



Kühlturm- Thermik



Nachdem es in den letzten Ausgaben um das Wandern von Thermik im Wind ging, wird hier ein besonderer Blick auf Thermik über Kühltürmen geworfen. Denn obwohl Industriethermik deutlich anders entsteht als natürliche Thermik, verhält sie sich am Ende genauso.

TEXT UND ILLUSTRATIONEN OLIVER PREDELLI FOTO THOMAS GERLACH

In den vorangegangenen Beiträgen wurde gezeigt, dass Thermik nicht an einem festen Ort, zum Beispiel einer Waldkante, abreißt, um anschließend schräg im Wind aufzusteigen. Sie verhält sich stattdessen eher wie ein am Boden liegender „Schal“ feucht-warmer Luft, der an einem Ende angehoben wird und sich dann in Windrichtung nach oben abschält. Die Thermik steigt dabei immer senkrecht auf, wobei der Bart mit der horizontalen Geschwindigkeit wandert, mit der er sich vom Boden abgelöst hat (**Bild 1**). Konsequenterweise spricht man dann auch nicht mehr von einem Ablösepunkt, sondern von einem Ablösepfad. Warum das so ist, wird detailliert in einer Veröffentlichung in Technical Soaring beschrieben, der Link dazu findet sich am Ende dieses Artikels.

Die Frage ist nun, ob das bei „Industriethermik“ auch so ist. Denn dort gibt es am Kühlturm-Auslass eine quasi punktförmige und fest stehende Energiequelle. Man wird beim Kreisen in diesem Aufwind deutlich versetzt. Könnte es also sein, dass sich Kühlturm-Thermik anders verhält als Thermik über Feld, Wald und Wiesen? Nein, das tut sie natürlich nicht. Denn ein aufsteigendes Luftpaket „weiß“ schließlich nicht, wie es entstanden ist und wird sich daher auch nicht einmal so und einmal anders verhalten. Um das zu verstehen, muss man tief in die Mechanismen eintauchen, die mit der Entstehung und Auflösung von Kühlturm-Wolken zusammenhängen.

„**Industriethermik**“ ist eine besondere Freude für Segelflieger rund um Aachen. Oft drehen sie nach einem langen Streckenflugtag eine extra Schleife, um noch einmal zum Ausklang des Tages, wenn die natürliche Thermik bereits am Abklingen ist, über den Braunkohlekraftwerken in Weisweiler, Grevenbroich oder Niederaußem ein letztes intensives Steigen mitzunehmen. Auf WeGlide labeln einige Piloten diese Flüge sogar scherzhaft mit „Kohleausstieg ist Thermikausstieg“.

Bild 2 zeigt zwei Flüge über einem der 173 m hohen Naturzug-Kühltürme des Kraftwerks Grevenbroich-Neurath. Thomas Gerlach, einer der Piloten, fotografiert dabei den Kühlturm. Es ist das Titelfoto dieses Beitrags. Er und sein Begleiter steuern die Kraftwerke zur Verlängerung ihres Flugweges an und sind froh, hier einen kräftigen Thermikspender gefunden zu haben, da die anderen Kraftwerke auf der Strecke gerade nicht arbeiten.

Während der gesamten drei Minuten, in denen die Piloten in der Industriethermik kreisen, fliegen sie direkt übereinander (violette Linien). Die horizontale Driftgeschwindigkeit des Bartes beträgt $v = 4,8$ m/s über Grund, was der an dem Tag gemessenen Windgeschwindigkeit in Kühlturmhöhe entspricht. Aus den Steiggeschwindigkeiten der Segelflugzeuge

