Warum ist die Luft oben kälter? *von Manfred Ullrich, ©1996*

Eine gängige Ansicht begründet es so: Im Kontakt mit der Erdoberfläche erwärmt diese die aufliegende, unterste Luftschicht; diese erwärmt die darüber liegende, diese die darüber liegende – und so nimmt eben die Temperatur nach oben ab. Wenn auch anscheinend naheliegend, ist dies keine richtige Erklärung. Oder eine andere, ebenfalls unrichtige Darstellung erklärt es damit, dass *die in der Höhe weniger dichte Luft gar nicht so viel Wärme aufnehmen kann* – hierbei wird jedoch *Wärme* mit *Temperatur* verwechselt.

Eine andere, und zwar die allgemein anerkannte **Standard**-Erklärung, sagt, dass Luft, wenn sie höher und dadurch unter **weniger Druck** kommt – weil immer weniger Luft von oben drückt –, sich durch die **„Adiabatische Expansion"** *(Ausdehnung ohne Wärmeaustausch)* abkühlt. Aber darunter lässt sich nicht leicht etwas Anschauliches vorstellen; und eine diesbezügliche Rechnung ist nicht ganz einfach.

Des Öfteren schon war mir durch den Sinn gegangen, dass es eine einfachere Erklärung für die Temperaturabnahme geben **muss**. Und ich fand eine andere Erklärung, rechnete – und siehe da: es ergibt sich damit das **ganz genau Selbe** wie mit der *Adiabatischen Expansion*. Aber meine Erklärung ist doch viel einfacher, direkter und anschaulicher; und zudem brauche ich dafür den oben erwähnten Druck gar nicht. Ja, ich meine sogar:
Die Temperaturabnahme mit dem abnehmenden Luftdruck zu erklären ist **ein unnötiger Umweg** – und behindert den Blick aufs Wesentliche.

Also warum ist es oben kälter? Kurz gesagt: der Grund ist **die irdische Schwerkraft**. Aus demselben Grund, warum ein nach oben geworfener Stein auf dem Weg nach oben wegen der Erdanziehung immer langsamer wird (und anscheinend zum Stillstand kommt, bevor wieder nach unten fällt), aus demselben einfachen Grund wird es oben kälter. Und so wie sich ausrechnen lässt, wie beim Stein mit steigender Höhe seine Geschwindigkeit abnimmt, ebenso – fast genauso einfach – lässt sich die Temperaturabnahme der Luft herleiten. Und dies geschieht nun im Folgenden *(um das zu verstehen sind keine besonderen Kenntnisse nötig)*:

Was ist denn eigentlich Wärme bei Luft? Warme Luft unterscheidet sich dadurch von kälterer, dass die Luftmoleküle sich mehr bewegen – und zwar **völlig chaotisch**: **eben das ist deren Wärme!** Und während der geworfene Stein beim Nach-oben-Steigen Bewegungsenergie (kinetische Energie) verliert, indem er sichtbar langsamer wird, verlieren die Luftmoleküle aus dem gleichen Grund beim Nach-oben-Steigen ebenso Bewegungsenergie, indem sie auch langsamer und damit fühl- und messbar kälter werden. **Denn die Bewegungsenergie der Luftmoleküle drückt sich in deren Wärme aus!** Und nun stellt sich zunächst die Frage: *Wie schnell sind sie denn überhaupt, welche Bewegungsenergie, kinetische Energie, haben somit die Luftmoleküle hier unten – bei zum Beispiel 20 Grad?*

Ganz allgemein ist die kinetische Energie von einem Ding, das sich bewegt,

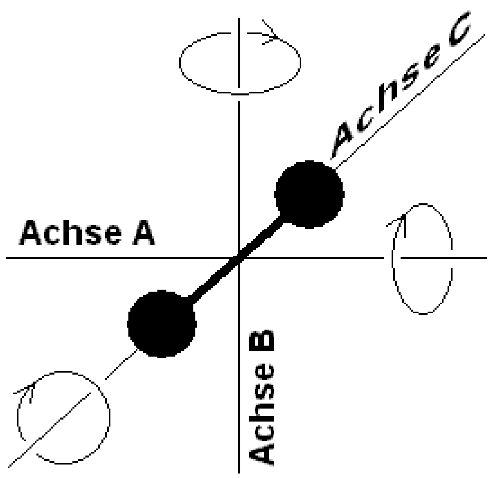
½ mal Masse mal Geschwindigkeit im Quadrat
(diese Allerwelts-Formel wird den allermeisten schon mal begegnet sein),

