestimmung des Widerstandsbeiwerts von Fahrradfahrern bei seitlicher Anströmung

### Determination of the drag coefficient of cyclists in crosswind

**Christof Gromke, Ana Luisa Florêncio, Bodo Ruck**

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, E-mail: gromke@kit.edu

Druck- und Sogkräfte auf Fahrradfahrer, Überholvorgang, Fahrradaerodynamik, Fahrradsicherheit

Pressure and suction forces on cyclists, overtaking maneuver, bicycle aerodynamics, bicycle safety

### Zusammenfassung

Widerstandsbeiwerte  $C_w(\Phi)$  und Werte für die Drag Area  $C_w \cdot A(\Phi)$  von kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen (= Fahrradmodell mit aufgesetztem Personenmodell) wurden in Windkanaluntersuchungen für diverse Anströmungsrichtungen  $\Phi$  bestimmt. Eine Analyse der Reynoldszahlabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte ergab eine untere Grenz-Reynoldszahl  $Re_{crit} = 150000$ , wobei eine gewisse Abhängigkeit der Grenz-Reynoldszahl vom Anströmungswinkel  $\Phi$  besteht. Die an den kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen ermittelten  $C_w$ -Werte bei Frontalanströmung,  $\Phi = 0^\circ$ , fallen in die Bandbreite jener an naturmaßstäblichen Ausführungen bestimmten und konnten somit validiert werden. Sie sind allerdings etwa 10% bis 15% niedriger als deren Durchschnittswerte. Die  $C_w$ -Werte sind, bei Zugrundelegung der anströmungsrichtungsabhängigen Bezugsfläche  $A_{ref}(\Phi)$ , bei seitlicher Anströmung zwischen  $75^\circ < \Phi < 120^\circ$  am größten und bei leicht vorderseitig-schräger Anströmung zwischen  $15^\circ < \Phi < 30^\circ$  sowie bei leicht rückseitig-schräger Anströmung bei  $\Phi = 165^\circ$  am geringsten. Die minimalen  $C_w$ -Werte sind bei  $\Phi = 165^\circ$  aufgetreten. Die Drag Area  $C_w \cdot A$  und die Widerstandskräfte  $F_w$  sind bei seitlicher Anströmung zwischen  $60^\circ < \Phi < 120^\circ$  maximal. Sie sind etwa doppelt so groß wie die minimalen Werte für  $C_w \cdot A$  und  $F_w$  die bei rückseitiger Anströmung bei  $\Phi = 180^\circ$  aufgetreten sind.

### Einleitung

Am Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik am Karlsruher Institut für Technologie KIT läuft ein dreijähriges Forschungsprojekt, das die aerodynamischen Kräfte untersuchen soll, die auf Fahrradfahrer wirken, wenn sie von Fahrzeugen überholt werden. Hierzu werden unterschiedliche experimentelle Untersuchungen mit realen Fahrzeugen auf Teststrecken durchgeführt und die wirkenden Kräfte gemessen. Parallel dazu werden in einer Modellstudie die Kräfte im Windkanal an kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen (= Fahrradmodell mit aufgesetztem Personenmodell) bei Variation verschiedener Einflussgrößen ermittelt und daraus die Widerstandsbeiwerte bei seitlicher Anströmung abgeleitet, um fundamentale, qualitative Zusammenhänge offenzulegen. Der vorliegende Beitrag be-

schreibt diese Modelluntersuchungen im Windkanal, in denen die Widerstandsbeiwerte an verschiedenen Fahrradfahrermodellen bei Variation des Anströmungswinkels  $\Phi$  zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ermittelt wurden.

Zwar gibt es bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zur Aerodynamik von Fahrradfahrern, jedoch befassen sich diese überwiegend mit dem Widerstandsbeiwert  $C_w$  bei Frontalanströmung in Fahrtrichtung, der je nach Fahrradtyp und Fahrerhaltung i.d.R. zwischen  $0.8 < C_w < 1.2$  liegt (Chowdhury et al. 2011, Crouch et al. 2017, Hennekam 1990, Kyle 1979, Lukes et al. 2005). Die relativ große Bandbreite bei den  $C_w$ -Werten liegt in den unterschiedlichen Fahrradtypen und Haltungen, die von der "geduckten Haltung" auf einem Rennrad bis hin zu "aufrecht sitzenden Haltung" auf einem Stadtrad reichen, begründet. Die einzige, den Autoren bekannte Untersuchung zu Widerstandskräften auf Fahrradfahrer bei seitlicher Anströmung stammt von Fintelman et al. 2014. In dieser Untersuchung werden allerdings keine Werte für die Widerstandsbeiwerte  $C_w$  bei seitlicher Anströmung angegeben, sondern für die „Drag Area“  $C_w \cdot A$  ( $m^2$ ).