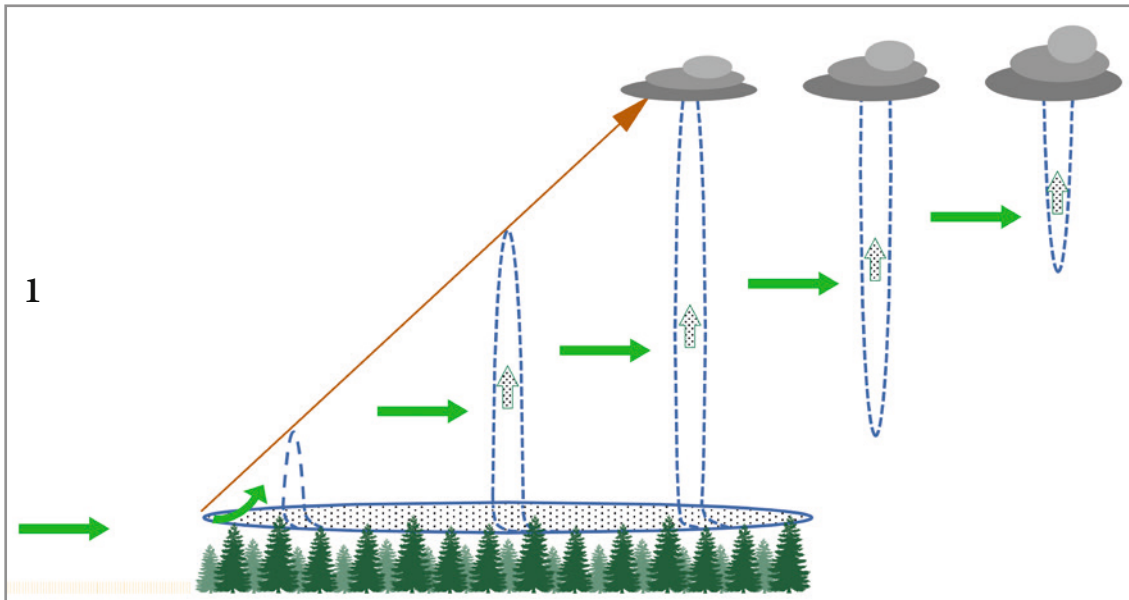
ergibt sich ein Aufwind von $w = 4$ m/s. Die grafische Analyse in **Bild 2** lässt vermuten, dass es auch hier einen „Ablösepfad“ geben muss, wie man ihn von natürlicher Thermik her kennt. Entlang dieses Ablösepfades wächst der Bart zunächst in die Höhe, während er aus der Kühlturmwolke heraus gespeist wird. Nach einiger Zeit reißt er ab und steigt unter Beibehaltung seiner Horizontalgeschwindigkeit auf. Das Abreißen erkennt man unter anderem daran, dass die Segelflugzeuge nicht weiter steigen, wenn das untere Ende des Bartes an ihnen vorbeigezogen ist.

Eingebettet in **Bild 2** ist die im ersten Beitrag vorgestellte „vertikale Projektion“. Wird vom örtlichen Versatz der Segelflugzeuge die Driftgeschwindigkeit des Aufwindes abgezogen, kann man erkennen, wie die Piloten zunächst versuchen zu zentrieren, um danach im Zentrum des (wandernden) Bartes zu kreisen. Auch hier sieht man, dass beide Flugzeuge übereinander unterwegs sind und gemeinsam innerhalb eines Kreisdurchmessers von 400 bis 600 m kurbeln.

Die Wolke eines Kühlturms neigt sich natürlich im Wind. Denn anders als Thermik, die nur aus feuchter Luft besteht, ist eine Kühlturmwolke übertoll mit unzähligen Wassertropfchen. Und die besitzen einen Luftwiderstand, weshalb der Wind sie vor sich herschieben kann. In wissenschaftlichen Untersuchungen wurden einhundert Meter hinter einem Kühlturm-Auslass typische Tropfen-Durchmesser von 200 bis 600 μm gemessen. Die Tropfen beginnen zu verdunsten, sobald trockenere Umgebungsluft in die Wolke hineinwirbelt. Das Verwirbeln und Vermischen nennt man „Entrainment“. Man hat herausgefunden, dass winzige Tropfen mit 100 μm Durchmesser bei 20 °C in 80 % Luftfeuchtigkeit ca. 12 Minuten brauchen, bis sie sich aufgelöst haben. Ein 100 μm -Tropfen könnte in **Bild 2** also bis zu 3500 m weit fliegen. Größere Tropfen lösen sich langsamer auf, auch verzögert sich die Verdunstung bei steigender Luftfeuchtigkeit, während sie bei Entrainment schneller abläuft. Der im Bild gezeigte Ablösepfad reicht 1000 m weit, die Größenordnung stimmt also zunächst einmal.

