

Kontakt

Falk Klinge (*f.klinge@ostfalia.de*)

Jan Velten (*janvelten@hotmail.de*)



Ostfalia

Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Wolfenbüttel

Luftwiderstandsmessung verschiedener Velomobile im H.-U.-Meier-Windkanal

FAKULTÄT MASCHINENBAU

INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND ANGEWANDTEN MASCHINENBAU (IKAM)

Jan Velten, Niklas Ojemann, Aaron Jerschke, Sebastian Bruns, Matthias Günther, Benedikt Leonhardt, Jannes Haßelmann, Falk Klinge

Wolfenbüttel, den 02.06.2022

Abstract

This report is about the measurement of aerodynamic drag of multiple velomobiles (DF, Alpha 7, Hilgo, Milan GT, Milan SL, Alvaj and Quattrovelo). The objective was to provide comparability across the different velomobiles regarding their flow behaviour. First the test vehicles are introduced and their projection areas are photographically measured. Then the measurement setup is presented and explained. Finally we take a look at the results. Here the c_dA -values of the vehicles are compared primarily, while statements about the c_d -values are possible due to the previous measurement of the projection areas.

In the comparison of the c_dA -values Milan SL, Alvaj, Milan GT and Alpha 7 (with wheelhouse covers) perform the best. The order regarding c_d -values is: Milan GT, Milan SL, Alvaj and Alpha 7 (with wheelhouse covers). Here the different vehicle configurations have to be considered (see table 1 and 2).

Kurzfassung

Dieser Bericht befasst sich mit der Luftwiderstandsmessung mehrerer Velomobile (DF, Alpha 7, Hilgo, Milan GT, Milan SL, Alvaj und Quat-

trovelo). Ziel war hierbei eine Vergleichbarkeit der Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Strömungswiderstände herzustellen. Nach einer Vorstellung der Fahrzeuge und der fotografischen Bestimmung ihrer Projektionsfläche, folgt eine Vorstellung des Messaufbaus. Anschließend werden die Ergebnisse betrachtet. Hierbei werden primär die c_wA -Werte der Fahrzeuge miteinander verglichen. Durch die zuvor bestimmten Projektionsflächen sind jedoch auch Aussagen über die c_w -Werte möglich.

Im c_wA -Vergleich belegen Milan SL, Alvaj, Milan GT und Alpha 7 (mit Radhausabdeckungen) die vorderen vier Plätze. Die Reihenfolge im c_w -Wert-Vergleich vom kleineren zum größeren Wert ist: Milan GT, Milan SL, Alvaj und Alpha 7 (mit Radhausabdeckungen). Hierbei sind jedoch unbedingt die unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen (siehe Tabelle 1) zu beachten.

1 Zielsetzung

Ziel der Messung ist die Vergleichbarkeit der Güte der Formgebung ausgewählter Velomobile hinsichtlich ihres Strömungswiderstands bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. Hierbei werden realitätsnahe Geschwindigkeiten von ca. 38 - 71 km/h untersucht.

2 Fahrzeuge

Nachfolgend werden die untersuchten Fahrzeuge und Fahrzeugkonfigurationen vorgestellt. Außerdem wird die Bestimmung der Projektionsfläche der Fahrzeuge erläutert. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt.

2.1 Fahrzeugvorstellung

DF. Das DF ist ein von **Daniel Fenn** entworfenes Velomobil der Firma Intercitybike aus den Niederlanden mit seitlich offenen Radhäusern. Das Fahrzeug wird von der Firma Velomobilworld in Rumänien hergestellt. Es wird mit zwei Spiegeln (Zefal Spin) und offenen Radhäusern untersucht. Einmal mit Schaumdeckel und Kopfersatz (A) und einmal mit Kopfhaube (B)

Alpha 7. Das Alpha 7 ist ein ebenfalls von Daniel Fenn entwickeltes Velomobil mit seitlich offenen Radhäusern. Auch dieses Velomobil wird durch Velomobilworld in Rumänien produziert. Daniel Fenn ist hierbei allerdings direkter Lizenzgeber. Das Alpha 7 wird in drei Konfigurationen untersucht. Zunächst wird es mit einem Spiegel (Zefal Spin) und ohne Kopfhaube (A) bzw. mit Kopfhaube (B) untersucht. Anschließend wird ein Alpha 7 mit zwei Spiegeln (Zefal Spin) sowie Kopfhaube und Radhausabdeckungen¹ untersucht.

Hilgo. Das Hilgo ist ein Velomobil mit offenen Radhäusern der Firma Drymer aus der Niederlande. Es wird in zwei Konfigurationen untersucht - mit zwei Spiegeln (Zefal Spin) sowie ohne (A) und mit Schaumdeckel (B) zum Verschließen der Einstiegsöffnung. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Fahrzeugen sind am Hilgo im Frontbereich LED Streifen angebracht, die möglicherweise die Umströmung (negativ) beeinflussen.

Milan GT. Der Milan GT (MK1) wurde von der Räderwerk GmbH in Niedersachsen entwickelt und wird mittlerweile in Rumänien von der Firma Velomobilworld hergestellt. Er wird ohne Spiegel und Scheinwerferlöcher mit „Alltags“-Kopfhaube untersucht.

