

Wissenschaftliche Analyse von CdA-Werten bei Rennradfahrern unter verschiedenen Bedingungen und deren Zusammenhang mit Anthropometrie

Einleitung

Der aerodynamische Widerstand ist eine entscheidende Determinante der Leistungsfähigkeit im Radsport, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten auf flachem Terrain. Zentral für das Verständnis und die Optimierung der Aerodynamik ist der CdA-Wert, das Produkt aus dem Luftwiderstandsbeiwert (Cd) und der projizierten Stirnfläche (A) des

Fahrer-Fahrrad-Systems.¹ Der Cd-Wert repräsentiert die aerodynamische Effizienz der Form ("Slipperyess"), während A die dem Luftstrom ausgesetzte Fläche darstellt.¹ Die Minimierung des CdA-Wertes ist von überragender Bedeutung, da sie entweder die benötigte Leistung zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit reduziert oder eine höhere Geschwindigkeit bei gleicher Leistung ermöglicht.¹ Tatsächlich wird das Verhältnis von Leistung zu CdA (Power:CdA) auf flachen Strecken als potenziell wichtiger angesehen als das oft zitierte Verhältnis von Leistung zu Gewicht (Power:Weight).¹

Die Dominanz des Luftwiderstands wird besonders bei Geschwindigkeiten über ca. 40-50 km/h (ca. 11-14 m/s) auf ebener Strecke deutlich, wo er 80% bis über 90% des Gesamtwiderstands ausmachen kann.³ Die zur Überwindung des Luftwiderstands erforderliche Leistung steigt dabei kubisch mit der Geschwindigkeit an¹⁰, was die aerodynamische Optimierung bei Rennen mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten unerlässlich macht. Im Vergleich dazu treten Rollwiderstand und Gravitationskräfte auf flachem Terrain bei hohen Geschwindigkeiten relativ in den Hintergrund⁹, gewinnen jedoch bei Steigungen an Bedeutung.⁸

Ein wesentlicher Aspekt ist, dass der Körper des Fahrers den weitaus größten Teil des aerodynamischen Widerstands verursacht. Wissenschaftliche Quellen beziffern diesen Anteil auf 65% bis 80% des Gesamt-CdA des Fahrer-Fahrrad-Systems.⁶ Das Fahrrad selbst trägt die verbleibenden 20-35% bei.¹² Diese Verteilung unterstreicht die immense Bedeutung der Körperhaltung des Fahrers und der Wahl der Bekleidung für die aerodynamische Gesamtperformance.⁶ Die Tatsache, dass der Luftwiderstand einen so hohen Prozentsatz des Gesamtwiderstands ausmacht und direkt mit der Leistung und Geschwindigkeit korreliert¹¹, etabliert die Minimierung des CdA-Wertes nicht nur als einen von vielen Faktoren, sondern als eine primäre Stellschraube zur Leistungssteigerung im Radsport, insbesondere bei Zeitfahren und auf flachen Etappen.⁸

Messung und Quantifizierung des CdA-Wertes

Zur Bestimmung des CdA-Wertes haben sich in der wissenschaftlichen Forschung und Praxis

verschiedene Methoden etabliert, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen.

- **Windkanaltests:** Diese Methode gilt oft als "Goldstandard" für aerodynamische Messungen im Radsport, da sie eine hochgradig kontrollierte Umgebung bietet, die präzise und wiederholbare Messungen ermöglicht.¹ Im Windkanal werden die auf das Fahrer-Fahrrad-System wirkenden Kräfte bei definierten Windgeschwindigkeiten und Gierwinkeln (Anströmwinkel des Windes) gemessen.¹⁴ Es wurden sogar spezielle Windkanäle für den Radsport entwickelt.¹⁰ Zu den Limitationen gehören die oft statische Natur der Messungen (obwohl Tests mit pedalierenden Fahrern möglich sind, stellen sie eine Herausforderung dar¹⁰), die Vereinfachung der realen, dynamischen Umweltbedingungen sowie die hohen Kosten und die eingeschränkte Zugänglichkeit.⁷
- **Feldtests / On-Bike Systeme:** Diese Methoden zielen darauf ab, den CdA-Wert unter realen Fahrbedingungen zu ermitteln. Sie nutzen typischerweise eine Kombination aus Leistungsmessern (Power Meter), Geschwindigkeitssensoren und Umgebungssensoren, die Luftdruck, Temperatur und relative Windgeschwindigkeit sowie -richtung messen (oft mittels Pitotrohren oder spezialisierten Aerodynamik-Sensoren wie Notio Aerometer, Aerosensor oder Body Rocket).² Mathematische Modelle werden auf die gesammelten Daten angewendet, um den CdA zu berechnen.² Der Vorteil liegt in der Erfassung der realen Fahrdynamik. Die Herausforderung besteht jedoch in der Kontrolle externer Variablen wie Windböen, Verkehr und Straßenoberflächenbeschaffenheit, die die Messgenauigkeit beeinflussen können.²
- **Computational Fluid Dynamics (CFD):** CFD ist ein simulationsbasierter Ansatz, der numerische Methoden verwendet, um die Luftströmung um das Fahrer-Fahrrad-System zu modellieren und daraus den Luftwiderstand vorherzusagen.¹⁰ CFD ist besonders wertvoll als Designwerkzeug, da es detaillierte Einblicke in lokale Druckverteilungen und Strömungsphänomene ermöglicht¹⁴ und das Testen virtueller Prototypen erlaubt, bevor physische Modelle gebaut werden.³⁵ Die Genauigkeit hängt stark von der Qualität des zugrundeliegenden 3D-Modells des Fahrers und des Fahrrads sowie von der Feinheit des Berechnungsnetzes (Mesh) ab.¹² Eine Validierung der CFD-Ergebnisse anhand experimenteller Daten (Windkanal oder Feldtests) ist unerlässlich.¹⁰ Die Erstellung genauer Modelle und die Durchführung der Simulationen können rechenintensiv sein.¹²
- **Schätzmethode:** Einfachere Methoden zur Abschätzung des CdA basieren auf anthropometrischen Daten (Körpergröße, -masse) und digitalen Fotografien zur Bestimmung der Stirnfläche.¹ Diese Ansätze bieten eine geringere Präzision als direkte Messungen, können aber nützlich sein, um grobe Schätzungen zu erhalten oder die Plausibilität von gemessenen Werten zu überprüfen ("Smell Test").³⁹

Die Validität und Reliabilität dieser Methoden sind Gegenstand kontinuierlicher Forschung. Studien haben gezeigt, dass moderne On-Bike-Systeme wie Body Rocket in kontrollierten Umgebungen (z.B. Velodrom) eine hohe Übereinstimmung mit bekannten Widerstandsänderungen (Korrelationskoeffizient $r^2 = 0.99$) und eine hohe Messwiederholgenauigkeit (Intra-Class Correlation Coefficient ICC = 0.99, Variationskoeffizient CV = 1.67%) aufweisen können.¹³ Solche Systeme können auch sehr

kleine CdA-Änderungen (z.B. 0.002 m²) detektieren.¹³ Feldtests mit Leistungsmessern können unter sorgfältig kontrollierten Bedingungen Ergebnisse liefern, die mit Windkanalmessungen vergleichbar sind.¹¹ Ebenso zeigen verfeinerte CFD-Simulationen oft eine gute Übereinstimmung mit Windkanaldaten.¹⁰

Es ist jedoch wichtig, die inhärenten Limitationen jeder Methode zu berücksichtigen.