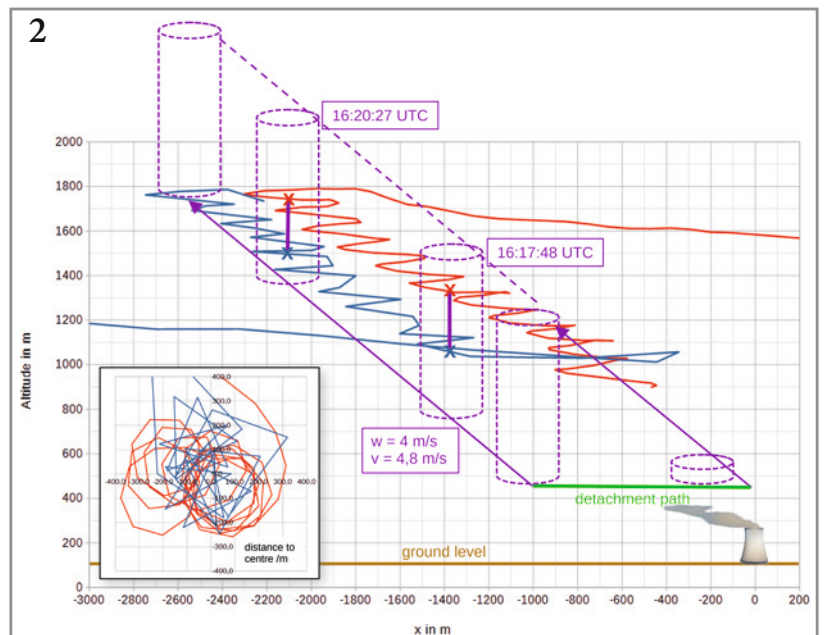
Die Thermik, die sich aus der Wolke löst und in der die Piloten kreisen, ist jedoch nicht mehr im Wind geneigt. Die Thermiksäule ist immer senkrecht. Denn genau wie bei der natürlichen Thermik ist es dem Umgebungswind nicht möglich, eine Kraft auf den Bart auszuüben und ihn schräg zu stellen. Die vielen WeGlide-Flüge bestätigen, dass Flugzeuge im selben Bart immer direkt übereinander kreisen, egal wieviel Höhenmeter sie dabei auseinander sind.

Den Zusammenhang zwischen Tropfen-Verdunstung und Thermik-Entstehung zeigt **Bild 3**. Die Wassertropfen in der Kühlturmwolke lösen sich auf. Entrainment wirbelt trockenere Umgebungsluft in die Wolke hinein, die die Feuchtigkeit