Milan SL. Der Milan SL (MK4 bzw. MK6) wurde ebenfalls von der Räderwerk GmbH in Niedersachsen entwickelt und kann als kleine Schwester oder kleiner Bruder des Milan GT verstanden werden. Er weist eine gegenüber dem Milan GT deutlich reduzierte Querschnittsfläche auf. Es wurden verschiedene Konfigurationen untersucht. Zunächst wird ein Milan SL MK4 mit einem Spiegel und „Alltags“-Kopfhaube untersucht. Anschließend wird ein Milan SL MK6 ohne Spiegel und Scheinwerferlöcher sowie mit „Battlemountain“-Kopfhaube untersucht.

Alvaj. Beim Alvaj handelt es sich um einen Eigenbau. Er wird mit der (ungefähr passenden) Kopfhaube des Alpha 7 untersucht.

Quattrovelo. Das Quattrovelo ist ein Velomobil des Herstellers velomobielenl aus der Niederlande und in diesem Vergleich das einzige vierrädrige Fahrzeug. Es wird mit zwei Spiegeln, ohne Wartungsdeckel an der Unterseite und je einmal ohne (A) und mit Schaumdeckel (B) untersucht.

2.2 Bestimmung der Projektionsfläche

Um aus den Messungen Rückschlüsse auf den Luftwiderstandsbeiwert c_w ziehen zu können, wird die Projektionsfläche der Fahrzeuge bestimmt. Im Gegensatz zum $c_w A$ -Wert ist der c_w kein absolutes Maß für den Luftwiderstand des jeweiligen Fahrzeuges, sondern ein relatives, von der Größe des untersuchten Objektes unabhängiges Maß. Zur Bestimmung der Projektionsfläche werden die untersuchten Velomobile vor einem neutralen, gut vom Fahrzeug abgrenzbaren Hintergrund platziert und fotografiert. Um die perspektivische Verzerrung der Projektionsfläche so gering wie möglich zu halten, wird eine möglichst große Distanz zum Fahrzeug eingenommen. Die Kamera wird ca. 36 Meter vor und in Höhe der Mitte des Fahrzeuges auf einem Stativ positioniert (siehe Abbildung 2). Es wird sichergestellt, dass das Fahrzeug in einer Flucht zur Kamera steht.

Das aufgenommene Bild wird in die CAD-Software Autodesk Fusion 360 eingefügt und anhand der Spurbreite auf die reale Größe skaliert. Anschließend wird die Kontur des Fahrzeuges skizziert und dessen Flächeninhalt bestimmt, siehe Abbildung 1.

¹Gemeint sind Abdeckungen „Hosen“, die die sonst seitlich offenen Radhäuser abdecken.

Fahrzeug	Abk.	Projektionsfläche	Konfiguration
DF	(A)	$0,408 \pm 0,004 \text{ m}^2$	2 x Spiegel, Schaumdeckel
	(B)	$0,408 \pm 0,004 \text{ m}^2*$	2 x Spiegel, Kopfhaube
Alpha 7	(A)	$0,412 \pm 0,004 \text{ m}^2$	2 x Spiegel, offen
	(B)	$0,412 \pm 0,004 \text{ m}^2*$	2 x Spiegel, Kopfhaube
	(C)	$0,473 \pm 0,005 \text{ m}^2$	2 x Spiegel, Kopfhaube, Radhausabdeckungen
Hilgo	(A)	$0,437 \pm 0,004 \text{ m}^2$	2 x Spiegel, offen
	(B)	$0,437 \pm 0,004 \text{ m}^2*$	2 x Spiegel, Schaumdeckel
Milan GT	-	$0,450 \pm 0,005 \text{ m}^2$	ohne Spiegel, ohne Scheinwerferlöcher, Alltagskopfhaube
Milan SL MK4	-	$0,393 \pm 0,004 \text{ m}^2$	ohne Spiegel, Alltagskopfhaube
Milan SL MK6	-	$0,393 \pm 0,004 \text{ m}^2*$	ohne Spiegel, ohne Scheinwerferlöcher Battlemountainhaube
Alvaj	-	$0,427 \pm 0,004 \text{ m}^2$	ohne Spiegel, ohne Scheinwerferlöcher, A7-Haube
Quattrovelo	(A)	$0,472 \pm 0,005 \text{ m}^2$	2 x Spiegel, ohne Wartungsdeckel, offen
	(B)	$0,472 \pm 0,005 \text{ m}^2*$	2 x Spiegel, ohne Wartungsdeckel, Schaumdeckel

Tabelle 1: Übersicht zu untersuchten Fahrzeugkonfigurationen. *: Flächen wurden nicht explizit für diese Konfiguration bestimmt. Es werden die Werte für eine vergleichbare Konfiguration angegeben.

Für den Milan GT liegt ein hochauflösender 3D-Scan vor. Durch Angleich der fotografisch ermittelten Fläche mit der Fläche des 3D-Scans lässt sich, unter der Annahme der Scan entspricht der Realität, der Fehler beim Milan GT bestimmen. Die fotografisch bestimmte Fläche ist 0,8 % größer, als die des 3D-Scans. Auf Grundlage dieser Betrachtung wird der Fehler bei der Flächenbestimmung auf $\pm 1 \%$ geschätzt. Die bestimmten Flächen sind in Tabelle 1 dargestellt.



Abbildung 1: Flächenbestimmung im CAD-Programm. Die vermessene Kontur ist blau dargestellt.

Velomobil



Abbildung 2: Aufbau zur Bestimmung der Projektionsfläche. Im Hintergrund ist das zu fotografierende Velomobil zu sehen. Die Kamera befindet sich ca. 36 m vor dem Fahrzeug.