wobei es hier um die Masse des Luftmoleküls geht - die Erdanziehung macht ja aus der Masse das Gewicht. Und wie groß ist nun die Geschwindigkeit des Luftmoleküls? Hier lässt sich nun – und dies ist die **einzige** Komplikation – nicht einfach **eine Zahl** angeben. Denn die Bewegung und damit gesamte Bewegungsenergie der Luftmoleküle lässt sich nämlich **drei plus zwei** Geschwindigkeits-Komponenten zuordnen. Und eben über diese Geschwindigkeits-Komponenten kommt man recht einfach – wie nun folgt – zur Gesamt-Bewegungsenergie.

Zunächst die drei Geschwindigkeits-Komponenten: **Wegen ihrer Wärme** flitzen die Luftmoleküle wild umher in alle Richtungen und stoßen ständig gegen andere – pro Sekunde viele, viele Millionen Mal. Beim Stoß prallen sie voneinander ab und ändern dadurch ständig Richtung und Geschwindigkeit. Dieser wirren Bewegung ließe sich eine bezüglich ihrer **Bewegungsenergie** mittlere Geschwindigkeit zuordnen. Wird zudem nach Geschwindigkeits-Richtungen unterschieden, so lässt sich diese mittlere Geschwindigkeit vollständig auf **drei** Komponenten mit **zueinander rechtwinklig angeordneten Richtungen** aufteilen: so zum Beispiel auf-ab, links-rechts und vor-zurück. Warum ***rechtwinklig*** zueinander?

Mit der Kombination so aufgeteilter Komponenten lassen sich einerseits **alle Raumrichtungen** erfassen; andererseits – und das ist das Wichtigere – lässt sich so aufgeteilten Geschwindigkeits-Komponenten **je ihre eigene Energie** zuordnen, und so lassen sich deren Einzelenergien in ihrer Summe einfach zusammenzählen. Und wie groß ist nun **eine** (von diesen dreien) **in eine Richtung** weisende Komponente? Es ist eben jene Geschwindigkeit, mit der die Luftmoleküle im Mittel **in diese eine Richtung vorankommen** – sie kommen zwar gar nicht weit, da sie gegen andere stoßen, aber jene kommen weiter, und so fort. Und so kann – wie die Stafette bei einem Stafettenlauf – von Stoß zu Stoß, von Molekül zu Molekül mit eben dieser Geschwindigkeit etwas weitergegeben werden. Und dieses „etwas" ist **der Schall.** Dies heißt also: Die **energiemäßig** mittlere Geschwindigkeit (die *vrms*) in eine Richtung ist gerade gleich der **Schallgeschwindigkeit!** (*Schall ist ja eine Luftenergie, die Schallgeschwindigkeit somit eine Energie-Geschwindigkeit – daher vrms.*) Und die Schallgeschwindigkeit ist bekannt, ist ja wohl oft genug gemessen worden: **343 Meter pro Sekunde bei 20 Grad Celsius** – wenn kälter, dann weniger. Für die beiden anderen Richtungen gilt selbstverständlich dasselbe, und somit hat also ein Luftmolekül **für jede dieser drei** Geschwindigkeits-Komponenten bei **20 Grad Celsius** eine mittlere Bewegungsenergie von **½ · Masse · (343m/s)²**.

