

Aikins (re.) und Baumgartner während eines Testtags mit einem Wingsuit.



diver Aikins: „Wo es Luft gibt, die dich taumeln lässt, gibt es Luft, mit der du arbeiten kannst. Wir können in der Luft mehr, als sich viele Aerodynamiker vorstellen können. 1960, als Joe Kittinger sprang, hatte er gerade einmal 33 Fallschirmsprünge hinter sich, Felix steht bei über 3000. 1960 lag der Rekord für Formations-Freifall bei acht Springern, heute sind wir bei knapp 500 Springern, die sich im freien Fall die Hand reichen.“

Und trotzdem: „Aus so großer Höhe wie Felix bei Red Bull Stratos ist noch keiner gesprungen. Um wirklich zu erfahren, was bei einem Freifall aus einer solchen Höhe passiert, gibt es nur eine Möglichkeit: Jemand muss es ausprobieren.“

Luke Aikins' Job ist es, alle Eventualitäten zu bedenken, Probleme vorherzusehen und dafür Lösungen zu erarbeiten. Luke hat mit dem Red Bull Stratos-Schirmsystem über 100 Sprünge absolviert und jede



Geschwindigkeitskontrolle

Heftige Diskussionen im Internet: Kann ein Mensch im freien Fall die Schallmauer durchbrechen? Wir lassen Physiker DDr. Martin Apolin von der Wiener Fakultät für Physik nachrechnen – und gelangen zu erstaunlichen Ergebnissen.

Text: Martin Apolin

Warum kann Felix Baumgartner die Schallmauer durchbrechen, wenn ein Fallschirmspringer kopfüber (in Head-down-Position) „bloß“ etwa 300 km/h erreicht? Die kurze Antwort: Erstens ist in großen Höhen die Luftdichte geringer, weshalb die Fallgeschwindigkeit höher werden kann. Zweitens ist die Schallgeschwindigkeit dort oben aufgrund der tiefen Temperaturen geringer. Beide Effekte zusammen ermöglichen das Durchbrechen der Schallmauer. Das ist die Kurzversion. Will man es allerdings genauer wissen und konkrete Zahlen berechnen, muss man tiefer in die Physik eintauchen. Kompressibilitätseffekte durch Druckwellen lasse ich bei meiner Analyse unberücksichtigt.

Zunächst überlegen wir, wovon die erreichbare Maximalgeschwindigkeit abhängt. Dazu muss man die zwei Kräfte kennen, die auf eine fallende Person wirken. Erstens die Gravitationskraft $F_G = -mg$, wobei m die Masse des Sprin-

gers samt Ausrüstung (in unserem Fall 140 kg) ist und g die Erdbeschleunigung. Weil F_G nach unten zeigt, verpasst man ihr ein negatives Vorzeichen. Bewegt sich der Springer durch die Luft, tritt eine bremsende Kraft auf, die Luftwiderstandskraft: $F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 c_w A$. ρ ist die Luftdichte, c_w der Strömungswiderstandskoeffizient, A die Anströmfläche und v die momentane Geschwindigkeit. Die Gesamtkraft, die auf den Springer wirkt, ergibt sich dann durch $F_{\text{total}} = F_L + F_G = \frac{1}{2}\rho v^2 c_w A - mg$.

Auf Meeresniveau beträgt die Fallbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$, in 36,5 Kilometer Höhe ist sie nahezu gleich hoch. Anders verhält es sich mit der Luftwiderstandskraft, die ja proportional mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst: $F_L \sim v^2$. Verdoppelt sich die Geschwindigkeit, vervierfacht sich also F_L . Die Maximalgeschwindigkeit wird dann erreicht, wenn Luftwiderstandskraft und Gravitationskraft einander die Waage halten, F_{total} also null wird. Deshalb spricht man auch von der Gleichgewichtsgeschwindigkeit, weil sich dort beide Kräfte die Waage halten. Man kann in diesem Fall die Gleichung für die Gesamtkraft null setzen, nach v auflösen und erhält $v = \sqrt{2mg/\rho c_w A}$.

