

Präzision in dünner Luft

Höhenmessung & Höhenmesser

von Walter Fimml

Aller Erlebnispädagogik und Weisheiten wie „Der Weg ist das Ziel“ zum Trotz, ist die Höhe eines Berggipfels immer noch ein zentrales Motiv für seine Ersteigung. Man nehme nur die „seven summits“, die eifrigen 4000er-Sammler unter den Alpinisten, die Pläne, das 3993 m hohe Fletschhorn im Saasertal zu einem touristisch „attraktiven“ 4000er aufzurüsten oder die generelle Tendenz, die jeweils höchsten Gipfel eines Gebietes, einer Gebirgsgruppe oder eines Landes als vorrangige Tourenziele anzusehen.

Da Höhenmessung für den Alpinisten zumeist Luftdruckmessung bedeutet, müssen wir uns zum Verständnis der Funktion und möglicher Fehler der Höhenbestimmung, mit dem Luftdruck und den Eigenheiten der Erdatmosphäre etwas näher auseinandersetzen. Im vorliegenden, ersten Teil zum Thema Höhenmessung & Höhenmesser stellt Walter Fimml die unterschiedlichen Messprinzipien vor und erläutert sie aus der Sicht des Bergsteigers.

Messmethoden

Optische Methoden

Für die Höhenmessung im Gelände wurden im Laufe der technischen Entwicklung recht unterschiedliche Methoden eingesetzt. Eine der ältesten Methoden ist sicherlich die Trigonometrische Messung (Peilung + Berechnung), die schon den Ägyptern und Griechen bekannt war (siehe Abb. 1). Das vereinfachte Messprinzip: Von einem vermessenen Punkt P aus wird ein Berggipfel angepeilt, und aus der Entfernung L und dem Winkel α (der Peilung) kann mit sinus & cosinus die Höhe des Berggipfels berechnet werden. Die Erdkrümmung kann eingerechnet oder für kleine Entfernungen auch vernachlässigt werden. Optische Präzisionsmessgeräte (Theodoliten) wurden für diese Messungen entwickelt und ganze Gebirgszüge wurden von

einigen mit Maßband bestimmten Grundlinien ausgehend vermessen („trianguliert“). Wegen der militärischen Bedeutung guter Karten wurden viele Expeditionen und Erstbesteigungen von Vermessern und Kartographen durchgeführt. Obwohl bei den optischen Methoden der Luftdruck nicht direkt gemessen wird, wirkt er sich indirekt auf die Messergebnisse aus. Da die Luft mit zunehmender Höhe dünner wird und Licht in „dicker“ Luft stärker gebrochen wird als in dünner Luft, kann eine Bergspitze nicht gerade angepeilt werden, sondern nur im Bogen. Damit erhält man – je nach Lufttemperatur und Druckverteilung – einen anderen Wert für den Peilwinkel, und somit einen Fehler in der Höhenmessung. Selbstverständlich werden heutzutage Korrekturen für Temperatur, Luftdruck und Feuchtigkeit angewandt.

Höhenbestimmung mittels Luftdruckmessung

Sieht man vom GPS einmal ab, basieren alle Höhenmesser für den Bergsteiger auf der Tatsache, dass der Luftdruck mit der Höhe abnimmt. Man misst also in irgendeiner Form den Luftdruck und rechnet diesen nach einer Tabelle oder einer mathematischen Formel in eine Seehöhe

um. Begonnen hat alles mit Torricelli und Guericke, sozusagen „Erfindern“ des Luftdrucks. Torricelli verwendete 1644 ein auf einer Seite verschlossenes Glasrohr, welches mit Quecksilber gefüllt war und in ein Glas mit Quecksilber getaucht wurde. Er stellte fest, dass die Luft eine ca. 76 cm hohe Quecksilbersäule im Gleichgewicht halten konnte. Guericke verwendete Wasser,

Die Internationale Höhenformel

Luftdruck als Funktion der Höhe in der Standardatmosphäre

$$p(h) = 1013.25 * \left[1 - \frac{0.00651 * h}{288} \right]^{5.255} \quad h = 1 - \frac{288}{0.0651} * \left[\frac{p}{1013.25} \right]^{1/5.255}$$

$p(h)$ ist der Luftdruck (in hPa bzw. mbar) in der Höhe h (in Metern). 1013.25 ist der mittlere Luftdruck auf Meeresniveau, 288 entspricht 15°C in Grad Kelvin, die 0.00651 ist die Temperaturabnahme pro Höhenmeter, und auch die 5.255 sind kein Willkürakt sondern berechnen sich aus der Molmasse der Luft, der Boltzmannkonstanten, der Erdbeschleunigung g (9.81m/s²) und nochmals dem Temperaturgradienten.

