

Untersuchung des Effekts des Windschattenfahrens beim Speedskating

von Sandra Forndran

Maximilian - von - Montgelas - Gymnasium Vilsbiburg

Inhalt

1 Einführung	2
2 Vorgehensweise	2
2.1 Änderung der Herzfrequenz	3
2.3 Modell im Windkanal	3
2.2.1 Ermittlung der Größe des Modells	3
2.2.2 Aufbau des Modells	5
2.2.3 Durchführung der Versuche	5
3 Ergebnisse	7
3.1 Änderung der Herzfrequenz	7
3.2 Modell im Windkanal	7
4 Interpretation	13
4.1 Änderung der Herzfrequenz	13
4.2 Modell im Windkanal	15
5 Ausblick	17
Quellenverzeichnis	18
Abbildungsverzeichnis	18

1 Einführung

Bei schnellen Ausdauersportarten wie Rennradfahren, Handbikefahren oder Speedskating ist es üblich, dass die Sportler in Gruppen fahren und sich mit der Führungsposition abwechseln, also „rotieren“. Alle zusammen sind nämlich schneller als einer alleine, da nur einer „im Wind“ fahren muss, die anderen können den Windschatten ausnutzen. Das bringt erhebliche Vorteile durch Kraftersparnis. Diesen Vorteil spürt jeder recht schnell, der einmal im Windschatten gefahren ist, er hat bei geringem Abstand tatsächlich das Gefühl, zum Vordermann hingezogen zu werden. Ich selbst nehme an Rennen im Speedskating teil und konnte diesen Effekt schon oft beobachten, daher wurde mein Interesse für dieses Thema geweckt und die Idee entstand, dazu eine naturwissenschaftliche Untersuchung durchzuführen. Im Folgenden soll dieses Phänomen, Windschatten, insbesondere beim Speedskating, genauer betrachtet werden, also Fragestellungen wie wie viel es tatsächlich bringt, im Windschatten zu fahren oder welche Position die günstigste ist, oder welche Auswirkungen mehrere Mitfahrer auf den Vordermann haben, untersucht werden.

2 Vorgehensweise

Um dieses Phänomen der Kraftersparnis als einer der hinteren Fahrer einmal in Daten zu erfassen und die tatsächlichen Größenordnungen festzustellen, würde sich der recht einfache Weg mit einer Pulsmessung bei Fahrern an verschiedenen Positionen anbieten, da dieser bei geringerer Belastungsintensität niedriger sein sollte als bei höherer. Bei einer Recherche fand ich heraus, dass solche Versuche bereits von der Deutschen Sporthochschule Köln zum Handbikefahren durchgeführt worden waren, allerdings in größerem Umfang, da nicht nur die physiologische Größe Herzfrequenz, sondern auch die Laktatkonzentration im Blut herangezogen wurde (vgl.¹). Diese Möglichkeit stand mir nicht zur Verfügung, ebenso wurde in einer Viererformation gefahren, während ich mich aber auf drei Versuchspersonen und die Ermittlung der Pulsfrequenz beschränken musste.

Eine weitere Möglichkeit, um das Phänomen von physikalischer Seite her genauer zu betrachten, ist, ein Modell im Windkanal zu bauen und die auftretenden Kräfte zu messen.

¹ (<http://www.handbikesport.de/handbike/handbike-windschatten-studie.php>)

2.1 Änderung der Herzfrequenz

Zuerst wurden Messungen zur Änderung der Herzfrequenz durchgeführt. Um zu ermitteln, ob die Herzfrequenz an zweiter oder dritter Stelle tatsächlich niedriger ist als an erster, eignen sich Messreihen, die bei einer Gruppe von mehreren Personen die Herzfrequenzen der einzelnen Fahrer an der jeweiligen Position zeigen. Ich habe drei männliche Testpersonen im Alter von 15, 17 und 22 Jahren, alle von sehr gutem Trainingszustand, auf einer 200m-Bahn ohne Kurvenüberhöhung als Dreiergruppe mit den Geschwindigkeiten 30 und 35 km/h fahren lassen. Dabei ist jeder für 2 Minuten an einer Position gefahren, sodass jeder einmal an erster, zweiter und dritter Stelle war. Hierbei wurde die Geschwindigkeit mit einer GPS-Uhr ermittelt, die gleichzeitig auch mit Hilfe eines Brustgurts den Puls anzeigte.

2.2 Modell im Windkanal

Für feinere Untersuchungen, wie die tatsächliche relative Kraftersparnis des zweiten Fahrers im Vergleich zum ersten oder welcher Abstand der günstigste ist, zu ermitteln, ist die Herzfrequenz aber weniger geeignet, weshalb auf die Betrachtung von Modellen im Windkanal zurückgegriffen werden muss. Dort können dann die Luftströme und deren Veränderungen untersucht sowie auftretende Kräfte gemessen werden. Für meine Versuche konnte ich den Windkanal der FH Landshut mit 305x305mm² Durchmesser und einer max. Geschwindigkeit von 40m/s nutzen.