Nun zu jenen **zwei** weiteren Geschwindigkeits-Komponenten: Moleküle bestehen aus Atomen, und die Luftmoleküle **fast gänzlich** aus zwei, je gleichartigen Atomen, die miteinander verbunden sind – wie eine winzige Hantel (siehe Bild). Durch die ständigen Stöße, wobei die beiden Atome meist **ungleich** getroffen werden, bekommen die Luftmoleküle nicht nur einen Stoß in eine Richtung, sondern – eben durch den ungleichen Stoß – auch noch eine Drehung (Rotation). Und deshalb flitzen sie nicht nur schnell davon, sondern drehen sich noch dabei – **ebenso schnell** kreisen beide Atome umeinander. Auch Drehbewegungen lassen sich in Bestandteile aufteilen, und zwar bezüglich der **Richtung** ihrer Drehachse (z.B. Achse A, B, C) in drei **senkrecht zueinander** stehende Komponenten **mit je eigener Rotationsenergie**. Da fast alle Luftmoleküle aus zwei Atomen bestehen, ergeben sich bei einer Aufteilung, wie hier dargestellt, **zwei** Drehrichtungen, bei denen die beiden Atome **mit jener energiemäßig mittleren Geschwindigkeit umeinander kreisen**. Um die dritte Dreh-Achse, und zwar die längs der „Hantel"–Achse C, gibt es – ganz offensichtlich – kein **Umeinander**kreisen und somit auch keine diesbezügliche Rotationsenergie.
(Es lässt sich mathematisch zeigen, dass bei anderer Aufteilung, als hier dargestellt – also „Hantel"-Achse ***ungleich*** *zu Achsen A und B* ***und*** *auch C –, die Summe der* ***dann drei*** *Rotationsenergien gleich der von jenen zweien ist.)*



Und so hat mit diesen beiden Komponenten und den drei oben beschriebenen das **Luftmolekül** schließlich fünfmal von jener Energie - es heißt: *Wärme hat bei Luft fünf „Freiheitsgrade".* Also: **Die gesamte Bewegungsenergie (Wärmeenergie) der Luftmoleküle hier unten bei 20 Grad ist somit 5-mal 1/2 • Masse • (343m/s)².**

Mit dieser Energie flitzen die Luftmoleküle umher und eben auch nach oben und verlieren so beim Bewegen **gegen die Erdanziehung** an Bewegungsenergie, werden langsamer – wie der nach oben geworfene Stein. Zwar gelangt das einzelne Luftmolekül so kaum ganz nach oben, weil es ständig gegen andere stößt. Aber da der Stoß von einem Luftmolekül zum anderen weitergegeben wird, tritt somit das eine an die Stelle des anderen – bis oben hin. Und obwohl beim Nach-oben-Flitzen bis zum nächsten Stoß **zunächst** nur die eine der fünf Bewegungen – die nach oben gerichtete – wegen der Erdanziehung abnimmt, findet durch die ständigen gegenseitigen Stöße immer wieder ein Ausgleich statt; und so nehmen alle fünf ab beim Weg nach oben.

Auf welche Höhe würden die Luftmoleküle so – im Mittel und theoretisch – nach oben gelangen, bevor sie ihre gesamte Bewegungsenergie (also thermische Energie, Wärme) verloren hätten? Es wird dabei wie bei dem Stein Bewegungsenergie (kinetische Energie) unten in Lageenergie (potentielle Energie) oben umgesetzt. Die Lageenergie ist ja

Gewicht • Höhe *(je höher ein Gewicht gehoben wird, desto mehr Energie steckt drin – zeigt sich beim Herunterfallen),* wobei das Gewicht wiederum sich ergibt aus

Masse • Erdanziehungsfaktor *(ein Kilogramm auf dem Mond wiegt bekanntlich*
. *viel weniger als hier).*

Da die Lageenergie oben von der Bewegungsenergie (Wärme) unten herrührt, lassen sich die beiden Energien gleichsetzen, also

Die Lageenergie oben *ergibt sich aus* Bewegungsenergie (Wärme) unten:

Masse • Erdanziehungsfaktor • Höhe **=** 5 • 1/2 • Masse • $(343 m/s)^2$

Die Höhe, bei der – im Mittel und theoretisch – alle Bewegungsenergie (thermische Energie, also Wärme) so aufgebraucht wäre und dann ganz in der Lageenergie (also in der Höhe) steckt, erhält man mit dem Umstellen der Gleichung, nämlich hier mit dem Teilen beider Seiten durch Masse und den Erdanziehungsfaktor, genannt Erdbeschleunigung $g = 9{,}8 m/s^2$. Somit

Höhe = $5 \cdot 1/2 \cdot (343 m/s)^2 / 9{,}8 m/s^2 = 5/2 \cdot 343^2/9{,}8$ Meter,

ergäbe eine Höhe von **30.012 Meter**. Da hätte die Luft (theoretisch, wenn nichts „stören" würde!) also eine Temperatur von absolut Null = minus 273 Grad, das heißt keine Wärme, keine thermische Energie mehr. Die Temperatur nähme demnach von unten bis 30.012 Meter Höhe um **293** Grad ab, von plus 20Grad auf minus 273Grad. Und jene rund 30km nun aufgeteilt auf diese T_0 = 293 Grad ergibt schließlich