Mit dieser Formel – oder besser mit der daneben angeführten nach der Höhe aufgelösten Umformung rechnen die gängigen Höhenmesser den gemessenen Luftdruck in die angezeigte Höhe um.

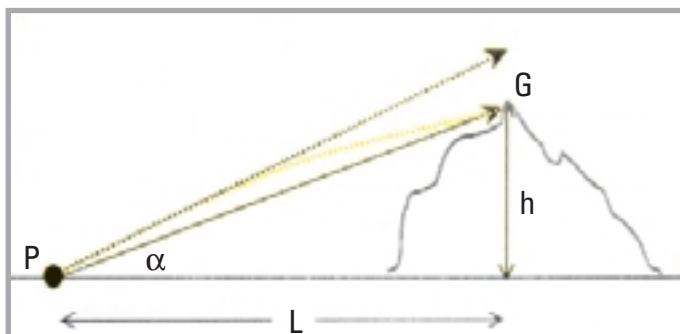


Abb. 1: Trigonometrische Höhenmessung

Die Höhe h kann aus dem Winkel α und der Strecke L berechnet werden. Da die Dichte der Luft mit der Höhe abnimmt, peilt man allerdings im Bogen und erhält ohne Luftdruckkorrektur einen falschen Winkel bzw. eine falsche Höhe (gestrichelte Linien). Musste früher die Strecke L indirekt bestimmt werden, so kann heute mittels Zeitmessung eines Laserpulses die Strecke P-G direkt gemessen werden.

und da Quecksilber rund 13,6 mal schwerer als Wasser ist, war sein mittlerer Luftdruck nicht 760 mmHg, sondern ungefähr 10130 mm Wassersäule. Sein Messgerät war also ein gut 10 m langes wassergefülltes Glasrohr an einer Hausmauer. 10 m Wasser entsprechen dabei einem Bar, dem atmosphärischen Druck auf Meereshöhe. 1 millibar ist somit etwa der Druck unter einer 1 cm dicken Wasserschicht. Für den Bergsteiger haben diese Geräte heutzutage keine praktische Bedeutung mehr, denn wer schleppt schon gerne Quecksilber mit ins Gebirge. Ein paar langsam aussterbende Begriffe verweisen aber noch auf diese Messung. 1 torr entspricht 1 mmHg also jenem Druck, den eine 1 mm dicke Quecksilberschicht durch ihr Gewicht ausübt (**Hg** ist dabei das chemische Symbol für Quecksilber, abgeleitet vom griechischen **Hydrargyrum**). Jedenfalls wurde der „Normale“ Luftdruck auf Meeressniveau (früher 760 mmHg, später 1013 Millibar und heutzutage 101325 Pascal bzw. 1013,25 Hectopascal) schon von Torricelli als Mittelwert mehrjähriger Messungen bestimmt.

Siedepunktmethode

Es soll hier keine Geschichte der Luftdruckmessung abgehandelt werden, da aber dieser Effekt jedem Höhenbergsteiger schon begegnet ist, sollte auch die Sie-

depunktmethode (Ebullioskopische Methode) erwähnt werden. Diese Messmethode nützt die Tatsache, dass der Siedepunkt des Wassers mit dem Luftdruck abnimmt. Alles was man braucht ist ein Schluck Wasser, ein kleiner Kocher, ein Thermometer und eine Umrechnungsformel oder Tabelle, mit deren Hilfe der gemessene Siedepunkt in eine Höhe umgerechnet werden kann. Die Abnahme des Siedepunktes mit der Höhe beträgt ca. 10°C pro 3000 m und ist, weil der Siedepunkt des Wassers mit dessen Dampfdruck zusammenhängt, annähernd linear, das heißt Wasser kocht auf Meeressniveau bei 100°C , in der Restaurantküche auf der fast 3000 m hohen Zugspitze bei 90°C , im Lager 2 auf 6000 m bei 80°C und am Gipfel des Everest (8848 m) bei ca. 70°C (außer man verwendet einen Druckkochtopf). Deshalb dauert es in großer Höhe auch länger bis das Risotto fertig ist und die Nudeln al dente sind.