3 Messaufbau & Messablauf

Der Windkanal. Die Messungen wurden am H.-U.-Meier-Windkanal der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfenbüttel durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Windkanal Göttinger Bauart mit einer Messstreckelänge von 3,3 m bei einem Querschnitt von 2 x 2 m und einem Kontraktionsverhältnis von 4:1. Die Antriebsleistung von 315 kW ermöglicht bei leerem Windkanal eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 120 km/h bzw. eine Reynoldszahl von 6 Millionen. Ein 3D-Modell des Windkanals ist in Abbildung 3 dargestellt.

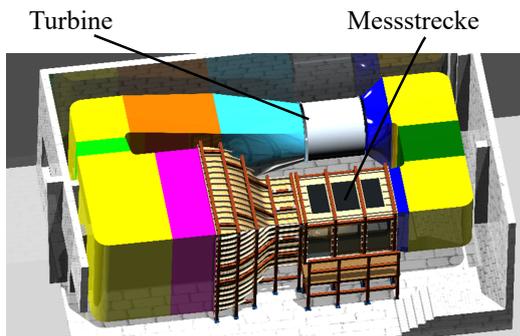


Abbildung 3: Der H.-U.-Meier-Windkanal der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften am IKAM in Wolfenbüttel.

Messaufbau. Abbildung 4 zeigt vereinfacht den Messaufbau der Velomobile. Mit den beiden Prandtlrohren wird der dynamische Druck gemessen, womit sich die Strömungsgeschwindigkeiten im Kanal berechnen lässt. Die tropfenförmigen Klötze unter den Reifen des Velomobils dienen dazu, die Karosserie außerhalb der Grenzschicht am Boden des Windkanals zu platzieren. Die Messung der Widerstandskraft geschieht über eine Kraftmessdose unterhalb des Windkanals. Dafür wird ein Flacheisen unter das Velomobil geklebt und durch eine Öffnung im Boden des Windkanals geführt. Über eine Feder wird eine Vorspannkraft auf die Kraftmessdose aufgebracht. Außerdem befinden sich auf dem Boden des Windkanals aufgeklebte Linien in Strömungsrichtung. Diese sind notwendig, um die verschiedenen Velomobile identisch und exakt in Strömungsrichtung auszurichten und so vergleichbare Messdaten aufnehmen zu

können.

Das Flacheisen (30 x 4 mm, aerodynamisch geformt) bewirkt eine Strömungsbeeinflussung am Hinterrad, die als nicht signifikant eingeschätzt wird und deshalb vernachlässigt wird.

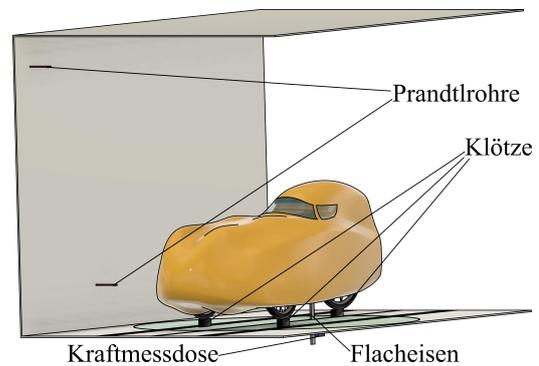


Abbildung 4: Velomobil im Windkanal.

Messdurchführung. Die Messungen werden bei Drehzahlen (Strömungsgeschwindigkeiten) von 343 U/min (ca. 38 km/h), 460,6 U/min (ca. 53 km/h), 558,6 U/min (ca. 65 km/h) und 607,6 U/min (ca. 71 km/h) durchgeführt. Diese Geschwindigkeiten decken bei wenigen Messungen eine große Bandbreite ab. Die Reihenfolge der Messgeschwindigkeit wird für jedes Fahrzeug zufällig ausgewählt, um systematische Fehler zu vermeiden. Das Einschalten des Windkanals erfolgt zeitgleich mit dem Start des Messprogramms, um auch die Hochlaufphase betrachten zu können. Beim Start des Windkanals wird die benötigte Drehzahl eingestellt. Nach ca. zwei Minuten wird die Messung beendet und der Windkanal ausgeschaltet. Die Messwerte werden auf Plausibilität geprüft. Dabei werden einige Messungen zufällig oder bei starken Ausreißern auch gezielt wiederholt, um sicherzustellen, dass diese Messwerte reproduzierbar sind.

Die aufgenommenen Werte werden in Excel ausgegeben und mithilfe verschiedener VBA² und Pythonskripte ausgewertet. Diese dienen u.a. dazu, aus den Messwerten Strömungsgeschwindigkeiten, Kraft- und Druckmittelwerte zu bestimmen.

²Visual Basic for Applications (VBA), in Microsoft Office integrierte Programmiersprache.

4 Ergebnisse

Aus den gemessenen Größen - der Widerstandskraft und dem dynamischen Druck - wird der $c_W A$ -Wert als Maß für den Luftwiderstand des jeweiligen Fahrzeuges bestimmt. Der häufig angegebene c_W -Wert kann als Maß für den Luftwiderstand eines Objektes unabhängig von dessen Projektionsfläche (ermittelt in Krafrichtung) verstanden werden. Um die Luftwiderstände mehrerer Velomobile vergleichbar zu machen, wird nachfolgend vorrangig der $c_W A$ -Wert betrachtet. Dieser kann als Maß für den gesamten Luftwiderstand eines Objektes gesehen werden. [3]

$$c_W A = \frac{F_W}{\rho/2 \cdot v^2} = \frac{F_W}{p_{dyn}} \quad (1)$$

In Abbildung 7 und Tabelle 2 ist eine Übersicht der Messergebnisse zu finden.