Windkanaltests vereinfachen die komplexe und dynamische Realität des Fahrens im Freien.⁶

Feldtests leiden unter der Variabilität der Umgebungsbedingungen.² Die Genauigkeit von CFD hängt stark von der Modellierungsqualität ab.¹² Dynamische Manöver wie Sprints sind messtechnisch besonders herausfordernd, selbst im Windkanal, wo höhere Varianzen in den Messwiederholungen beobachtet wurden als bei statischen Zeitfahrpositionen.⁴²

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass die verschiedenen Messmethoden unter idealen, kontrollierten Bedingungen oder nach sorgfältiger Modellverfeinerung zu konvergenten Ergebnissen führen können.¹³ Sobald jedoch die Komplexität der realen Welt (wechselnde Winde, dynamische Bewegungen) ins Spiel kommt, können die Ergebnisse divergieren.² Es gibt daher keine universell überlegene Methode; die Wahl hängt von der spezifischen Fragestellung, den verfügbaren Ressourcen und der erforderlichen Präzision ab. Die Interpretation von CdA-Werten erfordert immer ein Verständnis des Kontexts, in dem sie gemessen wurden.

Einfluss der Körperhaltung auf den CdA-Wert

Die Körperhaltung des Fahrers ist der Faktor mit dem potenziell größten Einfluss auf den aerodynamischen Widerstand, da der Fahrer selbst den Großteil der Stirnfläche und der widerstandserzeugenden Form ausmacht.¹⁰

- **Analyse verschiedener Haltungen:**

Im Straßenradsport lassen sich mehrere grundlegende Haltungen unterscheiden, die sich primär durch die Handposition am Lenker und den daraus resultierenden Oberkörperwinkel definieren:

- **Aufrechte Haltung / Oberlenkerhaltung (Upright/Hoods - HH):** Die Hände befinden sich auf den Brems-/Schaltgriffen (Hoods), der Oberkörper ist relativ aufrecht.¹ Diese Position wird oft beim Klettern, im Peloton oder bei entspannter Fahrt eingenommen.
- **Unterlenkerhaltung (Drops - HD/DB):** Die Hände greifen den unteren Bogen des Rennlenkers (Drops), was zu einem flacheren Oberkörperwinkel führt als in der Hoods-Position.¹ Dies ist eine häufige Rennhaltung. Es kann zwischen einer Standard-Unterlenkerhaltung (HD) und aggressiveren Varianten (DB - Body Dropped, Arme stark angewinkelt) unterschieden werden.¹²
- **Zeitfahrposition (Time Trial - TT):** Eine sehr aggressive Haltung mit tiefem Oberkörper und auf Aerolenker-Extensions abgelegten Unterarmen.¹ Diese Position zielt auf die Minimierung der Stirnfläche und bietet den geringsten Luftwiderstand. Neben diesen Hauptpositionen gibt es spezifische Haltungen für Sprints (sitzend, stehend, stehend-vorgebeugt)²⁷ und Kletterpositionen⁴³, die ebenfalls unterschiedliche aerodynamische Charakteristika aufweisen.

- Typische CdA-Wertebereiche und prozentuale Einsparungen:
Die wissenschaftliche Literatur berichtet über signifikante Unterschiede in den CdA-Werten zwischen diesen Haltungen:
 - **Aufrecht/Hoods (HH):** Die berichteten CdA-Werte zeigen eine erhebliche Streuung, was auf unterschiedliche Definitionen der genauen Haltung und Messmethoden zurückzuführen sein dürfte. Typische Bereiche liegen zwischen 0.30 und 0.50 m².¹⁰ Eine spezifische CFD-Studie fand einen Wert von ca. 0.42 m² bei 0° Gierwinkel für das Gesamtsystem¹², während eine andere CFD-Simulation für den Fahrer allein (ohne Fahrrad) einen Wert von ca. 0.294 m² ergab.¹²
 - **Unterlenker (HD/DB):** Diese Position bietet eine deutliche Reduktion gegenüber der aufrechten Haltung. Genannte Bereiche liegen bei 0.25 bis 0.30 m².¹⁰ Prozentuale Einsparungen gegenüber der Hoods-Position werden mit 15-20%¹⁰ oder bis zu 12%⁴³ angegeben. CFD-Simulationen bestätigen, dass die DB-Position (Body Dropped) signifikant niedrigere CdA-Werte als HH und HD aufweist.¹²
 - **Zeitfahrposition (TT):** Diese Position weist die niedrigsten CdA-Werte auf, typischerweise im Bereich von 0.20 bis 0.25 m².¹⁰ Eine Studie gibt einen Gesamtbereich über alle getesteten Positionen von 0.214 bis 0.450 m² an, wobei die TT-Position die niedrigsten Werte erreichte.¹² Eine CFD-Studie fand Werte zwischen 0.22 und 0.24 m²¹², eine andere sogar einen Minimalwert von 0.150 m² (allerdings bei 20° Gierwinkel).¹² Die Einsparungen gegenüber der aufrechten Haltung können 30-35% betragen.¹⁰

Diese Zahlen verdeutlichen den enormen Einfluss der Körperhaltung: Der CdA-Wert kann sich zwischen einer aufrechten Position und einer optimierten Zeitfahrposition mehr als verdoppeln.¹² Schlüsselemente zur Reduzierung des Luftwiderstands durch die Haltung sind das Absenken von Kopf und Rumpf sowie das Einziehen der Arme, um die Stirnfläche zu minimieren und eine strömungsgünstigere Form zu erreichen.¹⁰ Selbst relativ kleine Anpassungen, wie die Position der Arme, können spürbare Einsparungen bewirken.¹² Der Vergleich der potenziellen CdA-Reduktionen durch Haltungsänderungen (z.B. 15-35% Einsparungspotenzial¹⁰, in Extremfällen bis zu 50% Reduktion von aufrecht zu TT¹⁰) mit den typischen prozentualen Gewinnen durch einzelne Ausrüstungs-Upgrades (z.B. Helme 3-6%⁴⁴, Laufräder ca. 2% im Durchschnitt²⁴, Skinsuits 4-8%¹⁰) legt nahe, dass die Optimierung der Körperhaltung die größte einzelne aerodynamische Verbesserungsmöglichkeit darstellt, die direkt vom Fahrer kontrolliert werden kann. Allerdings ist die Kategorisierung in grobe Haltungstypen (Hoods, Drops, TT) eine Vereinfachung. Innerhalb jeder dieser Kategorien können subtile Variationen in der Kopfhaltung, dem genauen Rumpfwinkel oder der Armposition den CdA-Wert signifikant beeinflussen.¹⁰ Beispielsweise ist die exakte Kopfneigung entscheidend für die Performance eines Aerohelms⁴⁴, und das Absenken des Rumpfes zur Verbesserung der Aerodynamik kann physiologische Einschränkungen mit sich bringen.³² Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer individualisierten Betrachtung und Optimierung der Haltung, die über generische Empfehlungen hinausgeht.

