

**Wie kann man die thermischen Unterschiede zwischen Kalt- und Warmluft beim Segelflug am besten managen?  
Von Dr. Manfred Reiber**

Wir wissen aus der Erfahrung, dass Thermik stark von der Luftmasse abhängt. Kaltluftzufluss auf der Rückseite von Tiefs lässt gute Thermik erwarten, Warmluftzufuhr auf der Vorderseite von Tiefs eher schlechte. Welche physikalischen Eigenschaften sind es aber konkret, die die Güte der Thermik bestimmen? Können wir vielleicht durch eine bessere Beachtung der Unterschiede von „Kaltluftthermik“ und „Warmluftthermik“ unser flugtaktisches Verhalten so einrichten, dass wir genau diese Unterschiede gezielt für die Durchführung von Streckenflügen nutzen können?

Wovon hängt die Güte der Thermik ab?

Geht man davon aus, dass in einer Thermikblase trockenindifferente Schichtung herrscht (Temperaturabnahme  $0,98\text{ °C/pro } 100\text{ m}$ , keine Kondensation von Wasserdampf), dann sind es folgende zwei physikalische Eigenschaften der Luft, die die Güte der Thermik bestimmen:

1. Die Lufttemperatur
2. Die Luftfeuchte

Überlegen wir uns, in welcher Weise diese beiden Parameter die Güte der Thermik beeinflussen!

Überlegen wir zuerst: Wie hängen „Thermikgüte“ und Lufttemperatur zusammen?

1. Je tiefer die Temperatur einer Luftmasse ist, umso besser ist die potenzielle Güte der Thermik.
2. D.H.: Bei gleichem Temperaturunterschied zwischen Umgebungsluft und Warmluft in der Blase, ist die Thermik umso besser, je kälter eine Luftmasse ist.

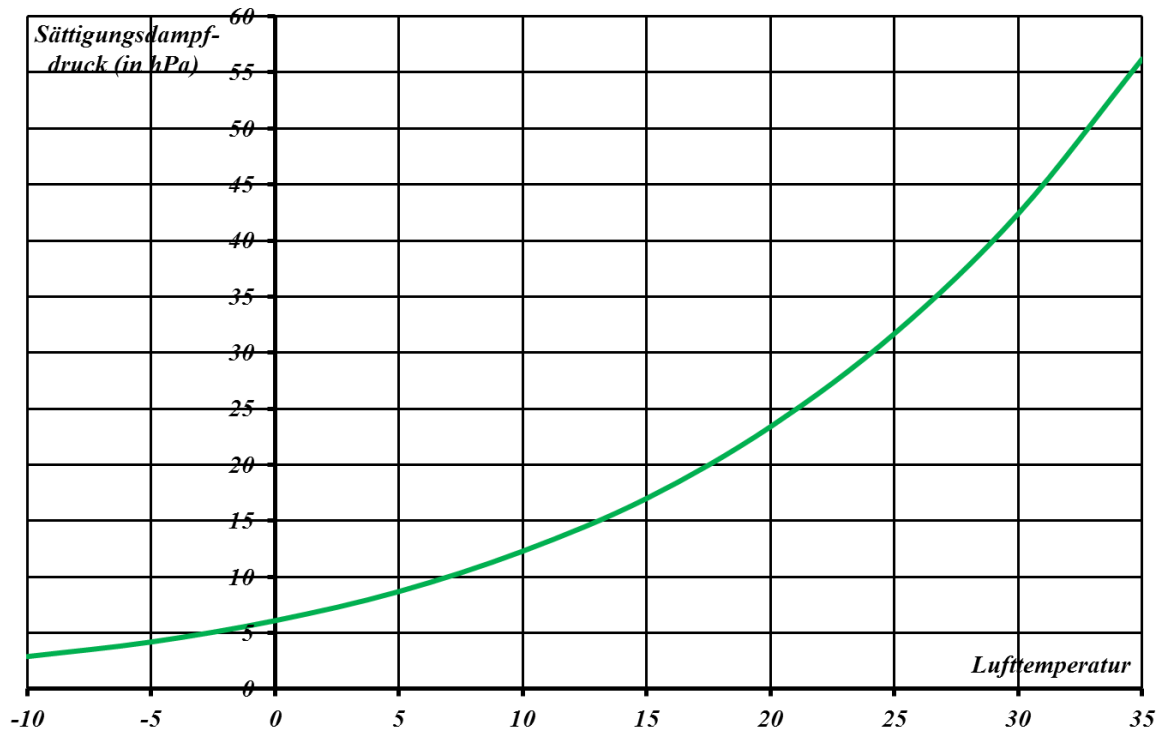
Das entspricht ja auch unserer Erfahrung, eine „Rückseitenkaltluft“ im Frühjahr, wenn die Luftmasse eben noch kühl ist, bringt besseres Streckenwetter als im Sommer, wenn die Luftmasse insgesamt schon wärmer ist.

