„Der Einfluss von Inversionen auf die Tragfähigkeit von Heißluftballonen und das Problem des dynamischen Auftriebes“

Von Dr. Manfred Reiber www.DrMReiber.de

1. Die Rolle der Tragfähigkeit beim Ballonfahren

Für die Praxis des Ballonfahrens ist die Tragfähigkeit eine entscheidende Kenngröße. Bestimmt wird sie in der Regel mit Hilfe von Grafiken oder Tabellen, die wesentlich auf Daten der Standardatmosphäre basieren. Das bedeutet, man kann die Tragfähigkeit nur dann genau bestimmen, wenn die Standardatmosphäre erfüllt ist. In der Realität ist aber die Standardatmosphäre *nie* erfüllt, sie weicht immer mehr oder weniger von der realen Atmosphäre ab. In vielen Fällen ist zwar die so bestimmte Tragfähigkeit für die Praxis ausreichend genau, aber insbesondere in Inversionen sind die Fehler groß oder sogar sehr groß. Die Hauptursache ist der Temperaturgradient, der ja bekanntlich in der Standardatmosphäre auf -0,65 °C pro 100 m festgelegt ist. In Inversionen hat der Gradient aber positive Vorzeichen und kann in Extremfällen auch Werte über +5 °C pro 100 m erreichen. Zumindest bei solchen Wetterlagen sollte man die Tragfähigkeit extra berechnen. Fehlentscheidungen, vor allem beim Start, bzw. bei der Landung, sind sonst vorprogrammiert. Die Sache ist auch gar nicht so kompliziert, wenn man weiß wie es geht. Herr Jurkat, der mich zu diesem Artikel angeregt hat, bietet auf seiner Homepage (www.jurkat.de) ein automatisches Berechnungsverfahren an, das allerdings noch, entsprechend der Ausführungen dieses Artikels, korrigiert werden müsste. Dann wäre eine Berechnung, auch für Inversionswetterlagen, leicht und schnell für jedermann möglich.
Folgen wir der Maxime Immanuel Kants „Es gibt nichts Praktischeres, als eine gute Theorie“ und beschäftigen uns mit diesem Problem.

1.1 Was verstehen wir unter Tragfähigkeit eines Ballons?

Die Tragfähigkeit eines Ballons ist gleich der Masse der vom Ballon verdrängten Luft minus der Masse des im Ballon befindlichen Gases bzw. der Heißluft. Sie wird in Kilogramm [kg] angegeben. Wenn man das Volumen des Ballons als konstant annimmt, dann wird die Tragfähigkeit allein durch die Dichteunterschiede von Umgebungsluft und Traggas bestimmt.

Berechnen kann man die Tragfähigkeit mit Hilfe folgender Formel:

$$F_{Tragfähigkeit} = V_{Ballon}(\rho_{Außenluft} - \rho_{Heißluft}) \text{ [kg]}$$

$F_{Tragfähigkeit}$	Tragfähigkeit eines Ballons (kg)
V_{Ballon}	Volumen des Ballons (m³)
$\rho_{Außenluft}$	Dichte der Umgebungsluft (kg/m³)
$\rho_{Heißluft}$	Dichte der Heißluft im Ballon (kg/m³)

Über die Höhenabhängigkeit der Tragfähigkeit unter den Bedingungen der Standardatmosphäre kann man sich leicht mit Hilfe der Abbildung 1 einen Überblick verschaffen.

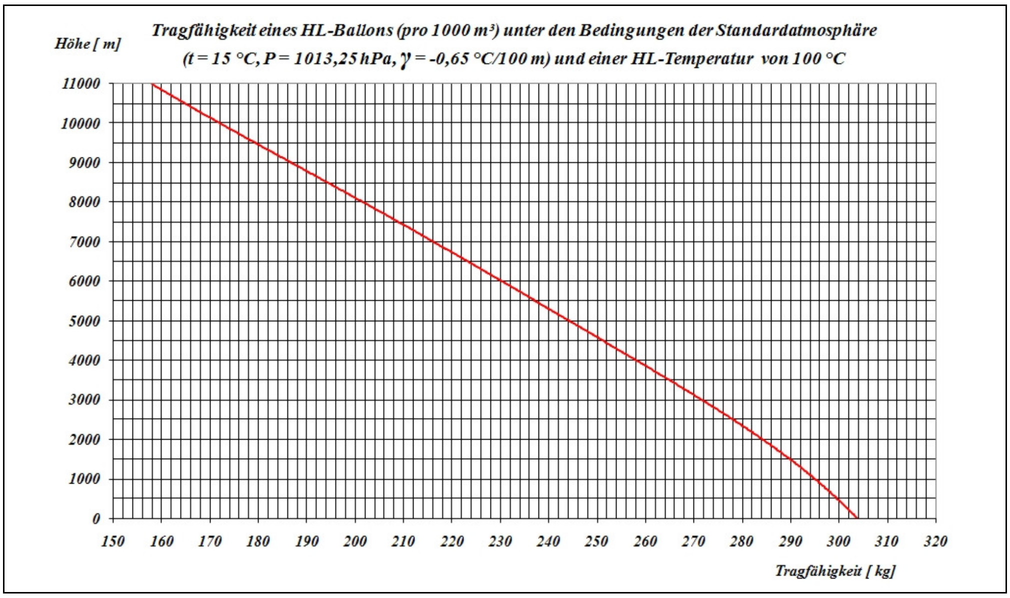

Abbildung 1: Diagramm zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines HL-Ballons (pro 1000 m³)unter Standardbedingungen

Man erkennt z. B. leicht, dass sich die Tragfähigkeit eines Ballons bis zur Tropopause etwa halbiert. Oberhalb 11000 m nimmt die Tragfähigkeit dann wesentlich schneller ab, weil in der Stratosphäre die Temperatur mit zunehmender Höhe gleichbleibt (Isothermie) oder sogar zunimmt (Inversion).

1.2 Wie berechnet man die Tragfähigkeit in einer realen Atmosphäre?

Genau genommen kann man die Tragfähigkeit eines Ballons jeweils nur für konstante Höhen bzw. Druckwerte genau berechnen. Dafür zwei Beispiele:

1. Wie groß ist die Tragfähigkeit eines 1000 m³ Ballons am Boden, wenn die Temperatur t = 0°C, P = 1020 hPa und die Heißluft im Ballon 100 °C beträgt?

2. Wie groß ist die Tragfähigkeit eines 1000 m³ Ballons in 500 m Höhe, wenn die Temperatur t = -3°C, P = 950 hPa und die Heißluft im Ballon 100 °C beträgt?

Wir wollen die Tragfähigkeit für beide Beispiele berechnen.

Zuerst bestimmt man die Luftdichte nach folgender Formel:

$$\rho = 0{,}3484\frac{P}{T}$$

P Luftdruck in hPa
T Temperatur in °K (T=t+273) wobei t die Temperatur in °C ist

Für unser erstes Beispiel ergibt sich:

$$F_{Tragfähigkeit} = 1000\left(0{,}3484\frac{1020}{273} - 0{,}3484\frac{1020}{373}\right)[\mathrm{kg}]$$

$$F_{Tragfähigkeit} = \underline{349\ \text{kg}}$$

Für unser zweites Beispiel ergibt sich:

$$F_{Tragfähigkeit} = 1000\left(0{,}3484\frac{950}{270} - 0{,}3484\frac{950}{373}\right)[\text{kg}]$$

$$F_{Tragfähigkeit} = 338{,}6\ \text{kg} \approx \underline{339\ \text{kg}}$$

Die Tragfähigkeit ändert sich beim Aufstieg von 349 kg auf ca. 339 kg und beim Abstieg von 339 auf 349 kg. Der Tragfähigkeitsunterschied ΔF für diese Höhendistanz beträgt also:

$$\Delta F = F_{Boden} - F_{500\ m\ Höhe} = \underline{10\ kg}$$

Bei diesem Beispiel hat die Temperatur vom Erdboden bis 500 m Höhe um 3 °C abgenommen. Es herrscht also ein Temperaturgradient von – 0,6 °C/100 m. Das entspricht etwa den Standardbedingungen und gilt als „normal“. Beachten wollen wir allerdings, dass im Beispiel von einer Ballongröße von 1000 m³ ausgegangen wird. Hat der Ballon ein Volumen von 3000 m³, dann multipliziert man den berechneten Wert mit drei, bei 3600 m³ mit 3,6 usw.
So, oder so ähnlich werden die Werte in der Praxis häufig sein, dann lässt sich die Änderung der Tragfähigkeit problemlos kompensieren. In kräftigen Bodeninversionen sieht das allerdings völlig anders aus!