2.2.1 Ermittlung der Größe des Modells

Die Versuche im Windkanal erfordern zuerst das Anfertigen eines geeigneten Modells. Damit Untersuchungen realitätsnah sind, also Strömungen um das Modell gleiches Turbulenzverhalten zeigen wie Strömungen um den realen Körper, muss bei den Maßen des Modells darauf geachtet werden, dass die Reynoldszahl von realem Körper und Modell etwa identisch ist. Der Einfachheit halber und wegen der Schwierigkeiten bei der Umsetzung wird als Modell ein Zylinder angenommen. Nun muss die Reynoldszahl des realen Körpers berechnet werden: $Re = (v_M * D_h) / \nu$. Dabei ist v_M die Strömungsgeschwindigkeit (bei angenommener Windstille gleichzusetzen mit der Fahrtgeschwindigkeit), ν die kinematische

Viskosität, eine in Tabellen nachschlagbare Zahl, und für den hydraulischen Durchmesser D_h wird bei Zylindern üblicherweise der Durchmesser d genommen (vgl. ²). Die Reynoldszahl des Modells muss dieser dann ungefähr entsprechen, d.h. man wählt Querschnitt und Umfang des Zylinders dann so, dass sich für die benötigten Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal, um die gewünschten realen Geschwindigkeiten simulieren zu können, Werte ergeben, die das Gebläse des Windkanals auch leisten kann.

Ermittlung der Reynoldszahl des realen Körpers:

Höhe (mit Skates und Helm in Skateposition) : 150cm

Breite: 50cm

kinematische Viskosität von Luft bei einem Druck von 1013hPa und 20°C: $15,13 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
(vgl. ³)

Fahrtgeschwindigkeit: 8 m/s

$$Re = (8\text{m/s} * 0,5\text{m}) / (15,13 * 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}) = 264375$$

Durch schnelles Überschlagen (da $\vartheta = \text{const.}$, gilt: $v_{\text{real}} * d_{\text{real}} = v_{\text{Modell}} * d_{\text{Modell}}$) wird bereits klar, dass in einem nicht zu großen Windkanal bei einer maximal begrenzten Windgeschwindigkeit von 40m/s das Erreichen dieser Reynoldszahl beim Modell schwierig werden wird. Die Höhe, die der Zylinder maximal haben darf, ist nämlich auch durch die Höhe des Windkanals von 30,5cm begrenzt, da ein Drittel dieser nicht ausgefüllt sein sollte. Der Durchmesser resultiert dann aus der Höhe, da das Verhältnis Höhe:Breite von 1:3 des realen Körpers beibehalten werden soll.

Höhe: 20cm

Breite: 7cm

$$Re = (40\text{m/s} * 0,07\text{m}) / (15,13 * 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}) = 185062$$

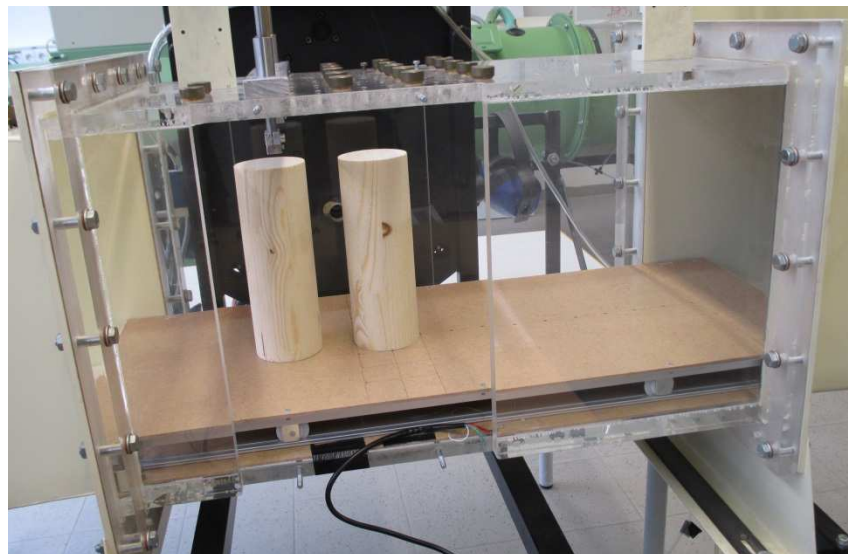
Somit ist die Reynoldszahl des Modells um 30% kleiner als die des realen Körpers und bewegt sich noch im Bereich des Akzeptablen, da die Messung aufgrund der Annahme des Skaters als Zylinder ohnehin stark vereinfacht ist.

² (<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/fluidtechnik/hydraulik/70-reynoldszahl>)

³ (http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_luft.php5)

2.2.2 Aufbau des Modells

Der Zylinder wird auf einer Platte im vorderen Bereich mittig befestigt. Diese Platte verfügt über ein Lochmuster, sodass in verschiedenen Positionen ein weiterer Zylinder eingeschraubt werden kann. Die Platte besitzt Rollen, die in den Schienen einer zweiten, ebenso großen Platte laufen. So kann die untere Platte am Boden des Windkanals festgeklebt werden, während die obere noch frei beweglich ist. Das Anheben der oberen Platte bei Strömungseinfluss wird durch Winkel verhindert, die dafür sorgen, dass die Platte nur in horizontaler Richtung beweglich ist. Zwischen den beiden Platten befindet sich ein Kraftsensor der Firma „Althen GmbH Mess- und Sensortechnik“, ein Dehnungsmessstreifen, der verbogen wird, wenn die obere Platte durch die Krafteinwirkung beim Einströmen von Luft auf den Zylinder bewegt wird.



2.2.3 Durchführung der Versuche

Bevor die untere Platte in den Windkanal geklebt wurde, wurde der Kraftsensor mit einem 500g Massestück kalibriert und auch eine geeignete Einstellung des Verstärkerbereichs ermittelt. Doch trotz größtmöglicher Einstellung ergab sich bei der Durchführung die Problematik, dass wenn die Maximalgeschwindigkeit des Windkanals ausgenutzt wurde, der Verstärker zu empfindlich war und die Kraft über den messbaren Bereich hinausging. Daher wurde die Geschwindigkeit solange gedrosselt, bis das Signal wieder gemessen werden konnte. Diese Geschwindigkeit, mit der nun alle Versuche durchgeführt wurden, kann über

die Differenz des Staudrucks bei aus- und eingeschaltetem Windkanal ermittelt werden. Die Anlage verfügt nämlich über ein solches Messsystem mit Pitotrohr.

