Dr. Manfred Reiber E.-F.-Gottschalk-Weg 17 79650 Schopfheim www.DrMReiber.de

Die Bestimmung der Flugbahn eines Ballons mit Hilfe von Trajektorien und wozu sind Trajektorien außerdem nützlich?
von Dr. Manfred Reiber

Vielleicht gerade in Zeiten, wo das kleine „Monster-Virus“ Corona die Welt aus den Angeln hebt und tief in das persönliche Leben eingreift, findet man auch Gelegenheit sich mit Dingen zu befassen, für die man sonst nie richtig Zeit hatte. Nehmen wir uns also mal die Zeit tiefer in spezielle Methoden des Wetter-Selfbriefings einzudringen.

Bei einer Ballonfahrt lassen sich der genaue Zielort und die Art der Landung nie ganz exakt vorausbestimmen. Diese Ungewissheit ist Bestandteil, sicher auch Herausforderung und Reiz des „Abenteuers“ Ballonfahrt.

Hat sich ein Ballon einmal in die Atmosphäre erhoben, dann wirkt allein sie mit ihren thermischen und dynamischen Kräften und bestimmt seine Fahrt. Der Pilot eines Ballons kann lediglich durch Vertikalmanöver die Fahrtrichtung und Fahrtgeschwindigkeit beeinflussen, wenn er die unterschiedlichen Luftströmungen in den verschiedenen Höhen kennt. Wetterrisiken, wie Turbulenz, Starkwind, Thermik, Nebel, Hochnebel, Regen, Schnee oder gar Gewitter kann er nur meiden, wenn er rechtzeitig vor Eintritt solcher Ereignisse landet, oder besser, wenn er bei zu erwartenden gefährlichen Wettererscheinungen gar nicht erst mit seinem Ballon startet.
Gute Ballonfahrer sind in der Tat auch „Wetterexperten“ und widmen einen großen Teil der Zeit für die Fahrtvorbereitung dem Studium der Wetterlage und ihrer Entwicklung. Sie starten nur, wenn sie Wetterrisiken ausschließen können und wenn sie möglichst genau wissen wohin und wie schnell die zu erwartenden Luftströmungen ihren Ballon tragen werden.
In diesem Artikel wollen wir uns aus dem Gesamtkomplex der Wettervorbereitung einer Ballonfahrt auf die zu erwartende Flugbahn des Ballons konzentrieren, vielleicht dem wesentlichsten Teil des Wetterbriefings überhaupt. Vorzüglich dafür eignen sich berechnete Trajektorien, wie man sie von der Wetterplattform www.meteoblue.com in guter Qualität und hervorragendem Design für jeden beliebigen Ort (beliebige Koordinate) auf der Erde und praktisch für alle relevanten Höhen bekommen kann.

Was sind Trajektorien?

Laut Definition sind Trajektorien die Luftbahnen „individueller Luftteilchen“ während eines längeren Fluges in der Atmosphäre. Betrachtet man einen Ballon als „individuelles Luftteilchen“, dann ist seine Flugbahn, die er während einer Fahrt zurückgelegt hat eine Trajektorie.

Schon seit einiger Zeit kann man die Trajektorie(n) einer geplanten Ballonfahrt vor Fahrtantritt mit einem einfach zu handhabenden Prognosemodell verblüffend genau berechnen. Ich glaube, es lohnt sich für jeden Ballonfahrer dieses Modell in sein Wetter-Selfbriefing aufzunehmen. Das erhöht nicht nur die Sicherheit, sondern man kann eben auch die „Flugbahn“ seines Ballons gut antizipieren und bis zu einem gewissen Grade sogar vorausschauend selbst „steuern“. Die Möglichkeit dazu liefert uns die unter Ballonfahrern schon gut bekannte Wetterplattform www.meteoblue.com aus der Schweiz. An Hand von Beispielen werde ich das Vorgehen zur Berechnung von Trajektorien erläutern.

Wie geht man bei der Berechnung von Trajektorien vor?

Schauen wir uns das an Hand der folgenden Abbildungen genauer an.