3. In Kaltluft beginnt die Thermik bereits in Bodennähe, ist dort schon relativ stark und nimmt mit der Höhe meistens sogar noch leicht zu.
4. Daraus folgt, Kaltluftthermik ist auch bei einem Windenstart in der Regel gut zu erreichen, beim F-Schlepp werden nicht so große Schlepphöhen benötigt.

Wie hängen „Thermikgüte“ und Luftfeuchtigkeit zusammen?

1. Warme Luft kann mehr Luftfeuchtigkeit aufnehmen als kalte Luft. Sie ist also zumindest potenziell immer feuchter als kalte Luft (Diagramm 1). Aus diesem Diagramm 1 können wir z. B. ablesen, dass der Dampfdruck bei  $20\text{ °C}$  schon etwa doppelt so hoch ist, wie bei  $10\text{ °C}$  und bei  $30\text{ °C}$  schon 3,5 Mal so hoch ist wie bei  $10\text{ °C}$ . Der Wasserdampfgehalt steigt mit zunehmender Temperatur exponentiell.

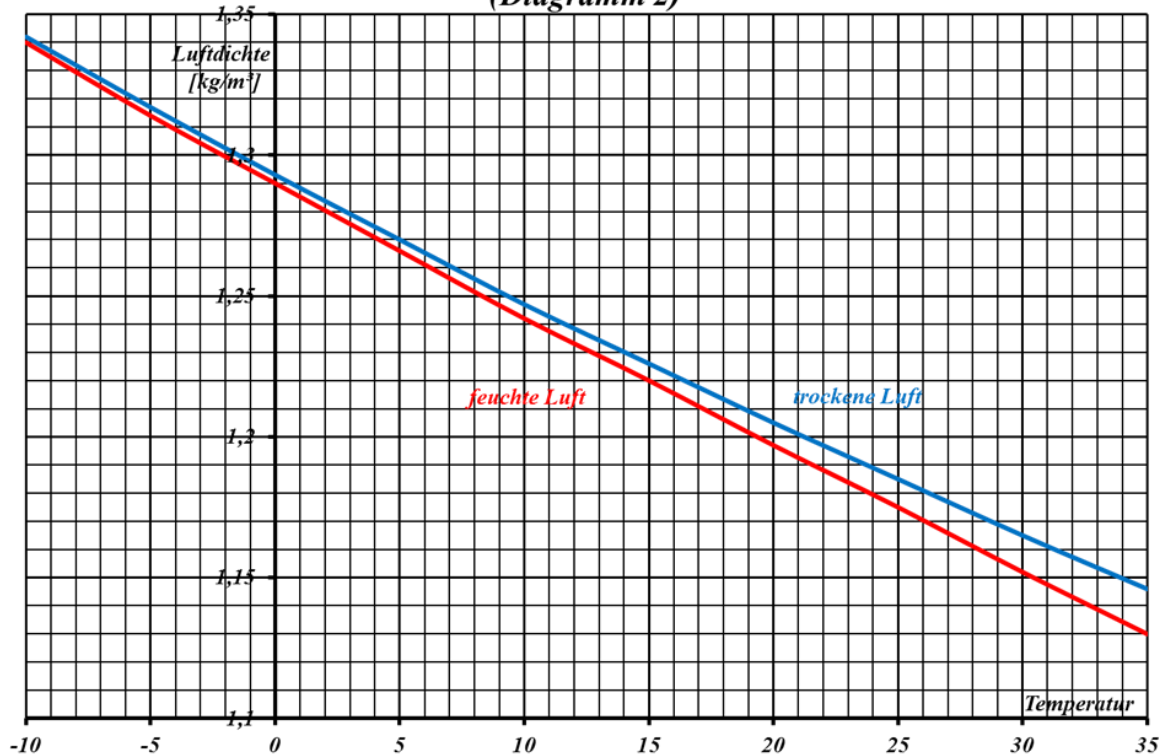
### Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur (Diagramm 1)