1.3 Die Änderung der Tragfähigkeit beim Auf- bzw. Abstieg in einer Inversion

Wie ändert sich aber die Tragfähigkeit eines Ballons beim Aufstieg bzw. Abstieg in einer Inversion? Wir wollen auch dafür ein Beispiel berechnen:

3. Wie groß ist der Tragfähigkeitsunterschied eines 1000 m³ Ballons, wenn am Boden die Temperatur t = 0°C, der Druck P = 1020 hPa betragen und der Ballon auf 500 m Höhe aufsteigt? In dieser Höhe wird eine Temperatur von t = 10°C und ein Druck von P = 950 hPa gemessen. Der Temperaturgradient beträgt jetzt + 2°C/100 m! Das ist eine deutliche Abweichung von der Standardatmosphäre. Die Heißluft im Ballon soll während des Aufstieges konstant 100 °C betragen.

Zunächst berechnen wir die Tragfähigkeit am Boden:

$$F_{Tragfähigkeit} = 1000\left(0{,}3484\frac{1020}{273} - 0{,}3484\frac{1020}{373}\right)$$

$$F_{Tragfähigkeit} = 349\ \text{kg}$$

Die Tragfähigkeit in 500 m Höhe beträgt:

$$F_{Tragfähigkeit} = 1000\left(0{,}3484\frac{950}{283} - 0{,}3484\frac{950}{373}\right)$$

$$F_{Tragfähigkeit} = 282{,}2 \text{ kg} \approx \underline{282 \text{ kg}}$$

Der Tragfähigkeitsunterschied zwischen Boden und 500 m Höhe beträgt bei dieser Inversionslage:

$$\Delta F = F_{Boden} - F_{500\ m \text{ Höhe}}$$

$$\Delta F \approx \underline{67kg}$$

Die Tragfähigkeit beträgt in beiden Beispielen am Boden 349 kg pro 1000 m³. Im ersten Fall nimmt die Tragfähigkeit bis in 500 m Höhe auf 339 kg ab. Im zweiten Fall, bei Existenz der Bodeninversion nimmt die Tragfähigkeit aber auf 282 kg ab. Während man im ersten Fall die Abnahme von 10 kg noch gut kompensieren konnte, wird es im zweiten Fall mit 67 kg pro 1000 m³ problematisch!!! und diese Veränderungen können sowohl beim Start, als auch bei der Landung zu großen Risiken führen.

Wer solche Berechnungen selbst nicht durchführen möchte, weil sie zu kompliziert oder zu langwierig sind, sollte sich wenigstens die Größenordnungen solcher Tragfähigkeitsänderungen einprägen. Für die „reinen Praktiker" sollen die Zusammenhänge noch einmal anschaulich (ohne mathematische Berechnungen) dargestellt werden.

1.4 Start und Landung mit Ballonen in einer Bodeninversion

Obwohl Starts bzw. Landungen mit Ballonen in einer Bodeninversion sehr häufig sind, bedürfen sie immer wieder besonderer Aufmerksamkeit.

1.4.1 Was ist beim Start bzw. einer Landung in einer gut ausgeprägten Bodeninversion zu beachten?

Betrachten wir zunächst einen Start bzw. eine Landung in einer gut ausgeprägten Bodeninversion (siehe Abbildung 2).
Beim Start innerhalb einer Bodeninversion nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe zu, daraus folgt eine Abnahme von $\rho_{Umgebungsluft}$ und gerade das bewirkt ja eine Abnahme der Tragkraft des Ballons. Beim Start muss kräftig geheizt werden, bzw. Ballast abgegeben werden, oder der Ballon steigt nur langsam, ggf. gar nicht.
Merke:

Besonders beim Start vor Hindernissen (Gebäude, Hochspannungsleitungen, Bäume usw.) sollten wir diesen Sachverhalt beachten und kein unnötiges Risiko eingehen.

Bei der Landung taucht der Ballon von oben in die Bodeninversion ein, $\rho_{Umgebungsluft}$ nimmt zu, die Tragkraft steigt und die Sinkgeschwindigkeit verringert sich. Der Ballon „schwimmt" auf, der angepeilte Landeort wird überfahren. Bei Landungen nahe einer Straße oder unmittelbar vor Hindernissen kann das zu gefährlichen Situationen führen. Deshalb sollte man sich merken:

Bei einer Landung in einer gut ausgeprägten Bodeninversionen, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Landeort „überfahren" wird. Bei sehr flachen Bodeninversionen (Obergrenzen deutlich unter 100 m) tritt das Aufschwimmen unmittelbar vor dem Aufsetzten auf und kann deshalb sogar zur Gefahr werden. Gut ausgeprägte, flache Bodeninversionen *können vor allem im Herbst und Winter schon vor Sonnenuntergang entstehen. Für Fahrten am Morgen ist dieser Fall eher untypisch, es sei denn, man startet bei Sonnenaufgang und landet kurze Zeit darauf wieder.*

Bei Landungen in stark ausgeprägte Bodeninversionen hinein, kommt es nicht nur zu dem bekannten „Aufschwimmen". In Extremfällen wird es schwierig überhaupt zu landen. Dafür folgendes Beispiel:

Ein mit nur drei Personen besetzter, 4000 m³ großer Ballon wollte in einer stark ausgeprägten Bodeninversion, die sich über einer Schneedecke gebildet hatte, landen. Der Ballonfahrer heizte nicht mehr, um zu sinken. Dadurch wurde die Hülle derart schlaff, dass der Ballon instabil wurde. Das zwang den Ballonfahrer wieder zu heizen. Nach mehreren Landeversuchen im Tal, musste er letztendlich auf einem unzugänglichen Hochplateau landen. Von dort wurden die Passagiere und das Gerät mit dem Hubschrauber geborgen. (Start in Walchsee mit Landung auf der Winkelmoosalm bei einer Fahrt über Reit im Winkel).

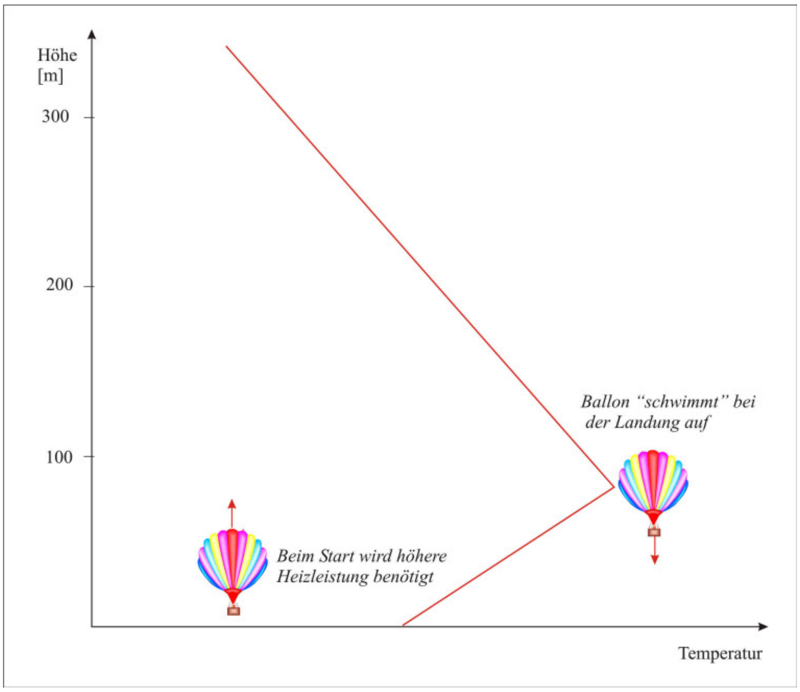

Abbildung 2: Start bzw. Landung in einer gut ausgeprägten Bodeninversion

1.4.2 Was ist bei einem Start bzw. einer Landung zu erwarten, wenn die Bodeninversion bereits teilweise aufgelöst ist?

Bodeninversionen lösen sich durch zunehmende Sonneneinstrahlung zunächst in Bodennähe auf. Die Bodeninversion geht so in eine tief liegende, freie Inversion über. Diese Konstellation stellt sich ab etwa einer Stunde nach Sonnenaufgang ein. Im Laufe des Tages wird der „Bodeninversionsrest" immer kleiner, bis er ganz verschwindet und die Bodeninversion völlig aufgelöst ist. Was bedeutet es für einen Start bzw. eine Landung, wenn noch ein Rest Bodeninversion existiert? (siehe Abbildung 3)