Umrechnung von Luftdruck in Seehöhe

Der Luftdruck im Bereich des Meeresspiegels beträgt etwa 1013 hPa und nimmt um ca. 12 hPa pro 100 Meter ab. Würde sich diese Abnahme in der Höhe konstant fortsetzen, dann wäre in 8400 m der Druck Null erreicht und oberhalb nur noch luftleerer

Raum. Weil Gase aber komprimierbar sind, und das Gewicht der jeweils noch oberhalb liegenden Luftschicht immer geringer wird, nimmt der Luftdruck mit der Höhe immer langsamer ab. In 5500 m Höhe z.B. nur noch um 6 hPa pro 100 Höhenmeter. Man spricht von einer exponentiellen Abnahme: Ca. alle 5500 m halbiert sich der Luftdruck.

Mathematisch wird dies mit der einfachen *barometrischen Höhenformel* beschrieben.

$$p_h = p_0 \cdot e^{-(rgh/p_0)}$$

wobei $p(h)$ und $p(0)$ der Luftdruck in der Höhe h bzw. auf 0 m ist, r (sprich „rho“) die Dichte der Luft und g die Erdbeschleunigung. Diese Formel gilt aber nur in einer isothermen Atmosphäre, das heißt die Lufttemperatur müsste überall konstant sein. Zusätzlich gilt noch:

- Die Temperatur der Atmosphäre nimmt mit der Höhe je nach Luftfeuchtigkeit um etwa 0.5 bis 0.9°C , im Mittel etwa 0.65°C pro 100 m ab, und das Gewicht der Luft und damit der Druck, den sie ausübt, ist von der Temperatur abhängig. Auch die Gravitation nimmt mit der Höhe ab, der Effekt ist aber vernachlässigbar gering.
- die Erdatmosphäre ist am Äquator „dicker“ als an den

Polen, da sich Luft beim Erwärmen ausdehnt.

Die Höhenformel hängt also von der geographischen Breite ab. Grund dafür ist die globale Temperaturverteilung. Die unterschiedliche Fliehkraft und Gravitationsunterschiede aufgrund der nicht ganz kugelförmigen Erde spielen eine zusätzliche, wenn auch untergeordnete Rolle (siehe Abb.2).

- Durch Jahreszeit und Wetter bedingte Luftdruckschwankungen machen aus jeder Messung nur eine Momentaufnahme, die Stunden oder Tage später zu einem anderen Luftdruckwert und somit zu einer anderen errechneten Höhe führen würde.

Auf dem Weg vom Zentrum eines Hochdruckgebietes mit 1030 hPa zum nächsten Tiefdruckgebiet mit 980 hPa zeigt ein Höhenmesser einen Höhengewinn von ca. 400 m an!

Die Internationale Standardatmosphäre

Da die Höhenmessung für die Luftfahrt schon immer eine zentrale Sicherheitsfrage war, hat man sich - um nicht für jede Wetterlage eine neue Formel berechnen zu müssen - auf die Verwendung von Mittelwerten geeinigt. Sie wurde von der internationalen Luftfahrtbehörde als

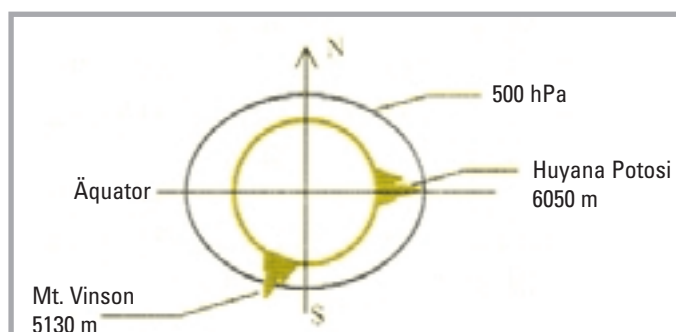


Abb. 2:

„Form“ der Erdatmosphäre (stark überzeichnet). Die 500 hPa-Fläche liegt am Äquator deutlich höher als an den Polen. Am Mt. Vinson, dem mit 5130 m höchsten Berg der Antarktis in beinahe 80° südlicher Breite, atmet es sich schwerer als auf einem äquatornahen 6000er wie z.B. dem Huyana Potosi in Bolivien. Auch der Mt. McKinley macht seinen Besteigern aufgrund seiner nördlichen Lage das Atmen nicht gerade leicht.