Das bestätigt die eingangs aufgestellte Behauptung: Bei gleicher Körperhaltung und Masse sind alle Werte bis auf die Luftdichte konstant und v daher proportional zu $1/\sqrt{\rho}$. Weil die Luft nach oben

nur denkbare Fehlfunktion ausprobiert. Angenommen, Felix springt und der Reserveschirm öffnet sich irrtümlich: Das würde er nicht überleben, da er zu wenig Sauerstoff für den langsamen Abstieg mit sich führt. Also muss es eine Möglichkeit geben, den Reserveschirm zu kappen – etwas, das beim normalen Skydiving ein absolutes No-Go ist. Und es braucht einen, der im Selbstversuch herausfindet, ob das alles auch tatsächlich funktioniert wie gewünscht.

Luke sieht sich dennoch nicht als Versuchskaninchen, er ist kein Waghals, im Gegenteil. Er ist vielleicht der erfahrenste und coolste Skydiver der Welt. Und sein Respekt vor Felix Baumgartner ist riesig: „Felix hat bei dieser Mission so viel zu tun,

da ist es einfach hilfreich, einen Skydiver an der Seite zu haben, der einem die Testarbeit abnimmt. Auch im Rennsport gibt es Testfahrer. Der Missions-Pilot kann sich nicht um alles persönlich kümmern.“

Bei einem Trainingssprung in Taft ging ein Sprung mit dem alten Schirmsystem beinahe schief: „Felix hat am falschen Griff gezogen, der Schirm hat sich nicht geöffnet. In solchen Situationen sind schon etliche Springer gestorben: Sie sind in Panik verfallen und haben so lange an dem einen Griff gezerrt, bis es zu spät war. Felix hingegen hat einen halben Atemzug lang nachgedacht und cool eine neue Entscheidung getroffen – für den richtigen Griff. Er wartete nicht, dass ihm jemand half, sondern er agierte. Er trifft

also Entscheidungen, schnell und richtig. Das ist das Besondere an ihm. Echte Champions sehnen sich nach Situationen, in denen man versagen kann. Sie wollen zeigen, dass sie bestehen können. Die einen Fußballer fürchten sich vor dem Elfmeter, andere freuen sich aufs Schießen. Felix gehört zur zweiten Gruppe.“

Aikins sieht an Red Bull Stratos vor allem den sportlichen Wert, die Rekorde, das Bestreben, die Grenzen seines Sports ein Stück zu verschieben: „Wir wollen zeigen, dass es möglich ist, mit Raumanzug und Fallschirm aus der Stratosphäre zu springen, Überschall zu erreichen und danach sicher und kontrolliert zu landen.“

Wann würde Luke Aikins Red Bull Stratos als Erfolg werten?

„Wenn sich der Fallschirm öffnet und Felix sich bewegt, dann ist alles gut.“

„Die einen Fußballer fürchten sich vor dem Elfmeter. Andere freuen sich aufs Schießen.“

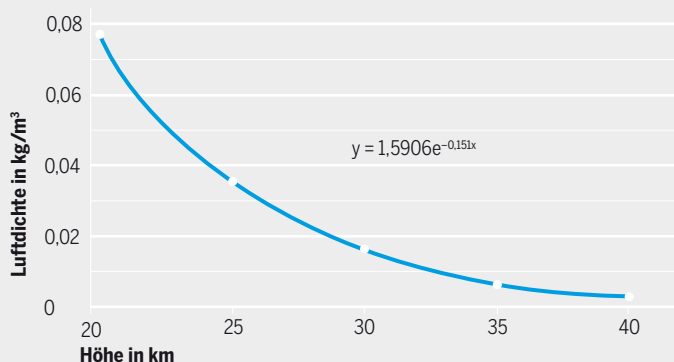


Abb. 1

Die Luftdichte nimmt in großer Höhe massiv ab und macht so den Rekordversuch erst möglich.