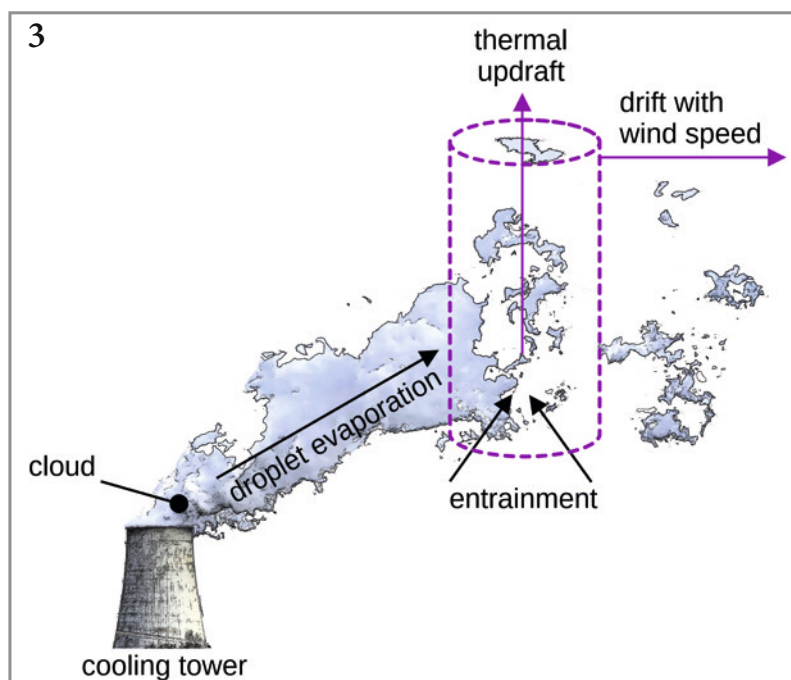


1

- 1 Ablösung und Aufstieg eines feucht-warmen Luftpaketes. Es bildet sich ein Ablösepfad oberhalb der Baumwipfel. Ein Segelflieger könnte fälschlicherweise denken, er befinde sich in einem schrägen Bart, der an der Waldkante entstand (gelber Pfeil).
- 2 Zwei Segelflugzeuge kreisen zwischen 16:17 UTC und 16:20 UTC direkt senkrecht übereinander im selben Aufwind einer Kühlturm-Wolke; der Aufwind löst sich aus einem Ablösepfad (WeGlide Nr. 180635 und 180696). Eingebettetes Bild: vertikale Projektion mit $v = 4,8 \text{ m/s}$.
- 3 Bildung eines senkrecht stehenden Aufwinds aus einer Kühlturm-Wolke durch Verdampfung der Wassertropfen und Entrainment.