Hierzu kann aus der Bernoulli – Gleichung $\Delta p = \rho/2 \cdot v^2$ verwendet werden, wobei $\rho = 1,204\text{kg/m}^3$, Dichte von Luft, und Δp die Staudruckdifferenz. Die ermittelte Differenz der Wassersäule beträgt 16mm. Daraus lässt sich die Druckdifferenz in Pascal berechnen. Mit der Formel $\rho = h_{\text{mmWS}} \cdot g \cdot 1 / (1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot (t_0 - 4))$ und einer Raumtemperatur $t_0 = 22^\circ\text{C}$ ergibt sich: $\Delta p = 156,3$. Daraus folgt mit $v^2 = (2 \cdot 156,3\text{Pa}) / 1,204\text{kg/m}^3$ für $v = 16,1\text{m/s}$. Das bedeutet aber auch eine andere Reynoldszahl: $Re = 61483$ und damit kann die Geschwindigkeit beim realen Körper berechnet werden, die dann nur noch etwa 8km/h betragen würde. Allerdings ist es nicht essentiell wichtig, dass die Reynoldszahl in Realität und Modell exakt übereinstimmen. Trotzdem bedeutet es, dass der Effekt, der messbar ist, wohl geringer ist, als wenn in der Realität 28km/h gefahren werden, für welche Geschwindigkeit ursprünglich Versuche geplant waren.

Der vorderste Zylinder stand immer fest auf seiner Position, während ein weiterer in immer größer werdendem Abstand direkt hinter ihm und schräg hinter ihm platziert wurde.

Außerdem wurden Messungen mit zwei Zylindern nebeneinander und einem alleinstehenden durchgeführt. Bei jedem Versuch wurden, nach etwa 30s Wartezeit bis der Windkanal die endgültige Geschwindigkeit erreicht hatte, etwa 30s lang die Signale des Kraftsensors mit Hilfe des Programms „ForceGauge“ von der LMU München aufgezeichnet, was etwa 87500 Messwerte lieferte. Aus diesen konnte jeweils der Mittelwert berechnet werden, der auf drei Stellen nach dem Komma gerundet wurde. Durch eine „Leermessung“ ohne Zylinder, nur mit dem Modell, konnte auch die Kraft ermittelt werden, die auf das Modell als solches wirkt, also die von den Werten abgezogen werden muss, diese betrug $0,383\text{ N}$.

Als weiteren Versuch wurde noch versucht, die Strömung zu visualisieren. Dazu wurden die Zylinder, damit sie die Farbe nicht aufsaugten, schwarz lackiert und mit einer aus gelb-grün erscheinenden Uranin-Farbpigmenten der Firma „Kremer GmbH und Co. KG“ und Holzwachs angerührten Farbe bestrichen. Dann wurde der Windkanal eingeschaltet und direkt im Anschluss wurden die Zylinder mit der verlaufenen Farbe fotografiert. Diese Versuche führte ich bei in verschiedenem Abstand hintereinanderstehenden Zylindern durch.

3 Ergebnisse

3.1 Änderung der Herzfrequenz

Bei diesem Versuch zeigte sich, dass es äußerst schwierig ist, die relative Kraftersparnis anhand von physiologischen Größen zu ermitteln. Die ermittelten Herzfrequenzen an den drei Positionen für jeden Fahrer bei 30km/h wurden in einer Tabelle dargestellt, sowie bei 35km/h in einer gesonderten. Aus meinen Ergebnissen kann nicht erkannt werden, dass die zweiten oder dritten Fahrer eine deutlich niedrigere Herzfrequenz haben. Fahrer 2 zeigt bei 30km/h den von mir erwarteten Verlauf, mit dem Puls an zweiter Stelle am niedrigsten und an erster am höchsten (s. Abb.1). Fahrer 3 bei 35km/h passt auch noch dazu mit einem Puls von 200 an erster Stelle und an zweiter und dritter niedriger mit 195 und 193 (s. Abb.2). Vollkommen entgegen meiner Erwartung waren jedoch die Werte von Fahrer 1 bei 35km/h, der an erster Stelle den niedrigsten Pulswert erreichte und an zweiter und dritter Stelle geringfügig höhere.

Pulsfrequenz bei Geschwindigkeit 30 km/h			
	Position 1	Position 2	Position 3
Fahrer 1	175 (2min)	176 (6min)	175 (4min)
Fahrer 2	175 (4min)	160 (2min)	170 (6min)
Fahrer 3	190 (6min)	185 (4min)	190 (2min)

Abb. 1

Pulsfrequenz bei Geschwindigkeit 35 km/h			
	Position 1	Position 2	Position 3
Fahrer 1	185	187	187
Fahrer 2	180	175	180
Fahrer 3	200	195	193

Abb. 2

3.2 Modell im Windkanal

Bei meinen Versuchen stellten sich verschiedene Auffälligkeiten heraus:

a) Höhere Kraft auf einen einzelnen Zylinder als auf zwei hintereinanderstehende

Die Kraft, die auf einen einzelnen Zylinder wirkt, ist höher als die, die auf zwei direkt hintereinanderstehende wirkt. Die erstere beträgt 2,622N und die zweite 2,292N (s. Abb.3). Darüber wie viel Kraft aber exakt auf den ersten und den zweiten Körper wirkt, kann man

aber eigentlich nur spekulieren, da ich keine Einzelmessungen durchgeführt habe, es ist aber davon auszugehen, dass die auf den ersten Körper deutlich höher ist.

b) Höhere Kraft auf einen Zylinder neben einem anderen als auf einen alleinstehenden

Auf einen einzelnen, alleinstehenden Zylinder wirkt die Kraft 2,622N. Auf zwei nebeneinanderstehende Zylinder wirken 7,395N, das heißt auf jeden 3,70N (s. Abb.3).