2. Feuchte Luft hat eine geringere Dichte als trockene Luft bei gleicher Temperatur. (siehe Diagramm 2). D.h.: haben trockene und feuchte Luft die gleiche Temperatur, dann ist die feuchte Luft leichter als die trockene.

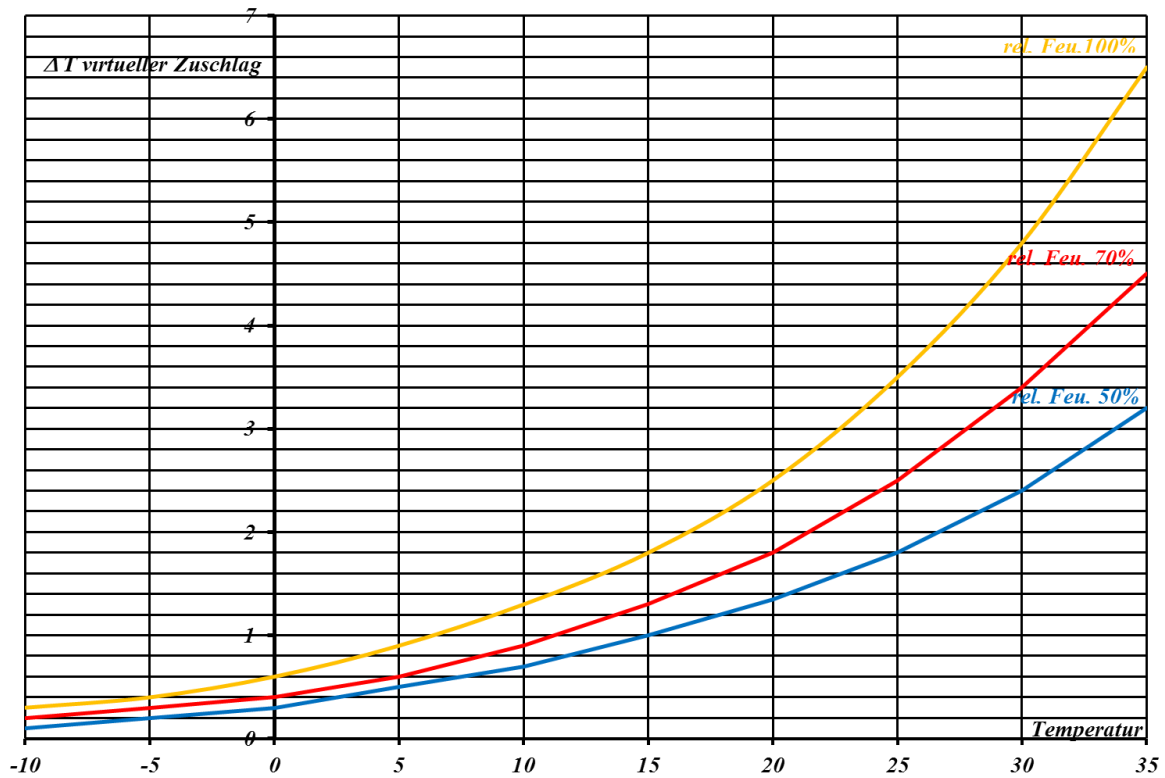
3. Warme Luft mit einem hohen Gehalt an Wasserdampf hat deshalb einen thermischen Vorteil: sie hat eine geringere Dichte, ist leichter und kann besser steigen! (siehe Diagramm 2)