2



3

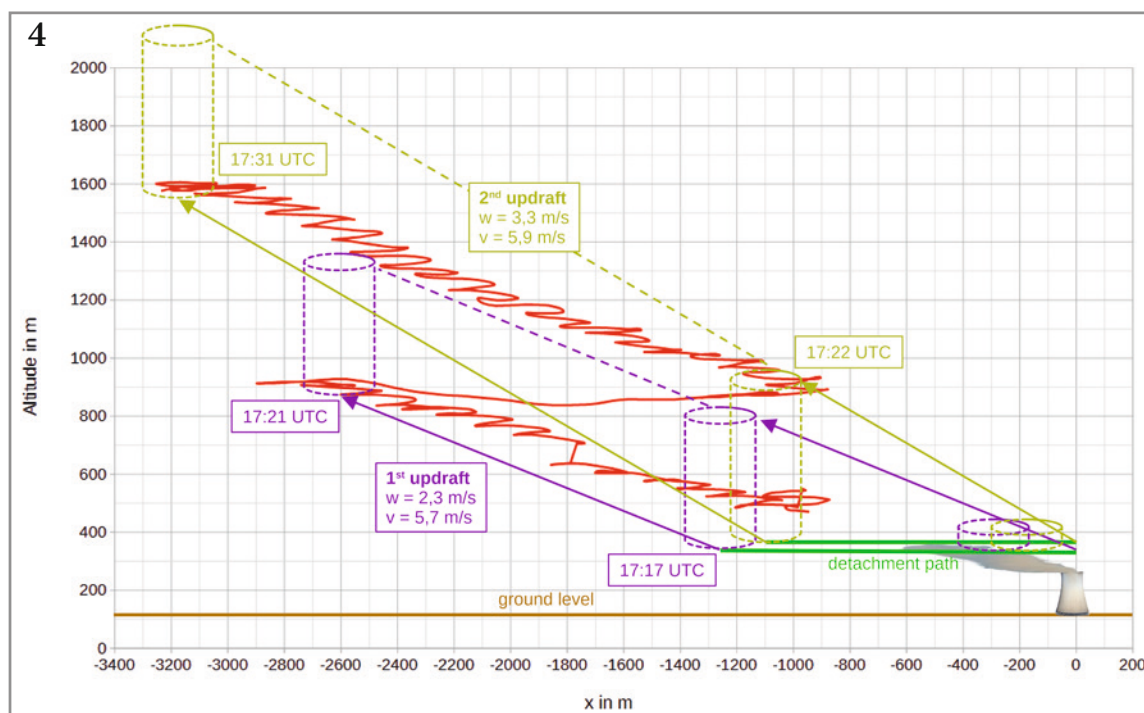
der verdunstenden Tropfen aufnimmt. Durch die Verwirbelungen gelangt diese feuchtere Luft wieder an die Umgebung außerhalb der Wolke, wo sie wegen ihrer geringeren Dichte aufzusteigen beginnt (feuchte Luft ist leichter als trockene Luft). Die aufsteigende Luft erzwingt ein Nachfließen von Umgebungsluft, wodurch Entrainment und Verdunstung verstärkt werden und sich ein Thermikschlauch bildet. Dieser verstärkende Effekt sorgt dafür, dass der Thermikschlauch über viele Minuten existieren kann und sich nicht nur einzelne kleine Blasen aus der Kühlturmwolke lösen. In einzelnen Blasen würden auch keine Segelflugzeuge kreisen können, schon gar nicht minutenlang in unterschiedlichen Flughöhen übereinander. Bisweilen werden die Ablösungen durch aufsteigende Wolkenfetzen oberhalb der eigentlichen Kühlturmwolke sichtbar. Der Thermikschlauch wandert mit der Geschwindigkeit über Grund, die er beim Ablösen hatte, also mit der horizontalen Windgeschwindigkeit am Kühlturm-Austritt. Das ganze wiederholt sich ständig, sodass immer wieder neue Bärte entstehen. Das führt dazu, dass bisweilen Segelflugzeuge in einem „älteren“ Bart kreisen, während andere näher am Kühlturm einen „jüngeren“ Bart nutzen.

Das sieht man in **Bild 4**. Dort kreist ein Pilot zunächst in einem ersten Bart, der jedoch schon 17:21 UTC an ihm vorbei nach

oben entschwindet. Nachdem er diesen Bart nicht mehr nutzen kann, „holt“ er sich am Kühlturmaustritt den nächsten Bart. Dieser bringt ihn dann auf 1600 Meter, bis auch hier das untere Ende des Bartes vorbeigezogen ist. Beide Bärte bewegen sich mit ungefähr gleicher Horizontalgeschwindigkeit. Allerdings unterscheiden sich die Steigwerte, der zweite Bart ist deutlich stärker. Dieses Aufeinanderfolgen von Bärten und das Ausfliegen eines kleinen „Jo-Jo“ erinnert an die Gebirgsthermik, die im letzten Beitrag vorgestellt wurde.

Mit einem Mollier-Diagramm kann erklärt werden, was über dem Kühlturm passiert (**Bild 5**). Am 04.07.2022, dem Tag der Flüge aus **Bild 2**, zeigen Wetterdaten im Internet, dass in Kühlturm-Austrittshöhe der Luftdruck um 16:00 UTC ca. 1018 hPa betrug, und die Umgebungstemperatur bei ca. 22,4 °C mit einem Mischungsverhältnis von ca. 6,3 g/kg lag (Punkt ①). Das im Arbeitsbereich des Kühlturms eingesetzte Wasser verdampft bei ca. 35 °C. Mit 100% relativer Luftfeuchtigkeit beinhaltet diese Luft 36 g/kg Wasser (②). Bei ihrem feuchtadiabatischen Aufstieg innerhalb des Kühlturms mit einem Temperaturgradienten von ca. 0,6 °C/100 m kondensiert ein Teil dieses Wassers, sodass die Kühlturmluft bis zur Austrittsöffnung um ca. 1 °C abkühlt, und die dortige Feucht- kugelttemperatur (engl. wet bulb temperature) ca. 34 °C be-