Nachfolgend wird zunächst die Bestimmung des Messfehlers erläutert. Anschließend werden die Erkenntnisse im Einzelnen erläutert und diskutiert.

4.1 Fehlerbetrachtung

Wie jede Messung ist auch die Messung des Luftwiderstandes der Velomobile fehlerbehaftet. Grundsätzlich gibt es drei Messfehler bzw. Schwankungen in den Messwerten, die berücksichtigt werden:

- Messunsicherheiten, die aus Ungenauigkeiten der eingesetzten Messgeräte resultieren
- Schwankungen der einzelnen Messwerte innerhalb einer Messreihe
- Schwankungen der Messreihen-Mittelwerte zwischen Messreihenwiederholungen

Unsicherheit aufgrund ungenauer Messgeräte.

Der $c_W A$ -Wert ist eine aus dem dynamischen Druck (p_{dyn}) und der Widerstandskraft (F_W) berechnete Größe. Der Fehler des jeweiligen Messergebnisses $c_W A = f(p_{dyn}, F_W)$ lässt sich über das totale Differenzial unter Beachtung der einzelnen Fehleranteile der Messgrößen F_W (Luftwiderstandskraft) und p_{dyn} (dynamischer Druck) wie folgt berechnen: [5]:

$$\Delta(c_W A) = \frac{\partial(c_W A)}{\partial p_{dyn}} \Delta p_{dyn} + \frac{\partial(c_W A)}{\partial F_W} \Delta F_W \quad (2)$$

Der sich für jeden Messpunkt einer Messreihe ergebende Fehler ist in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt.

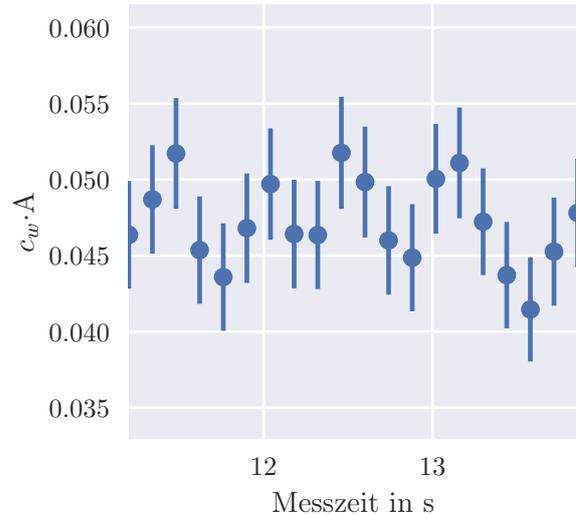


Abbildung 5: Messunsicherheit der einzelnen $c_W A$ -Messwerte aufgrund der Ungenauigkeiten der verwendeten Messgeräte.

Unsicherheit aufgrund von Schwankungen innerhalb einer Messreihe.

Während der Messreihen ist es zu Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit sowie des F_W -Wertes gekommen. Deshalb wird neben dem Mittelwert der Messreihe auch jeweils die Standardabweichung bestimmt, mithilfe derer sich wiederum Erwartungsbereiche angeben lassen, um die Streuung der Messwerte zu charakterisieren. In Abbildung 6 ist der Erwartungsbereich für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % markiert (t-Verteilung nach [1]).

Unsicherheit aufgrund von Schwankungen der $c_W A$ -Mittelwerte zwischen Messreihenwiederholungen.

Auch die Mittelwerte der Messreihen gleicher Versuchsanordnungen weisen eine Schwankungsbreite auf. Insgesamt sind 25 Messungen ein oder mehrfach wiederholt worden. Die Wiederholgenauigkeit lässt sich damit auf ca. $\pm 4\%$ schätzen und ist in Abbildung 6 dargestellt. Für eine genauere Aussage müssten diesbezüglich zielgerichtete Untersuchungen stattfinden.

Unsicherheit des c_W -Wertes. Wie bereits erwähnt, werden hier insbesondere die $c_W A$ -Werte

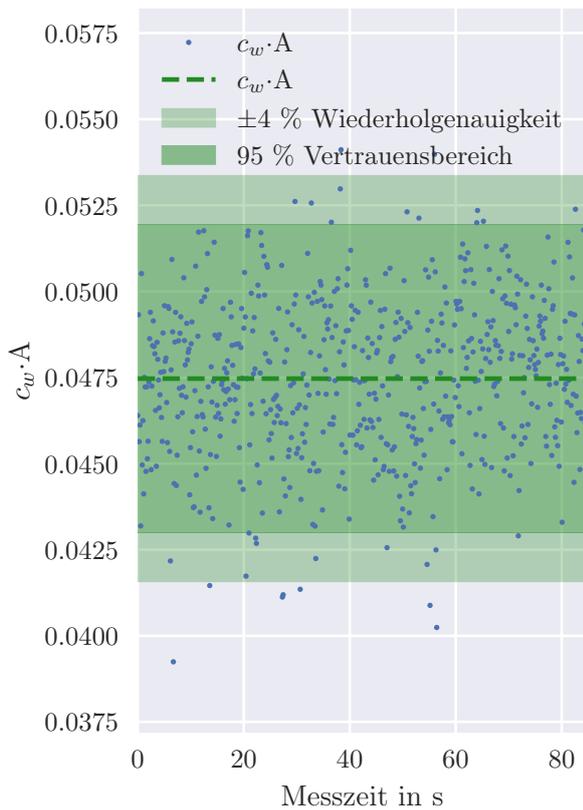


Abbildung 6: Schwankungen des ermittelten $c_w A$ - Wertes innerhalb einer Messreihe sowie Schwankung der Mittelwerte verschiedener Messreihen.