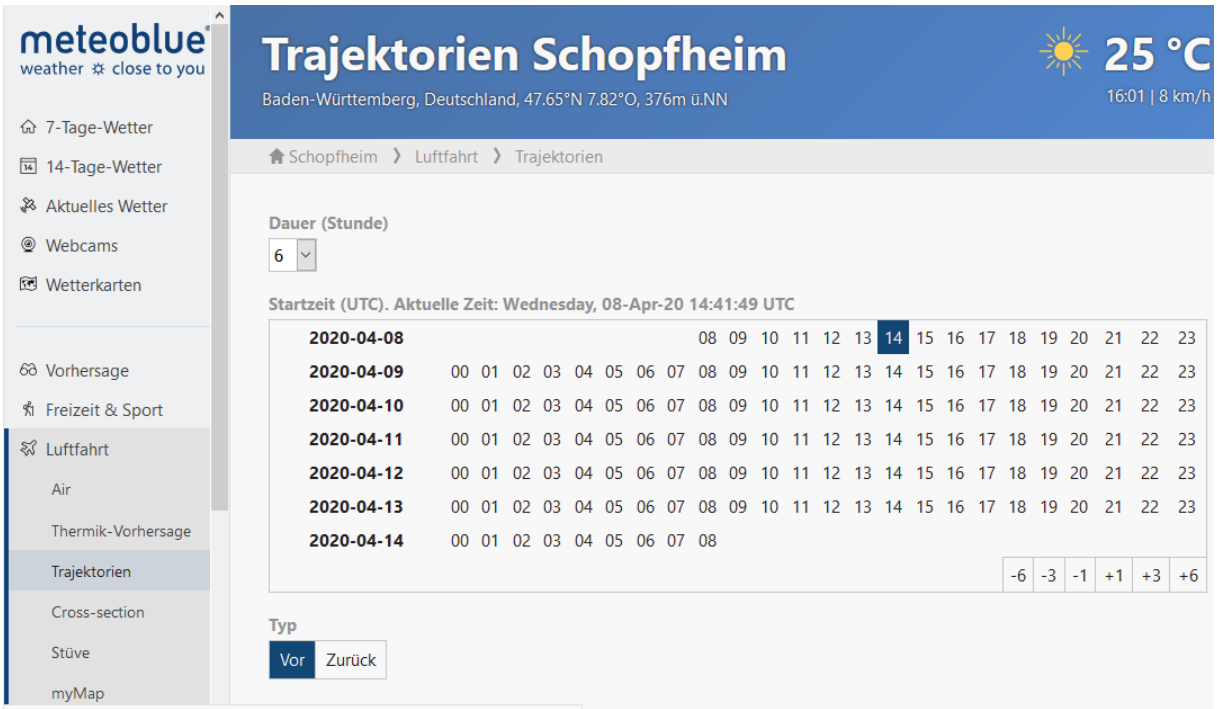

Abbildung 1 Man öffnet die Wetterplattform meteoblue und gibt zuerst den Startort des Ballons ein, oder bei einem Start im „freien Feld“ die Koordinaten Startortes (hier ist der Startort Schopfheim), dann klickt man links auf die Rubrik „Luftfahrt“ und wählt „Trajektorien“ aus. Es öffnet sich ein Fenster, wo die Dauer der Vorhersage, die Startzeit und der Typ der Trajektorie auszuwählen sind. Bei der Dauer sind 6 Stunden voreingestellt, vorhersagbar sind bis zu 72 Stunden. Als nächstes wählt man aus der Tabelle den Startzeitpunkt (hier 08.04.2020 14 UTC). Zur Berechnung der Trajektorie einer geplanten Ballonfahrt verwendet man beim „Typ“ der Trajektorie immer „vor“ (ist voreingestellt); das bedeutet „Vorwärtstrajektorie“. Es wird die prognostizierte Flugbahn berechnet. Stellt man den „Typ“ „zurück“ ein, wird die „Rückwärtstrajektorie“ berechnet. Diese Trajektorie würde mir z.B. zeigen, wo ein Ballon herkommt, den ich gerade über mir sehe. Die sinnvolle Verwendung von Rückwärtstrajektorien werde ich später noch erläutern.

Die Berechnung der Trajektorie dauert einige Sekunden und wird dann in einer Karte dargestellt (Abbildung 2).