Der Widerstandsbeiwert bei seitlicher Anströmung ist eine wichtige Größe in der Bestimmung der Querkraft  $F_w$ , der der Fahrradfahrer ausgesetzt ist. Gl. 1 gibt die linearisierte Bewegungsgleichung für die Rollbewegung (Drehpunkt O, siehe Abb. 1) wieder (Åström et al. 2005), die die Drehmomentenbilanz des Systems bestehend aus Fahrrad und Fahrer mit Massenträgheitsmoment  $J$  um die Rollachse bei der Fahrradfahrt (pendelartiges Durchfahren hintereinander angeordneter Kreisbögen) beschreibt:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{m_B \cdot g \cdot h_m}{J} \cdot \alpha + \frac{m_B \cdot h_m \cdot v^2}{b \cdot J} \cdot \beta + \frac{m_B \cdot a \cdot h_m \cdot v}{b \cdot J} \cdot \frac{d\beta}{dt} + \frac{h_m}{J} \cdot F_w . \quad (1)$$

Hierbei beschreiben der Term auf der linken Seite die Trägheitsmomente aufgrund einer Änderung des Neigungswinkels  $\alpha$ , der erste Term auf der rechten Seite das Drehmoment, hervorgerufen durch die Schwerkraft bei seitlicher Neigung, der zweite Term das sich einstellende Moment aufgrund der Zentrifugalkraft bei einer Kreis(bogen)fahrt, der dritte Term das Trägheitsmoment bei einer Änderung des Lenkereinschlags und der vierte Term das Moment aufgrund der horizontalen Querkraft  $F_w$ , die senkrecht zur Fahrtrichtung wirkt.

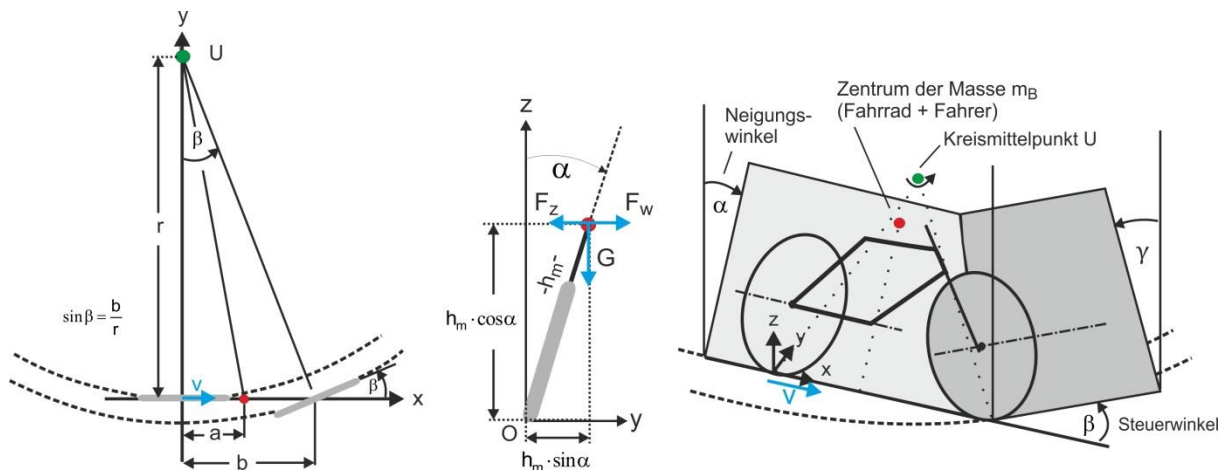


Abb. 1: Geometrie, Kräfte und Bezeichnungen relevant für die Drehmomentenbilanz um die Rollachse bei der Fahrradfahrt (Pendelbewegung auf hintereinander angeordneten Kreisbögen).