Grundmessungen	
Beschreibung	Kraft in N
ohne Zylinder	0,383
ein Zylinder	2,622
zwei Zylinder nebeneinander	7,395
pro Zylinder	3,700
zwei Zylinder hintereinander	2,296

Abb. 3

c) Zunahme der Gesamtkraft auf die Zylinder mit größer werdendem Abstand

Die Kraft, die auf die Zylinder, die direkt hintereinander stehen, nimmt wie angenommen, mit größer werdendem Abstand der beiden Zylinder voneinander zu. Allerdings nicht linear, sondern erst stark, also bei sich fast berührenden Körpern, wirken 2,296N und bei einer Radiuslänge Abstand, also 3,5cm schon 3,384N. Ab etwa 21cm Abstand nimmt die Kraft nicht mehr nennenswert zu und bleibt bei fast 4,3N, also dem 1,6-Fachen von der Kraftwirkung auf die direkt hintereinanderstehenden Zylinder (s. Abb. 4,5).

Abstand in cm	Mittelwert Kraft in N
0,0	2,296
3,5	3,384
7,0	3,584
10,5	3,519
14,0	3,629
17,5	3,870
21,0	4,112
24,5	4,177
28,0	4,23
31,5	4,317
35,0	4,293
38,5	4,273

Abb. 4

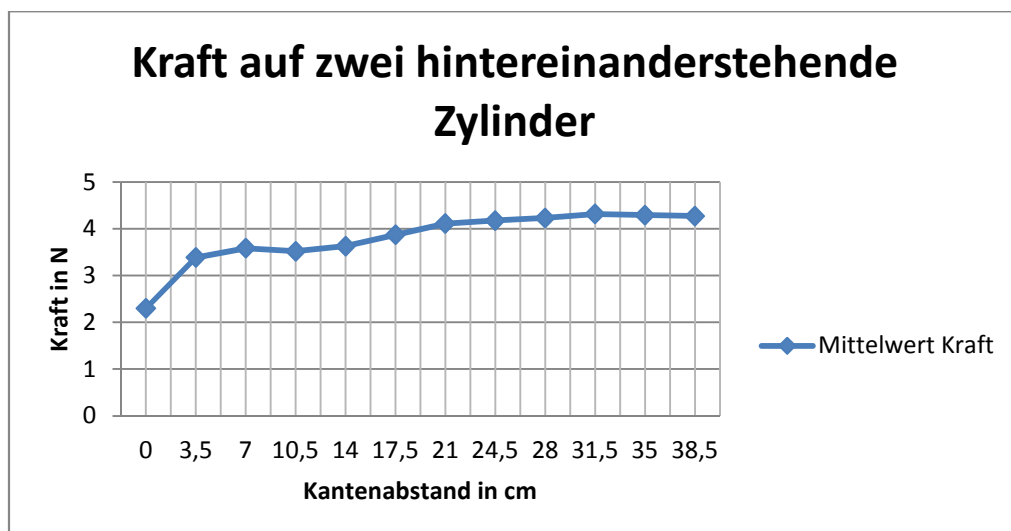


Abb. 5

d) Deutlich erhöhte Kraft bei bereits geringfügiger seitlicher Positionierung

Die Versuche mit der Schrägstellung des zweiten Zylinders wurden nur auf eine Seite des ersten Zylinders durchgeführt, da die Kraftwirkung symmetrisch sein muss. Bei schräger Positionierung kann erkannt werden, dass die Gesamtkraft rasch zunimmt, je größer bei der Schrägstellung die Komponente des seitlichen Verschiebens ist. Berühren sich die Zylinder beinahe und sind schräg gestellt, so beträgt die Gesamtkraft bereits 4,737N,

anstatt der 2,296N, die bei direkter Hintereinanderstellung erreicht werden und beträgt somit das 2,1-Fache (s. Abb. 7). Bei weiterer seitlicher Verrückung um eine Radiuslänge erhöht sich die Kraft langsamer weiter mit 5,356N.

Im Folgenden wurde berechnet, wie viel Prozent an Kraft an einer bestimmten Position vom zweiten Zylinder eingespart werden kann im Vergleich zu der Kraft, die auf einen Zylinder wirkt, der neben dem anderen steht. Dabei wurde als die auf den zweiten Zylinder wirkende Kraft die Differenz aus Gesamtkraft und Kraft, die ein Zylinder neben einem anderen aufbringen muss, gewählt. Diese Berechnung ist allerdings nur eine Vereinfachung, da berücksichtigt werden müsste, dass auf einen einzelnen Zylinder, eine geringere Kraft wirkt (im Gegensatz dazu, wenn er neben einem anderen steht) und eine noch geringere, wenn sich in seinem Nachlauf ein weiterer Zylinder befindet. Bei der Schrägstellung ist davon auszugehen, dass der zweite Zylinder sich teilweise im Nachlauf des ersten befindet und die Kraft auf diesen so geringfügig beeinflusst und tatsächlich auf den ersten eine kleinere Kraft wirkt als angenommen. Das würde bedeuten, dass der Kraftanteil auf den zweiten Zylinder höher ist, weil als Kraftwirkung auf den ersten ein geringerer Wert abgezogen werden müsste. Da jedoch der Einfluss des zweiten Körpers auf den ersten sich selbst immer wieder mit Positionsveränderung ändert und zudem mit zunehmender seitlicher Verschiebung immer geringer wird und Messungen in Bezug auf diesen Faktor mit meinem Modell nicht möglich sind, wird vereinfachend eine konstante Kraft auf den ersten Körper angenommen, nämlich 3,700N, die auf ihn wirken, wenn er neben einem anderen steht.