- **Tabelle 1: CdA-Werte für verschiedene Körperhaltungen (Beispiele aus Studien)**

Körperhaltung (Kategorie)	Spezifische Beschreibung	Typischer/Gemessener CdA-Bereich (m ²)	% Reduktion vs. Aufrecht (ca.)	Gierwinkelabhängigkeit (Zusammenfassung)	Referenzstudien
Aufrecht (HH)	Hände auf Bremsgriffen (Hoods), Oberkörper relativ aufrecht	0.30 - 0.50 (Bereich) ¹⁰ ~0.42 (@ 0° Yaw) ¹²	Basislinie (0%)	CdA steigt bei 5-10° Yaw, sinkt bei höheren Winkeln ¹²	¹⁰
Unterlenker (HD/DB)	Hände im Unterlenker (Drops), tieferer Oberkörper	0.25 - 0.30 (Bereich) ¹⁰	12% - 20%	Ähnlich wie HH, aber DB stabiler bei Seitenwind, sinkt bei höheren Winkeln ¹²	¹⁰
Zeitfahrposition (TT)	Aggressiv tief, Arme auf Aero-Extensions	0.20 - 0.25 (Bereich) ¹⁰ 0.22 - 0.24 ¹² min. 0.15 (@ 20° Yaw) ¹²	30% - 35% (bis >50% möglich)	Stabil bei Seitenwind, CdA sinkt tendenziell bei höheren Winkeln ¹²	¹⁰

Einfluss der Ausrüstung auf den CdA-Wert

Neben der Körperhaltung spielt auch die verwendete Ausrüstung eine wichtige Rolle bei der Minimierung des aerodynamischen Widerstands.

- **Helme:** Aerodynamisch optimierte Helme, sowohl klassische Zeitfahrhelme mit langem Heck (Long-Tail, LT) als auch moderne Aero-Straßenhelme (oft mit kürzerem Heck, Short-Tail, ST), bieten messbare Vorteile gegenüber Standard-Straßenhelmen.¹⁸ Studien berichten von Widerstandsreduktionen im Bereich von 3% bis 6%.⁴⁴ Die tatsächliche Performance hängt jedoch stark von der Kopfhaltung (Neigungswinkel) des Fahrers ab.³⁵ LT-Helme sind oft für eine spezifische, tiefe Kopfhaltung optimiert. ST-Helme können über einen breiteren Bereich von Kopfhaltungen oder bei mittleren Neigungswinkeln besser funktionieren.⁴⁴ Eine unpassende Kopfhaltung kann den aerodynamischen Vorteil zunichtemachen oder sogar zu erhöhtem Widerstand führen.⁴⁴ Vergleichende Windkanal- und CFD-Studien zeigen messbare Unterschiede zwischen verschiedenen Helmmodellen.¹⁴ Ein Feldtest ergab beispielsweise Leistungsunterschiede von bis zu 5 Watt zwischen verschiedenen Aero-Straßenhelmen.³⁰
- **Bekleidung:** Eng anliegende Rennanzüge (Skinsuits) sind aufgrund der großen Körperoberfläche, die sie bedecken, aerodynamisch relevant.¹⁰ Sie reduzieren den

Widerstand im Vergleich zu locker sitzender Kleidung erheblich. Die Eigenschaften des verwendeten Materials – insbesondere Oberflächenstruktur, Rauigkeit und die Platzierung von Nähten – haben einen signifikanten Einfluss auf die Luftströmung und damit auf den Widerstand.¹⁰ Speziell texturierte Stoffe können die Strömungsablösung verzögern und so den Widerstand reduzieren. Genannte Einsparungen liegen bei etwa 4%¹⁰ oder sogar bis zu 8%, wenn gezielt die Stoffe an den Armen optimiert werden.²¹ Moderne Anzüge nutzen oft "Zoned Fabrics", d.h. unterschiedliche Materialien an verschiedenen Körperzonen, um die Strömung optimal zu beeinflussen (z.B. glatte Stoffe am Rumpf, texturierte Stoffe an Armen und Beinen, wo eine Turbulenzinduzierung vorteilhaft sein kann).⁴⁵ Die Optimierung der Bekleidung wird als wichtiger Hebel zur CdA-Reduktion angesehen, da der Fahrer den Hauptanteil des Widerstands verursacht.⁶

- **Laufräder:** Laufräder mit höheren (tieferen) Felgenprofilen weisen im Allgemeinen einen geringeren Luftwiderstand auf als flache Felgen, insbesondere bei Seitenwind (höhere Gierwinkel).²⁴ Dies wird oft auf einen "Segeleffekt" zurückgeführt, bei dem das Laufrad bei seitlicher Anströmung sogar einen leichten Vortrieb erzeugen kann.²⁴ Bei direkter Anströmung von vorne (Gierwinkel 0°) können tiefere und oft breitere Felgen jedoch aufgrund der größeren Stirnfläche einen geringfügig höheren Widerstand aufweisen als flachere Modelle.²⁴ Studien berichten von deutlichen Widerstandsreduktionen für Aero-Laufräder im Vergleich zu Standardlaufrädern (z.B. bis zu 60% weniger Widerstand für 60-70mm Felgen im Vergleich zu Standardfelgen, wobei dies sich wahrscheinlich auf Messungen des Laufrads allein bezieht²⁵). In Tests des Gesamtsystems (Fahrer + Fahrrad) wurde eine durchschnittliche CdA-Reduktion von ca. 0.006 m² (entspricht ca. 6 Watt bei 40 km/h) durch den Einsatz von tiefen Aero-Laufrädern im Vergleich zu Basis-Laufrädern über verschiedene Gierwinkel gemessen.²⁴ Die Unterschiede zwischen verschiedenen *hochwertigen* Aero-Laufrädern können jedoch relativ gering sein (z.B. ca. 4 Watt zwischen dem besten und schlechtesten getesteten Satz).²⁴ Die Performance hängt auch stark von der Kombination aus Laufrad und Reifen ab; insbesondere das Verhältnis von Reifenbreite zu Felgenbreite (T/W) korreliert mit dem Widerstand.²⁵ Breitere Reifen am Vorderrad können den aerodynamischen Widerstand erhöhen.³⁷ Ein wichtiger Aspekt bei tiefen Felgen ist die Seitenwindstabilität; extrem hohe Profile können bei böigem Wind schwer zu kontrollieren sein.²³ Felgenhöhen um 40-50 mm gelten oft als guter Kompromiss zwischen Aerodynamik und Handhabung.²³
- **Fahrradrahmen und Komponenten:** Aerodynamisch optimierte Fahrradrahmen tragen ebenfalls zur Reduzierung des Gesamtwiderstands bei.¹⁰ Es gibt messbare Unterschiede zwischen verschiedenen Aero-Rahmenmodellen, auch wenn diese möglicherweise geringer ausfallen als die Effekte durch Laufräder oder die Körperhaltung.³⁸ Komponenten wie Lenker, Gabeln und die Integration von Zügen und Leitungen werden zunehmend aerodynamisch gestaltet.¹⁶ Zeitfahräder sind aufgrund ihrer Gesamtkonstruktion und der ermöglichten Fahrerposition prinzipiell aerodynamischer als klassische Rennräder oder Mountainbikes.¹⁶