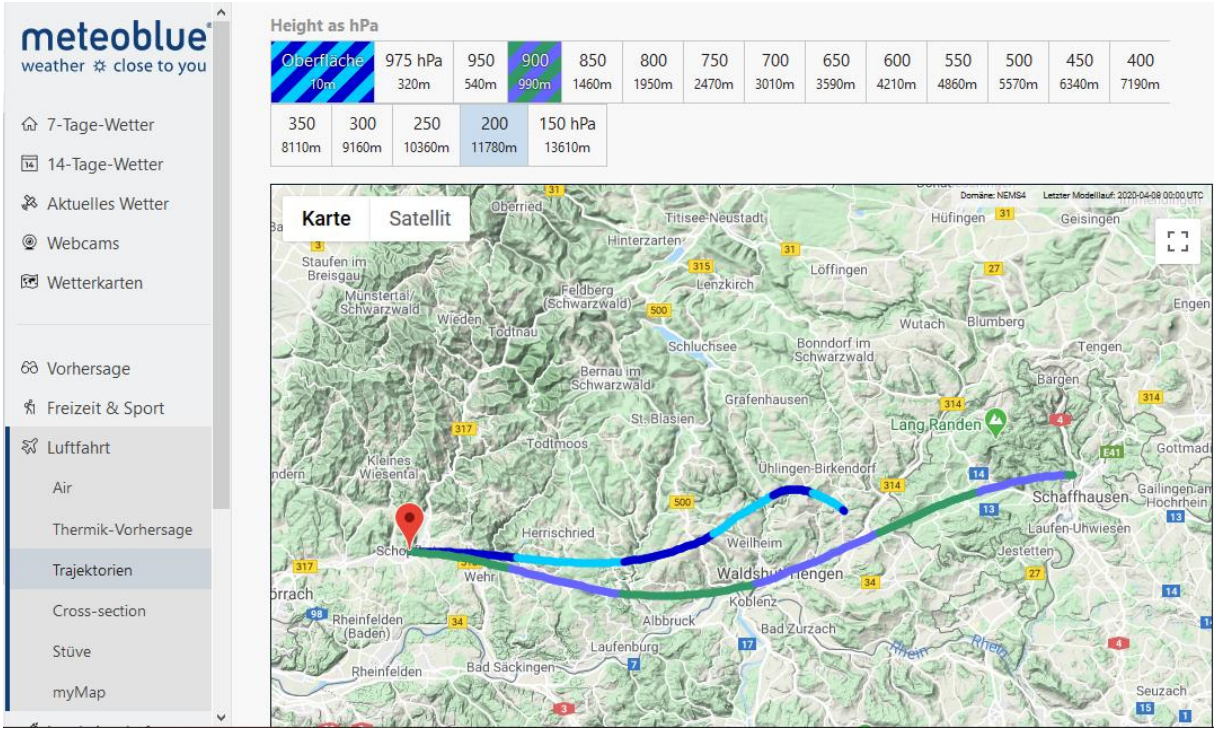

Abbildung 2 Immer wird zuerst automatisch die Trajektorie „Oberfläche“ berechnet und in der Karte angezeigt. Das ist die Flugbahn eines Ballons, die er in 10 m Höhe zurücklegen würde. Für das Ballonfahren ist diese Höhe jedoch nicht wirklich relevant, aber man kann die Trajektorien für die vorgegebenen Höhen 320m, 540m, 900m, …..bis 13610 m einfach auswählen, berechnen und dann betrachten mit welcher Geschwindigkeit ein Ballon in welche Richtung in der jeweiligen Höhe getragen wird. Man wählt immer mehrere Höhen aus und kann danach entscheiden, wie man die geplante Ballonfahrt „gestalten“ möchte, d.h. welche konkrete Höhe bzw. Höhen man für seine geplante Fahrt favorisiert. Die einzelnen farbigen Abschnitte einer Trajektorie zeigen immer die zurückgelegte Strecke pro Stunde an.

Man kann also in wenigen Minuten beliebig viele Trajektorien für verschiedene Höhen berechnen und so das angepeilte Ziel auswählen. Für eine geplante Fahrt nicht relevante Trajektorien lassen sich leicht durch einen Klick auf die ausgewählte Höhe in der oberen Auswahlleiste wieder löschen. So behält man immer eine gute Übersicht und wird nicht von zu vielen Trajektorien verwirrt.

Der maximale Prognosezeitraum beträgt 72 Stunden. Bei geplanten Langstreckenfahrten (Gasballonfahrten) ist es ratsam die Berechnungen täglich, besser mehrmals täglich neu zu starten, um den besten Weg zu finden.

Wie gut sind die vorhergesagten Trajektorien?

Auch Trajektorien sind „Vorhersageprodukte“ und deshalb immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die umso größer wird, je länger der Vorhersagzeitraum ist. Trajektorien lassen sich nur sehr schwer direkt verifizieren, deshalb liegen dafür auch keine konkreten Ergebnisse vor. Was konkret vorliegt sind verifizierte Vorhersagen der Windgeschwindigkeit und da schneidet die Modellfamilie NEMS von meteoblue sehr gut ab. Gute Windvorhersagen sind ja die Grundlage gut vorhergesagter Trajektorien.

Der MAE (mittlerer absoluter Fehler) bei NEMS beträgt 1,67 m/s. Im Vergleich dazu beträgt der MAE beim weltweit eingesetzten GFS (Global Forecast System der USA), das weitverbreitet im Einsatz ist und auf dem die meisten im Internet frei verfügbaren Wettervorhersagen beruhen, 1,69 m/s. Der Unterschied im MAE zwischen NEMS und GFS ist zwar nicht signifikant, weist aber darauf hin, dass die Trajektorien von NEMS mindestens genauso gut sind wie die mit dem GFS berechneten. Wobei das Design und die Handhabung der MEMS Trajektorien von meteoblue aber deutlich besser sind!

Der Einsatz von Trajektorien zur Vorhersage von Rauchwolken, radioaktiven Wolken, chemischen Wolken, Vulkanaschewolken u.a.