In der Darstellung ist der rote Kreis der Mittelpunkt des Zylinders, dessen Platz fest bleibt, die grünen Kreise stellen jeweils die möglichen Positionen der Mittelpunkte des zweiten Zylinders dar, die Anströmrichtung ist von oben nach unten (s. Abb. 6). Es wird nicht korrekterweise, nur zur vereinfachenden Veranschaulichung davon ausgegangen, dass der zweite Zylinder 100% Kraftersparnis hat. Es kann erkannt werden, dass die Kraft auf den zweiten Zylinder immer, unabhängig vom vertikalen Abstand in der Zeichnung zum rot gezeichneten Zylinder, mit zunehmendem horizontalem Abstand rasch abnimmt. Die Abnahme mit zunehmendem horizontalem Abstand ist geringer, wenn der vertikale Abstand größer ist. So hat ein Zylinder mit einer Radiuslänge vertikalem und horizontalem Abstand 72% Kraftersparnis, während einer mit ebenfalls einer Radiuslänge

horizontalem, aber zwei Radiuslängen vertikalem Abstand 96% Kraftersparnis. Wie sich schon beim Ergebnis bei drei Radiuslängen vertikalem Abstand andeutet, nimmt die Kraftersparnis aber wieder ab, wenn der vertikale Abstand noch größer wird.

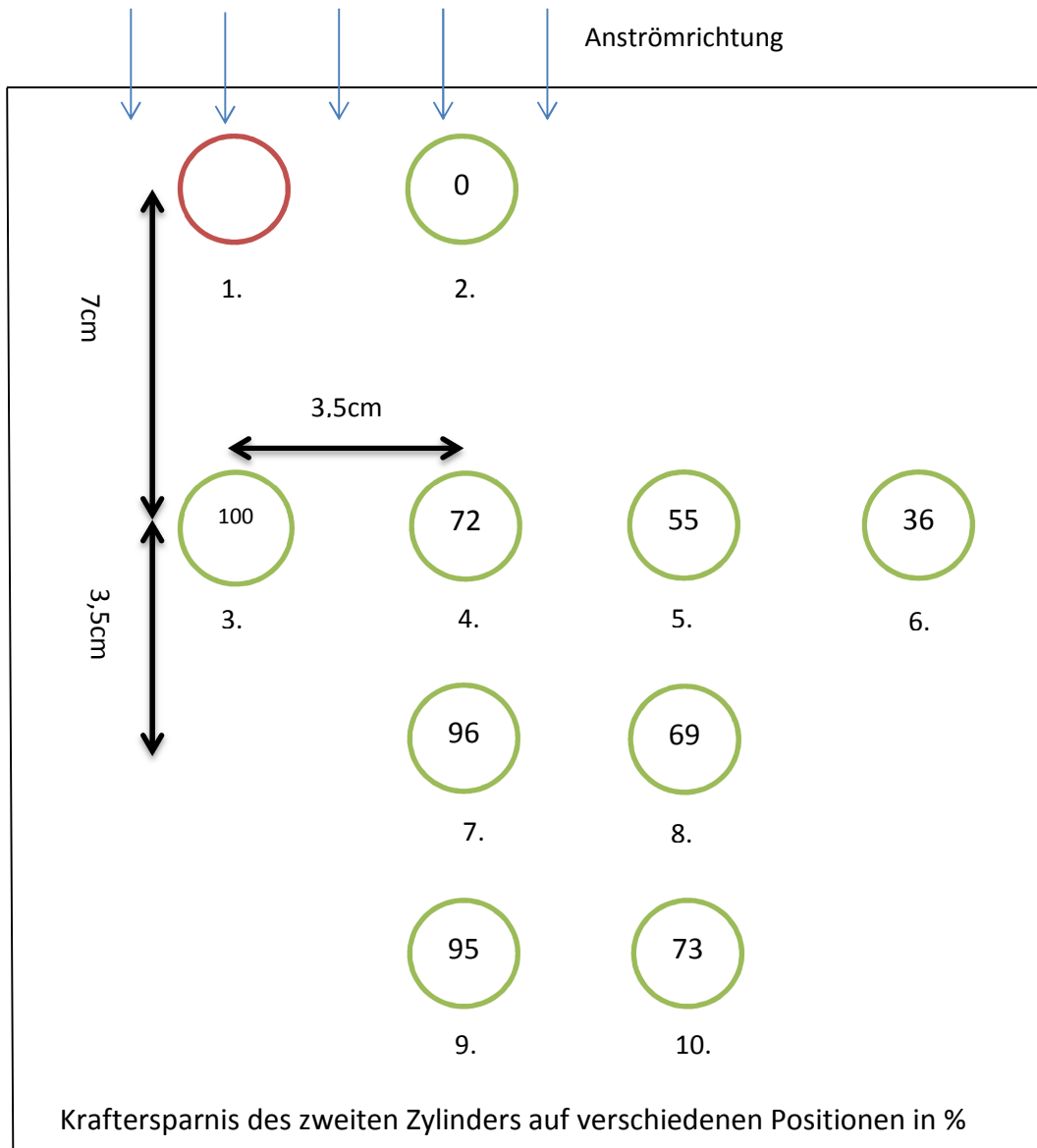


Abb. 6

Position	Gesamtkraft in N
2.	7,395
3.	2,296
4.	4,737
5.	5,356
6.	6,053
7.	3,857
8.	4,840
9.	3,867
10.	4,684