## Versuchsaufbau und Messungen

Die Bestimmungen der Widerstandsbeiwerte wurden an kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen mit Modellmaßstäben von  $M = 1:9$  bzw.  $M = 1:10$  in einem Windkanal Göttinger Bauart bei uniformer Anströmung durchgeführt (Abb. 2). Es wurden Widerstandsbeiwerte  $C_w(\Phi)$  in einem Winkelbereich von  $\Phi = 0^\circ$  (Frontalanströmung) bis  $180^\circ$  (Rückenwind) in  $15^\circ$ -Inkrementen bestimmt. Unterschiedliche Fahrradtypen (Mountainbike, Rennrad) wurden mit Personenmodellen männlicher Erwachsener derart bestückt, dass die Personenmodelle eine Fahrradfahrer-typische aufrecht sitzende, also nicht aerodynamisch optimierte Haltung auf den Fahrradmodellen einnahmen. Eine Übersicht zu den untersuchten Fahrradfahrermodellen FFM (Kombinationen) ist in Tab. 1 gegeben.

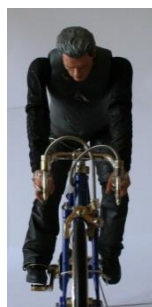


Abb. 2: Splitterplatte mit eingelassener Kraftmesswaage und montiertem Fahrradfahrermodell in der Testsektion des Windkanals Göttinger Bauart.

Tab. 1: Übersicht der Fahrradfahrermodelle FFM (Kombination Fahrrad-/Personenmodell).

Bezeichnung	FFM-01	FFM-02	FFM-03
Fahrradmodell	Rennrad	Mountainbike	Mountainbike
Personenmodell	T	D	Z
Modellmaßstab M	1:9	1:10	1:10
Höhe $h_{FFM}$ [cm]	17.5	17.9	16.9

Foto



Die Widerstandskräfte wurden mit einer speziell für 1-axiale Kraftmessungen konstruierten Kraftmesswaage gemessen, um parasitäre Kräfteinflüsse in der Messung weitestgehend auszuschließen. Eine zylinderförmige 1-axiale Dehnungsmessstreifen-Wägezelle (HBM U1 Sensor, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) mit einer maximalen Nennlast von 10 N und 0.1% Messgenauigkeit wurde zur Messung der Kräfte eingesetzt. Als Messverstärker kam ein Transamerica Instruments Typ PSC 8015-1 zum Einsatz. Eine Kalibrierung des Systems Wägezelle/Messverstärker wurde unmittelbar vor Beginn der Messreihe durchgeführt.

Die Widerstandsbeiwerte  $C_w$  wurden aus den gemessenen Widerstandskräften  $F_w$  gemäß

$$C_w(\Phi) = \frac{2 F_w(\Phi)}{\rho U^2 A_{\text{ref}}(\Phi)} \quad (2)$$

bestimmt, wobei  $\rho$  die Dichte der Luft und  $U$  die Geschwindigkeit der ungestörten, uniformen Anströmung ist. Die Referenzfläche  $A_{\text{ref}}(\Phi)$  wurde basierend auf fotografischen Aufnahmen separat für jede Anströmungsrichtung  $\Phi$  mittels digitaler Bildauswertung ermittelt (Abb. 3).

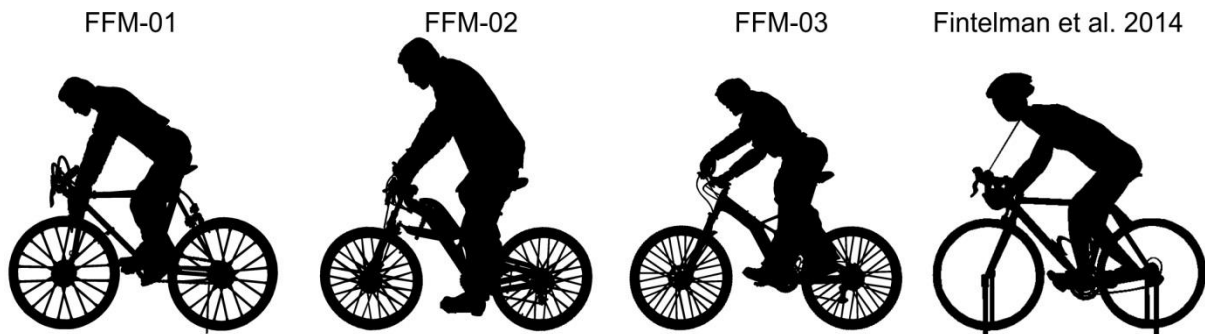


Abb. 3: Fotografische Aufnahmen zur Bestimmung der Referenzfläche  $A_{\text{ref}}(\Phi = 90^\circ)$ .