Die Analyse der Ausrüstungseffekte zeigt deutlich, dass der aerodynamische Vorteil vieler Komponenten nicht konstant ist. Insbesondere bei Laufrädern ²⁴ und Helmen ⁴⁴ hängt der tatsächliche Gewinn stark von den Umgebungsbedingungen (speziell dem Gierwinkel) und dem Verhalten des Fahrers (Kopfhaltung) ab. Dies bedeutet, dass die Wahl der "besten" Ausrüstung immer kontextabhängig ist und die durchschnittlich berichteten Einsparungen (wie die ca. 6 Watt für Laufräder ²⁴) nicht unbedingt die Leistung in spezifischen, häufig auftretenden Szenarien (z.B. Fahren bei direktem Gegenwind) widerspiegeln.³⁷

Darüber hinaus deutet sich an, dass bei High-End-Komponenten zunehmend "diminishing returns" (abnehmende Grenzerträge) zu beobachten sind. Während der Wechsel von Standard- zu Aero-Komponenten oft deutliche Vorteile bringt, sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Top-Aero-Laufrädern ²⁴ oder Aero-Rahmen ³⁸ möglicherweise nur noch marginal. Da der Fahrer ohnehin 70-80% des Widerstands verursacht ¹², werden prozentuale Verbesserungen an der Ausrüstung absolut gesehen kleiner. Der Fokus verschiebt sich daher zunehmend von der Optimierung einzelner Teile hin zur Optimierung des Gesamtsystems aus Fahrer, Fahrrad und Ausrüstung, wobei der Anpassung des Fahrers an das Material (Bike Fitting) eine zentrale Rolle zukommt.²⁰

- **Tabelle 2: CdA-Reduktion durch Ausrüstung (Beispiele aus Studien)**

Ausrüstungstyp	Spezifische Komponente/Bedingung	Gemessene CdA-Reduktion (m ² / W @ km/h / %)	Gierwinkel-/Positionsabhängigkeit (Zusammenfassung)	Referenzstudien
Helm	Aero-Helm vs. Standard-Helm	3% - 6% Reduktion ⁴⁴ Aero-Helm ca. 2 N geringerer Widerstand @ 11.11 m/s ³⁴	Stark abhängig von Kopfneigung (Pitch); LT vs. ST Performance variiert mit Winkel ³⁵	¹⁸
	Vergleich Aero-Straßenhelme	Unterschiede bis zu 5 W @ 30 km/h ³⁰	Geringere Unterschiede zwischen Top-Modellen möglich ³⁰	³⁰
Bekleidung	Skinsuit vs. Lockersuit	Qualitativ signifikant; Quantifizierung schwierig ohne feste Referenz	Eng anliegend ist entscheidend ¹⁰	⁶
	Texturierte/Optimierte Stoffe (vs. glatt/Standard-Skinsuit)	4% Reduktion (texturiert) ¹⁰ Bis zu 8%	Effektivität kann von Körperregion und Strömungsregime	¹⁰

		Reduktion (optimierte Arm-Stoffe) ²¹ Zoned Fabrics zur Optimierung ⁴⁵	abhängen ⁴⁵	
Laufräder	Tiefe Felgen (60-70mm) vs. Standard (Laufrad allein)	Bis zu 60% geringerer Widerstand ²⁵	Vorteil tiefer Felgen steigt mit Gierwinkel ²⁵	²⁵
	Tiefe Felgen vs. Basis-Laufräder (Gesamtsystem, Ø über Yaw)	~0.0062 m ² Reduktion / ~5.9 W @ 40 km/h ²⁴	Tiefe Felgen bei 0° Yaw evtl. langsamer, bei >5-10° Yaw schneller; T/W Ratio wichtig ²⁴	²⁴
	Vergleich Aero-Laufräder	Unterschiede ~4 W @ 40 km/h zwischen Modellen ²⁴	Performance hängt stark vom Gierwinkel ab; Stabilität wichtig ²³	²⁴
Rahmen	Aero-Rahmen vs. Standard-Rahmen	Qualitativ signifikant; Quantifizierung schwierig ohne feste Referenz	Aero-Rahmen reduzieren Gesamtwiderstand ¹⁰	¹⁰
	Vergleich Aero-Rahmen	Unterschiede vorhanden, z.B. 0.0882 m ² bis 0.0959 m ² für Top 10 (Rahmen+Gabel+Cockpit, ohne Fahrer) ³⁸	Unterschiede zwischen Top-Modellen relativ gering ³⁸	³⁸
	Zeitfahrrad vs. Rennrad vs. Mountainbike (Gesamtsystem)	TT ca. 36% < MTB; RR ca. 21% < MTB; TT ca. 18% < RR ¹⁶	TT-Rahmen ermöglicht aerodynamischere Haltung ¹⁶	¹⁶

Der Effekt des Windschattenfahrens (Drafting)

Das Fahren im Windschatten eines anderen Fahrers (Drafting oder Slipstreaming) ist eine grundlegende Taktik im Radsport, um Energie zu sparen, indem der Luftwiderstand reduziert wird.

- CdA-Reduktion für folgende und führende Fahrer:

Der Effekt ist für den folgenden Fahrer am größten. Studien berichten von einer Reduktion des Luftwiderstands bzw. des CdA-Wertes für den Hinterherfahrenden im Bereich von 15% bis 50%¹⁰ oder spezifischer 27% bis 49%⁴³, abhängig von verschiedenen Faktoren.⁵ Eine Feldstudie quantifizierte die Reduktion für einen folgenden Fahrer in aerodynamischer Position auf 31.9% und in aufrechter Position auf 19.3%.²⁹ Das Fahren hinter einem Motorrad kann sogar noch größere Vorteile bringen, beispielsweise eine Reduktion um 48% bei einem Abstand von nur 2.64 Metern.⁵⁰ Interessanterweise zeigen mehrere Studien übereinstimmend, dass auch der *führende* Fahrer einen kleinen, aber messbaren aerodynamischen Vorteil erfährt, wenn jemand direkt hinter ihm fährt.¹⁰ Dieser "Schiebeeffekt" wird auf eine Veränderung des Druckfeldes hinter dem führenden Fahrer zurückgeführt. Die gemessenen Reduktionen für den Führenden liegen im Bereich von ca. 1.6%⁴⁷ bis 2.6-3.3%.²⁹ Dieses Erkenntnis, dass Drafting nicht nur dem Folgenden, sondern in geringerem Maße auch dem Führenden nützt, deutet darauf hin, dass es sich aerodynamisch betrachtet um ein subtil kooperatives System handelt, nicht um eine rein parasitäre Beziehung.