Trajektorien lasen sich nicht nur für die Prognose der Flugbahn eines Ballons verwenden, sie eignen sich auch gut zur Berechnung der Ausbreitung von z.B. bodennahen Rauchwolken, radioaktiven Wolken, chemischen Wolken, Vulkanaschewolken u.a. Insbesondere bei Katastrophen ist die Kenntnis der Ausbreitungsrichtung und Ausbreitungsgeschwindigkeit z.B. von radioaktiven Wolken oder anderweitig kontaminierter Wolken für die Einleitung von Schutz- und Abwehrmaßnahmen von größter Bedeutung.

Dafür ein ganz aktuelles Beispiel vom April 2020:

Anfang April 2020 brach im Umland des am 26. April 1986 havarierten Atomkraftwerks von Tschernobyl ein Waldbrand aus. Es bestand die Gefahr, dass im Zentrum des Feuers die Radioaktivität über der Norm ist und mit der Rauchwolke verfrachtet wird. Der Brand konnte mehrere Tage nicht unter Kontrolle gebracht werden. Die Gefahr die Umgebung des Brandherdes radioaktiv zu kontaminieren war real. Die Frage war: Wo zieht diese Rauchwolke hin? Welche Erkenntnisse können wir in diesem Beispiel aus den berechneten Trajektorien ableiten? Siehe Abbildung 3.

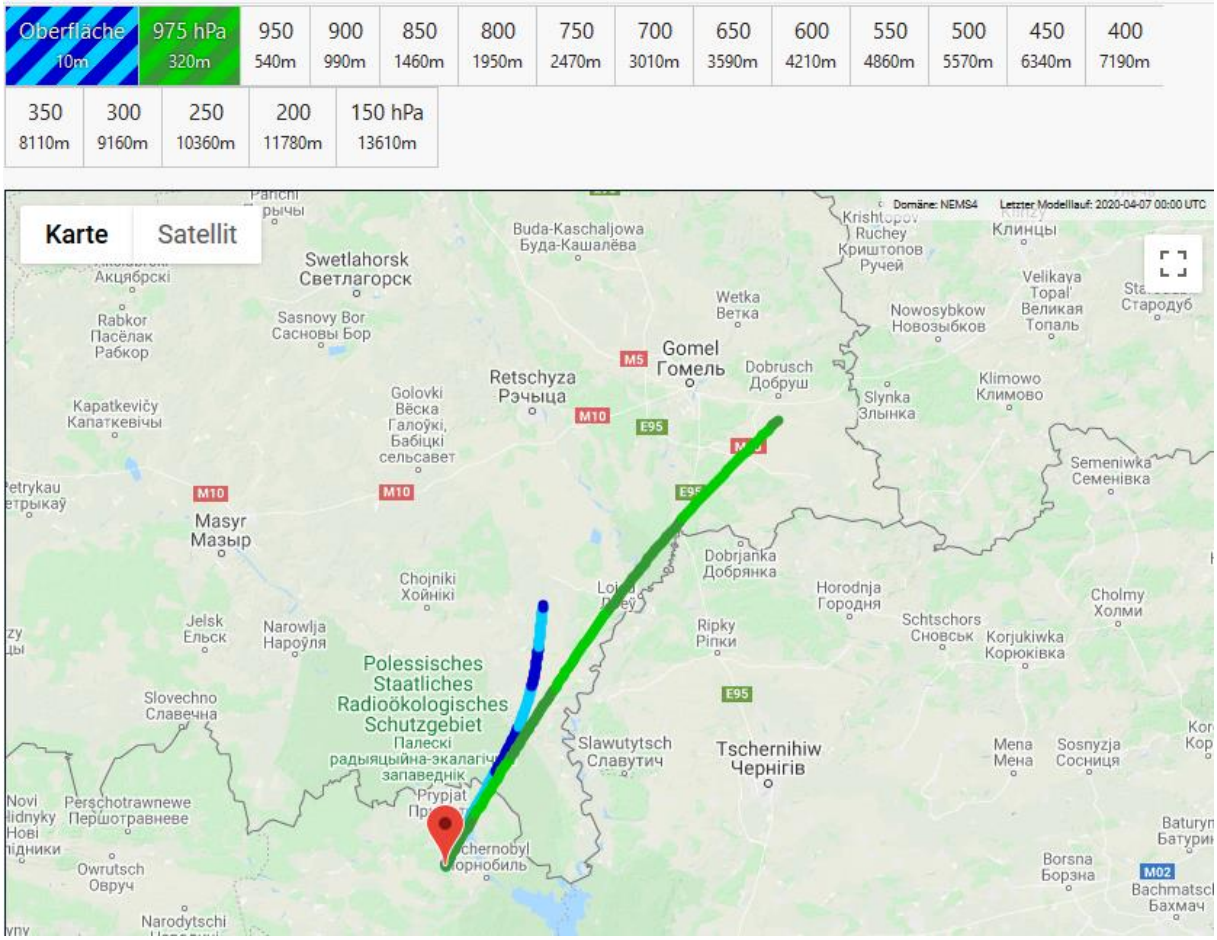

Abbildung 3 In dieser Abbildung sind die für den 7. April berechneten Trajektorien für die Erdoberfläche (Wind in 10 m Höhe) und für 320 m Höhe dargestellt. Das ist in etwa die Höhe, in der sich eine Rauchwolke ausbreiten wird. Die Trajektorien zeigen, dass eine Verlagerung des Rauches nach Nord bis Nordost zu erwarten ist. Die Trajektorien zeigen im Falle einer Rauchwolke quasi die „Spur“, die diese Wolke über dem Gelände zieht. Die Geschwindigkeit kann man an den farbigen Stunden-Abschnitten der Trajektorien gut ablesen.