## Ergebnisse und Diskussion

### Reynoldszahlabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte

Eine wichtige Fragestellung, die es zunächst zu klären gilt, ist die nach der Reynoldszahlabhängigkeit der an den kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen ermittelten Widerstandsbeiwerte. Aus diesem Grund wurde eine Analyse der Reynoldszahlabhängigkeit am Fahrradfahrermodell FFM-01 (siehe Tab. 1) für verschiedene Anströmungsrichtungen  $\Phi$  durchgeführt. Die Reynoldszahl wurde hierbei gebildet mit der Geschwindigkeit der ungestörten, uniformen Anströmung  $U$  und der Höhe  $h_{\text{FFM}}$  des Fahrradfahrermodells (Distanz zwischen Boden und Kopfoberkante) gemäß

$$\text{Re}_{\text{FFM}} = \frac{U h_{\text{FFM}}}{\nu} \quad (3)$$

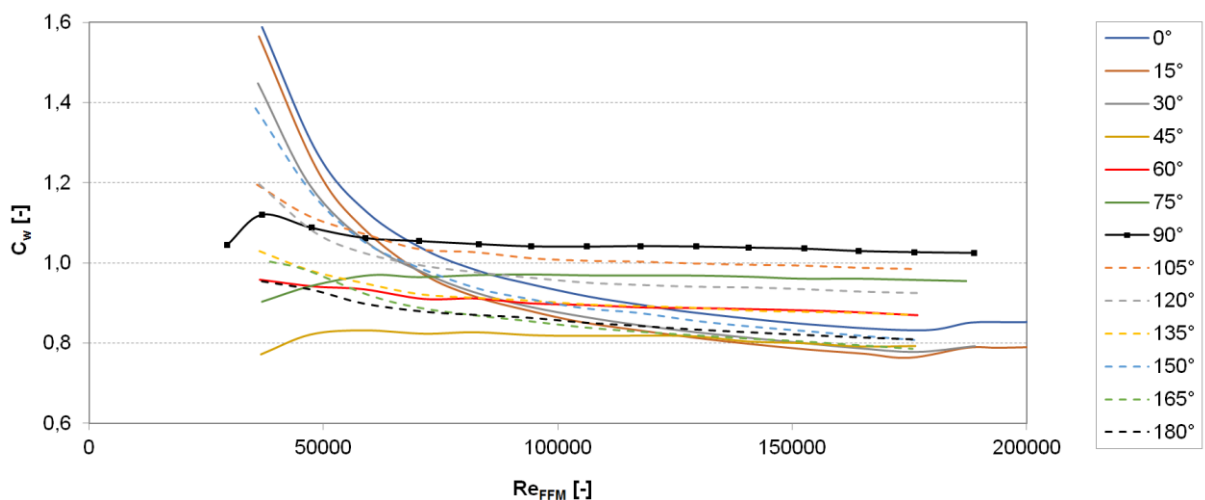


Abb. 4: Reynoldszahlabhängigkeit des Widerstandsbeiwertes  $C_w$  für verschiedene Anströmungsrichtungen  $\Phi$  am Fahrradfahrermodell FFM-01.

Aus Abb. 4 ist ersichtlich, dass der untere Grenzwert, ab welchem eine Reynolds-zahlunabhängigkeit eintritt mit dem Anströmungswinkel  $\Phi$  variiert. Es lässt sich eine Verschiebung zu kleineren unteren Grenzwerten bei zunehmend seitlicher Anströmung, insbesondere im Winkelsektor  $\Phi = 90^\circ \pm 45^\circ$ , konstatieren. Generell kann über den Bereich von Anströmungswinkeln zwischen  $0^\circ < \Phi \leq 135^\circ$  ein unterer Grenzwert von  $Re_{FFM,crit} = 150000$  bestimmt werden. Für größere Winkel  $\Phi$  besteht bei rückseitiger Anströmung darüber hinaus eine geringe Variation des  $C_w$ -Wertes mit der Reynoldszahl  $Re$ . Als Erklärungshypothese für diese Variation wird die stromlinienförmigere Gestalt des Oberkörpers des Fahrradfahrermodells bei Rückenwind angesehen. Während bei vorderseitiger Anströmung der Wind auf eine insgesamt konkave Oberkörperform trifft, geht diese bei rückseitiger Anströmung mit zunehmendem Winkel  $\Phi$  in eine insgesamt konvexe und somit stromlinienförmigere Form über.