- Quantifizierung basierend auf Position und Abstand:
Die Stärke des Windschatteneffekts ist nicht konstant, sondern hängt von mehreren Faktoren ab:
 - **Abstand:** Der Vorteil ist unmittelbar hinter dem Vordermann am größten und nimmt mit zunehmendem Abstand schnell ab. Bei einem Abstand von etwa einer Radlänge reduziert sich der Effekt bereits auf ca. 10-30%.¹⁰ Selbst bei größeren Abständen von 10 Metern oder mehr kann noch ein messbarer Effekt vorhanden sein, der aber deutlich geringer ist.⁵⁰
 - **Position des folgenden Fahrers:** Wie die Feldstudie zeigte, maximiert der folgende Fahrer seinen Vorteil, wenn er selbst eine aerodynamische Position einnimmt (31.9% Reduktion) im Vergleich zu einer aufrechten Position (19.3% Reduktion).²⁹ Dies beeinflusst möglicherweise auch den geringen Vorteil für den führenden Fahrer.²⁹
 - **Größe des führenden Fahrers:** Ein größerer Vordermann mit einer größeren Stirnfläche (oder höherem CdA) bietet mehr Windschutz, was zu einem stärkeren Drafting-Effekt für den folgenden Fahrer führt.⁴⁷
 - **Position in der Gruppe:** In einer Kette von Fahrern (Paceline) kann der Effekt für den dritten Fahrer größer sein als für den zweiten.¹⁰ In großen Gruppen (Pelotons) können die Abschirmungseffekte enorm sein, mit Widerstandsreduktionen von über 50-60% für Fahrer, die gut im Feld eingebettet sind.¹²

Die Sensitivität des Drafting-Effekts gegenüber der Position des Folgenden und der Größe des Führenden²⁹ bedeutet, dass das Maximieren des Windschattenvorteils eine aktive Positionierung und Aufmerksamkeit seitens des folgenden Fahrers erfordert. Einfach nur "dahinter zu fahren" ist nicht zwangsläufig optimal.

- **Tabelle 3: Windschatteneffekte (CdA-Reduktion %)**

Szenario	Abstand	Position des	CdA-Reduktion	Referenzstudien
----------	---------	--------------	---------------	-----------------

		Folgenden	% (ca.)	
Führender Fahrer	Direkt dahinter (<1m)	Aero	2.6% ²⁹	10
	Direkt dahinter (<1m)	Aufrecht	3.3% ²⁹	10
	Allgemein	-	~1.6% - 3% ¹⁰	10
Folgender Fahrer	Direkt dahinter (<1m)	Aero	31.9% ²⁹ (Bereich 15-50% je nach Studie/Bedingung ¹⁰)	10
	Direkt dahinter (<1m)	Aufrecht	19.3% ²⁹	29
	1 Radlänge (~2m)	-	10% - 30% ¹⁰	10
	10 m	-	~23% (hinter Motorrad) ⁵⁰	50
	30 m	-	~12% (hinter Motorrad) ⁵⁰	50
	Im Peloton	-	>50% - 60% möglich ¹²	12

Einfluss von Geschwindigkeit und Umweltbedingungen

Die aerodynamischen Kräfte, die auf einen Radfahrer wirken, werden nicht nur durch Haltung und Ausrüstung bestimmt, sondern auch maßgeblich durch die Fahrgeschwindigkeit und die Umgebungsbedingungen, insbesondere den Wind.

- Geschwindigkeitsabhängigkeit des Luftwiderstands:

Es ist fundamental, dass die aerodynamische Widerstandskraft proportional zum Quadrat der Relativgeschwindigkeit zur Luft (v_f) ansteigt ($F_D \propto v_f^2$).¹ Die Leistung, die zur Überwindung dieses Widerstands benötigt wird, steigt sogar mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit ($P \propto v^3$).¹⁰ Dies erklärt, warum Aerodynamik bei höheren Geschwindigkeiten exponentiell wichtiger wird.

Die Frage, ob der C_dA -Wert selbst geschwindigkeitsabhängig ist, ist komplexer. Für viele praktische Anwendungen und Modellierungen wird C_dA oft als konstant über den relevanten Geschwindigkeitsbereich angenommen.¹ Physikalisch betrachtet hängt der Widerstandsbeiwert (C_d) jedoch von der Reynolds-Zahl ab, die wiederum von der Geschwindigkeit abhängt. Einige Studien deuten darauf hin, dass C_d und damit C_dA bei steigender Geschwindigkeit innerhalb des typischen Radsportbereichs leicht sinken können.¹⁵ Diese Reynolds-Zahl-Abhängigkeit wird jedoch oft als sekundär gegenüber den Effekten von Haltung und Ausrüstung betrachtet, insbesondere bei Feldtests.²⁸

- Einfluss von Gierwinkeln (Seitenwind):

Selten trifft der Wind einen Radfahrer direkt von vorne. Der Gierwinkel (Yaw Angle) beschreibt den Winkel zwischen der Fahrtrichtung des Radfahrers und der Richtung des scheinbaren Windes (resultierend aus Fahrtwind und natürlichem Wind).²⁴ Dieser

Winkel hat einen erheblichen Einfluss auf den CdA-Wert.

Das Verhalten des CdA bei unterschiedlichen Gierwinkeln hängt stark von der Körperhaltung und der Ausrüstung ab:

- Bei eher aufrechten Haltungen (Hoods, Drops) kann der CdA-Wert bei kleinen Gierwinkeln (z.B. 5-10°) leicht ansteigen und bei größeren Winkeln wieder abfallen.¹²
- Bei optimierten Zeitfahrpositionen (TT) kann der CdA-Wert auch bei größeren Gierwinkeln stabil bleiben oder sogar sinken.¹²
- Die aerodynamische Performance von Ausrüstung, insbesondere von Laufrädern²⁴ und Helmen³⁵, ist stark gierwinkelabhängig. Aero-Formen werden oft so konzipiert, dass sie über einen bestimmten Bereich von Gierwinkeln (z.B. 0-15°) gut funktionieren, da diese im realen Fahrbetrieb häufig auftreten.²³ Der Gierwinkel kompliziert aerodynamische Tests und Modellierungen erheblich²³, da im realen Fahrbetrieb die Windbedingungen und somit der Gierwinkel ständig wechseln.³⁷

Die starke Abhängigkeit des CdA von Gierwinkeln ist ein entscheidender Faktor. Sie bedeutet, dass eine Optimierung, die nur bei 0° Gierwinkel (direkter Gegenwind) durchgeführt wird, nicht zwangsläufig zu optimaler Leistung unter realen Bedingungen mit Seitenwind führt.³⁷ Unterschiedliche Haltungen und Ausrüstungsgegenstände reagieren verschieden auf Seitenwind.¹² Beispielsweise können tiefprofilige Laufräder ihren Vorteil gegenüber flachen Felgen erst bei signifikanten Gierwinkeln ausspielen.²⁴ Dies macht den Gierwinkel zu einem wichtigen Differenzierungsmerkmal und unterstreicht die Notwendigkeit, Aerodynamik im Kontext realistischer Windbedingungen zu bewerten.