Internationale Standardatmosphäre definiert. Sie stellt einen Mittelwert dar und stimmt am besten bei durchschnittlichen Temperaturen, durchschnittlicher Wetterlage und mittleren geographischen Breiten. In großer Kälte oder Hitze, an den Polen oder am Äquator kommt es zu größeren Abweichungen und die Höhenmessungen müssen korrigiert werden.

Die Definition der I.S.A. (= ICAO-Standard-Atmosphäre), gültig bis 11 km Höhe:

- Luftdruck auf Meeresebene: 1013,25 hPa
- Temperatur auf Meereshöhe: +15°C
- Temperaturabnahme: 0,65°C je 100 m.

Mit den Vorgaben der Standardatmosphäre, dem Gewicht der Luft, den Gasgesetzen und etwas Differentialrechnung kann man nun eine Formel berechnen, die den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Seehöhe in dieser Atmosphäre beschreibt (siehe Kasten Seite 33: Internationale Höhenformel).

Messgeräte für den Bergsteiger

Mechanische Höhenmesser

Sie waren bis vor ca. 15 Jahren die einzigen brauchbaren Geräte für unterwegs. Trotz der elektronischen Übermacht punkten sie gegenüber den leichteren und zumeist billigeren elektronischen Geräten aber immer noch durch batteriefreien Betrieb, hohe Ausfallsicherheit, Unempfindlichkeit gegen Kälte und einfache Bedienung.

Auch die Dekorationsstücke neben dem Hütteneingang, die mit ihrer magischen Skala *schlecht – veränderlich – schön* einen willkommenen Gesprächsstoff auf fast jeder Berghütte liefern, arbeiten zumeist nach diesem Messprinzip. Dabei dient eine luftdichte, zumeist luftleere, zusammendrückbare Metalldose (Anaeroid-Dose) als Drucksensor. Steigt der Luftdruck, so wird die Dose stärker zusammengedrückt, und diese Formänderung im Zehntel-Millimeter Bereich wird