### Widerstandsbeiwerte der Fahrradfahrermodelle

Abb. 5 zeigt die Widerstandsbeiwerte  $C_w$  für die drei Fahrradfahrermodelle (Tab. 1) berechnet nach Gl. 2 mit anströmungsrichtungbezogener Bezugsfläche  $A_{ref}(\Phi)$ . Zum Vergleich und zur Validierung sind  $C_w$ -Werte bei Frontalanströmung ( $\Phi = 0^\circ$ ) ermittelt an tatsächlichen Fahrradfahrern bzw. an lebensgroßen Dummies eingetragen. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die an den kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen ermittelten  $C_w$ -Werte sich mit dem unteren Bereich von  $C_w$ -Werten naturmaßstäblicher Fahrradfahrer zwar decken, jedoch häufig kleiner sind, u.a. auch im Vergleich zu den geduckt sitzenden Rennradfahren aus den Untersuchungen von Chowdhury et al. 2011 und Kyle 1979, obwohl die Personenmodelle eine eher aufrecht sitzende, also nicht aerodynamisch optimierte, Haltung auf den Fahrradmodellen einnehmen. Mögliche Gründe hierfür können in den vergleichsweise glatten Kunststoffoberflächen der Personenmodelle und in einer Unterrepräsentation der Speichenanzahl bei den Fahrradmodellen liegen (Abb. 2).

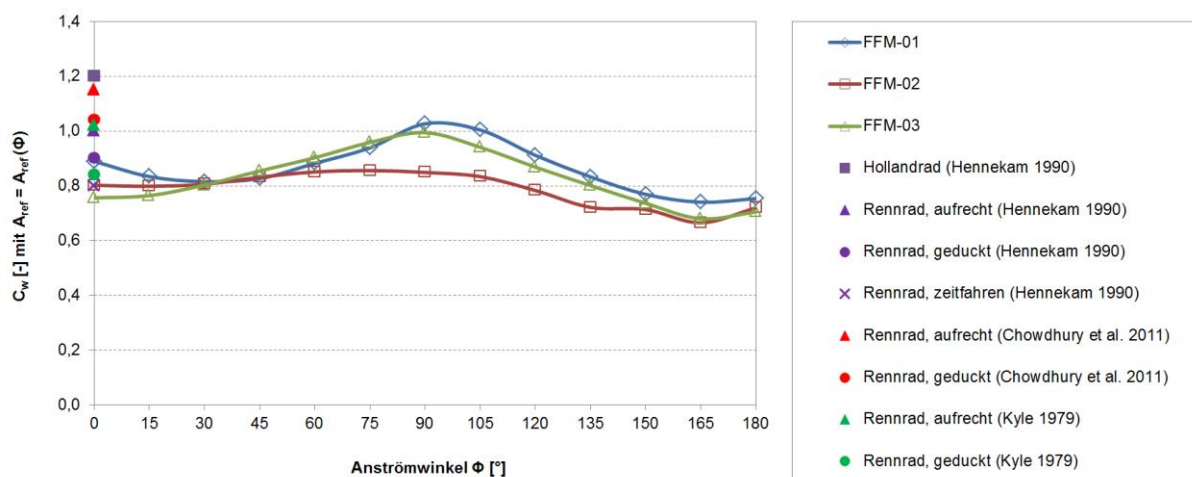


Abb. 5: Widerstandsbeiwerte  $C_w$  der kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodelle FFM in Abhängigkeit der Anströmungsrichtung  $\Phi$  bei Bezugsfläche  $A_{ref}(\Phi)$  sowie von naturmaßstäblichen Fahrradfahrern.

Die Widerstandsbeiwerte sind für die seitliche Anströmung im Bereich  $75^\circ < \Phi < 120^\circ$  am größten. Bei Gegenwind treten die kleinsten Widerstandsbeiwerte bei leicht vorderseitig-schräger Anströmung bei etwa  $15^\circ < \Phi < 30^\circ$  auf. Die minimalen  $C_w$ -Werte sind bei leicht rückseitig-schräger Anströmung um  $\Phi = 165^\circ$  zu finden. Die Bandbreite der  $C_w$ -

Wertvariationen bezogen auf  $C_w(\Phi = 0^\circ)$  liegt bei etwa 30%, wobei diese für die Fahrradfahrermodelle FFM-01 und FFM-03 stärker ausgeprägt ist als für FFM-02. Insgesamt zeigen die Widerstandsbeiwerte eine näherungsweise symmetrische Verteilung um  $\Phi = 90^\circ$ .