der unterschiedlichen Fahrzeuge ausgewertet. Die Auswertung des c_w -Wertes führt einerseits zu einer vergrößerten Unsicherheit, da die unter Abschnitt 2.2 erläuterten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Projektionsfläche berücksichtigt werden müssen.

4.2 Ergebnisbeschreibung

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 und Tabelle 2 dargestellt.

Betrachtung der $c_w A$ -Werte. Es ist zu erkennen, dass der Milan SL, Alvaj und Milan GT die Plätze eins bis vier belegen. Darauf folgt das Alpha 7 (C) mit Haube und Radhausabdeckungen, das DF, das Hilgo und auf den hinteren beiden Plätzen befindet sich das Quattrovelo als einziges vierrädriges Fahrzeug in diesem Vergleich. Hierbei ist wiederum zu beachten, dass das Quattrovelo

ohne Wartungsdeckel an der Unterseite gemessen worden ist.

Werden die vorderen drei Plätze betrachtet, so ist es wichtig zu berücksichtigen, dass diese Fahrzeuge weder mit Scheinwerferöffnungen noch mit Spiegeln ausgestattet waren. Das Alpha 7 (C) mit Haube, Radhausabdeckungen und zwei Spiegeln (vergleiche Abschnitt 2) schneidet im Mittel nur wenig schlechter ab, als ein Milan SL MK4 mit Alltagshaube (und Scheinwerferöffnungen) ohne Spiegel.

Bedeutung und Betrachtung der c_w -Werte.

Der c_w -Wert ist im Gegensatz zum $c_w A$ -Wert bei gleichen Strömungsverhältnissen (gleiche Reynoldszahl) unabhängig von der Projektionsfläche des betrachteten Körpers. Er beschreibt also, wie strömungsgünstig eine bestimmte Form ist. Um ihn zu berechnen, wird der Quotient aus $c_w A$ -Wert (siehe Tabelle 2) und Stirnfläche (siehe Tabelle 1) gebildet.

$$c_w = \frac{c_w A}{A} \quad (3)$$

Betrachtet man die untersuchten Fahrzeuge, so zeigt sich dass der Milan GT mit ca. 0,129 - 0,102 (geschwindigkeitsabhängig) den besten c_w -Wert aufweist. Ferner zeigt sich, dass das Alpha 7 (C) einen minimal besseren c_w -Wert aufweist, als der ähnlich konfigurierte Milan SL MK4.

Geschwindigkeitsabhängigkeit des $c_w A$ -Wertes.

Bei fast allen Fahrzeugen ist außerdem festzustellen, dass der $c_w A$ bzw. c_w -Wert mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, siehe Abbildung 7. Dies führt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 71 km/h zu einer Ersparnis von über 30 W (ca. 10 %) gegenüber einem als konstant angenommenen $c_w A$ -Wert, siehe Abbildung 8.

Lediglich Hilgo und Quattrovelo zeigen dieses Verhalten wenig bis gar nicht.

In Diagramm 10 sind die Luftwiderstandsleistungen der einzelnen Velomobile in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die durchgezogenen Linien entsprechen der mittleren Leistung und die getönten Bereiche der jeweiligen Unsicherheit, die aus der Messung des $c_w A$ -Wertes resultiert. Zwischen den einzelnen Messpunkten der $c_w A$ -Werte und den vorliegenden Fehlern wur-