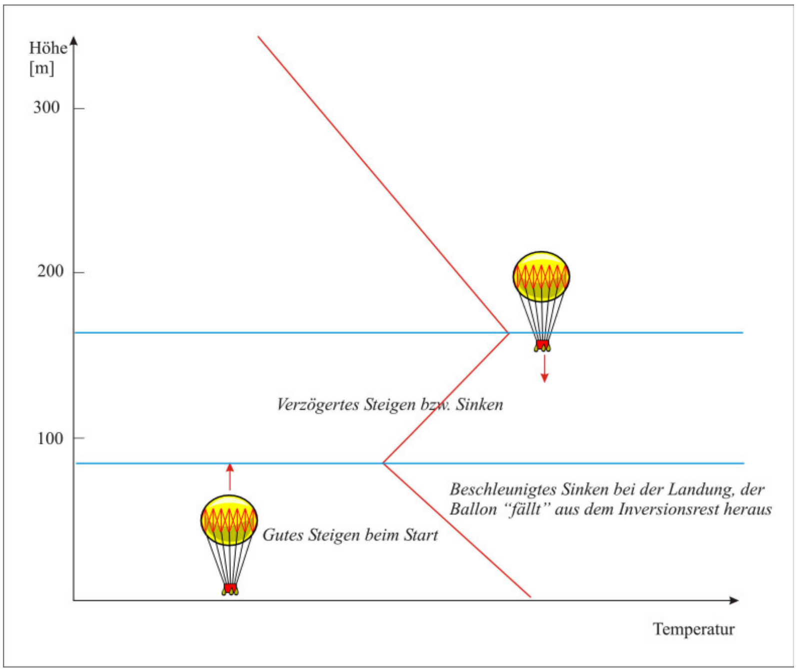

Abbildung 3: Start bzw. Landung in einer teilweise aufgelösten Bodeninversion

Beim *Start* hat man zunächst gutes Steigen bis zum Eintritt in die „Restinversion“, weil die Temperatur mit der Höhe fällt und die Tragkraft zunehmen kann. Bei Eintritt des Ballons in die „Restinversion“ wird eine stärkere Heizleistung, bzw. Ballastabgabe erforderlich, um die Steiggeschwindigkeit zu halten.

Bei der Landung taucht man zuerst in die „Restinversion“ ein, das Sinken verlangsamt sich wegen der Temperaturabnahme spürbar. Verlässt man nun die „Restinversion“ nach unten, erfolgt ein abrupter Übergang in beschleunigtes Sinken, oft verbunden mit einer vorzeitigen, harten Landung. Deshalb sollte man sich merken:

Nach Sonnenaufgang lösen sich Bodeninversionen von unten her auf. Bei Landungen wird im noch vorhandenem „Inversionsrest“ zunächst das Sinken verzögert. Das verleitet vielleicht dazu nicht mehr zu heizen. Erreicht der Ballon den aufgelösten Teil der Bodeninversion, wird das Sinken abrupt beschleunigt. Besonders bei Fahrten am Morgen kann es deshalb zu „vorzeitigen“ und harten Landungen kommen, wenn in die teilweise aufgelöste Bodeninversion hinein gelandet wird. Diese „Inversionskonstellation“ ist für Landungen am Morgen typisch.

1.4.3 Was ist beim Ballonfahren an freien Inversionen (Peplopausen) zu beachten?

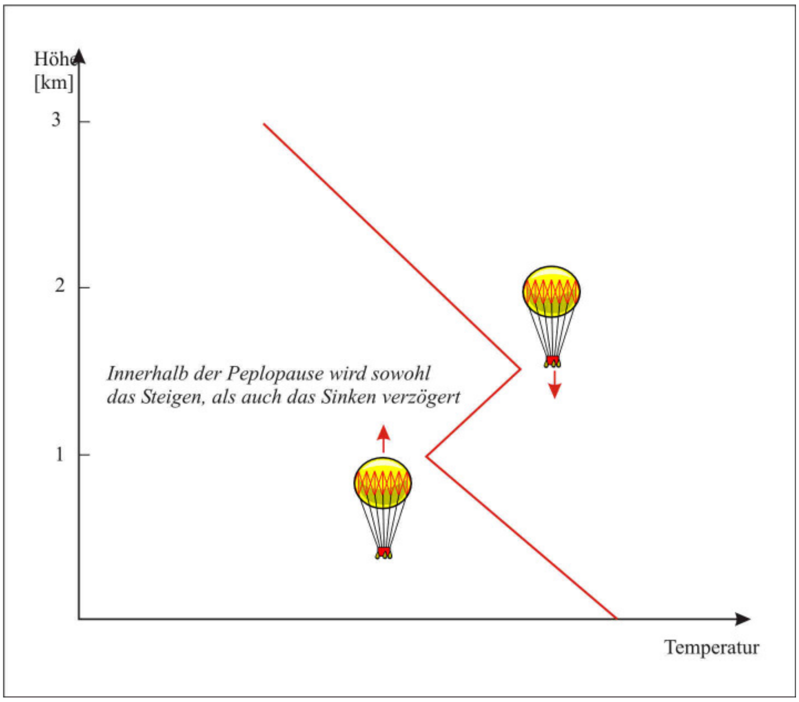

Abbildung 4: Steigen bzw. Sinken eines Ballons beim Durchqueren der Peplopause (freie Inversion)

Betrachten wir dazu die Beispiele der Abbildung 4. Erreicht der Ballon beim Aufstieg die Peplopause von unten, dann verlangsamt sich das Steigen merklich, weil $\rho_{Umgebungsluft}$ innerhalb der Inversion abnimmt. Nur durch zusätzliches Heizen bzw. Ballastabgabe kann die Steiggeschwindigkeit aufrechterhalten werden. Ist die Obergrenze der Peplopause erreicht, nimmt $\rho_{Umgebungsluft}$ wieder zu, die Steiggeschwindigkeit vergrößert sich wieder deutlich, ohne heizen zu müssen, bzw. ohne Ballast abgeben zu müssen.

Sinkt man von oben in die Peplopause hinein, dann nimmt $\rho_{Umgebungsluft}$ zu. Die Sinkgeschwindigkeit verringert sich. Ist die Peplopause nach unten vollständig durchquert, beschleunigt sich die Abwärtsbewegung deutlich, weil $\rho_{Umgebungsluft}$ wieder abnimmt. Man hat den Eindruck der Ballon „fällt“ aus der Peplopause heraus.

Für die Fahrpraxis an Inversionen sollte man außerdem noch folgendes beachten:

Wenn man in eine Inversion einfährt, egal, ob von unten oder oben kommend, dann dringt der Ballon auf Grund der Trägheit zunächst einige Meter oder Dekameter in die Inversion ein, wird aber sogleich wieder in entgegengesetzter Richtung beschleunigt, also aus der Inversion „hinausgedrückt“. Anschließend fährt er wieder ein usw. Bei genauer Beobachtung erkennt man, dass die Fahrtkurve des Ballons eine gedämpfte Schwingung darstellt. Bei Gasballons kann man diesen Effekt besser beobachten, als bei Heißluftballons, weil hier durch evt. Heizen nicht überkompensiert werden kann. Besonders für Gasballons rentiert sich deshalb ein „behutsames Einfahren“ in die Inversion und das „Auspendeln lassen“ ohne Ballast abgeben zu müssen (siehe Abbildung 5).

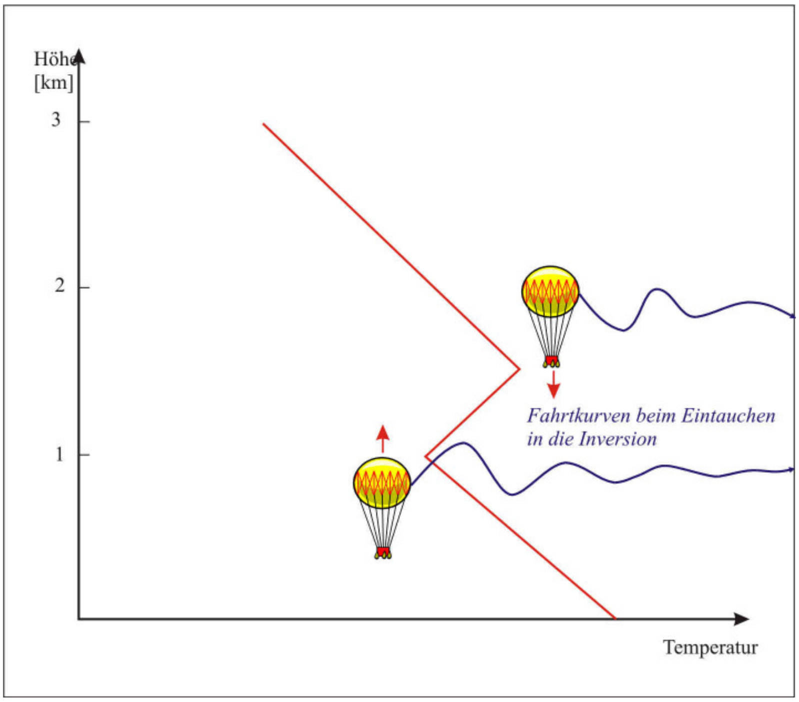

Abbildung 5: Beim „behutsamen Einfahren“ in eine Inversion ergibt sich als Fahrtkurve eine gedämpfte Schwingung

Freie Inversionen entstehen nicht immer durch Absinken und die damit verbundene adiabatische Erwärmung, sie entstehen auch durch Warmluftzufuhr in der Höhe. Solche Inversionen sind in ständiger Veränderung, haben in der Regel nur eine kurze Lebensdauer und kommen in verschiedenen Höhen vor. Für das Ballonfahren sind sie kaum systematisch nutzbar. Insbesondere beim Gasballonfahren hängt es vom Geschick und der Erfahrung des Ballonfahrers ab, auch diese Inversion zu nutzen.