Abb. 7

e) Verschiebung des Ablösungspunkts nach hinten mit abnehmendem Kantenabstand

Bei den Aufnahmen wurde deutlich, dass der Punkt, an dem die Luft den Zylinder nicht mehr laminar umströmt, sondern sich ablöst und als turbulente Strömung hinter dem Zylinder verwirbelt, erkennbar als farbigen Strich, von der Seite des zweiten Zylinders immer weiter nach hinten verschiebt, je näher er an den ersten kommt. Diese Striche müssen zu beiden Seiten zu sehen sein, wegen der Symmetrie reicht es aber, eine Seite zu betrachten. Zusammenfallen tun die Striche jedoch nie, denn das würde ja keinen Strömungswiderstand mehr zu haben bedeuten.

f) Relativ hoher C_w – Wert des umströmten Zylinders

Der c_w – Wert wird oft gebraucht, um etwas über die Windschlüpfrigkeit eines Körpers auszusagen. $c_w = 2 F / (\rho \cdot v^2 \cdot A)$, wobei F die wirkende Kraft sei, $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$ die Dichte der Luft, v die Windgeschwindigkeit und A die Querschnittsfläche des umströmten Körpers. Für die des Zylinders gilt: $A = h \cdot d$, $A = 0,00735 \text{ m}^2$. Da die Geschwindigkeit, die Dichte und die Querschnittsfläche bei meinen Versuchen Konstanten sind, ist der c_w - Wert direkt proportional zur Kraft.

Bei dem einzelnen alleinstehenden Zylinder beträgt der c_w -Wert $c_w = 2,28$, bei der Versuchsanordnung, bei der der zweite in verschiedenem Abstand hinter dem ersten steht, werden Werte zwischen etwa zwei und 3,7 erreicht (s. Abb. 8), was relativ hohe

Werte sind. Zum Vergleich: Ein Kleinwagen ($A = 1,8\text{m}^2$) hat bei 80km/h einen c_w -Wert um 0,5 (vgl. ⁴).

Messreihe Zylinder hintereinander	
c _w -Wert	Kraft in N
2,002	2,296
2,950	3,384
3,125	3,584
3,068	3,519
3,164	3,629
3,374	3,870
3,585	4,112
3,642	4,177
3,688	4,230
3,764	4,317
3,743	4,293
3,726	4,273

Abb. 8

4 Interpretation

4.1 Änderung der Herzfrequenz

Die Ergebnisse entsprachen nicht meiner Erwartung, nach der die Herzfrequenz an zweiter und dritter Stelle deutlich niedriger als an erster hätte sein sollen. Dieses Ergebnis könnte damit erklärt werden, dass der menschliche Körper keine Maschine ist, die immer gleich leistungsfähig funktioniert. Bei solchen Versuchen spielt auch die Erschöpfung eine Rolle, was nämlich bisher nicht berücksichtigt wurde, ist, dass wenn beispielsweise Fahrer 3 an erste Stelle kommt, ist er schon viel länger gefahren, als wenn Fahrer 1 zu Beginn an erster Position fährt. In der Tabelle, in der die Werte bei 30km/h dargestellt sind, wurden die Zeitspannen eingefügt, die die Fahrer beim Feststellen des jeweiligen Pulses nun insgesamt schon gefahren sind. So könnte man erklären, warum Fahrer 1 an zweiter Stelle den höchsten Puls hat, da er beim Fahren an erster und dritter Stelle noch ausgeruhter war und an zweiter Stelle, wo möglicherweise die Kraft, die er aufwenden muss, zwar am geringsten sein könnte, er aber bereits erschöpft ist. Ein weiterer Punkt ist, dass sich nicht jeder Mensch

⁴ (<http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Luftwiderstand.htm>)

gleich schnell umstellt, d.h. dass bei manchen der Puls erst nach fünf Minuten an zweiter Stelle absinkt, wenn er vorher an erster gefahren ist, bei anderen dagegen schon nach zwei Minuten. Eine Verlängerung der Intervalle würde aber insgesamt wieder eine längere Fahrtzeit bedeuten, die wieder den Faktor Erschöpfung begünstigt.

Zudem spielen andere Einflüsse eine Rolle wie Windverhältnisse, Psyche (Gedanken wie „Kann ich mit den anderen diese Geschwindigkeit mithalten?“, „Ich muss mich konzentrieren, dass ich die Schritte meines Vordermanns nachfahre.“) und die Kurven der Bahn. Dadurch ist es nämlich keine andauernd gleichmäßige Bewegung, sondern wird durch Übersetzen unterbrochen. Wie sich das tatsächlich auf die Herzfrequenz auswirkt, hängt natürlich stark vom Fahrer, seiner Bahnroutine und seinem technischen Können ab.