**Luftdichte trockener und feuchter Luft (bei Sättigung) in  
Abhängigkeit von der Temperatur bei Standarddruck (1013,25 hPa)  
(Diagramm 2)**



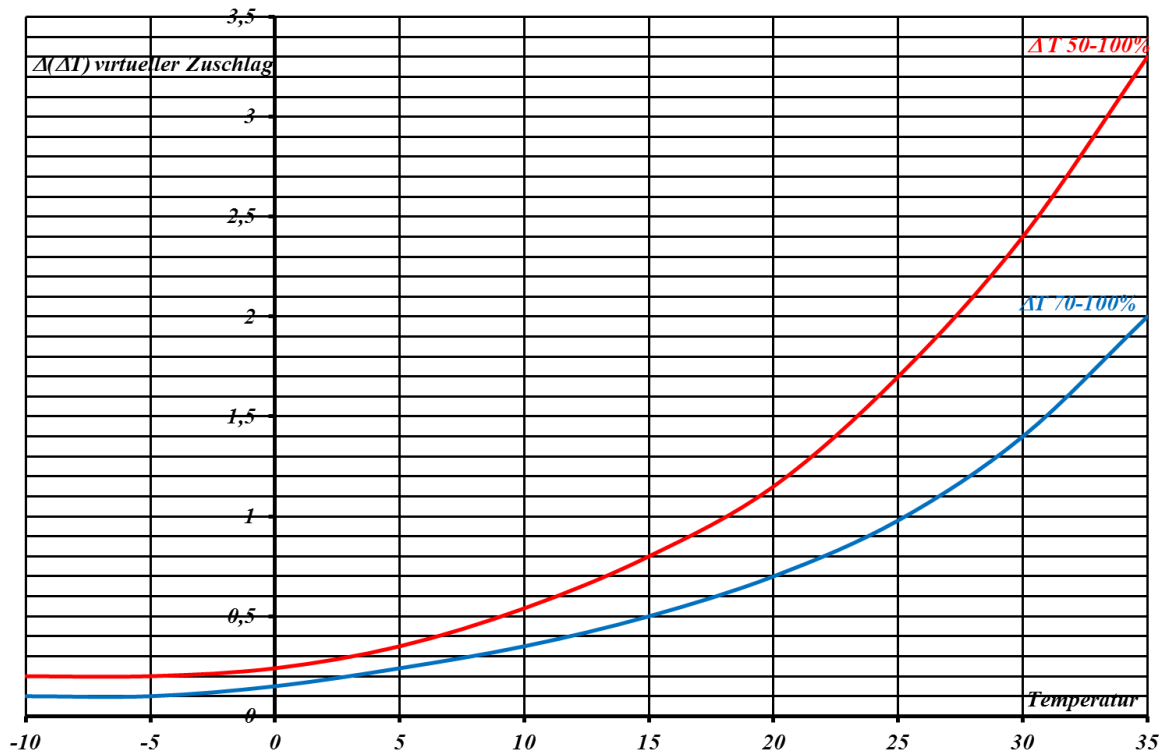
4. Der Dichteunterschied zwischen trockener und feuchter Luft wird mit Hilfe der sogenannten virtuellen Temperatur beschrieben. Zu verstehen ist das etwa so: Hat trockene Luft die gleiche Dichte wie feuchte, dann muss die trockene Luft etwas wärmer sein als die feuchte. Diesen Temperaturunterschied nennt man virtuellen Zuschlag. D.h.: Je mehr Feuchte die Luft enthält, umso größer muss der virtuelle Zuschlag sein. (siehe Diagramm 3)