Um die Widerstandskräfte bei den verschiedenen Anströmrichtungen  $\Phi$  untereinander vergleichen zu können, wurde alternativ für alle Winkel  $\Phi$  die Bezugsfläche  $A_{\text{ref}}(\Phi = 0^\circ)$  verwendet. Die derart ermittelten  $C_w$ -Werte sind in Abb. 6 dargestellt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die maximalen Widerstandskräfte bei seitlicher Anströmung im Winkelsektor  $\Phi = 90^\circ \pm 30^\circ$  auftreten. Die minimalen Widerstandskräfte sind bei Rückenwind ( $\Phi = 180^\circ$ ) vorhanden. Dies wird auf die insgesamt konvexe Oberkörperform des Personenmodells und somit auf ein stromlinienförmigeres Fahrradfahrermodell bei dieser Anströmrichtung zurückgeführt. Die Bandbreite der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der Anströmrichtung  $\Phi$  variiert stark mit dem Fahrradfahrermodell. Sie ist am deutlichsten ausgeprägt für das Fahrradfahrermodell FFM-01 an dem die maximale Widerstandskraft bei  $\Phi = 90^\circ$  um den Faktor 2.6 größer ist als die minimale Widerstandskraft bei  $\Phi = 180^\circ$ . Bei den Fahrradfahrermodellen FFM-02 und FFM-03 fällt die Bandbreite mit einem Faktor von 1.9 geringer aus. Dieser Unterschied in den Bandbreiten kann in der vergleichsweise stromlinienförmigeren Haltung des Personenmodells bei FFM-01 (Rennrad) im Gegensatz zu den mehr aufrecht sitzenden Haltungen bei FFM-02 und FFM-03 (beides Mountainbikes) bei ausgeprägt vorderseitigem bzw. rückseitigem Wind begründet liegen, siehe Fotos in Tab. 1 und Abb. 3. Wie auch schon bei den Widerstandsbeiwerten  $C_w(\Phi)$  in Abb. 5 festgestellt, weisen die mit  $A_{\text{ref}} = A_{\text{ref}}(\Phi = 0^\circ)$  berechneten Widerstandsbeiwerte  $C_w(\Phi)$  und somit auch die Widerstandskräfte  $F_w(\Phi)$  eine insgesamt näherungsweise symmetrische Verteilung um  $\Phi = 90^\circ$  auf.

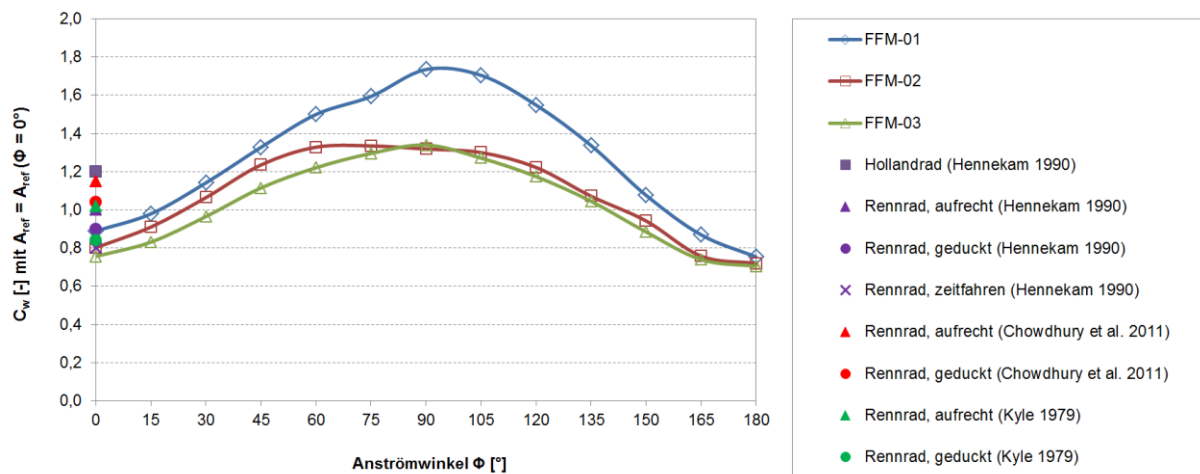


Abb. 6: Widerstandsbeiwerte  $C_w$  der kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodelle FFM in Abhängigkeit der Anströmrichtung  $\Phi$  bei Bezugsfläche  $A_{\text{ref}}(\Phi = 0^\circ)$  sowie von naturmaßstäblichen Fahrradfahrern.