1.5 Diagramme zur Abschätzung der Tragfähigkeitsänderung in Bodennähe (für Bodeninversionen mit Schichtdicken von 300 m und 500 m)

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen zwei Diagramme mit deren Hilfe man die Tragfähigkeitsänderung innerhalb von Inversionen (Bodeninversionen) mit einer Dicke von 300 m bzw. 500 m und verschiedenen Temperaturen in Bodennähe ablesen kann.

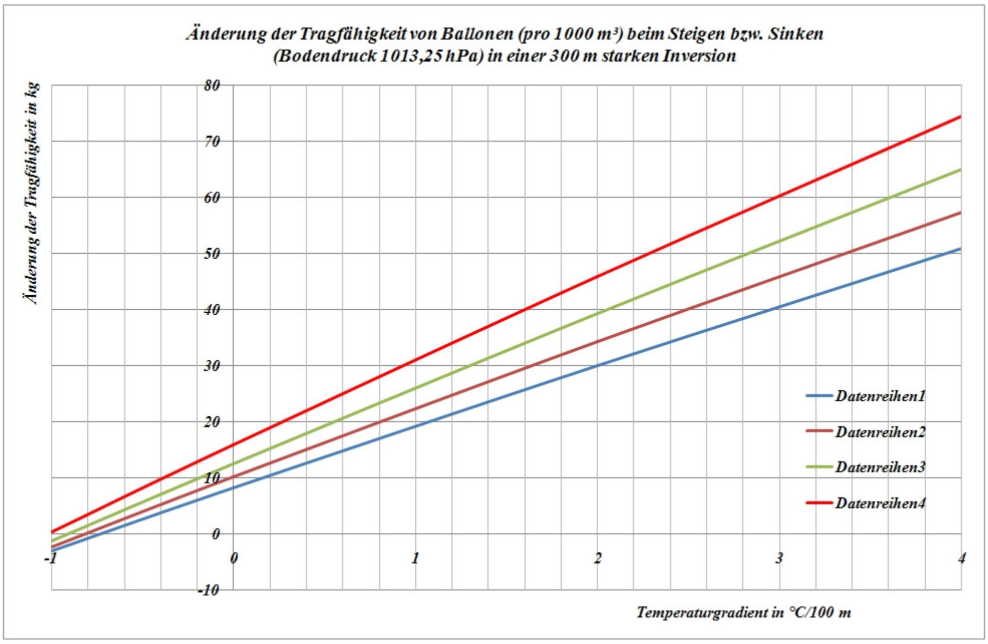

Abbildung 6: Diagramm zur Bestimmung der Änderung der Tragfähigkeit in einer Bodeninversion von 300 m Dicke und Bodentemperaturen von 30 °C - Datenreihe 1, 15 °C – Datenreihe 2, 0°C – Datenreihe 3, -15°C – Datenreihe 4

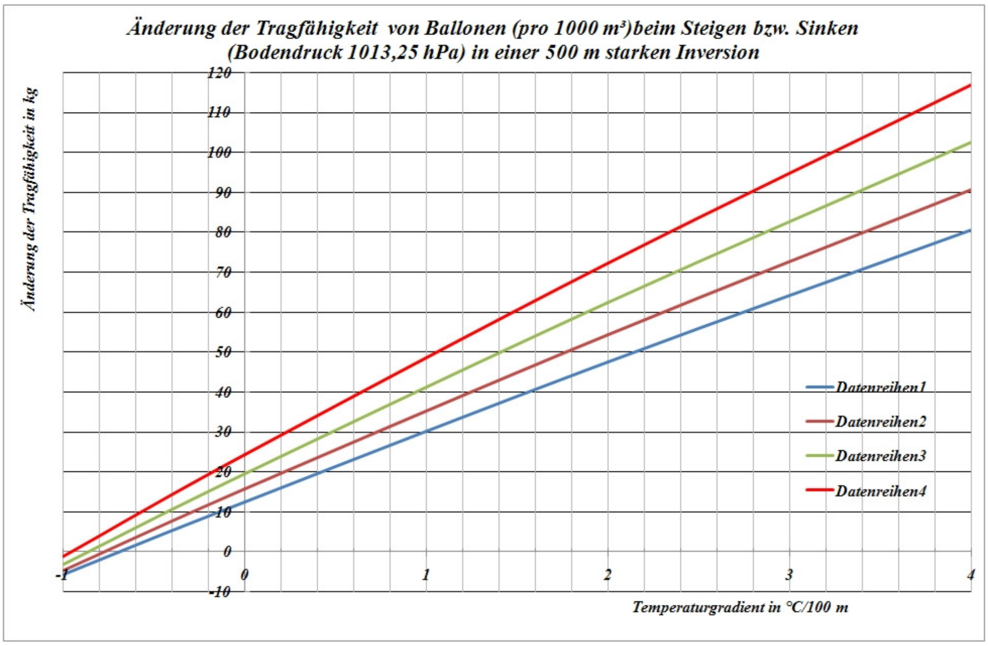

Abbildung 7: Diagramm zur Bestimmung der Änderung der Tragfähigkeit in einer Bodeninversion von 500 m Dicke und Bodentemperaturen von 30 °C - Datenreihe 1, 15 °C – Datenreihe 2, 0°C – Datenreihe 3, -15°C – Datenreihe 4

Wie sind diese Diagramme zu handhaben? Ein Beispiel soll das zeigen.

Beispiel: Wie stark ändert sich die Tragfähigkeit eines 4000 m³ Heißluftballons beim Aufstieg vom Boden bis zur Obergrenze der Bodeninversion. Die Lufttemperatur beim Start beträgt -15 °C, der Temperaturgradient +2 °C/100 m. Die Obergrenze der Bodeninversion ist 500 m hoch.

Lösung: Wir verwenden das Diagramm Abbildung 7. Zur Bestimmung der Tragfähigkeitsänderung vom Temperaturgradienten 2 °C/100 m senkrecht nach oben, bis die Datenreihe 4 (gültig für -15 °C) geschnitten wird und liest links an der y-Achse die Änderung der Tragfähigkeit ab. Der Wert beträgt für 1000 m³ ca. 71 kg. Für den 4000 m³ Ballon also 4x71 kg = 284 kg. Die Tragfähigkeit nimmt beim Aufstieg bis 500 m Höhe also um ca. 284 kg ab, beim Abstieg (Landung) aber um den gleichen Betrag zu!

Für die Praxis wichtig sind für jeden Ballonfahrer einige allgemeine Regeln, die sich aus diesen Diagrammen ableiten lassen.

1. *Je tiefer die Temperatur in Bodennähe, desto stärker die Änderung der Tragfähigkeit; d.h. im Winter sorgen Bodeninversionen für eine stärkere Tragfähigkeitsänderung als im Sommer.*
2. *Je größer der Temperaturgradient ist, umso größer ist die Tragfähigkeitsänderung. Besonders starke Temperaturgradienten bilden sich im Winter über (frischen) Schneedecken.*
3. *Bei kleinen (negativen) Temperaturgradienten, sind die Tragfähigkeitsänderungen gering.*
4. *Je dicker die Inversionsschicht ist, umso größer ist die Tragfähigkeitsänderung.*

1.6 Wie ist eine genaue Berechnung der Tragfähigkeitsänderung in der Praxis zu realisieren?

Für eine genaue Berechnung der Tragfähigkeitsänderung benötigt man die vertikale Temperaturverteilung, die man Temps entnehmen kann. Je nach dem Zeitpunkt für den man die Tragfähigkeitsänderung berechnen möchte, verwendet man real gemessene Temps oder prognostizierte Temps. Die Vorgehensweise ist gleich. Bedenken muss man, dass prognostizierte Temps, gerade in Bodennähe, mit Fehlern behaftet sind.