**Virtueller Temperaturzuschlag in Abhängigkeit  
von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Diagramm 3)**



5. Wenn relativ trockene Warmluft (ca. 50 bis 70% rel. Feuchte) trockenadiabatisch aufsteigt, hat sie einen größeren Gewinn am virtuellen Zuschlag, als relativ feuchte Warmluft (Diagramm4)

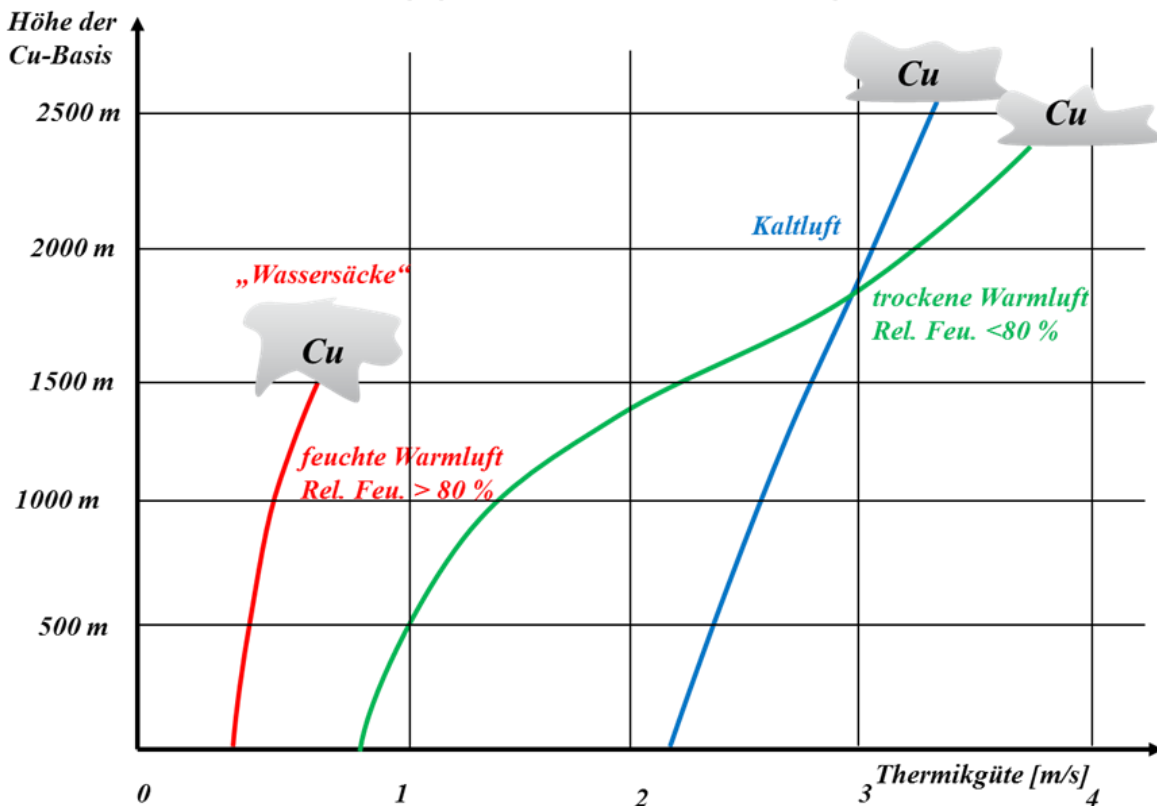
**Differenz des virtuellen Zuschlages zwischen 50% und 100%  
und zwischen 70% und 100% Luftfeuchte (Diagramm 4)**