Abschließend werden die Messergebnisse noch in Form der Drag Area  $C_w \cdot A$  aufgetragen, siehe Abb. 7. Hierzu wurde die Bezugsfläche  $A_{\text{ref}} = A_{\text{ref}}(\Phi)$  entsprechend folgender Formel

$$A_{\text{ref,Naturmaßstab}} = \frac{A_{\text{ref,Modellmaßstab}}}{M^2} \quad (4)$$

in den Naturmaßstab übertragen, um einen direkten Vergleich mit den Messergebnissen von Hennekam 1990 und Fintelman et al. 2014 zu ermöglichen. Der Vergleich offenbart, dass die an den Fahrradfahrermodellen im Windkanal ermittelten Werte für die Drag Area um etwa

den Betrag  $C_w \cdot A = 0.30 \dots 0.40$  über denen von Fintelman et al. 2014 liegen und auch sonst üblicherweise größer als die Werte von Hennekam 1990 sind. Lediglich für die Drag Area ermittelt für eine Person auf einem Hollandrad ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Diese Abweichungen, insbesondere jene zu Fintelman et al. 2014, werden Unterschieden in den Staturen der Personenmodelle der Windkanaluntersuchungen und denen der tatsächlichen Fahrradfahrer bzw. der lebensgroßen Dummies zugeordnet. Die Untersuchungen von Fintelman et al. 2014 wurden an lebensgroßen Dummies von Profirennradfahrern von schlanker und schmächtiger Statur durchgeführt, wohingegen für die kleinmaßstäblichen Windkanaluntersuchungen Personenmodelle von kräftiger Statur eingesetzt wurden (Abb. 3). Trotz dieser Unterschiede weisen die Drag Area Verläufe  $C_w \cdot A(\Phi)$  qualitative Übereinstimmungen im Bereich  $0^\circ < \Phi < 90^\circ$  auf. Die Drag Area Werte sind am niedrigsten bei Frontalanströmung,  $\Phi = 0^\circ$ , und am größten bei seitlicher Anströmung,  $\Phi = 90^\circ$ . Dazwischen, bei einem Winkel von  $\Phi = 45^\circ$ , weisen die Verläufe einen Wendepunkt auf. Die Windkanaluntersuchungen zeigen eine näherungsweise symmetrische Verteilung der Drag Area Werte um  $\Phi = 90^\circ$  und weiterhin, dass die minimalen  $C_w \cdot A$ -Werte bei Rückenwind,  $\Phi = 180^\circ$ , auftreten.

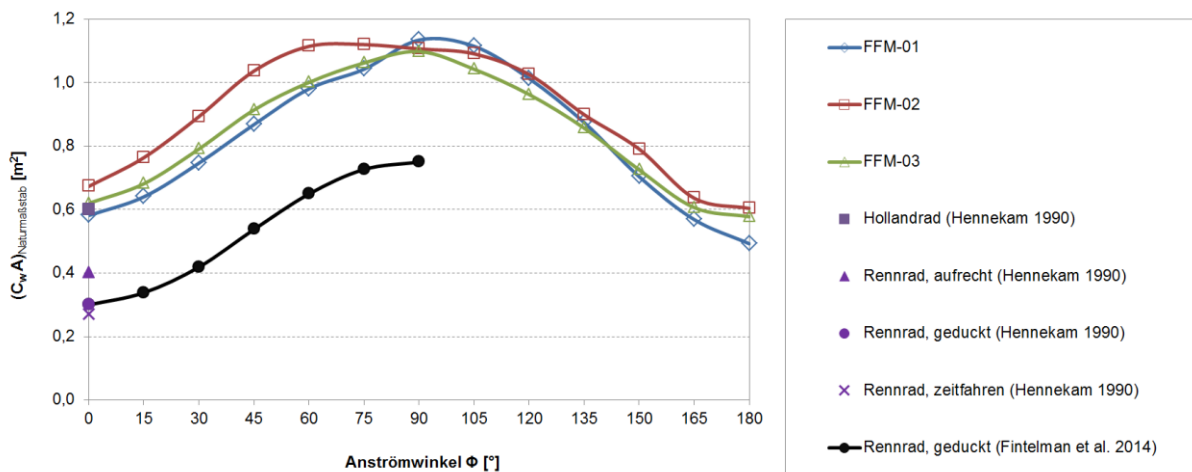


Abb. 7: Drag Area  $C_w \cdot A$  der kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodelle FFM in Abhängigkeit von der Anströmungsrichtung  $\Phi$  und Vergleich mit naturmaßstäblichen Messungen.