Woher bekommt man Temps? Real gemessene Temps kann man für diskrete Orte über das Selbstbriefingsystem pc_met erhalten, qualitativ hochwertige Prognosetemps kann man über pc_met für diskrete Orte oder über MyMeteoblue für jeden x-beliebigen Startort erhalten.

Eine exakte Berechnung soll an einem realen Beispiel gezeigt werden.

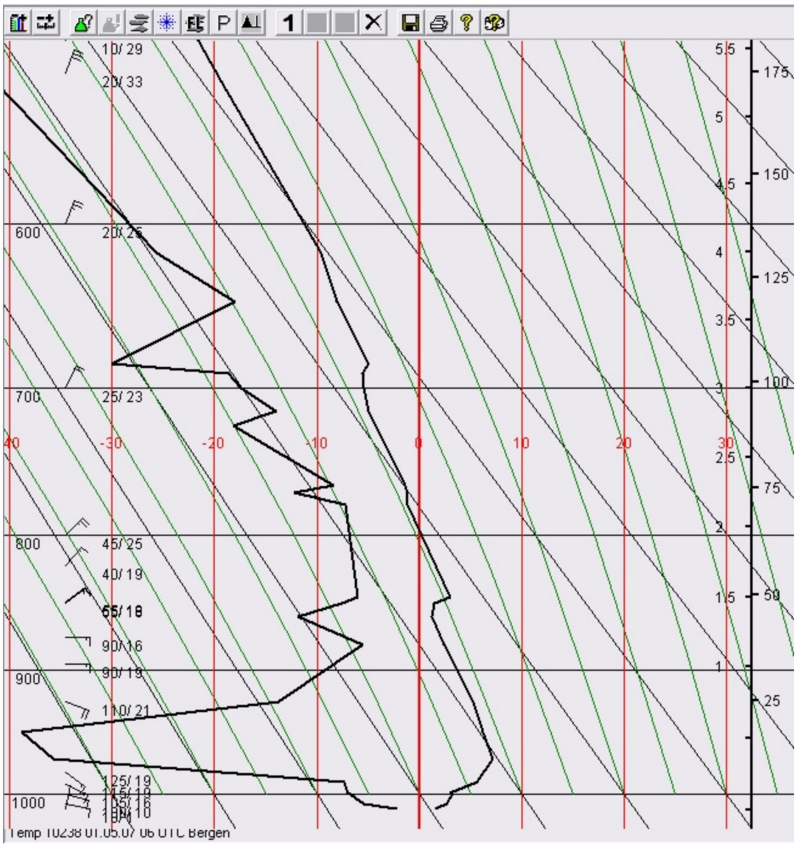

Abbildung 8: Real gemessener Temp, Bergen, 01.05.2007 06 UTC

Die Abbildung 8 zeigt den real gemessenen Temp von Bergen. Wir wollen die Tragfähigkeitsänderung am Startort Bergen bis in eine Höhe von 1000 m schichtweise berechnen.

Wie geht man vor?
Man betrachtet zunächst den Verlauf der gemessenen Temperaturkurve vom Boden bis 1000 m Höhe und stellt folgendes fest:

1. Bodeninversion vom Boden (1015 hPa) bis 300 m Höhe (975 hPa). Temperatur am Boden +1,5 °C, an der Inversionsobergrenze +6,5 °C. Daraus ergibt sich ein Temperaturgradient von 1,67 °C/100 m (5 °C Temperaturunterschied auf 300 m).
2. Oberhalb der Bodeninversion nimmt die Temperatur von 6,5 °C auf 4 °C in 1000 m (900 hPa) ab.

Man berechnet nun zweckmäßigerweise zuerst die Tragfähigkeitsabnahme in der Bodeninversion, danach im zweiten Schritt für die Schicht von 300 m bis 1000 m Höhe.

1. Schritt:

$$F_{TragfähigkeitamBoden} = 1000\left(0{,}3484\frac{1015}{274{,}5} - 0{,}3484\frac{1015}{373}\right) \approx 340kg$$

$$F_{TragfähigkeitObergrenzeBI} = 1000\left(0{,}3484\frac{975}{279{,}5} - 0{,}3484\frac{975}{373}\right) \approx 305kg$$

Der Tragfähigkeitsunterschied zwischen Boden und Inversionsobergrenze beträgt also:

$$\Delta F_{\text{Boden- Obergrenze BI}} \approx 35\ \text{kg (pro 1000 m}^3\text{)}$$

Für einen 4000 m^3 Ballon beträgt die Tragfähigkeitsabnahme beim Aufstieg 140 kg, bei der Landung nimmt sie um den gleichen Betrag zu.

Verwendet man das Diagramm in der Abbildung 6 zur Bestimmung der Tragfähigkeitsänderung für dieses Beispiel, ermittelt man ebenfalls einen Wert von ca. 35 kg pro 1000 m^3. Das geht zwar schneller, aber wenn die Inversion eine andere Dicke hat, muss man rechnen (oder weitere Diagramme berechnen).

2. Schritt:

Nun berechnen wir die Tragfähigkeitsänderung für die Schicht von 300 m bis 1000 m. In dieser Schicht nimmt die Temperatur gleichmäßig mit der Höhe ab. Für die Tragfähigkeitsänderung ergibt sich:

$$F_{TragfähigkeitObergrenzeBI} = 1000\left(0{,}3484\frac{975}{279{,}5} - 0{,}3484\frac{975}{373}\right) \approx 305kg$$

$$F_{Tragfähigkeit1000mHöhe} = 1000\left(0{,}3484\frac{900}{277} - 0{,}3484\frac{900}{373}\right) \approx 291kg$$

Der Tragfähigkeitsunterschied zwischen Inversionsobergrenze und 1000 m Höhe beträgt also:

$$\Delta F_{\text{Obergrenze BI-1000 m Höhe}} \approx 14\ \text{kg (pro 1000 m}^3\text{)}$$

Die Änderung der Tragfähigkeit ist für diese 700 m dicke Schicht deutlich geringer, als für die 300 m dicke Bodeninversion. Das liegt daran, dass der Temperaturgradient in dieser Schicht negativ ist (ca. -0,36 °C/100 m)

Schlussfolgerung:
Die schichtweise Berechnung der Tragfähigkeitsänderung ist sinnvoll und deshalb sehr empfehlenswert. Ein Mittelwert über eine Gesamtschicht kann niemals die Besonderheiten und ggf. Probleme der Einzelschichten aufzeigen und ist deshalb nicht sinnvoll.

Die Abbildung 9 zeigt einen Prognosetemp aus Meteoblue für den Ballonstartort Europa-Park Rust. Es handelt sich hier um eine andere Diagrammform, die Ablesung des Temperaturverlaufes für die Berechnung der Tragfähigkeitsänderung sollte aber dennoch keine Schwierigkeiten bereiten (für den Beispieltemp: Bodentemperatur 9 °C, Bodendruck 1000 hPa;Temperatur an der Inversionsobergrenze 12 °C, Luftdruck 920 hPa [lt. Barometrischer Höhenstufe ist das eine Höhe von 640 m], in der Schicht darüber nimmt die Temperatur bis 820 hPa auf 4 °C ab, dann folgt eine isotherme Schicht bis ca. 760 hPa usw.)