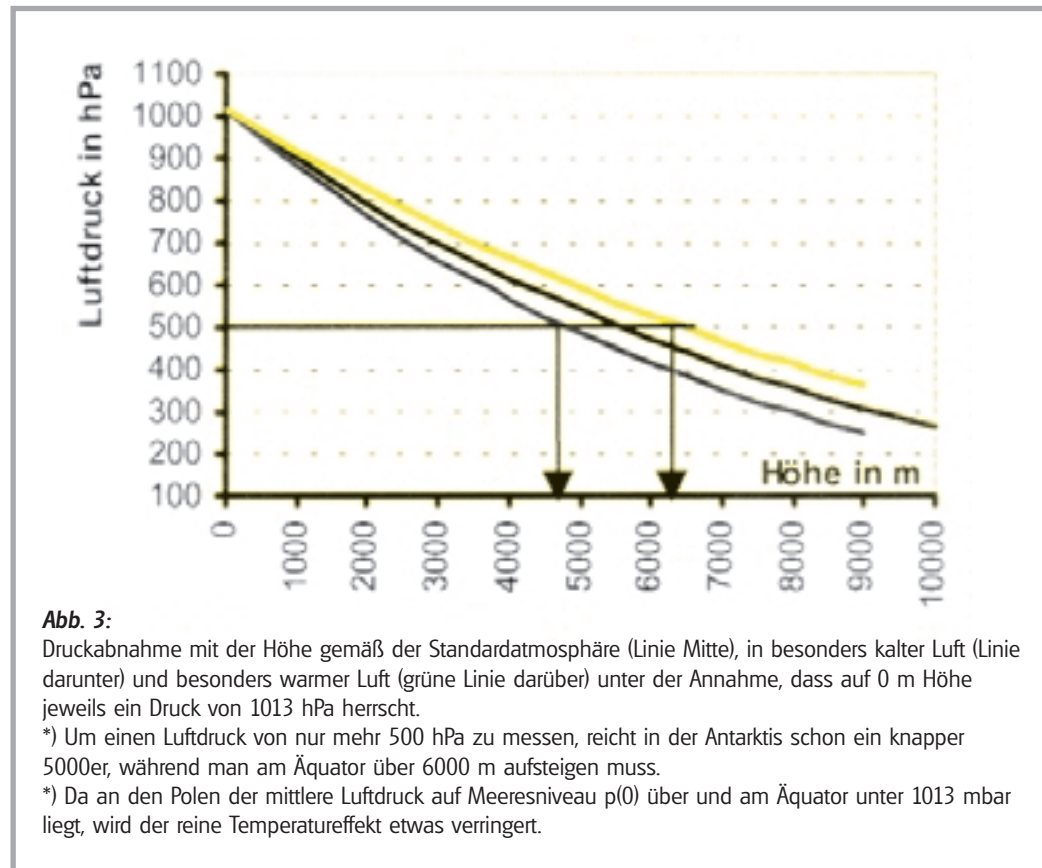


Abb. 3: Druckabnahme mit der Höhe gemäß der Standardatmosphäre (Linie Mitte), in besonders kalter Luft (Linie darunter) und besonders warmer Luft (grüne Linie darüber) unter der Annahme, dass auf 0 m Höhe jeweils ein Druck von 1013 hPa herrscht.

*) Um einen Luftdruck von nur mehr 500 hPa zu messen, reicht in der Antarktis schon ein knapper 5000er, während man am Äquator über 6000 m aufsteigen muss.

*) Da an den Polen der mittlere Luftdruck auf Meeresebene $p(0)$ über und am Äquator unter 1013 mbar liegt, wird der reine Temperatureffekt etwas verringert.

über Hebel und Zahnräder so verstärkt, dass eine deutlich ablesbare Zeigerbewegung entsteht. Die Mechanik muss dabei mit ihrer Übersetzung die Barometrische Höhenformel nachbilden, deshalb endet der Messbereich meist bei ca. 5000 m, nur die sehr teuren Top-Geräte schaffen es bis 8000 m.

Elektronische Höhenmesser

War der erste Höhenmesser in der Armbanduhr vor knapp 20 Jahren noch eine kleine Sensation und seine Alpintauglichkeit Gegenstand heißer Diskussionen, so ist dieses Rennen – vor allem aufgrund des Preisverfalls der Elektronik – inzwischen klar entschieden. Kinderkrankheiten wie ungenügende Temperaturkompensation oder falsch programmierte Höhenformel sind mittlerweile auskuriert. Integrierte Drucksensoren gibt's inzwischen bei jeder besseren Outdoor-„Uhr“, eingebaut im Griff des Schweizermessers und als Zusatzinstrument in GPS-Geräten. In den Datenblättern der Geräte und auf den Internetseiten der Hersteller

findet man kaum Angaben über die im jeweiligen Modell verwendeten Drucksensoren, zumeist kommt aber eine der folgenden Techniken zum Einsatz:

Kapazitive Messung

Eine mikroskopisch kleine, luftleere Kammer wird von einer biegsamen Membran überdeckt und je nach Luftdruck unterschiedlich verformt. Die Membran und der Boden der Kammer bilden den Kondensator eines sogenannten elektrischen Schwingkreises. Bei einer Druckänderung ändert sich die Form des Kondensators und damit die charakteristische Frequenz des Schwingkreises. Die „Bordelektronik“ rechnet dann die gemessene Frequenz des Schwingkreises in einen Luftdruck bzw. mit der Höhenformel in eine Meereshöhe um. Bei den neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet ist die Messkammer ca. 0.1 mm lang und ebenso breit, 0.001 mm tief und wird von einer etwa 0.001 mm (1µm) dicken Siliziummembran überdeckt. Das Ganze kann inklusive Auswerteeinheit auf

einem Chip untergebracht werden.

Piezo-elektrische Druckmessung

Diese Druckmessung macht sich die Tatsache zunutze, dass bestimmte Materialien (wie zum Beispiel Quarz) die elektrische Ladung an der Oberfläche ändern, wenn sie verbogen werden. Eine luftleere Kammer wird von einer piezo-elektrischen Membran verschlossen, und deren luftdruckbedingte Verformung wird in eine Ladungsänderung und damit in ein verwertbares Messsignal umgesetzt.