102 Meter pro Grad

$$\boxed{\frac{dh}{-dT} = \frac{5}{2} \cdot \frac{v_{Schall}^{2}}{g \cdot T_0}}$$

Und das war tatsächlich schon die ganze Rechnerei – **so einfach**; alle 102 Meter nähme demnach die Temperatur um ein Grad ab. *(Alles zusammengefasst in der Formel darunter.)*

Jedoch dieser beschriebene Vorgang der Temperaturabnahme ist „**Störungen**" ausgesetzt. Und die Auswirkung solcher *Störungen* zeigt die so genannte *„Standardatmosphäre"*, die besagt nämlich, tatsächlich misst man – **durchschnittlich**, mal mehr, mal weniger – 154 Meter pro Grad (6,5 Grad pro 1000 Meter). Das heißt die Temperatur der Lufthülle nimmt **normalerweise** nach oben etwas weniger stark ab – sie ist mehr oder weniger *„stabil geschichtet"*. Der Grund dafür ist **wetterbedingt** und geschieht vor allem durch **Einfließen anders temperierter Luftmassen**. Eingeflossene wärmere, damit weniger dichte, leichtere Luft legt sich eher oben hin, eingeflossene kältere (schwerere) eher unten – **beides** mindert so die Temperaturabnahme nach oben. Und deshalb und auch wegen anderer „Störungen“ (z.B. direkte Erwärmung der Luft durch Sonneneinstrahlung) reicht die Lufthülle in Wirklichkeit höher als jene theoretischen rund 30 Kilometer.

Also einfach indem sie gegen die Erdanziehung anrennen, verlieren die Luftmoleküle pro 102 Meter so viel an Bewegungsenergie (das heißt Wärme!), dass sie dadurch jeweils ein Grad kälter werden. Und dies ist der **unmittelbare** Grund dafür, dass es nach oben kälter wird. Und das Wettergeschehen mindert diese Temperatur-abnahme etwas.

Wie schon gesagt, wenn gemäß der üblichen Erklärung, die *„Adiabatischen Expansion"*, gerechnet wird, kommt man zum **ganz genau selben Ergebnis**. Nur jene Rechnung ist nicht so leicht zu verstehen (dazu siehe weiter unten). Und abgeleitet von Gedanken in diesem Aufsatz hier ergab sich meine eigene Sichtweise zu „*Erwärmung durch Luftreibung*“.

Erwärmung durch *Luft-Reibung,* mal anders gesehen, *©2002*

Abgeleitet von Gedanken, die ich in *„Warum ist die Luft oben kälter?“* hatte, bin ich – Jahre später – zu einer anderen Sichtweise gekommen, wie ein Gegenstand durch *„Reibung“* in und an der Luft sich erwärmt. Und zwar sehe ich dies folgendermaßen:
Luft ist warm, indem die Luftmoleküle sich (völlig chaotisch) bewegen – eben **das** ist deren Wärme. Den Luftmolekülen lassen sich dabei (wie oben dargestellt) diesbezüglich fünf grundsätzliche, **energiemäßig** voneinander unabhängige Arten der Bewegung zuordnen: drei Bewegungen in den drei Raumrichtungen und zwei Rotationsbewegungen. Bei 20 Grad Celsius bewegen sich die Luftmoleküle mit einer energiemäßig mittleren Geschwindigkeit von 343m/s in jede der drei Raumrichtungen (**Schallgeschwindigkeit**), und mit gleicher Geschwindigkeit rotieren die Atome des Luftmoleküls in zwei weiteren Bewegungen umeinander. Hierbei entspricht die Temperatur der Bewegungsenergie der Luftmoleküle und damit der **Summe der Quadrate** der **fünf Bewegungsgeschwindigkeiten**. Und wenn nun Luft auf einen Gegenstand mit der zusätzlichen Geschwindigkeit v_Z strömt oder der Gegenstand sich in der Luft mit der Geschwindigkeit v_Z bewegt, so kommt eine sechste Bewegungsart hinzu, **die energiemäßig nichts mit den anderen fünf zu tun hat**. Die Energie dieser sechsten Bewegungsart ergänzt die der anderen fünf. Und **dies ist für den Gegenstand** so, als wäre die Luft **entsprechend wärmer!** Also ohne die sechste Bewegungsart hat die Luft bei 20Grad Celsius (ist absolute Temperatur von 293 Grad/*Kelvin*) eine Bewegungsenergie entsprechend