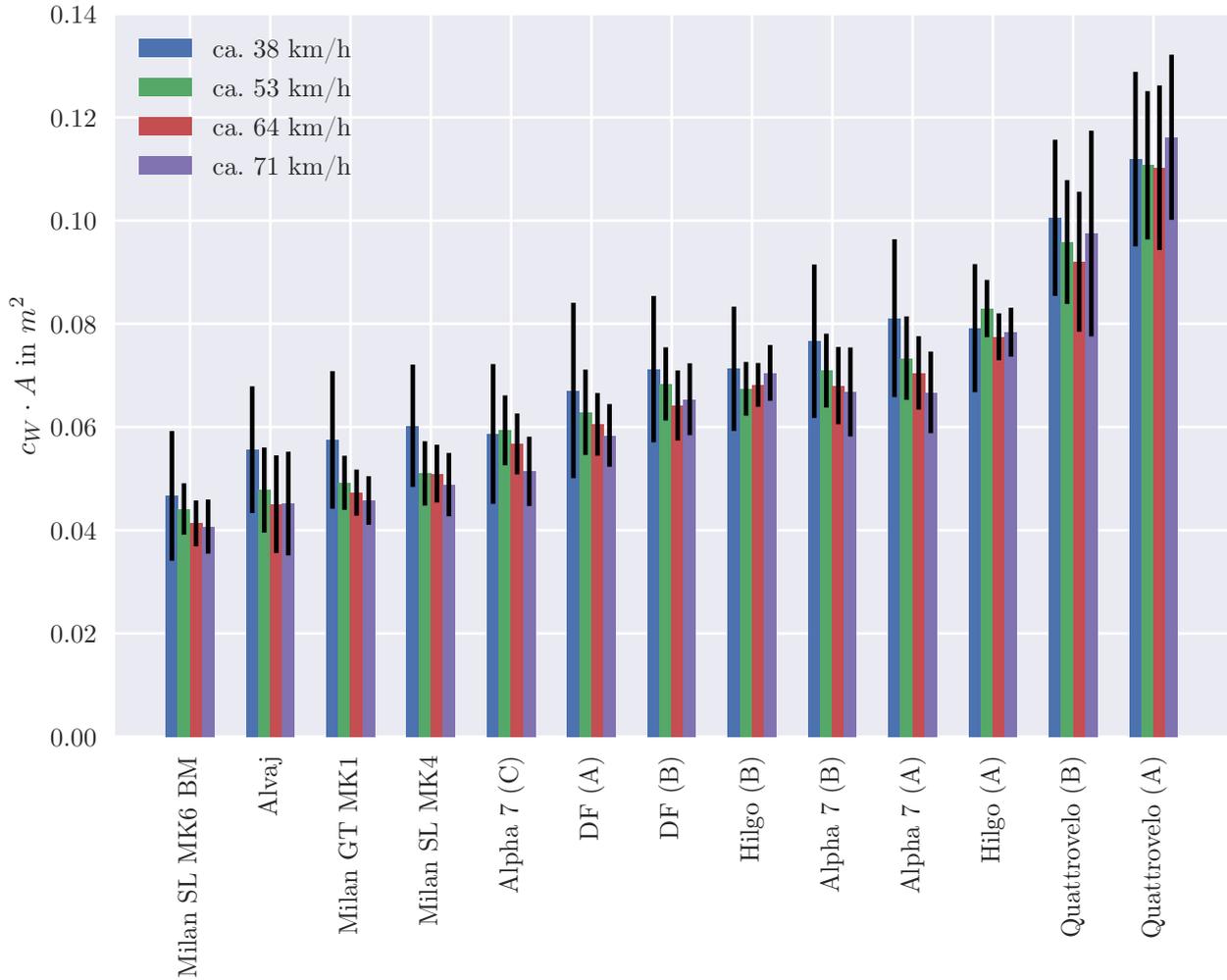


Abbildung 7: Übersicht der ermittelten $c_W A$ – Werte in Abhängigkeit von Fahrzeug und Strömungsgeschwindigkeit

Tabelle 2: Ermittelte $c_W A$ – Werte nach Fahrzeug und Strömungsgeschwindigkeit.

Fahrzeugdaten		$c_W A$ in m^2			
Konfiguration	A	ca. 38 km/h	ca. 53 km/h	ca. 64 km/h	ca. 71 km/h
Milan SL MK6 BM	0,393	0.047 ± 0.0126	0.044 ± 0.005	0.041 ± 0.0044	0.041 ± 0.0052
Alvaj	0,427	0.056 ± 0.0123	0.048 ± 0.0082	0.045 ± 0.0095	0.045 ± 0.0100
Milan GT MK1	0,450	0.058 ± 0.0133	0.049 ± 0.0052	0.047 ± 0.0045	0.046 ± 0.0047
Milan SL MK4	0,393	0.060 ± 0.0119	0.051 ± 0.0062	0.051 ± 0.0056	0.049 ± 0.0061
Alpha 7 (C)	0,412	0.059 ± 0.0135	0.059 ± 0.0068	0.057 ± 0.0059	0.051 ± 0.0067
DF (A)	0,408	0.067 ± 0.0170	0.063 ± 0.0083	0.061 ± 0.0061	0.058 ± 0.0061
Hilgo (B)	0,437	0.071 ± 0.0121	0.067 ± 0.0052	0.068 ± 0.0042	0.070 ± 0.0054
Alpha 7 (B)	0,412	0.077 ± 0.0149	0.071 ± 0.0072	0.068 ± 0.0075	0.067 ± 0.0086
Alpha 7 (A)	0,412	0.081 ± 0.0153	0.073 ± 0.0081	0.070 ± 0.0071	0.067 ± 0.0079
Hilgo (A)	0,437	0.079 ± 0.0124	0.083 ± 0.0056	0.077 ± 0.0045	0.078 ± 0.0047
Quattrovelo (B)	0,472	0.101 ± 0.0151	0.096 ± 0.012	0.092 ± 0.0136	0.097 ± 0.0199
Quattrovelo (A)	0,472	0.112 ± 0.0169	0.111 ± 0.0144	0.110 ± 0.0159	0.116 ± 0.0160

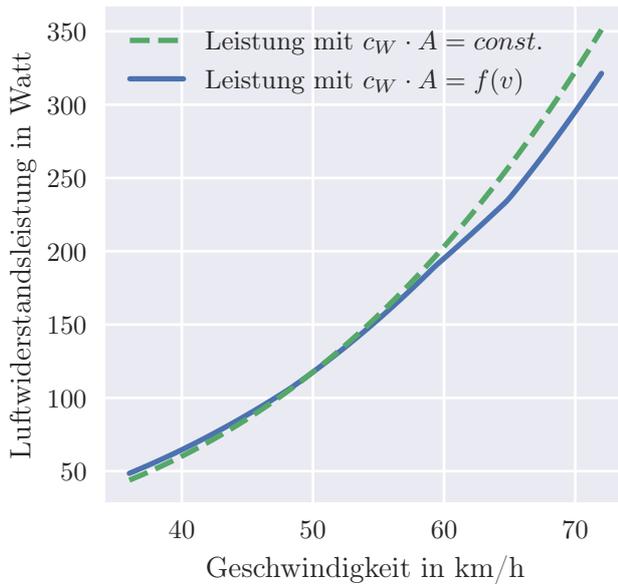


Abbildung 8: Auswirkung des nicht konstanten $c_W A$ – Wertes auf die Luftwiderstandsleistung am Beispiel des Alpha 7 (A).

de linearisiert. Außerhalb des Messbereiches wird der $c_W A$ -Wert als konstant angenommen.