Die berechnete Verlagerung wurde eindrucksvoll durch das Satellitenbild (Abbildung 4) bestätigt.

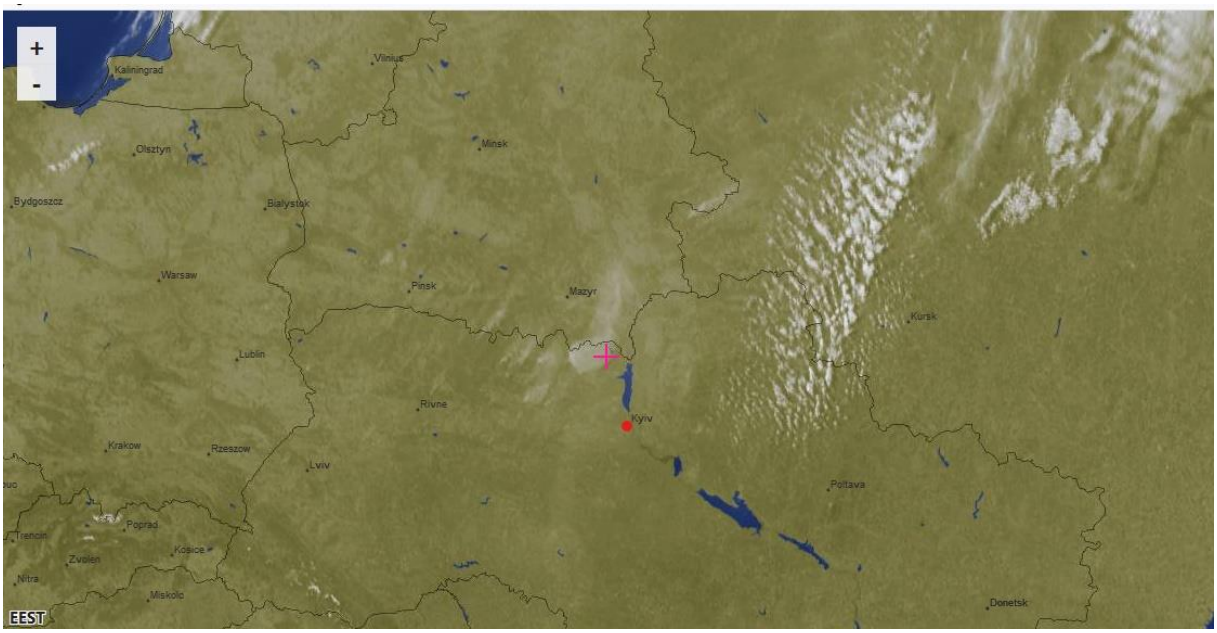

Abbildung 4 Das kleine rote Kreuz markiert den Ort Tschernobyl, der kleine rote Punkt die Stadt Kiew. Im Satellitenbild ist die Rauchausbreitung des Feuers, die Spur der Rauchwolke, vom 7. April 2020 nach N bis NE sehr schön zu erkennen.

Interessanter ist die Prognose der Rauchausbreitung für den nächsten Tag, den 8. April 2020. Hier wird die Prognoseleistung der Berechnungen mittels Trajektorien deutlich.