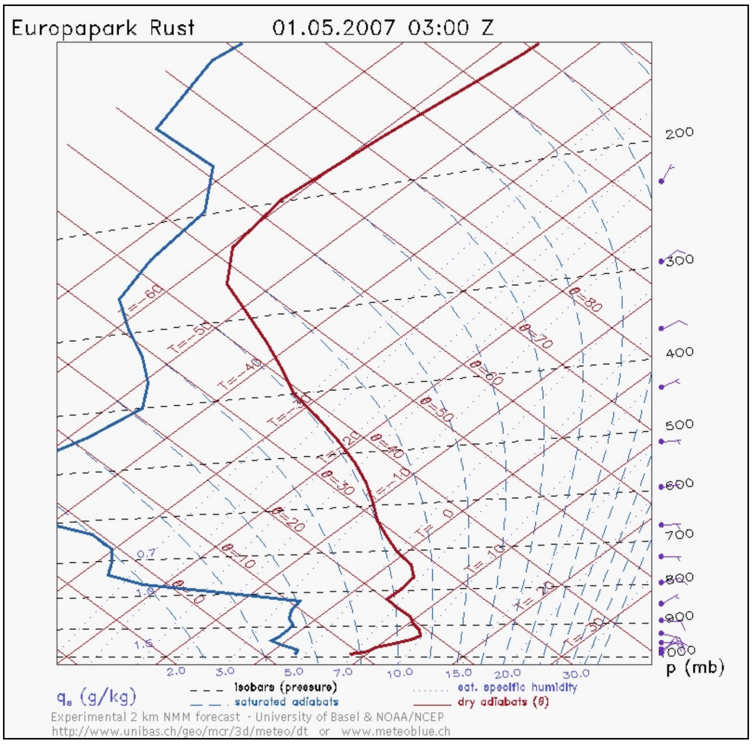

Abbildung 9: Prognosetemp des Ballonstartortes Europapark Rust für den 01.05.2007 03 UTC (aus dem Internetangebot von Meteoblue). Die braune Kurve ist die Temperaturkurve, die blaue ist die Taupunktkurve.

2. Dynamischer Auftrieb von Ballonen

Der dynamische Auftrieb von Ballons wird oft nicht richtig erkannt und deshalb werden seine Einflüsse auf das Ballonfahren falsch interpretiert. Kürzlich erklärte mir z. B. ein Ballonfahrer, der während des Startvorganges in starkes Sinken geriet und mit Not einer Kollision mit einem Hindernis entging, er sei von vertikalen Windböen getroffen worden, die den Ballon nach unten gedrückt hätten. Derartige Fehlinterpretationen sind nicht selten die Ursache für die Wiederholung von Fehlern und auch Ballonfahrer sollten wissen, der Schutzengel kann nicht immer rechtzeitig zur Stelle sein. Wollen wir uns etwas näher mit diesem „Scheinauftrieb" befassen.

Dynamischer Auftrieb entsteht bei der Umströmung von Körpern. Die Größe dieses Auftriebes hängt stark von der Form und Größe des umströmten Körpers, der Strömungsgeschwindigkeit und der Luftdichte ab. Die Profile von Flugzeugtragflügeln sind für die Erzeugung eines großen dynamischen Auftriebes besonders geeignet. Durch diesen dynamischen Auftrieb können sich tonnenschwere Flugzeuge in die Luft erheben. Aber auch an kugelförmigen Körpern, wie Ballonen, kann unter bestimmten Bedingungen ein beträchtlicher dynamischer Auftrieb entstehen. Was ist die Ursache?
Wird ein Ballon mit unterschiedlicher Windgeschwindigkeit umströmt, dann entsteht an der Stelle, wo die Strömungsgeschwindigkeit schneller ist ein Unterdruck, dort wo die Strömung langsamer ist ein Überdruck (gemäß dem Gesetz von Bernoulli) und deshalb wird der Ballon in Richtung Unterdruck „gezogen" und „geschoben". Man bezeichnet dieses Phänomen in der Aerodynamik als dynamischen Auftrieb. Siehe auch Abbildungen 13, 14, 15 und 16. Für Flugzeuge ist der dynamische Auftrieb die alles entscheidende Kraft, für Ballone eher eine unerwünschte Randerscheinung, die aber plötzlich zur Gefahr werden kann.

Wie kann man den dynamischen Auftrieb für einen Ballon berechnen? Die Formel dafür lautet:

$$F_{dynamischerAuftrieb} = c_a \cdot A \cdot \frac{\rho}{2}(\Delta v)^2$$

$F_{dynamischer\ Auftrieb}$	das ist die dynamische Tragkraft (ein Scheinauftrieb), die durch die unterschiedliche Umströmung von Ballonunter- und -oberseite entsteht (N)
C_a	Auftriebsbeiwert (ist abhängig von der Form, Größe, Beschaffenheit usw. des Ballons)
ρ	Luftdichte (kg/m^3)
$(\Delta v)^2$	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Ober- und Unterseite des Ballons (m/s)^2
A	Grundrissfläche des Ballons (m^2)

Weil die Größen c_a und A für jeden konkreten Ballon fest stehen, hängt der dynamische Auftrieb in der Praxis nur noch von der Dichte der umströmenden Luft und ihrer Geschwindigkeit ab. Wird der Ballon gleichmäßig umströmt, dann ist der dynamische Auftrieb nach allen Seiten gleich groß. Der statische Auftrieb verändert sich nicht. Wenn aber die Ballonkappe (Top) schneller als die Ballonunterseite umströmt wird, das ist ja der Normalfall beim Aufrüsten eines Ballons, dann entsteht zusätzlich zum statischen ein dynamischer Auftrieb, der auch als Scheinauftrieb bezeichnet wird.

Der dynamische Auftrieb ist also in erster Linie von der Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Ballonunterseite und Ballonkappe (Top) und in zweiter Linie von der Luftdichte abhängig.

Die dynamischen Auftriebskräfte, die an einem Ballon entstehen können, sind in der Praxis unbedingt zu beachten. Um sich einen Überblick verschaffen zu können, wurden Diagramme für 2 Ballongrößen im Temperaturspektrum von –15 °C bis 30 °C und Windgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen der Ballonkappe und der Ballonunterseite bis 20 kt berechnet. Die dafür notwendige Abschätzung der Windgeschwindigkeitdifferenz zwischen Ballonunter- und -oberseite kann man Hilfe des Diagramms Abbildung 10 bestimmen. Voraussetzung ist allerdings, dass man die Windgeschwindigkeit an der Ballonunterseite mit einem Handanemometer gemessen hat.

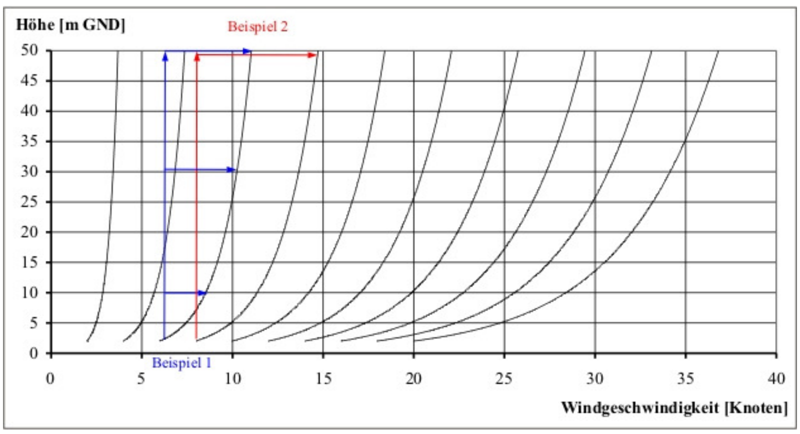

Abbildung 10: Diagramm zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit an der Unter- und Oberseite (Top) eines Ballons

Welchen Nutzen kann dieses Diagramm für die Praxis des Ballonfahrens und insbesondere für die Bestimmung des dynamischen Auftriebes bringen?

1. Um eine fundierte Entscheidung treffen zu können, ob man mit den Startvorbereitungen bzw. dem Aufrüsten eines Ballons beginnen kann, messen viele Ballonfahrer die Windgeschwindigkeit mit einem Handwindmessgerät (Anemometer). Vorausgesetzt, das Messgerät ist richtig geeicht, dann ist dieser Messwert dennoch nicht mit Windmessungen des Wetterdienstes direkt vergleichbar. Für alle Wetterdienste der Welt ist nämlich für den Wind eine Messhöhe von 10 m über GND vorgeschrieben. Die Windgeschwindigkeit per Handmessung (in ca. 2 m Höhe) ist aber signifikant niedriger als die in 10 m Höhe GND und somit nicht relevant für eine begründete Entscheidung, die Startvorbereitungen beginnen zu können oder nicht.

   Mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 10 kann man aus der in 2 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeit die in 10 m Höhe bestimmen. Man besitzt damit einen relevanten Vergleichswert zu dem vom Wetterdienst „vorschriftsmäßig" gemessenen Wert.

2. Man kann auch aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen 2 m Höhe und der in Kappenhöhe (am Top des aufgestellten Ballons) den dynamisch erzeugten Auftrieb berechnen oder zumindest gut abschätzen. Das ist bei Starts vor Hindernissen von erheblicher Bedeutung, weil man gerade dort den dynamisch erzeugten Scheinauftrieb beachten muss.