6. Die Dichte trockener Warmluft wird beim Aufsteigen bis zur Cu-Untergrenze immer geringer, als die Dichte feuchter Warmluft bzw. kalter Luft sein. Sie ist thermisch besser!
7. Feuchte Warmluft erreicht außerdem eher das Kondensationsniveau. Die Cu-Untergrenze ist also tief und lässt ohnehin keine großen Flughöhen zu. Selbst Cu in feuchter Warmluft weisen eher auf schlechte Thermik hin, sie sehen schlaff und kraftlos aus, man bezeichnet sie deshalb auch als „Wassersäcke“.
7. Je höher jedoch trockene Warmluft steigen kann, umso bessere werden ihre thermischen Eigenschaften.
8. Die thermische Güte von Warmluft ist also in Bodennähe, im Vergleich zur thermischen Güte von Kaltluft, schlechter, zumindest die von trockener Warmluft wird mit zunehmender Höhe aber immer besser und kann in der Höhe (in Nähe der Cu-Basis) sogar besser als Kaltluftthermik sein.

Daraus können wir folgende Schlussfolgerungen für den Verlauf der Thermikgüte in Abhängigkeit von der Höhe für unterschiedliche Luftmassen ableiten (siehe Diagramm 5).

### Verlauf der Thermikgüte verschiedener Luftmassen (qualitativ) in Abhängigkeit von der Höhe (Diagramm 5)



1. In Kaltluft ist vom Boden ab bis zur Cu-Basis mit guter Thermik zu rechnen. Für die fliegerische Praxis bedeutet das, auch in geringer Höhe gibt es immer wieder Chancen gute Thermik zu finden. Deshalb ist Thermik in Kaltluft bestens für Streckenflüge geeignet. In der Regel findet man den „Thermikanschluss“ auch bei einem Windenstart.
2. In trockener Warmluft (rel. Feuchte unter 80 %) ist die Thermik zwar in Bodennähe schlecht, wird aber mit zunehmender Höhe immer besser und kann in Nähe der Cu-Basis die Steigwerte von Kaltluftthermik erreichen oder sogar überschreiten. Bei Streckenflügen ist jedoch zu beachten dass man nicht zu tief kommt, weil dann der Anschluss zur guten Thermik verloren gehen kann. Die Folge wären ggf. Außenlandungen. Windenstarts sind in der Regel nicht geeignet, um den Thermikanschluss zu erreichen. Im F-Schlepp sind meist größere Höhen notwendig.
3. In feuchter Warmluft (rel. Feuchte >80 %) ist die Thermik in Bodennähe schwach, nimmt zwar mit der Höhe etwas zu, reicht aber kaum für größere Streckenflüge aus. Außerdem sind die Cu-Untergrenzen in der Regel zu tief, um überhaupt die notwendige Höhe für einen Streckenflug erreichen zu können. Die Wolken sehen schlaff und kraftlos aus, man bezeichnet sie oft als „Wassersäcke“.