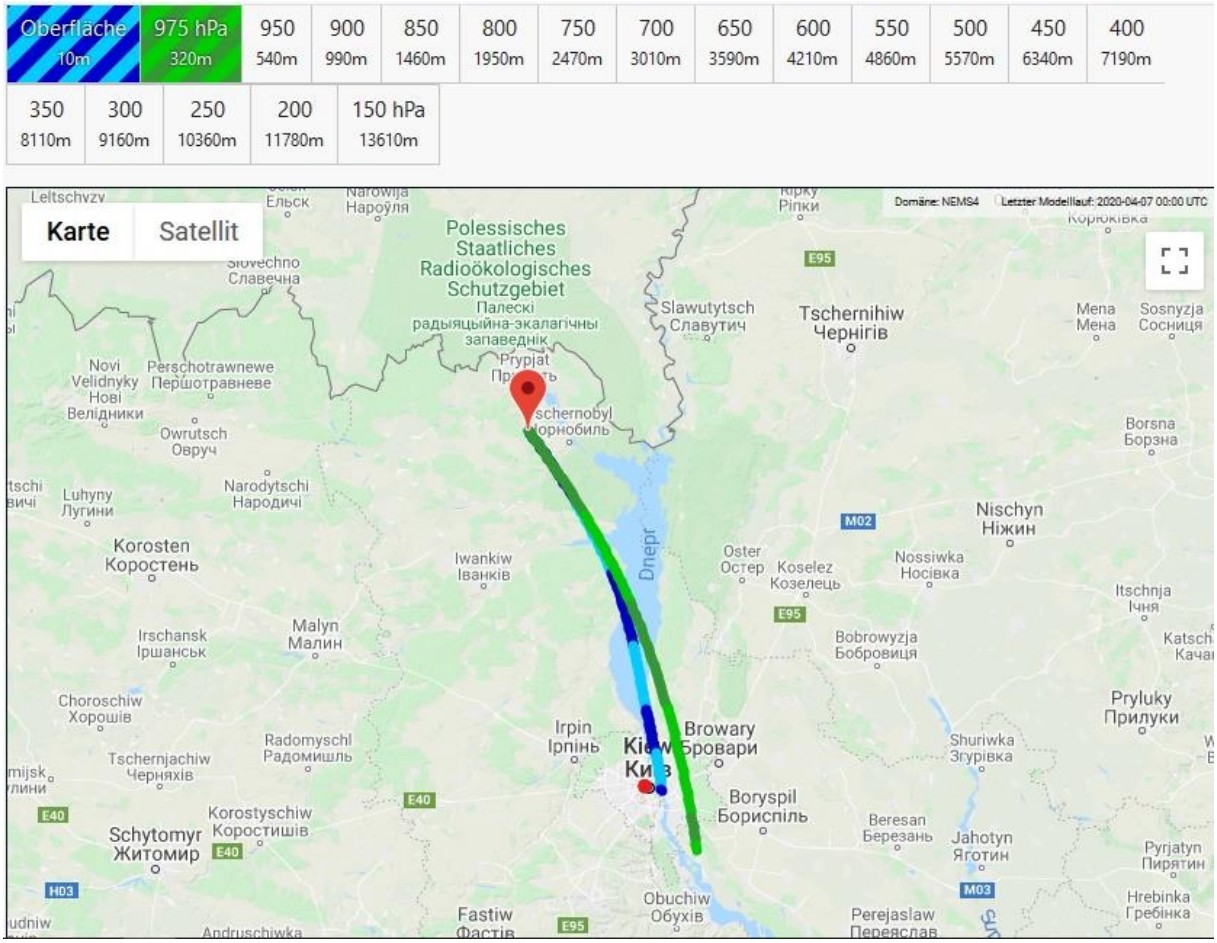

Abbildung 5 Die Prognose für den nächsten Tag, den 8. April 2020 zeigt ein Umkippen der Verlagerungsrichtung der Rauchwolke um etwa 180 Grad, nach S bis SSE, direkt in Richtung der Metropole Kiew. Für die Behörden und die Bevölkerung dieser Großstadt ein Warnsignal und die Aufforderung zum Handeln mit immerhin einem Tag Vorlauf.