Letztlich kann man sagen, dass, um von der Herzfrequenz, einer physiologischen Größe, auf Kraftersparnis zu schließen, sehr aufwändige Untersuchungen nötig wären, bei denen jeder Fahrer einmal an jeder Stelle fährt, dann folgt eine Regenerationsphase, usw. Dazu sind jedoch freiwillige Testpersonen erforderlich, die Sicherstellung von durchgehend gleichen Bedingungen, sowie möglicherweise eine präzisere Messung, die die körperliche Leistung nicht nur über den Puls ermittelt, sondern über die Sauerstoffaufnahme und den Laktatwert. Die bei der Vorgehensweise genannte Studie der Sporthochschule Köln führte die Untersuchungen mit Erholungsphasen durch und konnte bei der Herzfrequenz an zweiter oder dritter Stelle im Vergleich zur ersten zwar niedrigere Werte feststellen, aber auch nur mit geringem Unterschied (vgl. ⁵). Bei der Laktatkonzentration dagegen waren die Unterschiede schon deutlicher, sodass die geringere Belastung beim Windschattenfahren sich schon auf die physiologischen Größen auswirkt, diese aber nur schwer greifbar sind, weil sie von vielen Faktoren abhängen, die Laktatkonzentration ist zum Beispiel auch von Mensch zu Mensch bei einer gewissen Belastungsintensität verschieden.

⁵ (<http://www.handbikesport.de/handbike/handbike-windschatten-studie.php>)

4.2 Modell im Windkanal

Hier wird nun auf die einzelnen Beobachtungen eingegangen:

Zu a): Dass die Kraft auf einen Zylinder, der direkt vor einem zweiten steht, geringer ist als die auf einen alleinstehenden, könnte man damit begründen, dass der zweite Zylinder sich im Nachlauf des ersten befindet und den gesamten Nachlauf verkleinert. Bei einem Körper ohne jeden Strömungswiderstand ist die Vektorsumme der Druckkräfte, die von vorne durch die anströmende Luft auf den Körper wirken gleich der Vektorsumme der Druckkräfte, die von hinten nach vorne auf den Körper wirken.

Im Realfall jedoch bildet sich hinter dem Körper ein Nachlauf, d.h. durch Verwirbelungen wird die Druckenergie in eine andere Energieform, in eine Art Wärme – bzw.

Reibungsenergie (durch „Reibung“ zwischen den Luftmolekülen) umgewandelt. Dadurch ist die Vektorsumme der Drücke, die von hinten auf den Körper nach vorne wirken kleiner, d.h. es entsteht eine Druckdifferenz und eine resultierende Kraft nach hinten, dies ist der mess- und fühlbare Widerstand. Die Luft umströmt den Zylinder dabei zunächst laminar, bevor es zu einer Ablösung und zur Bildung des Nachlaufs kommt. Dies konnte ich auch schon durch die Versuche mit den Farbpigmenten beobachten (siehe 3.2 e)). Bei direkt hintereinander stehenden Zylindern steht der zweite Zylinder direkt im Nachlauf des ersten, d.h. die Ablösungen treffen als turbulente Strömung auf ihn, jedoch weiter hinten. Daher erfolgt eine Ablösung erst später und der Nachlauf ist kleiner. Die Aufnahmen mit den Farbpigmenten zeigten nämlich auch eine Ablösung weiter hinten und damit eine kleinere Fläche des Nachlaufs, je näher die Zylinder beieinanderstehen. Das bedeutet wieder eine geringere Druckdifferenz und somit einen geringeren Widerstand. Der Körper, bestehend aus zwei sich berührenden Zylindern muss somit auch einen geringeren c_w -Wert haben. Folglich wäre eine Skateraufstellung, die natürlich real nicht umsetzbar ist, am besten, bei der sich die Fahrer berühren und Körper an Körper im Gleichschritt fahren, nicht nur für den zweiten Fahrer äußerst günstig, sondern würde auch dem ersten Fahrer Ersparnis bringen.

Zu b): Die Tatsache, dass die Kraft auf einen einzelnen Körper kleiner ist als die auf einen Körper, der mit 7cm Kantenabstand neben einem anderen gleichen Körper steht, ist wohl eine Folge des recht kleinen Querschnitts des Windkanals. Die Wände üben hier schon einen großen Einfluss aus, da die Luft nicht ungehindert strömen kann und sich staut. Somit

ergeben sich höhere lokale Geschwindigkeiten, die zu höheren Druckkräften führen und somit eine höhere Kraft gemessen wird als in der Realität wirkt.

Zu c): Dieses Ergebnis entsprach vollkommen meiner Erwartung, dass die Gesamtkraft mit zunehmendem Abstand der Körper größer wird. Wird der zweite Zylinder nun nach hinten bewegt, so wird die Gesamtkraft langsam größer. In den Bereich, in dem sie das Doppelte der Kraft auf einen einzelnen Zylinder beträgt, also vollkommen unabhängig voneinander sind, komme ich jedoch mit den Maßen meines Modells gar nicht. Die Zylinder beeinflussen sich also noch bei recht großem Abstand. Der Nachlauf insgesamt ist kleiner, je näher die Zylinder beieinanderstehen, wie bei den Farbpigmenten (siehe 3.2 e)) beobachtet werden konnte, weil die Strömung wenn sie auf den zweiten Zylinder trifft, eine geringere Geschwindigkeit hat und wegen der Fluktuation, also dass die Strömung als turbulente auftritt und es dann erst später zu Ablösungen kommt. Bis 21cm Kantenabstand etwa steigt die Gesamtkraft noch an, bis 3,5cm sogar sehr rasch, das rührt daher, dass bei Berührung sich nur ein Nachlauf hinter dem zweiten Körper bildet und sobald sich dazwischen Abstand befindet, gibt es einen Nachlauf und damit Energieverluste hinter dem ersten Zylinder bis die Strömung auf den zweiten trifft und hinter dem zweiten. Mathematisch lässt sich die Strömung, wenn sie nicht mehr laminar ist, nur äußerst schwierig beschreiben, nämlich über numerische Verfahren. Daher ist es schwierig diese in andere Energieformen umgewandelte Druckenergie zu bestimmen.