Halbleiter-Sensoren

In einigen Drucksensoren kommen Halbleitermaterialien zum Einsatz, die den elektrischen Widerstand ändern, wenn sie gedehnt oder gebogen werden. Über eine sogenannte Wheatstone'sche Brücke kann diese Widerstandsänderung in ein verwertbares Messsignal umgesetzt werden. Die digitale, „metergenaue“ Anzeige elektronischer Geräte soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass sie den gleichen

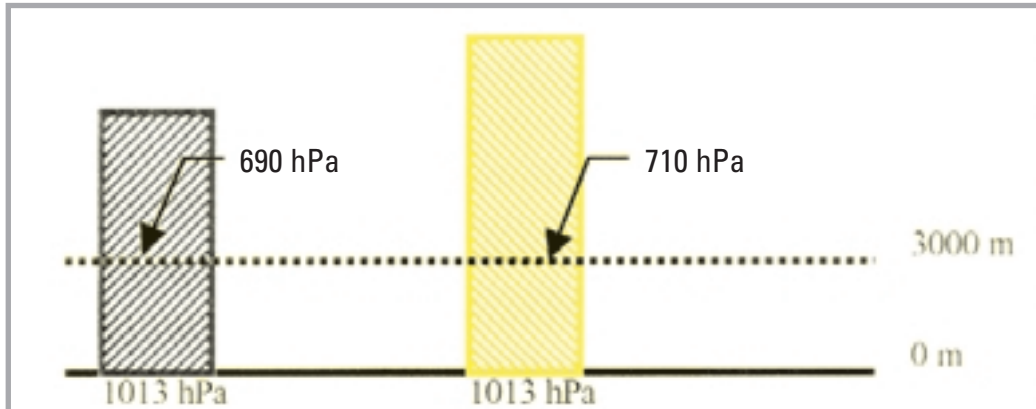


Abb. 4:

Warme Luft dehnt sich aus, der Luftdruck nimmt in warmer Luft mit der Höhe langsamer ab als in kalter, die warme Atmosphäre ist „dicker“. Nehmen wir zwei Bergsteiger, setzen einen in das linke Luftpaket, den anderen ins grüne rechte: Am Boden haben beide die selbe Luftmenge über sich und verspüren somit den gleichen Luftdruck. Wenn jetzt beide auf 3000 m aufsteigen, hat der (natürlich nur temperaturbedingt) „linke“ Bergsteiger weniger Luft über sich, misst also mit 690 hPa den geringeren Luftdruck und liest daher eine größere Höhe ab als der Kollege von der Sonnenseite. Der Höhenmesser rechnet die 690 hPa stur nach der Standardatmosphäre in eine Höhe von 3124 m, die 710 hPa in eine Höhe von 2899 m um.

systematischen Fehlern unterliegen wie alle luftdruckbasierenden Höhenmesser. Auch hier werden nur analoge Signale wie die Verformung einer Messkammer oder Membran elektronisch umgesetzt. Die Problematik der Temperaturkompensation ist prinzipiell die gleiche wie bei den mechanischen Geräten. Auflösung bzw. Skalenteilung dürfen nicht mit der Richtigkeit der Anzeige verwechselt werden! Es ist egal, ob ich auf 1 m oder 5 m genau ablesen kann, wenn die angezeigte Höhe um 100 m daneben liegt.

Das GPS als Höhenmesser

Das GPS kommt als einziges alpintaugliches Messinstrument ohne vorherige Bestimmung des Luftdrucks aus. Wie beim Triangulieren wird der Standort des GPS-Gerätes aus seiner Entfernung zu vermessenen Punkten – in diesem Fall den Satelliten – bestimmt, wobei der Abstand nicht in Metern oder Kilometern, sondern über die Zeit gemessen wird, welche die Funksignale von den Satelliten zum GPS-Gerät brauchen. War bis vor drei Jahren aufgrund der absichtlichen GPS-Störsignale die Höhenmessung noch sehr ungenau, so hat sich seit Abschaltung des „künstlichen

Rauschens“, sowie durch die simultane Erfassung mehrerer Kanäle und die allgemein gesteigerte Präzision der Geräte, die Qualität der Höhenangaben stark verbessert. Gibt man den Geräten etwas Zeit zur Mittelwertbildung, ist die Abweichung meist kleiner als 30 m. Bei der rasanten Entwicklung dieser Geräte ist es wohl nur noch eine Frage der Zeit, bis sie die Luftdruckgeräte an Genauigkeit ein- oder überholen. Derzeit wird manchen Geräten noch durch Einbau eines elektronischen, luftdruckbasierten Höhenmessers nachgeholfen. Einen anderen Lösungsansatz stellt die Verwendung von digitalen 3D-Karten dar, die im GPS gespeichert sind und mit deren Hilfe sich aus der genau bestimmten horizontalen Position die exakte Höhe ergibt. Grenzen setzt hier noch das verfügbare Kartenmaterial und die zu speichernde Datenmenge.