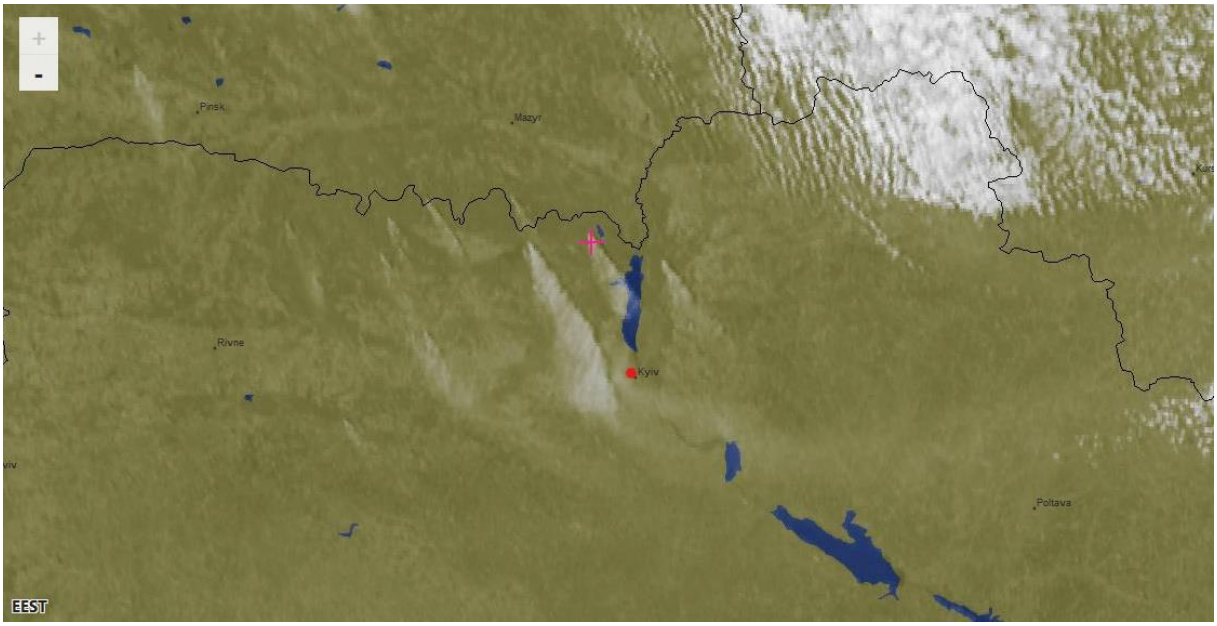

Abbildung 6 Das Satellitenbild vom 8. April 2020 bestätigt in eindrucksvoller Weise die Prognose der Zugrichtung der kontaminierten Rauchwolke. Von Tschernobyl aus, kleines rotes Kreuz, ziehen die Rauchwolken jetzt direkt auf Kiew (kleiner roter Punkt) zu. Man sieht auch sehr gut, dass sich in der Zwischenzeit mehrere Brandherde in der Umgebung gebildet haben.

Die Verwendung von Rückwärtstrajektorien

Rückwärtstrajektorien haben für die Planung einer Ballonfahrt keine Relevanz. Mit Rückwärtstrajektorien kann man ermitteln woher „ein individuelles Luftteilchen“, z. B. ein Ballon, oder eine kontaminierte Wolke kommen. Als am 26. April 1986 das Kernkraftwerk Tschernobyl explodierte, wurde das von der damaligen sowjetischen Administration streng geheim gehalten. Vielleicht hatte man die Hoffnung, dass sich die stark radioaktive Wolke nur lokal oder regional ausbreitet. Als man im Ausland, z.B. in Deutschland plötzlich hohe radioaktive Konzentrationen in der Luft gemessen hatte, wurden von den Meteorologen sofort Rückwärtstrajektorien berechnet und man konnte so den Ursprungsort dieser „Wolke“ schnell und ziemlich genau bestimmen. Die anfängliche Geheimhaltung Sowjets wurde so schnell ad absurdum geführt. Für die Ausbreitung von Schadstoffen verwendet man auch spezielle „Ausbreitungsmodelle“, wo man außer der Zugrichtung und Zuggeschwindigkeit einer kontaminierten Wolke mittels Trajektorien noch die Änderungen der Schadstoffkonzentration infolge thermischer und dynamischer Prozesse berechnet.

Rückwärtstrajektorien kann man natürlich auch für die Lösung nicht kritischer, einfach nur interessanter Probleme verwenden. Zum Beispiel: Ich möchte gern wissen woher kommt der Ballon, den ich gerade direkt über mir sehe. Dann berechnet man die Rückwärtstrajektorien, also die Flugbahn, die der Ballon bis hierher zurück gelegt hat. Dafür ein Beispiel.