5–mal $(343\text{m/s})^2$,

kommt die sechste Bewegungsart mit der Geschwindigkeit v_Z hinzu, dann entsprechend

5–mal $(343\text{m/s})^2$ **plus** 1–mal v_Z^2

Setzt man nun das links und rechts vom *plus* mit den Temperaturen so zueinander ins Verhältnis, sodass das linke den absolut 293 Grad (20 Grad C) und das andere dem Temperaturzuwachs T_Z entsprechen soll, also

$$\frac{293\,Grad}{5\cdot(343m/s)^2}=\frac{T_Z}{v_Z^2}$$

so ergibt sich aus der zusätzlichen Bewegung mit der Geschwindigkeit v_Z der Temperaturzuwachs T_Z:

$$\mathbf{T_Z} = 293\text{Grad}/5 \cdot (v_Z/343\text{m/s})^2 = \mathbf{(v_Z/44{,}8m/s)^2\ Grad}$$

Dies habe ich schon einmal experimentell nachgeprüft, indem ich an einem Sonntagmorgen früh (wenig Verkehr auf der nahen Bundesstraße) bei einem Bekannten (Heinz B.) im Auto mitfahrend und den mittels Kabel mit der Anzeige verbundenen Fühler eines (in der Firma ausgeliehenen) **hochgenauen** elektronischen Thermometers an einem Besenstiel weit aus dem Autofenster haltend mehrfach mal sehr langsam, mal schnell fahrend den Temperaturunterschied an mehreren Stellen der Strecke gemessen und notiert habe. Es ergab sich mit verblüffender Genauigkeit (auf ein Zehntel Grad genau) bei 44,8m/s = 161km/h eine Temperaturüberhöhung von **1,0 Grad** – wie obige Rechnung aussagt.

Also ich sehe es so: die bewegte Luft *„reibt"* eigentlich **nicht** an dem Gegenstand und erwärmt den so, sondern **tatsächlich ist die Luft so effektiv wärmer für** den Gegenstand. Demnach wäre also für ein Verkehrsflugzeug, das mit z.B. 900km/h=250m/s fliegt (normale Reise-Fluggeschwindigkeit), die – oben sonst kalte – Luft um ca. 30 Grad wärmer, als sie tatsächlich ist. Und für einen Satelliten, der aus einer **erdnahen** Umlaufbahn – mit dann knapp 8km pro Sekunde (!) – in die Erdatmosphäre eintaucht, ist die Luft rund **dreißig Tausend Grad** wärmer, heißer! Kein Wunder, dass ein großer Anteil verdampft, verbrannt ist, wenn der unten ankommt – falls kein Hitzeschild schützt.

Und aufgrund meiner Sichtweise von *Erwärmung durch Luftreibung* wage ich folgende Behauptung: Für die Stärke des Temperaturzuwachses ist die Luftdichte egal. Also obwohl dichtere Luft doch mehr *„reiben"* **müsste**, bringt die keinen stärkeren Temperaturzuwachs als die weniger dichte Luft – diese Temperaturüberhöhung geht nur **schneller** mit dichterer Luft.

Es soll hier nun gezeigt werden – wenn das auch leider nicht ganz so anschaulich geht -, dass meine einfache Erklärung im Aufsatz

„*Warum ist die Luft oben kälter?"*

zum **selben Ergebnis** führt wie hier eine Herleitung gemäß der üblichen, komplizierten und wenig anschaulichen Standard-Erklärung mit der „*Adiabatischen Expansion*“.