Zu d): Diese Versuchsanordnung lässt einen Rückschluss auf die räumliche Ausdehnung des Nachlaufs hinter dem Zylinder zu. Direkt schräg neben ihm scheint er nicht besonders ausgeprägt zu sein, wie an der rasch zunehmenden Gesamtkraft mit größer werdender seitlicher Verschiebung erkannt werden kann. Dann scheint er allerdings sich nach hinten auszuweiten, weil mit zunehmendem vertikalem Abstand bei horizontaler Verschiebung die Kraft erst langsamer zunimmt. Das lässt auf eine kegelartige Form schließen. Weitere Messungen bei einem solch weiten Abstand von der Mitte wie bei Position 6 (siehe Abb. 6) wurden deshalb nicht durchgeführt, da anzunehmen ist, dass so nahe der Wand des Windkanals diese bereits einen Einfluss auf die Strömung nimmt. Inwieweit dieses Ergebnis bei 6. also stimmt, kann man nicht abschätzen ohne weitere Untersuchungen zum Einfluss der Wände, wie bereits in b) angesprochen wurde. Da dieses Ergebnis aber die Tendenz fortsetzt, die sich bei Position 5 im Vergleich zu Position 4 andeutet, kann man doch davon

ausgehen, dass das Ergebnis nicht vollkommen falsch ist. Für einen Skater bedeutet die kegelartige Form, dass wenn es ihm zum Beispiel aufgrund fahrtechnischen Könnens nicht möglich ist, direkt hinter seinem Vordermann zu fahren und er eine versetzte Position einnehmen muss, günstiger ist, gleichzeitig etwas mehr vertikalen Abstand zu lassen.

Zu e): Die Ergebnisse von e) wurden bereits in a) und c) bei der Erklärung der geringeren Kraft bei zwei direkt hintereinanderstehenden Zylindern und der Zunahme der Kraft bei größerem Abstand aufgegriffen.

Zu f): Bei dem recht hohen c_w -Wert muss bedacht werden, dass es sich hier um den c_w -Wert eines Zylinders handelt, der als Annäherung gedacht ist. Entscheidend ist insbesondere beim Vergleich mit dem Auto wahrscheinlich vor allem die Oberkante des Zylinders, wo sich leicht Ablösungen bilden können, die hinter dem Körper verwirbeln und so für einen hohen Luftwiderstand sorgen. Das Auto ist stromlinienförmiger gebaut, d.h. weist an der Oberseite flache Übergänge und keine Kanten auf. Auf den ersten Blick erschien es mir seltsam, dass ein Modellzylinder im Vergleich zu einem doch großen und geometrisch komplexeren Körper wie einem Auto einen solch hohen Widerstandsbeiwert hat, jedoch muss man hier bedenken, dass die Kraft und die angeströmte Fläche ja im Verhältnis zueinander stehen und der Zylinder eben den Nachteil der deutlichen Kante hat. Beim Menschen wird der c_w -Wert wohl etwas niedriger sein, da er keine so deutlichen Kanten wie ein Zylinder hat, jedoch auch nicht so niedrig wie der des Autos.

5 Ausblick

Es wäre noch interessant, wenn ein anderer Verstärker zur Verfügung steht, die Messungen bei der eigentlich geplanten Windgeschwindigkeit durchzuführen und Vergleiche mit den Ergebnissen bei dieser niedrigeren Geschwindigkeit zu ziehen. Ebenfalls denkbar wären Versuche, bei denen der erste Zylinder nicht auf der Platte, sondern an den Wänden fixiert wird und so die Kraft, die nur auf den zweiten Zylinder wirkt, ermittelt werden kann. Daraus ließen sich dann zum Beispiel die Kraftanteile auf ersten und zweiten Zylinder bei direkter Hintereinanderstellung und damit die quantitative Ersparnis des ersten berechnen. Weitere Versuche sind auch noch denkbar, die sich genauer mit dem Phänomen des Nachlaufs

beschäftigen, z.B. das Pitotrohr direkt hinter und schräg neben dem Zylinder zu platzieren, um den Staudruck zu ermitteln.

Quellenverzeichnis

<http://www.handbikesport.de/handbike/handbike-windschatten-studie.php>
Abgerufen am 26. 1. 2014

<http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Luftwiderstand.htm> Abgerufen am 26. 1. 2014

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/fluidtechnik/hydraulik/70-reynoldszahl>
Abgerufen am 26. 1. 2014

http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_luft.php5 Abgerufen am 26. 1. 2014

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Abb. 2 Pulsfrequenzen bei 30 und 35km/h.....	7
Abb. 3	Grundmessungen	8
Abb. 4	Kraft auf zwei hintereinanderstehende Zylinder, Tabelle	9
Abb. 5	Kraft auf zwei hintereinanderstehende Zylinder, Diagramm	9
Abb. 6	Kraftersparnis des zweiten Zylinders auf verschiedenen Positionen, Darstellung.....	11
Abb. 7	Kraftersparnis des zweiten Zylinders auf verschiedenen Positionen, Tabelle	12
Abb. 8	c_w – Werte Messreihe Zylinder hintereinander	13