Als einziger Höhenmesser muss ein GPS-Gerät unterwegs nicht dauernd nachgestellt werden, es ist beinahe unabhängig von Temperatur, geographischer Breite, Jahreszeit und Wetterlage, eben jenen Faktoren, die in der Standardatmosphäre bzw. der Höhenformel zum Kompromiss eines

Mittelwertes zusammengefasst werden. Zu beachten ist allerdings, dass für die Höhenmessung zumindest 4 Satelliten „sichtbar“ sein müssen, was in engen Tälern, oder unter steilen Wänden nicht immer gegeben ist (nur treten hier auch selten die großen Orientierungsprobleme auf). Da jedoch nichts frei von Tücken ist, gilt es auch bei der GPS-Höhenmessung einiges zu beachten:

- Welches Ellipsoid, welches Kartendatum wird zur Höhenbestimmung herangezogen? Da die Erde keine exakte Kugel ist, werden unterschiedliche mathematische Näherungen für die Erstellung von Landkarten verwendet. Beim Kartendatum WGS 84 (World Geodetic System 1984), das den GPS-Messungen zugrunde liegt, wird die Erde als ein Ellipsoid („abgeflachte Kugel“) mit einem Durchmesser von 12.714 km von Pol zu Pol und 12.756 km am Äquator dargestellt. Von diesem Ellipsoid als 0m-Marke ausgehend, wird die Höhe der Gebirge berechnet – denn inmitten eines Kontinentes ist ja neben einem Berg kein Meeresspiegel als 0m-Marke vorhanden.

- Und selbst wenn: nicht einmal der Meeresspiegel ist so einfach festzulegen. Historisch bedingt hatte fast jedes Land seinen eigenen 0-Meter Meeresspiegel. Österreich nahm den mittleren Pegel in Triest, die Schweiz den in Marseille und Deutschland (West) den von Amsterdam, auf den man sich jetzt langsam europaweit einigt. Die Differenzen betragen hier aber nur einige für den Bergsteiger kaum bemerkbare Dezimeter. Andere Ellipsoidmodelle führen je nach Breitengrad zu Höhenabweichungen von über 100 m.

Was heißt Temperaturkompensation?

Eine gute Temperaturkompensation ist ein wesentliches Qualitätskriterium eines Höhenmessers, häufig wird dieser Begriff aber falsch interpretiert. Temperaturkompensation bedeutet, dass unabhängig von der Gerätetemperatur eine konstante Höhe angezeigt wird. Die Anzeige eines Höhenmessers sollte sich nicht mehr als etwa 10-20 m ändern, wenn man aus der warmen Hütte ins Freie tritt oder wenn man den Höhenmesser vom Handgelenk nimmt und in den Schnee oder zum Testen in die Kühltruhe legt. Mechanische Höhenmesser lösen dieses Problem durch Verwendung spezieller Materialien mit geringer temperaturbedingter Ausdehnung und durch eine Konstruktion der Übertragungshebel, bei der sich Materialausdehnung oder -Kontraktion gegenseitig wieder aufheben. Auch bei elektronischen Geräten spielt die richtige Materialwahl eine Rolle. Sensoren mit dem Piezo-Messprinzip sind verglichen mit den Schwingkreis-Sensoren weniger temperaturempfindlich. Bei den alpintauglichen Höhenmessern wird meistens gleichzeitig die Gerätetemperatur mit bestimmt und das Ergebnis der Druckmessung rechnerisch korrigiert. Man muss den Geräten aber bei großen Temperaturänderungen einige Minuten Zeit zur Akklimatisation lassen. Schwachpunkte bei großer Kälte sind mitt-

lerweile weniger die Drucksensoren als vielmehr die Flüssigkristall-Anzeigen oder halbleere Batterien.

Durch „Temperaturkompensation“ wird also nicht – wie häufig angenommen – die Abweichung der Lufttemperatur von der Standardatmosphäre, die ja die Grundlage der Höhenformel zur Umrechnung von Druck in Seehöhe ist, berücksichtigt! An sehr kalten oder sehr warmen Tagen wird es beim Auf- oder Abstieg immer zu falschen Höhenanzeigen kommen – trotz Temperaturkompensation. Der folgende Temperatur-Effekt lässt sich bei jeder Winterschitour beobachten – je kälter, desto besser.