4 Ein Segelflugzeug kreist zwischen 17:17 Uhr und 17:31 Uhr UTC in verschiedenen Aufwinden, die sich aus der Kühlturmwolke lösen (WeGlide Nr. 411968).



trägt (③). Punkt ④ zeigt den Zustand innerhalb des Nassdampfgebietes der Wolke über dem Kühlturm. Die Luft trägt weiterhin 36 g/kg Wasser, wobei ④ im Schnittpunkt der Enthalpielinie liegt, die durch die zugehörige Feuchtkugeltemperatur in ③ verläuft. Der Wasseranteil der Wolke (engl. liquid water content, LWC) ist ca. 2 g/m³, was sich aus der Mischungsverhältnis-Differenz zwischen ② und ③ ergibt. Bei der in Bild 3 beschriebenen Verdunstung und Vermischung durch Entrainment wandert der Zustand im Nassdampfgebiet der Wolke in Richtung der Umgebungsbedingungen in Punkt ①. Bei ca. 25 °C sind die Tropfen so weit aufgelöst, dass das enthaltene Wasser gasförmig vorliegt und die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt. In dieser Luft, sollte sie thermisch aufsteigen, würde es wegen der Abkühlung aufgrund des atmosphärischen Temperaturgradienten sofort wieder zu Kondensation kommen. Bisweilen sieht man diese Vorgänge als kleine wolkenartige „Eruptionen“, die nach oben heraus aus der Kühlturmwolke herausquellen. Da die Segelflugzeuge in klarer Luft kreisen, ist davon auszugehen (und die Wolkenketzen in **Bild 3** deuten es an), dass sich die Kühlturmluft noch etwas mehr mit der Umgebungsluft vermischt, bevor sie in Punkt ⑤ als Thermik aufsteigt. Aufsteigende Thermikluft hat bereits nach wenigen hundert Höhenmetern keinen relevanten Temperaturvorsprung mehr

gegenüber der Umgebungsluft. Entscheidend für die Stärke des Aufwindes ist vielmehr der Feuchtegehalt der Thermikluft im Vergleich zur Umgebung. Berechnet man zu den Punkten ① und ⑤ die zugehörigen Taupunkttemperaturen ($\tau_A = 8^\circ\text{C}$, $\tau_P = 19^\circ\text{C}$ bei $\vartheta_A = 22,4^\circ\text{C}$) und setzt sie in die „Thermikformel“ ein:

$$w = 5,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{1,1(\tau_P - \tau_A) - 1}{1,1(\vartheta_A - \tau_A)}},$$

ergibt sich eine Thermikstärke von $w = 3,8 \text{ m/s}$, was in guter Näherung dem in Bild 2 ermittelten Wert entspricht.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass auch die Thermik über Kühltürmen senkrecht aufsteigt. Denn Segelflieger kreisen nicht in der Kühlturmwolke selbst, sondern in Aufwinden, die bei der Verdunstung der Wolke entstehen. Diese Aufwinde wandern horizontal mit der Geschwindigkeit, die der Wind in Höhe des Kühlturm-Austritts hat. Damit folgen Kühlturm-Wolken den gleichen physikalischen Gesetzen wie die natürliche Thermik. Auch für sie gelten die in **Bild 1** gezeigten Zusammenhänge.

TS-Veröffentlichung auf <https://journals.sfu.ca/ts/index.php/ts/issue/view/249>



5 Mollier-Diagramm mit den Wetter-Daten zu Bild 2 und der daraus folgenden Thermikstärke.