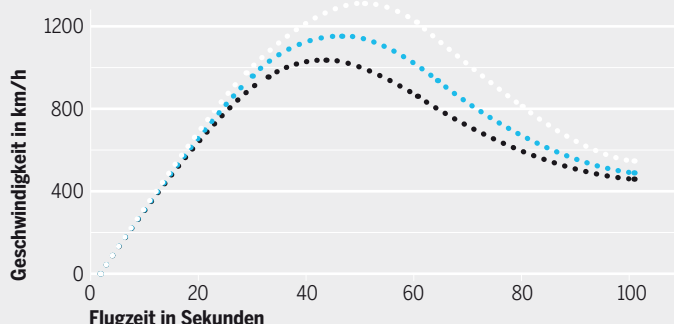


Abb. 2

Erstaunlich: Die Beschleunigung ist während der ersten rund 15 Sekunden nahezu unabhängig von der Absprunghöhe.

hin dünner wird, wächst die Gleichgewichtsgeschwindigkeit mit der Höhe. Springt Felix Baumgartner aus 36,5 Kilometern ab, wird er seine Maximalgeschwindigkeit in etwa 28.000 Meter Höhe erreichen. Dort beträgt die Luftdichte nur etwa 2 % des Normalwerts. Nimmt man die normale Luftdichte mit 1 an, beträgt der Wert in dieser Höhe also 0,02. Für die Gleichgewichtsgeschwindigkeit ergibt sich daher $\sqrt{1/\rho} = \sqrt{1/0,02} \approx 7$. Felix Baumgartner kann rund die siebenfache Geschwindigkeit wie in der dichten Atmosphäre erreichen.

Aber der Teufel steckt im Detail. Zunächst einmal ist es unmöglich, die Anströmfläche A und den Luftwiderstandsbeiwert c_w zu jedem Zeitpunkt exakt zu wissen, weil diese stark von der Körperposition abhängen und sich dadurch ständig verändern können. Man kann die durchschnittlichen Werte für Baumgartner und seinen Druckanzug aber abschätzen, wenn man den Probesprung vom 15. März 2012 auswertet. Damals sprang Felix aus 21.818 Meter Höhe und erreichte eine Maximalgeschwindigkeit von 587 km/h. Nun kann man die Werte für A und c_w in der Simulation so lange verändern, bis man auch hier auf genau diese Geschwindigkeit kommt. In unserem Fall ergibt sich für das Produkt aus A und c_w der Wert 1,07. Diesen durchschnittlichen Wert kann man nun für

Bei seinem Testsprung aus 21,8 Kilometern erreichte Felix Baumgartner eine Maximalgeschwindigkeit von 587 km/h.

„Felix kann in der Stratosphäre die siebenfache Geschwindigkeit wie in der dichten Atmosphäre erreichen.“

weitere Simulationen verwenden – natürlich nur unter der Voraussetzung, dass die anderen Sprünge in ähnlicher Körperposition ablaufen.

Ein wirklicher Knackpunkt ist aber die Abschätzung der Luftdichte. Diese verringert sich mit der Höhe, weil die unten liegende Luft durch die oberen Schichten zusammengedrückt wird. Dummerweise sinkt zusätzlich die Temperatur in den oberen Schichten stark ab, was die Dichte zusätzlich beeinflusst. Außerdem ändert sich die Luftdichte und hängt vom Tag, der Jahreszeit, der Luftfeuchtigkeit und vom Ort ab. Kurz: Man kann sie für den Zeitpunkt X niemals exakt bestimmen.

Daten aus der Troposphäre (bis 10 km) gibt es zur Genüge. Bei Daten aus der Stratosphäre (zwischen 15 und 50 km Höhe) wird aber die Luft ist wahrsten Sinn des Wortes dünn. Nimmt man die spärlichen Rohdaten für große Höhen als Basis, kann man sich der Luftdichte im Be-

reich zwischen 20 und 40 Kilometern sehr gut durch die Gleichung $\rho = 1,5906e^{-0,151h}$ annähern (Abb. 1), wobei h die Höhe in Kilometern ist. Aus wissenschaftlicher Sicht muss man aber festhalten, dass es sich dabei nur um eine Annäherung an sich ständig ändernde Werte handelt.

Nun sind wir bereit für die Simulationen (Abb. 2). Ich habe diese nur für die ersten 100 Sekunden durchgeführt, weil später die verwendete Formel für die Luftdichte eventuell nicht mehr exakt genug ist. Aber das Wichtigste ist sowieso nach etwa 50 Sekunden vorbei! Für die Simulationen habe ich neben der tatsächlichen Starthöhe von 120.000 Fuß (36.576 m) eine um 10.000 Fuß darunter (110.000 Fuß/33.528 m) und 10.000 Fuß darüber (130.000 Fuß/39.624 m) liegende gewählt, um durchzuspielen, was dann passiert. Abweichungen um einige Prozent sind durch veränderte Rahmenbedingungen möglich.