Zusammenhang zwischen CdA und Anthropometrie

Die individuelle Körpergröße und -masse eines Radfahrers beeinflussen naturgemäß dessen aerodynamische Eigenschaften, primär über die Stirnfläche.

- Korrelation mit Körpergröße und -masse:
Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen einen Zusammenhang zwischen anthropometrischen Maßen wie Körperhöhe (h) und Körpermasse (m) und aerodynamischen Parametern, insbesondere der projizierten Stirnfläche (Ap).¹ Größere und schwerere Fahrer haben tendenziell eine größere Stirnfläche.⁵³ Oft wird der Körperhöhe ein größerer Einfluss auf die Stirnfläche zugeschrieben als der Masse.⁵³ Der Zusammenhang ist jedoch nicht linear oder einfach. Die Stirnfläche skaliert nicht direkt proportional zur Körperoberfläche (Body Surface Area, BSA), da größere Fahrer tendenziell ein kleineres Verhältnis von BSA zu Masse aufweisen.⁴ Um die Beziehung mathematisch zu modellieren, werden Skalierungsexponenten verwendet. Basierend auf verschiedenen Studien wird angenommen, dass Ap etwa proportional zur Masse hoch 0.762 ($Ap \propto m^{0.762}$) skaliert.⁴ Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass der Widerstandsbeiwert (Cd) tendenziell mit steigender Masse sinkt, möglicherweise proportional zur Masse hoch -0.45 ($Cd \propto m^{-0.45}$).⁴ Kombiniert man diese beiden Beziehungen, würde der resultierende CdA-Wert etwa proportional zur Masse hoch 0.31 bis 0.32 ($CdA \propto m^{0.31-0.32}$) skalieren.⁴⁰

Obwohl diese Korrelationen existieren, ist die Vorhersagekraft anthropometrischer

Daten allein für den individuell gemessenen CdA-Wert begrenzt. Der Grund dafür ist, dass die tatsächliche Körperhaltung und die spezifische Körperform (Proportionen) einen enormen Einfluss haben, der durch einfache Höhen- und Massenmessungen nicht erfasst wird.¹⁰ Eine Studie fand beispielsweise heraus, dass die gemessene Stirnfläche (Ap) nur 54% der Variabilität im gemessenen Gesamt-CdA (Ad) erklärte.¹¹

- Formeln zur Schätzung von Stirnfläche (Ap) / CdA:

In der Literatur wurden verschiedene Formeln veröffentlicht, die versuchen, die Stirnfläche (Ap) oder den Cd-Wert bzw. den CdA-Wert aus anthropometrischen Daten abzuschätzen. Diese Formeln verwenden typischerweise Körperhöhe (h) und Körpermasse (m) als Eingangsgrößen, manchmal ergänzt um weitere Parameter wie Sitzrohrwinkel (STA), Rumpfwinkel (TA), Schulterbreite (SW) oder Helmabmessungen.¹ Die Genauigkeit dieser Schätzformeln ist limitiert. Der Standardfehler der Schätzung (Standard Error of Estimate, SEE) für Ap liegt je nach Formel im Bereich von 0.009 bis 0.017 m².³⁹ Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Variabilität des Cd-Wertes wird die Gesamtungenauigkeit bei der Schätzung des CdA-Wertes auf etwa $\pm 5\%$ bis 10% eines typischen Wertes geschätzt.³⁹ Diese Formeln können daher nur grobe Anhaltswerte liefern.

- Bedeutung der Körperform und Grenzen der Modelle:

Ein wesentlicher limitierender Faktor der anthropometrischen Modelle ist, dass sie individuelle Körperproportionen nicht adäquat abbilden. Faktoren wie Rumpflänge im Verhältnis zur Beinlänge, Schulterbreite, Hüftbreite und die allgemeine "Form" des Oberkörpers beeinflussen sowohl die Stirnfläche (A) als auch den Widerstandsbeiwert (Cd).¹⁰ Generell gelten schmale Schultern und Hüften als aerodynamisch vorteilhaft.⁵³ Darüber hinaus ist die Fähigkeit eines Fahrers, eine aerodynamisch effiziente Position einzunehmen und über längere Zeit zu halten, entscheidend. Diese Fähigkeit hängt von Faktoren wie Flexibilität, Rumpfstabilität und Biomechanik ab³² und wird durch statische Anthropometrie nicht erfasst.⁶

Obwohl anthropometrische Daten also eine nachweisbare Korrelation zur Stirnfläche und zum CdA aufweisen und somit eine notwendige Basisinformation darstellen, sind sie allein nicht ausreichend, um den CdA-Wert eines Individuums präzise vorherzusagen.¹¹ Die tatsächliche, im Feld oder Windkanal gemessene Aerodynamik wird maßgeblich durch die individuelle Form und vor allem die eingenommene Haltung modifiziert. Für eine genaue individuelle Bewertung und Optimierung bleiben direkte Messmethoden unerlässlich.¹¹

- **Tabelle 4: Anthropometrische Schätzformeln für Ap/Cd (Beispiele)**

Formel Typ	Gleichung	Benötigte Variablen	Quelle/Studie	Gemeldete Genauigkeit/SEE (falls verfügbar)
Ap (m ²)	$0.18964 \cdot h \text{ (m)} + 0.00215 \cdot m \text{ (kg)} - 0.07861$	h, m	Australian Institute of Sport ³⁹	?
Ap (m ²)	$0.0293 \cdot h \text{ (m)} \cdot m$	h, m	Bassett et al.	R ² =0.76,

	$(\text{kg})^{0.425} + 0.0604$		(1999) ³⁹ , Faria et al. (2005) ⁴	SEE=0.009 m ² ³⁹
Ap (m ²)	+ 0.066	m, STA, TA	Heil (2001) ⁴	R ² =0.54, SEE=0.017 m ² ³⁹
Ap (m ²)	+ 0.066	h, m, STA, TA	Heil (2001) ³⁹	R ² =0.56, SEE=0.014 m ² ³⁹
Ap (m ²)	+ 0.066	h, m, STA, TA, SW	Heil (2001) ³⁹	R ² =0.69, SEE=0.013 m ² ³⁹
Ap (m ²)	$0.045 * h (\text{m})^{1.15} * m (\text{kg})^{0.2794} + (\text{Helm-Terme})$	h, m, (Helm)	Barelle et al. (2010) ⁴	?
Cd	$4.45 * m (\text{kg})^{-0.45}$	m	Heil (Meta-Analyse) ⁴	Unbekannte Präzision ³⁹
Cd	~0.7 (Durchschnittswert)	-	Kyle (1991) ³⁹	Bereich 0.652 - 0.793 ³⁹

Anmerkung: h=Höhe, m=Masse, STA=Sitzrohrwinkel, TA=Rumpfwinkel, SW=Schulterbreite. Die Anwendbarkeit und Genauigkeit dieser Formeln kann je nach Fahrerpopulation und spezifischer Haltung variieren.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Analyse wissenschaftlicher Studien zu CdA-Werten von Rennradfahrern verdeutlicht die zentrale Rolle der Aerodynamik für die Leistungsfähigkeit. Der CdA-Wert, als Maß für den Gesamtwiderstand des Fahrer-Fahrrad-Systems, wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst.