Weiteres. Aus den Messergebnissen ist zu erkennen, dass der Einfluss der vollständig geschlossenen Kopfhaube beim Alpha 7 nur eine geringfügige aerodynamische Verbesserung im Bereich von ca. 4 % gegenüber keiner Kopfhaube (aber mit Kopfersatz, vergleiche Abbildung 9) bewirkt.

Weitere Untersuchungen am Milan GT lassen vermuten, dass auch eine stark verunreinigte Frontpartie des Fahrzeuges lediglich einen geringen Einfluss auf den Luftwiderstand hat. Hierzu ist zu-



Abbildung 9: Als Kopfersatz wurde ein abgeklebter Fahrradhelm genutzt.

nächst der Luftwiderstand des sauberen Fahrzeuges ermittelt worden. Anschließend wurde die „Nase“ des Fahrzeuges mit ca. 25 M5 Muttern beklebt und der Luftwiderstand wurde erneut bestimmt. Die Messung erfolgte bei ca. 38 und ca. 64 km/h. Die ermittelte Differenz zwischen den Mittelwerten der Messungen beträgt lediglich ca. 5 %. Damit liegt die Veränderung des $c_W A$ – Wertes (fast) im Bereich der Messunsicherheit.

4.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Insgesamt haben die ermittelten Werte nur eine begrenzte Gültigkeit. Sie sind lediglich untereinander vergleichbar. Das liegt an mehreren Dingen:

Einerseits liegt das an den stillstehenden Rädern und den fehlenden Vibrationen der Karosserie aufgrund von Unebenheiten des Straßenbelags, andererseits auch an den im Vergleich zur Straße vollkommen anderen Strömungsverhältnissen am Boden der Fahrzeuge bei der Messung im Windkanal. Während sich bei der Fahrt auf der Straße, der Untergrund relativ zum Fahrzeug bewegt, ist dieser im Windkanal stationär. Um im Windkanal realitätsähnliche Strömungsverhältnisse zu erzeugen, wurden die Fahrzeuge deshalb auf Klötzen platziert. Auf diese Art und Weise wird der Einfluss der sich am Windkanalboden ausbildenden Grenzschicht reduziert. Obwohl diese Veränderungen sicherlich zu besseren Ergebnissen beitragen, herrschen im Windkanal und insbesondere am Boden des Fahrzeuges nicht die gleichen Strömungsverhältnisse wie auf der Straße. Auch ist der Einfluss der sich beim Fahren drehenden Räder insbesondere bei Fahrzeugen mit offenen Radkästen als wesentlich einzuschätzen. Dieser Einfluss konnte im Rahmen der Untersuchungen aufgrund des Messaufbaus nicht beachtet werden.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Punkten kommt es bei der Messung der Velomobile im H.-U.-M.-Windkanal zu einem systematischen Fehler, aufgrund der Verkleinerung des Strömungsquerschnitts des Windkanals durch das jeweilige Velomobil (Versperrung). Dies führt zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Fahrzeuges (Stau effekt). Die in diesem Bericht angegebenen $c_W A$ -Werte sind auf Grundlage der Messwerte des vorderen (oberen) Prandtlrohres (siehe Abbildung 3) ermittelt worden und somit tendenziell zu groß. Dies liegt daran, dass der jeweils gemessenen Widerstandskraft ein etwas zu kleiner dynamischer

Druck zugeordnet wird, bzw. die Umströmungsgeschwindigkeit des Velomobils aufgrund der Versperrung der Messstrecke durch das Velomobil etwas zu groß ist. Dieser Effekt verstärkt sich bei Velomobilen mit größerer Querschnittsfläche. Da aber die Flächen der Velomobile sich nur um ca. 17 % (bzw. <2 % Versperrung) unterscheiden und die Veränderung nur einen kleinen Einfluss (<2 %) auf den Gesamtwiderstand hat, wird auf eine Korrektur verzichtet. [2], [4]

Entsprechend sind die ermittelten Widerstandsbeiwerte der Velomobile untereinander durchaus vergleichbar. Die Übertragbarkeit dieser Werte auf die Fahrbedingungen ist aus den oben genannten Gründen nur bedingt gegeben. Anhand der vorliegenden Versperrung von ca. 10 % und den in Fahrzeugnähe gemessenen lässt sich ein Korrekturfaktor gemäß [2] von ca. 15 % ermitteln. Die gemessenen Widerstandsbeiwerte sind also etwa 15 % größer als dies bei einem unendlich großen Messquerschnitt der Fall wäre.