Interessanterweise unterscheiden sich die Sprünge in den ersten 10 bis 15 Sekunden nur unwesentlich. Das liegt an der extrem geringen Luftdichte in der Starthöhe. Zu Beginn ist diese so klein, dass in allen drei Fällen praktisch ein ungebrems-ter freier Fall vorliegt. Die Geschwindigkeit wächst dann linear mit der Zeit. Der fehlende Luftwiderstand zu Beginn wird auch gut durch ein Zitat von Joe Kittinger nach seinem Sprung 1960 dokumentiert: „Am Ende des Countdowns mache ich einen Schritt ins Leere. Kein Wind pfeift, meine Kleidung bläht sich nicht. Ich habe nicht die geringste Empfindung von der zunehmenden Geschwindigkeit.“

Weil man bei Sprüngen aus geringeren Höhen schneller in die dichtere Luft kommt, unterscheiden sich die Geschwindigkeiten bereits bei 30 Sekunden empfindlich (siehe Abb. 2). Zwischen dem Sprung aus der

geringsten und dem aus der größten simulierten Höhe besteht dann schon ein Unterschied von 100 km/h. Bei der Maximalgeschwindigkeit beträgt dieser Unterschied bereits über 260 km/h. Bei dem geplanten Sprung aus 120.000 Fuß wird in dieser Simulation eine Maximalgeschwindigkeit von 1157 km/h erreicht. Wie viel Mach sind das aber?

Hier tritt noch eine letzte Schwierigkeit auf. Die Schallgeschwindigkeit wird landläufig mit 1235 km/h angegeben und als Mach 1 bezeichnet. Demnach hätte Felix beim geplanten Sprung aus 120.000 Fuß nur 0,94 Mach erreicht. Der Standardwert gilt aber für 20 °C. Die Schallgeschwindigkeit ist nämlich von der Temperatur abhängig und kann mit der Formel $v_{\text{Schall}} = 72 \text{ km/h} \cdot \sqrt{T_c + 273,15}$ berechnet werden, wobei T die Temperatur in Grad Celsius ist. (Die Umrechnung zwischen Celsius und Kelvin lautet $T_K = T_c + 273,15$.) Wenn wir also wissen wollen, ob Felix die Schallgeschwindigkeit in dieser Höhe durchbricht, müssen wir die dort herrschende Temperatur kennen. Wie schon oben erwähnt ist es nicht leicht, Daten für die Stratosphäre zu bekommen. Und wenn man diese hat, dann handelt es sich natürlich nur um Durchschnittswerte, die an diesem Tag nicht exakt gelten müssen. Das ist eine weitere Quelle der Unsicherheit bei der Voraussage.

Setzt man die Durchschnittswerte für die jeweiligen Höhen ein und berechnet die Schallgeschwindigkeit, dann bekommt man die Daten in den letzten beiden Tabellenspalten. Demnach würde bei einem Sprung aus 110.000 Fuß (33.528 m) die Schallgeschwindigkeit gerade angeritzt. Bei 120.000 Fuß (36.576 m) hat man einen Polster von rund 7%. Ginge man rein theoretisch noch einmal 10.000 Fuß (3048 m) höher, wäre man mit +19% auf der sehr sicheren Seite.

ABSPRUNG-HÖHE	Sekunden bis Schallgeschwindigkeit	Höhe bei Schallgeschwindigkeit	Sekunden bis Maximalgeschwindigkeit	Maximalgeschwindigkeit (v_{max})	Höhe bei Maximalgeschwindigkeit	Temp. in °C in dieser Höhe	Schallgeschw. in dieser Höhe	v_{max} in Mach
33.528 m (110.000 Fuß)	–	–	43 Sekunden	1028 km/h	26.000 m	–50,7 °C	1076 km/h	0,96
36.576 m (120.000 Fuß)	37 Sekunden	30.500 m	46 Sekunden	1157 km/h	27.600 m	–49,1 °C	1080 km/h	1,07
39.624 m (130.000 Fuß)	34 Sekunden	34.200 m	50 Sekunden	1289 km/h	29.000 m	–47,7 °C	1084 km/h	1,19

Werte gerundet (außer Höchstgeschwindigkeit und Temperatur).