Die **Körperhaltung** des Fahrers erweist sich als der Faktor mit dem größten Optimierungspotenzial. Typische CdA-Werte reichen von über 0.40 m² in aufrechter Haltung bis hinunter zu ca. 0.20 m² in einer optimierten Zeitfahrposition. Dies entspricht einer möglichen Reduktion des Luftwiderstands um 30-50% oder mehr, was die Bedeutung der Positionierung unterstreicht.

Die **Ausrüstung** – Helme, Bekleidung, Laufräder und Rahmen – trägt ebenfalls zur aerodynamischen Performance bei. Aero-Helme, Skinsuits mit optimierten Stoffen und Nahtführungen sowie Laufräder mit tiefem Profil können messbare CdA-Reduktionen bewirken. Allerdings sind die Gewinne durch einzelne Komponenten oft geringer als durch Haltungsänderungen, und die Effektivität vieler Ausrüstungsteile (insbesondere Helme und Laufräder) hängt stark von den spezifischen Bedingungen wie Kopfhaltung und Gierwinkel ab. Bei High-End-Ausrüstung scheinen zudem abnehmende Grenzerträge zu existieren, was die Bedeutung einer systemischen Optimierung unterstreicht.

Das **Windschattenfahren (Drafting)** reduziert den CdA-Wert des folgenden Fahrers drastisch (bis zu 50%), wobei der Effekt von Abstand, Position und Größe des Vordermanns abhängt. Bemerkenswerterweise profitiert auch der führende Fahrer geringfügig (ca. 2-3% CdA-Reduktion).

Die **Anthropometrie** (Körpergröße und -masse) korreliert erwartungsgemäß mit der

Stirnfläche und beeinflusst somit den CdA-Wert. Größere Fahrer haben tendenziell höhere CdA-Werte. Die Beziehung ist jedoch komplex und wird stark durch die individuelle Körperform und vor allem die eingenommene Haltung moduliert. Anthropometrische Schätzformeln können Anhaltswerte liefern, ersetzen aber keine individuelle Messung für präzise Optimierungsstrategien.

Zusammenfassend ist die Aerodynamik im Radsport ein komplexes Zusammenspiel aus Fahrer, Material und Umweltbedingungen.⁸ Eine effektive Minimierung des CdA-Wertes erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, der die individuelle Physiologie und Biomechanik des Fahrers, die sorgfältige Auswahl und Anpassung der Ausrüstung sowie die Berücksichtigung der typischen Renn- oder Trainingsbedingungen einschließt. Generische Empfehlungen stoßen an ihre Grenzen. Für ambitionierte Athleten und Teams bleiben individualisierte aerodynamische Tests, sei es im Feld unter kontrollierten Bedingungen oder im Windkanal, das Mittel der Wahl, um das persönliche aerodynamische Potenzial voll auszuschöpfen und quantifizierbare Leistungsverbesserungen zu erzielen.⁶

Referenzen

1. Power Wind Pro - AERODYNAMIC DRAG, Zugriff am April 9, 2025, <https://sites.google.com/view/powerbikepro/blog-en/aerodynamic-drag>
2. Validity of bicycle mounted pitot tubes for real-time analysis of cyclist's drag area for outdoor testing - Journal of Science and Cycling, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.jsc-journal.com/index.php/JSC/article/download/684/676/3459>
3. Aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025, https://www.researchgate.net/publication/51660070_Aerodynamic_drag_in_cycling_Methods_of_assessment
4. olivernash.org, Zugriff am April 9, 2025, http://olivernash.org/2014/05/25/mining-the-strava-data/cycling_drag_force.pdf
5. The complex case of aerodynamics and weight in racing - Weight Weenies - starbike.com, Zugriff am April 9, 2025, <https://weightweenies.starbike.com/forum/viewtopic.php?t=171870>
6. What is CdA in cycling? How to reduce drag so you can ride faster for less effort - TRI247, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.tri247.com/triathlon-training/what-is-cda-in-cycling-triathlon-bike-aerodynamics-drag-aero-gear-riding-position>
7. The Aerodynamics of a Bike Fit - Best Bike Split Case Study, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.bestbikesplit.com/case-study-bikefit>
8. Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics - DSpace@MIT, Zugriff am April 9, 2025, https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/108762/12283_2017_Article_234.pdf
9. Learn about aerodynamics with AeroCoach, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.aero-coach.co.uk/learn>
10. Update on cycling aerodynamics - Science4Performance, Zugriff am April 9,

- 2025,
<https://science4performance.com/2017/05/20/update-on-cycling-aerodynamics/>
11. Field-measured drag area is a key correlate of level cycling time trial ..., Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4540006/>
 12. Aerodynamic Benefits by Optimizing Cycling Posture - MDPI, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8475>
 13. Validity and Reliability of an on-bike sensor system for the determination of aerodynamic drag in cycling - SportRxiv, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://sportrxiv.org/index.php/server/preprint/download/490/1051/978>
 14. Cyclist aerodynamics: a comparison between wind tunnel tests and CFD simulations for helmet design - ResearchGate, Zugriffsdatum April 9, 2025, https://www.researchgate.net/profile/Paolo-Schito/publication/331679750_Cyclist_Aerodynamics_A_Comparison_Between_Wind_Tunnel_Tests_and_CFD_Simulations_for_Helmet_Design_IN-VENTO_2018/links/61d093f0da5d105e5511e8b7/Cyclist-Aerodynamics-A-Comparison-Between-Wind-Tunnel-Tests-and-CFD-Simulations-for-Helmet-Design-IN-VENTO-2018.pdf
 15. Practical computational fluid dynamic predictions of a cyclist in a time trial position - Loughborough University Research Repository, Zugriffsdatum April 9, 2025, https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/Practical_computational_fluid_dynamic_predictions_of_a_cyclist_in_a_time_trial_position/27037315
 16. ENTER TITLE HERE (14 PT TYPE SIZE, UPPERCASED, BOLD ...), Zugriffsdatum April 9, 2025, https://www.researchgate.net/profile/Harun-Chowdhury/publication/259742352_An_experimental_study_of_bicycle_aerodynamics/links/54f8feb60cf28d6deca2f301/An-experimental-study-of-bicycle-aerodynamics.pdf
 17. Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment - Taylor and Francis, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14763141.2011.592209>
 18. Aerodynamics Analysis for an Outdoor Road Cycling Helmet and Air Attack Helmet - International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://www.ijmmm.org/vol5/287-MF0012.pdf>
 19. Estimation of an elite road cyclist resistive forces and performance wearing standard and aero helmets: an analytical procedure and numerical simulations approach - European Journal of Human Movement, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://www.eurjhm.com/index.php/eurjhm/article/download/573/704>
 20. Bernardo Gonçalves | EP#397 - Scientific Triathlon, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://scientifictriathlon.com/tts397/>
 21. Aerodynamics of Cycling Skinsuits Focused on the Surface Shape of the Arms - MDPI, Zugriffsdatum April 9, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/5/2200>
 22. (PDF) Validity and Reliability of an on-bike sensor system for the determination of aerodynamic drag in cycling - ResearchGate, Zugriffsdatum April 9, 2025, https://www.researchgate.net/publication/387215204_VValidity_and_Reliability_of_a_n_on-bike_sensor_system_for_the_determination_of_aerodynamic_drag_in_cycling
 23. Aerodynamics in Cycling: Wind Tunnel Myths and Real-World Realities (Part 2 of