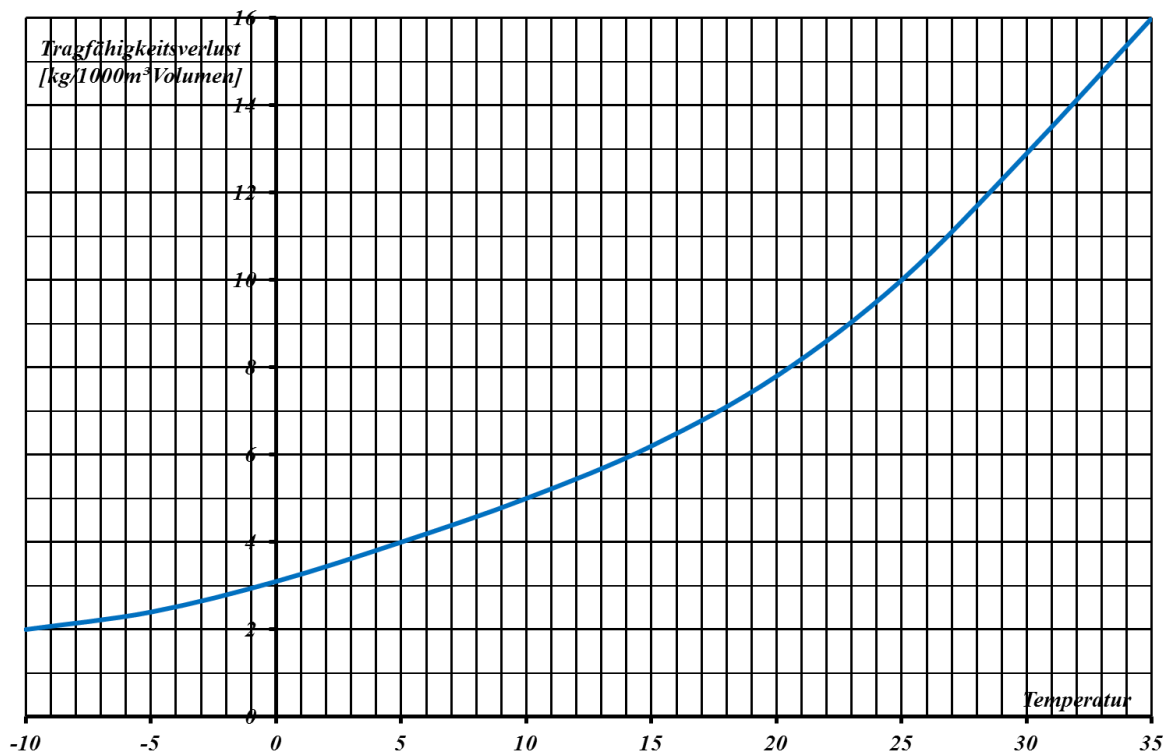
### ***Noch einige Bemerkungen für das Ballonfahren in feuchter Warmluft***

Je wärmer und je feuchter eine Luftmasse ist, umso geringer wird die Tragfähigkeit eines Ballons. Die Tragfähigkeit berechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{Tragfähigkeit} = V_{\text{Ballon}} (\rho_{\text{feuchte Umgebungsluft}} - \rho_{\text{Heißluft im Ballon}})$$

Im folgenden Diagramm 6 sind die Tragfähigkeitsverluste gesättigter Luft in Abhängigkeit von der Temperatur in kg pro 1000 m<sup>3</sup> Ballonvolumen dargestellt.

#### ***Tragfähigkeitsverlust eines Ballons pro 1000 m<sup>3</sup> Volumen in gesättigter Luft im Vergleich zu trockener Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (Diagramm 6)***



Einige Beispiele für den Tragfähigkeitsverlust eines Ballons mit 4600 m<sup>3</sup> Ballonvolumen, die eindrücklich zeigen, dass die Luftfeuchte, zumindest bei Temperaturen oberhalb etwa 25 °C deutlichen Einfluss auf die Tragkraft eines Ballons hat und bei der Fahrtvorbereitung unbedingt berücksichtigt werden muss (Tabelle 1).

Tabelle 1: Tragfähigkeitsverlust für einen Ballon mit einem Volumen von 4600 m<sup>3</sup>

<b><i>Temperatur in °C</i></b>	<b><i>10</i></b>	<b><i>15</i></b>	<b><i>20</i></b>	<b><i>25</i></b>	<b><i>30</i></b>	<b><i>35</i></b>
<b><i>TF-Verlust in kg</i></b>	<b><i>23</i></b>	<b><i>28,6</i></b>	<b><i>34,5</i></b>	<b><i>46</i></b>	<b><i>59,8</i></b>	<b><i>73</i></b>