Wie ist das Diagramm zu handhaben? Dafür zwei Beispiele:

Beispiel 1: Mit einem Handwindmessgerät werden in 2 m Höhe im Mittel 6 kt gemessen, dann beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe 8,5 kt, in 30 m Höhe 10,2 kt und in 50 m Höhe 11 kt. Windgeschwindigkeit und Δv lassen sich also auf der Basis von Handwindmessungen zuverlässig bis 50 m Höhe abschätzen und in die Entscheidungsvorbereitung (Verhalten des Ballons beim Aufrüsten, Größe der Scheintragfähigkeit) einbeziehen.

Da der Bodenwind aber immer mehr oder weniger böig ist, sollte man auch die Windspitzen unbedingt ins Kalkül ziehen. Dafür kann man folgende Faustformeln für die Praxis verwenden:

*Vmax ≈ 2 bis 2,5 * Vmittel*	*(bei labiler Schichtung, in frischer Kaltluft)*
*Vmax ≈ 1,5 bis 1,8 * Vmittel*	*(bei labiler Schichtung, in gealterter Kaltluft)*
*Vmax ≈ 1,2 bis 1,4 * Vmittel*	*(bei stabiler Schichtung, in Warmluft)*

3. Mit Hilfe dieses Diagramms kann man aber auch aus der Windgeschwindigkeit in der Höhe (50 m und darunter) die Windgeschwindigkeit in unmittelbarer Bodenähe bestimmen. Das ist für die Landung von Bedeutung. Dem Diagramm kann man entnehmen, wie beim Abstieg des Ballons die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt. Auf Grund der Trägheit fährt der Ballon aber beim Sinken noch schneller, als es der Windgeschwindigkeit entspricht. Der aufmerksame Ballonfahrer merkt das am „Gegenwind". Bei der Landeanfahrt sollte deshalb solange in möglichst geringer Höhe gefahren werden, bis man diesen „Gegenwind" nicht mehr spürt. In diesem Moment fährt der Ballon mit der bodennahen Strömung und hat das Minimum an

Vorwärtsgeschwindigkeit erreicht. Jetzt sind die besten Bedingungen für eine Landung gegeben.

Dafür das Beispiel 2:

Wenn die Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe z.B. 14,5 kt beträgt, dann kann die Vorwärtsgeschwindigkeit noch bis auf 8 kt bei der Landung abgebremst werden. Die Bedingung ist allerdings, dass man solange unmittelbar über dem Boden fahren kann, bis der Geschwindigkeitsüberschuss, den der Ballon „von oben“ mitbringt tatsächlich abgebaut ist.

In den Diagrammen der Abbildungen 11 und 12 ist der dynamische Auftrieb als Tragkraft in kg (Tragfähigkeit) dargestellt.

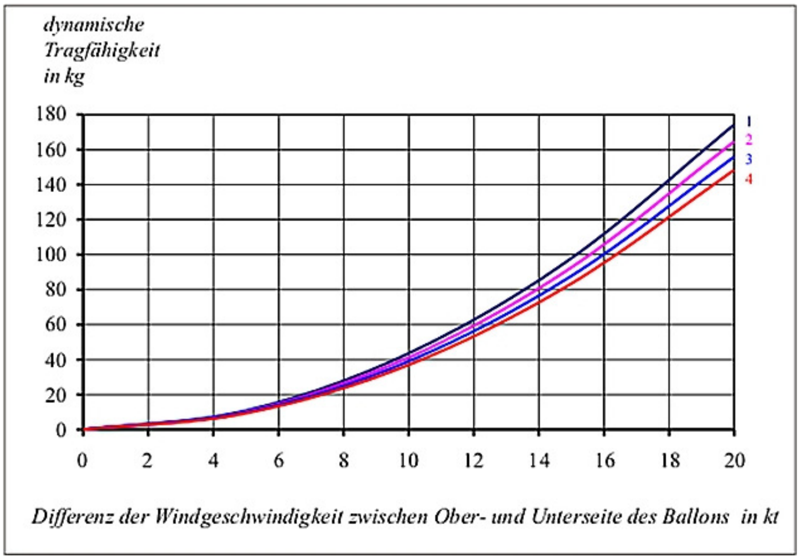

Abbildung 11: Diagramm zur Bestimmung des dynamischen Auftriebes (als Tragkraft in kg dargestellt) für 1050 m³ Gasballone (Reihe 1 [-15 °C], Reihe 2 [0 °C], Reihe 3 [15 °C], Reihe 4 [30 °C])

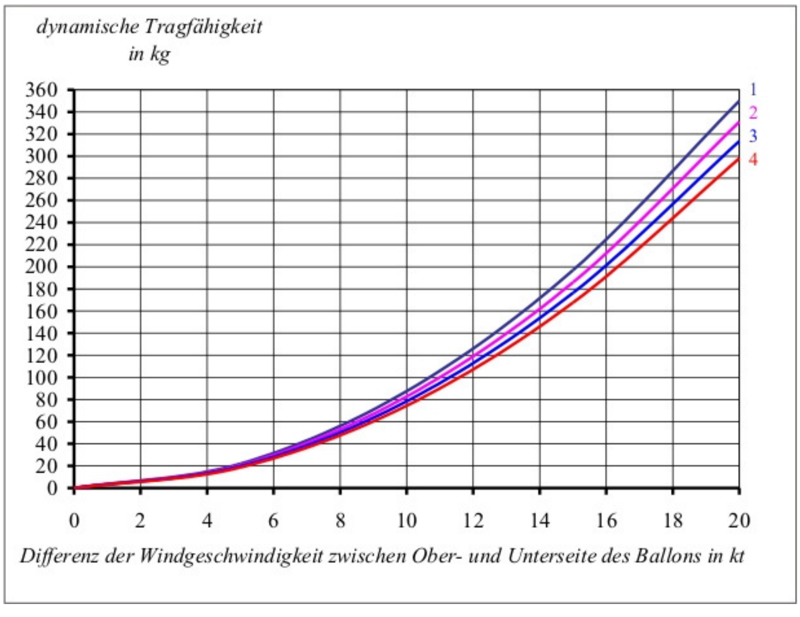

Abbildung 12: Diagramm zur Bestimmung des dynamischen Auftriebes (als Tragkraft in kg dargestellt) für 3000 m³ HL-Ballone (Reihe 1 [-15 °C], Reihe 2 [0 °C], Reihe 3 [15 °C], Reihe 4 [30 °C])

Für die Handhabung der beiden Diagramme zwei Beispiele:

1. Wie groß ist der dynamische Auftrieb (in kg) eines 1050 m³ Gasballons beim Start aus dem Lee einer Baumreihe, wenn die Lufttemperatur 15 °C beträgt und eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Ober- und Unterseite des Ballons von 10 kt herrscht?

Lösung: *Der dynamische Auftrieb beträgt fast 40 kg*

2. Wie unterscheidet sich der dynamische Auftrieb (in kg) eines 3000 m³ HL-Ballons beim Start aus dem Lee einer Baumreihe im Sommer und im Winter, wenn die Geschwindigkeitsdifferenz in beiden Fällen zwar 10 kt betragen hat, im Winter die Temperatur –15 °C war aber im Sommer 30 °C .

Lösung: *Im Winter ist der dynamische Auftrieb (in kg) 87,5 kg und im Sommer 74,5 kg bei gleichen Geschwindigkeitsunterschieden von 10 kt zwischen Ober- und Unterseite des Ballons.*

Für die Praxis wichtig zu merken ist also:

Der dynamisch erzeugte Auftrieb kann beachtlich groß werden. Bei tiefen Temperaturen ist er größer, als bei hohen, sehr stark wird er aber von der Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen Ober- und Unterseite des Ballons beeinflusst (wächst mit dem Quadrat). Unbedingt beachten muss man, dass z.B. beim Start der dynamische Auftrieb sehr schnell auf Null sinkt und der Ballon dann unvermittelt ins Sinken gerät. Beim Start vor Hindernissen kann das zur Gefahr werden.