5 Fazit

Eine wesentliche Erkenntnis aus den durchgeführten Versuchen ist, dass der ermittelte c_w und $c_w A$ -Wert bei allen Fahrzeugen mit Ausnahme des Quattrovelo und Hilgo, mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt. Da sich dieses Verhalten bei den allermeisten Messungen gezeigt hat, kann ein Messfehler ausgeschlossen werden. Weitere Versuche sind notwendig, um den Einfluss drehender Räder zu untersuchen.

Insgesamt konnten im Rahmen der durchgeführten Messungen dennoch sinnvolle Vergleichswerte für die Widerstandsbeiwerte der untersuchten Fahrzeuge ermittelt werden. Zusätzlich konnte der systematische Fehler der Messwerte bestimmt werden. Erst dadurch ist ein Vergleich von Werten möglich.

Literatur

- [1] *DIN 1319-3:1996-05, Grundlagen der Messtechnik*. Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/2713411.
- [2] E. Mercker und H. Fiedler. “Blockierungskorrektur für Messungen in Unterschallwindkanälen”. In: (1978), S. 242–248.
- [3] Herbert Oertel. *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012. DOI: 10.1007/978-3-8348-2315-1. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2315-1>.
- [4] G. Schulz. *Anwendungs-Kurzbericht über das Mehrebenen-Wandkorrekturverfahren für Unterschallwindkanäle mit geschlossener Meßstrecke*. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft und Raumfahrt e.V., 1981.
- [5] Hans-Rolf Tränkler und Gerhard Fischerauer. *Das Ingenieurwissen: Messtechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-662-44030-8. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44030-8>.

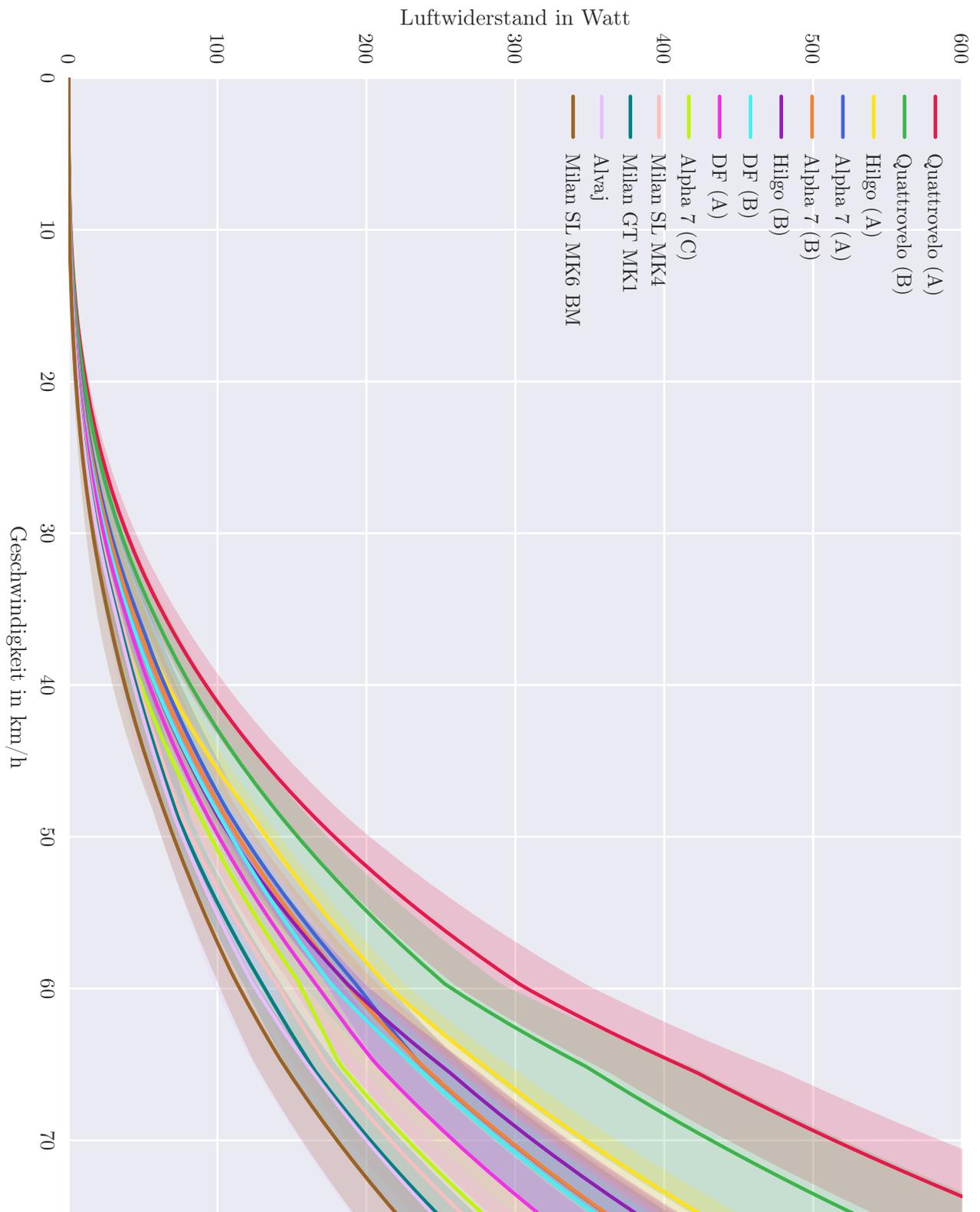


Abbildung 10: Luftwiderstandsleistung über der Strömungsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 4.2).