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Untersuchungen erlauben folgende Zusammenfassung und Schlussfolgerungen:

- Eine Unabhängigkeit des Widerstandsbeiwertes  $C_w$  von der Reynoldszahl kann für die Modelluntersuchungen ab  $Re_{FFM,crit} \geq 150000$  festgestellt werden. Die Reynoldszahl ist hierbei mit der Geschwindigkeit der ungestörten, uniformen Anströmung  $U$  und der Höhe  $h_{FFM}$  des Fahrradfahrermodells (Distanz zwischen Boden und Kopfoberkante) zu bilden. Für seitliche Anströmungsrichtungen im Winkelsektor  $\Phi = 90^\circ \pm 45^\circ$  tritt eine Reynoldszahlunabhängigkeit auch schon bei kleineren Grenzwerten ein. Diese Feststellung erlaubt die Folgerung, dass es prinzipiell möglich sein kann, Widerstandskräfte bzw. -beiwerte an kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen zu bestimmen.
- Die in den Windkanaluntersuchungen an den kleinmaßstäblichen Fahrradfahrermodellen ermittelten  $C_w$ -Werte bei Frontalanströmung ( $\Phi = 0^\circ$ ) liegen unterhalb des Durchschnittswertes von Versuchen an tatsächlichen Fahrradfahrern bzw. an lebensgroßen Dummies. Es besteht jedoch eine Übereinstimmung mit den niedrigsten in den naturmaßstäblichen

Messungen ermittelten  $C_w$ -Werten. Aufgrund dieser Übereinstimmung werden auch die an den kleinmaßstäblichen Modellen bestimmten  $C_w$ -Werte für Anströmungsrichtungen abweichend von  $\Phi = 0^\circ$  als realistisch und aussagekräftig eingestuft.

- Die  $C_w$ -Werte von Fahrradfahrern sind, sofern sie mit der anströmrichtungsabhängigen Bezugsfläche  $A_{\text{ref}}(\Phi)$  berechnet werden, bei seitlicher Anströmung ( $\Phi = 75^\circ \dots 120^\circ$ ) am größten und bei leicht vorderseitig-schräger Anströmung ( $\Phi = 15^\circ \dots 30^\circ$ ) sowie bei leicht rückseitig-schräger Anströmung ( $\Phi = 165^\circ$ ) am geringsten. Die minimalen  $C_w$ -Werte sind bei einem Winkel von  $\Phi = 165^\circ$  aufgetreten.
- Die Widerstandskräfte  $F_w$  und die Drag Area  $C_w \cdot A$  sind bei seitlicher Anströmung im Winkelsektor  $\Phi = 90^\circ \pm 30^\circ$  maximal. Die minimalen Werte für  $F_w$  und  $C_w \cdot A$  sind bei rückseitiger Anströmung ( $\Phi = 180^\circ$ ) festgestellt worden.

## Dankesworte

Die Autoren möchten sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung im Rahmen des Forschungsvorhabens RU 345/32-3 bedanken.

## Literatur

**Åström, K.J., Klein, R.E., Lennartsson, A., 2005:** "Bicycle dynamics and control: Adapted bicycles for education and research", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 25, No. 4, pp. 26-47

**Chowdhury, H., Alam, F., Khan, I., 2011:** "An experimental study of bicycle aerodynamics", Int. J. Mechanical and Materials Engineering (IJMME), Vol. 6, No. 2, pp. 269-274

**Crouch, T.N., Burton, D., LaBry, Z.A., Blair, K.B., 2017:** "Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics", Sports Engineering, Vol. 20, pp. 81-110

**Fintelman, D.M., Sterling, M., Hemidab, H., Li, F. X., 2014:** "The effect of crosswinds on cyclists: an experimental study", Procedia Engineering, Vol. 72, pp. 720-725

**Hennekam, W., 1990:** "The speed of a cyclist", Physics Education, Vol. 25, pp. 141-146

**Kyle, C.R., 1979:** "Reduction of Wind Resistance and Power Output of Racing Cyclists and Runners Travelling in Groups", Ergonomics, Vol. 22, No. 4, pp. 387-397

**Lukes, R.A., Chin, S.B., Haake, S.J., 2005:** "The understanding and development of cycling aerodynamics", Sports Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 59-74