Für die Praxis des Ballonfahrens ist der dynamische Auftrieb insbesondere in den folgenden drei Fällen zu beachten:

Vor und während des Starts

Vor dem Start ist der Ballon am Boden gefesselt. Wegen der Bodenreibung nimmt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe zu. Die obere Ballonkappe (Top) wird schneller umströmt als der untere Teil des Ballons. Der dynamische Auftrieb wirkt in gleicher Richtung wie der statische Auftrieb. Beide Kräfte addieren sich, der Ballon steigt beim Start rasch. Unmittelbar nach dem Start fährt der Ballon in die Strömung ein, nach kurzer Zeit wird er Ballon gleichmäßig umströmt. Der dynamische Auftrieb verringert sich schnell und fällt auf Null. Der Ballon steigt nun deutlich langsamer oder gerät sogar in´s Sinken. (siehe Abbildung 13 und 14)

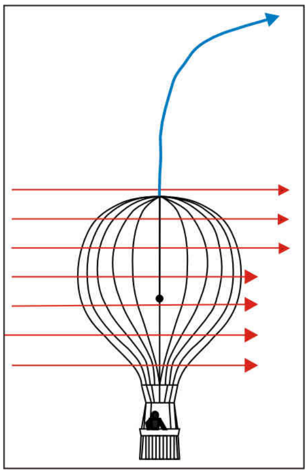

Abbildung 13: Wirkung des dynamischen Auftriebes beim Start eines Ballons.(An der Oberseite ist hier die Umströmung des Ballons etwas größer als an der Unterseite; der Ballon steigt beim Start erst schnell, dann lässt der dynamische Auftrieb nach und verschwindet schließlich ganz, der Ballon steigt langsamer)

Der Verlust des dynamischen Auftriebes während des Startvorganges wirkt sich besonders stark beim Start aus dem „Windschatten" (aus dem Lee) von Hindernissen aus, die nur wenig höher oder etwa gleich hoch sind wie der aufgestellte Ballon, weil dann der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Ober- und Unterseite besonders groß ist (siehe Abbildung 14).

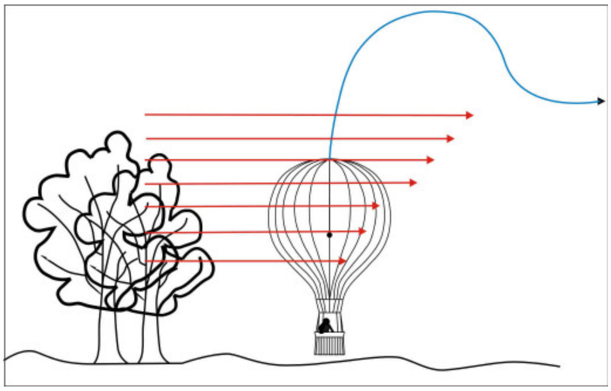

Abbildung 14: Wirkung des dynamischen Auftriebes beim Start eines Ballons. (An der Oberseite ist hier im Lee einer Baumreihe die Umströmung des Ballons deutlich größer als an der Unterseite; der Ballon steigt beim Start erst sehr schnell, dann lässt der dynamische Auftrieb nach und verschwindet schließlich ganz, der Ballon steigt deutlich langsamer oder sinkt sogar nach unten)

Während der Fahrt bei starker Windscherung

Fährt der Ballon von unten kommend in eine starke Geschwindigkeitsscherung ein, dann wird die obere Kappe schneller umströmt als der Ballon fährt. Es ergibt sich wieder eine Relativgeschwindigkeit, die einen dynamischen Auftrieb erzeugt, der in gleicher Richtung wie der statische Auftrieb wirkt. Der Ballon steigt schneller. Fährt der Ballon von oben kommend in eine starke Geschwindigkeitsscherung ein, dann entsteht ein dynamischer Abtrieb und der Ballon beginnt schneller zu fallen als es dem statischen Auftrieb entspricht (siehe Abbildungen 15 und 16).

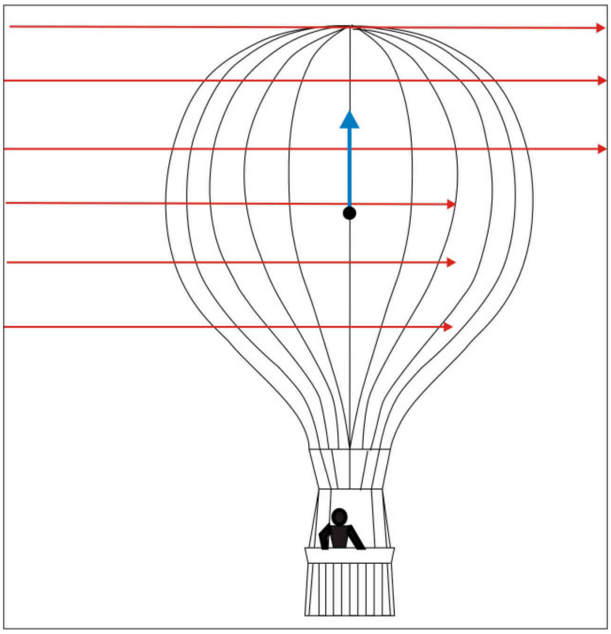

Abbildung 15: Einfahrt in eine Geschwindigkeitsscherung von unten. Das Steigen beschleunigt sich, daneben ist in der Regel mit Turbulenz und Hüllenverformung zu rechnen.

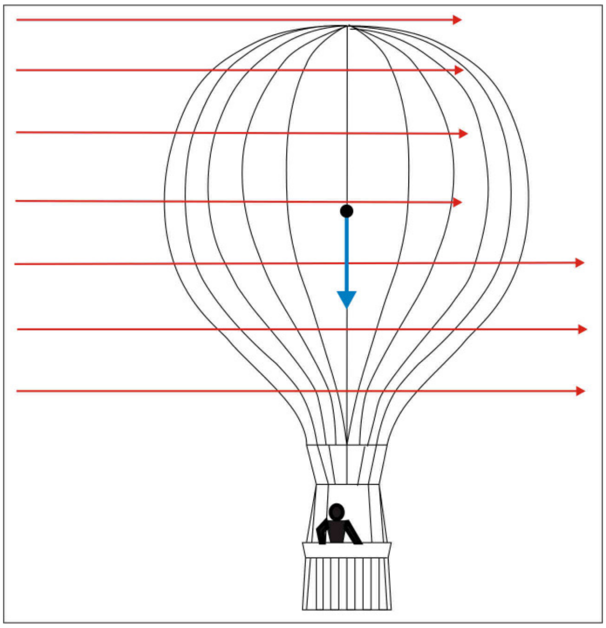

Abbildung 16: Einfahrt in eine Geschwindigkeitsscherung von oben. Das Sinken beschleunigt sich, daneben ist in der Regel mit Turbulenz und Hüllenverformung zu rechnen.

Bei einer Drehbewegung des Ballons

Gerät ein Ballon in eine Drehbewegung (z. B. beim Kaltabstieg), dann bricht der Ballon aus der Fahrtrichtung aus. Dreht sich der Ballon in Uhrzeigerrichtung, dann weicht er nach links aus, dreht er sich entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn weicht er nach rechts aus. Die Ursache ist eine Verstärkung der Umströmung an der einen und eine Verminderung an der anderen Seite infolge der Drehbewegung. Dadurch entsteht eine Kraft, die je nach Drehrichtung nach rechts bzw. nach links wirkt. Zu beobachten ist dieses Phänomen beim Kaltabstieg, in der Physik ist es als „Magnus-Effekt“ bekannt (siehe Abbildung 17).

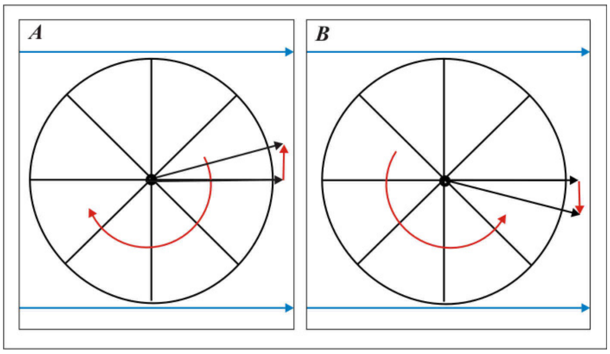

Abbildung 17: Ausweichen eines Ballons aus der Strömung bei einer Eigendrehung um seine vertikale Achse (Magnuseffekt)
A) Infolge der Rechtsdrehung des Ballons ist seine Umströmung an der linken Seite höher, an der rechten Seite geringer; es entsteht eine nach links gerichtete (Auftriebs)kraft. Der Ballon weicht nach links aus.
B) Infolge der Linksdrehung des Ballons ist seine Umströmung an der rechten Seite höher, an der linken Seite geringer; es entsteht eine nach rechts gerichtete (Auftriebs)kraft. Der Ballon weicht nach rechts aus.

Der Autor: Dr. Manfred Reiber hat Flugzeugbau und Meteorologie studiert. Er hat langjährige Erfahrungen auf allen Teilgebieten der Flugmeteorologie und Flugwettervorhersage. Er ist als Dozent, Wissenschaftsjournalist und Buchautor tätig. Brandneu ist sein für Ballonfahrer geschriebenes Lehrbuch „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“. Im Internet ist er unter www.DrMReiber.de zu finden.