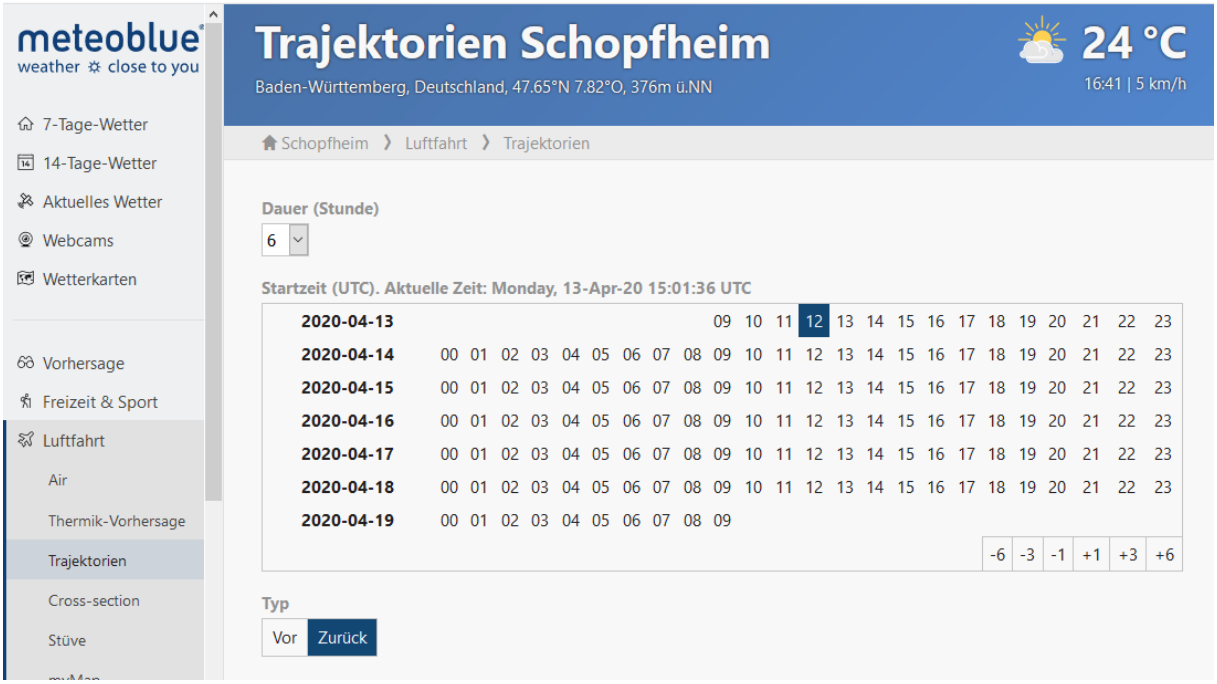

Abbildung 7 Hier wurden die Rückwärtstrajektorien für 12 UTC für 6 Stunden „zurück“ berechnet (Dauer 6 Stunden, Typ „zurück“). Über dem Standort Schopfheim fährt ein Ballon und ich möchte wissen, wo kommt der Ballon her? Die geschätzte Höhe des Ballons beträgt 500 m. Mit Hilfe der Abbildung 8 lässt sich das „Problem“ leicht lösen.

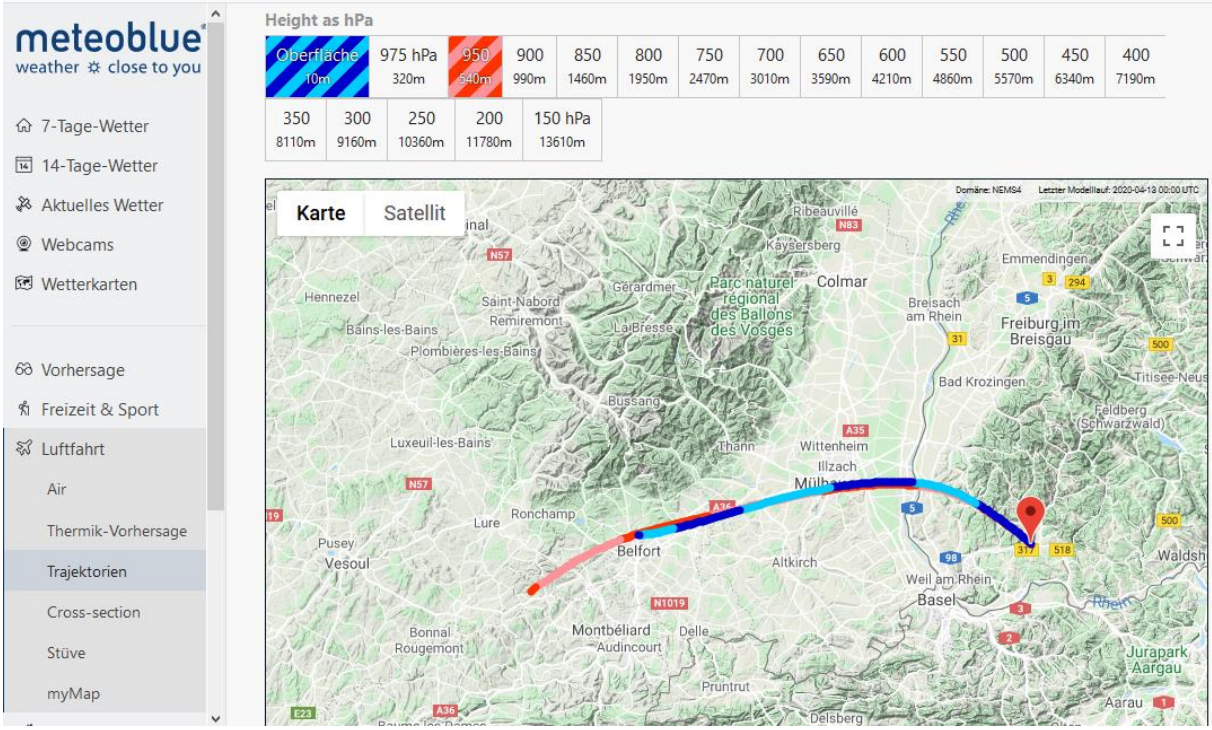

Abbildung 8 Wenn man den Herkunftsort dieses Ballons, der sich gerade über Schopfheim befindet, bestimmen möchte verfolgt man die Trajektorie 950 hPa (540 m geschätzte Höhe) zurück. Bei vorgegebener Fahrtzeit kann man relativ genau den Startort finden.

Für die richtige Anwendung prognostizierter Trajektorien braucht man schon etwas Übung, aber es ist wirklich kein „Hexenwerk“, im Gegenteil, es lässt sich leicht lernen und erfolgreich in der Praxis anwenden. Ein Versuch lohnt sich!

Viel Erfolg beim Üben und bleiben Sie gesund.

Ihr Dr. Manfred Reiber