Ausgegangen wird von drei Formeln für *Adiabatische Expansion* und *Schallgeschwindigkeit* (einem Physikbuch entnommen), die hier aber nicht – was sonst eigentlich nötig wäre! – weiter erklärt werden; **denn ich will hier nur zeigen, dass das Selbe sich ergibt.**

Also aus einem Physikbuch die drei Formeln:

$\frac{T_1}{T_2}=\left[\frac{V_2}{V_1}\right]^{\kappa-1}$ und $\left[\frac{T_1}{T_2}\right]^{\kappa}=\left[\frac{p_1}{p_2}\right]^{\kappa-1}$ für absolute Temperatur [T], Volumen [V], Druck [p] sowie

$v_{Schall}=\sqrt{\kappa\cdot\frac{p}{LD}}$ Schallgeschwindigkeit mit Luftdichte *LD* und Adiabaten-Koeffizient κ, für Luft $\kappa = 1{,}4$

Die nachfolgende Herleitung zeigt, wieviel einfacher und **anschaulicher** im Gegensatz dazu meine Erklärung ist. Und dies doch umso viel mehr, wenn dann auch noch die obigen drei Formeln mit erklärt werden sollten!
Im Folgenden sind Größen mit Index *0* der Wert auf Höhe Null – also unten.

Und nun zwei wesentliche Aussagen für die Herleitung:
1) das Volumen *V* einer Luftmenge verhält sich umgekehrt zu deren Dichte *LD* (logisch),
2) der Druck *p* nimmt ab mit der Höhe *h* gemäß dem Gewicht der Luftschichten und demnach mit der Luftdichte *LD* mal dem Erdanziehungsfaktor, *Erdbeschleunigung g*.

Also 1) $\frac{V_0}{V}=\frac{LD}{LD_0}$ und 2) $-\frac{dp}{dh}=LD\cdot g$ ergibt zusammen: $-dp=g\cdot LD_0\cdot\frac{V_0}{V}\cdot dh$

Da es hier um den Zusammenhang zwischen Höhe und Temperatur geht, *„stören"* Volumen *V* und Druck *p* in der Gleichung. Deshalb wird zunächst mit der ersten Physikbuchformel der *V*-Term durch einen *T*-Term ersetzt:

$-dp=g\cdot LD_0\cdot\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}\cdot dh$ Um schließlich auch *p* (eigentlich *dp*) durch einen T-Term zu ersetzen, wird der Differentialquotient *dp/dT* aus der zweiten Physikbuchformel gebildet:

$\left\{\frac{p}{p_0}\right\}^{\kappa-1}=\left\{\frac{T}{T_0}\right\}^{\kappa}$ umformen: $p=\frac{p_0}{T_0^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}\cdot T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$ und nach *T* ableiten: $\frac{dp}{dT}=\frac{p_0}{T_0^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}\cdot\frac{\kappa}{\kappa-1}\cdot T^{\frac{1}{\kappa-1}}$

und damit also oben *dp* ersetzen:

$$-\frac{p_0}{T_0^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}\cdot\frac{\kappa}{\kappa-1}\cdot T^{\frac{1}{\kappa-1}}\cdot dT=g\cdot LD_0\cdot\left\{\frac{T}{T_0}\right\}^{\frac{1}{\kappa-1}}\cdot dh$$

Kürzen macht's einfacher:

$$-\frac{p_0}{T_0}\cdot\frac{\kappa}{\kappa-1}\cdot dT=g\cdot LD_0\cdot dh$$

Mit der dritten Physikbuchformel p_0, LD_0 (für unten) und das eine κ durch *Schallgeschwindigkeit* (auch unten) ersetzen:

$$-\frac{1}{T_0}\cdot\frac{v_{Schall}^2}{\kappa-1}\cdot dT=g\cdot dh$$

Umformen mit κ = 1,4 für Luft, also 1/(κ - 1) = 2,5 = 5/2, ergibt schließlich

$$\boxed{\frac{dh}{-dT}=\frac{5}{2}\cdot\frac{v_{Schall}^2}{g\cdot T_0}}$$

ganz genau wie meine viel einfachere Erklärung, für die ich zudem noch nicht einmal die drei Formeln oben brauche und somit es auch nicht nötig habe, **diese** erklären zu müssen – was gar nicht so einfach ist!

Und warum wird es also ansonsten so kompliziert und **unanschaulich** erklärt?
Das allerdings hätte ich auch ganz gerne gewusst – aber **niemand** kann mir das sagen.

Übrigens eine Herleitung mit gleichem Ergebnis kann man auch anderweitig und ausführlicher sehen, zum Beispiel hier: *https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A4rischer_Temperaturgradient* Dort heißt es: „ *. . . so erhält man für den trockenadiabatischen Temperaturgradienten Γ den Wert von −9,76 K/km“* - was der Kehrwert ist von meinen 102 Meter pro (Minus)-Grad.