- 3), Zugriff am April 9, 2025,
<https://fasterbikeblog.com/blog/be-a-faster-cyclist-content/aerodynamics-in-cycling-wind-tunnel-myths-and-real-world-realities-part-2-3/>
24. Wind Tunnel Test: How Do Aerodynamic Wheels Differ? - ICAN Cycling, Zugriff am April 9, 2025,
<https://icancycling.com/blogs/articles/wind-tunnel-test-how-do-aerodynamic-wheels-differ>
25. (PDF) Drag and Side Force on Bicycle Wheel-tire Combinations - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/323909534_Drag_and_Side_Force_on_Bicycle_Wheel-tire_Combinations
26. Yet another aero sensor to measure CdA : r/Velo - Reddit, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.reddit.com/r/Velo/comments/82gp4y/yet_another_aero_sensor_to_measure_cda/
27. Reducing aerodynamic drag by adopting a novel road-cycling sprint position - Edith Cowan University, Zugriff am April 9, 2025,
<https://ro.ecu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=7710&context=ecuworkspost2013>
28. Your Power Meter is Still the Best Wind Tunnel Available - Fit Werx, Zugriff am April 9, 2025,
<https://fitwerx.com/your-power-meter-is-still-the-best-wind-tunnel-available/>
29. benefits of drafting on the leading cyclist: a ... - NMU Commons, Zugriff am April 9, 2025,
<https://commons.nmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2389&context=isbs>
30. 7 Road Helmets Aero Tested — Which Was Fastest? - Velo, Zugriff am April 9, 2025,
<https://velo.outsideonline.com/road/road-gear/7-road-helmets-aero-tested-which-one-was-fastest/>
31. Comparison of C_D [Å] and $C_D A$ [m^2] values as predicted by the CFD... - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-C-D-A-and-C-D-A-m-2-values-as-predicted-by-the-CFD-simulations-for-the_fig7_326745073
32. INFLUENCE OF CYCLING POSITION AND CROSSWINDS ON PERFORMANCE AND AERODYNAMICS “The angle matters” - University of Birmingham, Zugriff am April 9, 2025, <https://etheses.bham.ac.uk/6407/1/Fintelman15PhD.pdf>
33. Estimating Cycling Aerodynamic Performance Using Anthropometric Measures - MDPI, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/23/8635>
34. Analysis of a normal and aero helmet on an elite cyclist in the dropped position - AIMS Press, Zugriff am April 9, 2025,
<https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/biophy.2020005?viewType=HTML>
35. Aerodynamic Drag Study of Time-Trial Cycling Helmets Using CFD Analysis - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/342210107_Aerodynamic_Drag_Study_of_Time-Trial_Cycling_Helmets_Using_CFD_Analysis
36. (PDF) The understanding and development of cycling aerodynamics -

- ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/225161766_The_understanding_and_development_of_cycling_aerodynamics
37. Testing to Find the Fastest Bicycle Wheels - Hambini Engineering, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.hambini.com/testing-to-find-the-fastest-bicycle-wheels/>
38. Cyclingnews aero road bike test data/results? : r/Velo - Reddit, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.reddit.com/r/Velo/comments/1f4a25e/cyclingnews_aero_road_bike_test_dataresults/
39. Estimation of CdA ... - Training and Racing With a Power Meter Journal, Zugriff am April 9, 2025,
<http://www.trainingandracingwithapowermeter.com/2011/04/estimation-of-cda-from-anthropometric.html>
40. Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists ..., Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/11788060_Body_mass_scaling_of_projected_frontal_area_in_competitive_cyclists
41. New Method to Estimate the Cycling Frontal Area - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/23986705_New_Method_to_Estimate_the_Cycling_Frontal_Area
42. A wind-tunnel case study: Increasing road cycling velocity by adopting an aerodynamically improved sprint position - FLAIR - Monash University, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.flair.monash.edu/publications/pdfs/CrMeBaBrThBu_jset_2019.pdf
43. Aerodynamic performance and riding posture in road cycling and triathlon - FLAIR, Zugriff am April 9, 2025,
https://flair.monash.edu.au/publications/pdfs/BaBuShThBr_jset_2015.pdf
44. Comparative Analysis of Aerodynamic Drag Between Long Tail and Short Tail Aero Helmets Through Wind Tunnel Testing - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/389137612_Comparative_Analysis_of_Aerodynamic_Drag_Between_Long_Tail_and_Short_Tail_Aero_Helmets_Through_Wind_Tunnel_Testing
45. The Nike Swift Spin cycling project: reducing the aerodynamic drag of bicycle racing clothing by using zoned fabrics | Request PDF - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/285650490_The_Nike_Swift_Spin_cycling_project_reducing_the_aerodynamic_drag_of_bicycle_racing_clothing_by_using_zoned_fabrics
46. Official aero grading of bikes : r/Velo - Reddit, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.reddit.com/r/Velo/comments/hhw4q3/official_aero_grading_of_bikes/
47. Aerodynamic Characteristics as Determinants of the Drafting Effect in Cycling, Zugriff am April 9, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/6582559_Aerodynamic_Characteristics_as_Determinants_of_the_Drafting_Effect_in_Cycling

48. CdA and Aerodynamics of Cycling - Source Endurance, Zugriff am April 9, 2025, <https://source-e.net/rider-resources/cda-and-aerodynamics-of-cycling/>
49. benefits of drafting on the leading cyclist: a preliminary field study - NMU Commons, Zugriff am April 9, 2025, <https://commons.nmu.edu/isbs/vol40/iss1/16/>
50. (PDF) Aerodynamic benefits for a cyclist by drafting behind a motorcycle - ResearchGate, Zugriff am April 9, 2025, https://www.researchgate.net/publication/344349722_Aerodynamic_benefits_for_a_cyclist_by_drafting_behind_a_motorcycle
51. Wind tunnel tests of aero wheels, skinsuits, etc., are usually performed in a relatively static seated position. Do these results also apply to a max sprint, in which one is throwing their body and bike left and right very dynamically, or is this too different? : r/Velo - Reddit, Zugriff am April 9, 2025, https://www.reddit.com/r/Velo/comments/13y2pyl/wind_tunnel_tests_of_aero_wheels_skinsuits_etc/
52. Modern Real World Cycling Aerodynamics - Hambini Engineering, Zugriff am April 9, 2025, <https://www.hambini.com/modern-real-world-cycling-aerodynamics/>
53. How much of a role does body size play in cDA? : r/Velo - Reddit, Zugriff am April 9, 2025, https://www.reddit.com/r/Velo/comments/rsc9xt/how_much_of_a_role_does_body_size_play_in_cda/