Der Fehler der Höhenanzeige beträgt je Grad Temperaturunterschied zwischen der real vorhandenen und der Standardatmosphäre 0,36 m pro 100 m Höhenunterschied. 10 Grad Temperaturunterschied zur Standardatmosphäre ergeben somit einen Fehler von 3.6 % der zurückgelegten Höhendifferenz.

Ein Rechenbeispiel:

Ein Schitourengänger startet im grimmig kalten Jänner vom Parkplatz auf 1000 m Seehöhe bei -11.5°C auf einen Gipfel, der exakt 2200 m hoch ist. Was wird sein Höhenmesser am Gipfel anzeigen, wenn er am Parkplatz richtig eingestellt wurde?

Zuerst braucht man die Temperaturabweichung zur Standardatmosphäre. Nach der sollte es auf 1000 m $15 - 10 \cdot 0.65^\circ\text{C} = + 8.5^\circ\text{C}$ haben. Das ist eine Abweichung von 20° zu den gemessenen -11.5°C.

Diese 20°C verursachen $20 \cdot 0.36 = 7.2\%$ Fehler, und 7.2 % von den 1200 Aufstiegsmetern sind 86.4 m, also beinahe 100 m Fehlanzeige!

Der Höhenmesser wird also rund 2285 m anzeigen, zurück am Parkplatz passt wieder alles, falls am Gipfel nicht nachgestellt wurde. Und nochmals: Hier kann keine Temperaturkompensation helfen, nur eine Temperaturmessung und die Anwendung einer temperaturkorrigierten Höhenformel.



Maßeinheiten / Umrechnung

	hPa (Hectopascal)	Pa (Pascal)	mbar (Millibar)	bar	mmHg (= torr)
1 hPa	1	100	1	0,001	0,7501
1 bar	1000	10000	1000	1	750,1
1 mbar	1	100	1	0,001	0,7501
1 mmHg	1,33322	133,322	1,33322	0,00133322	1
1013 hPa	1013,25	101325	1013,25	1,01325	760

Tabelle 1:

Umrechnung gängiger Luftdruckeinheiten. Die gültige SI-Einheit ist das Pascal (1 Pa = 1 N/m²), da aber = 1 Hectopascal (= 100 Pascal) genau 1 Millibar (mbar) entspricht, wird der Luftdruck zumeist in hPa angegeben. Im englischsprachigen Raum werden auch noch inches Hg verwendet, eine Einheit die auch auf einigen der aktuellsten elektronischen Höhenmessern noch zur Auswahl steht. 1 Inch = 25.4 mm.

Obwohl die meisten elektronischen Geräte ein Thermometer integriert haben, verwendet keiner der mir bekannten Höhenmesser eine temperaturkorrigierte Version der Höhenformel, um diesen systematischen Fehler zu korrigieren. Die Problematik liegt zum einen in der Ermittlung der Lufttemperatur, wenn das Messgerät am Handgelenk getragen oder Sonne und Strahlung ausgesetzt wird und zum anderen in der dann notwendigen, deutlich aufwendigeren Höhenberechnung.

Walter Fimml

Dr. Walter Fimml, 37, Chemiker, IT-Verantwortlicher und Bergführer im Alpenverein-Lehrteam

Vorschau:

Im zweiten Teil von Höhenmessung & Höhenmesser in einem der nächsten Hefte, wird die Anwendung des Höhenmessers bei der Orientierung und seine Möglichkeiten bei Wetterbeobachtung und Prognose behandelt. Der Schwerpunkt wird dabei deutlich bei der Orientierung liegen, denn als Wetterstation sind die Handgelenksbarometer ohnedies nur bedingt geeignet.

Höhe[m]	Druck [hPa]	T [°C]	Sdp Wasser [°C]
0	1013	15,0	100
1000	899	8,5	97
2000	795	2,0	93
3000	701	-4,5	90
4000	616	-11,0	87
5000	540	-17,5	83
6000	471	-24,0	80
7000	410	-30,5	77
8000	355	-37,0	73
9000	307	-43,5	70
10000	264	-50,0	67

Tabelle 2:

Abnahme von Luftdruck, Temperatur und Siedepunkt des Wassers mit der Höhe in der ISA-Standardatmosphäre

Links:

- Barometrische Höhenformel: www.ame.ch/mechanik/barometer.htm
- Internationale Höhenformel: www.kontextgmbh.de/exploremag/suunrech.htm
- Temperaturkorrektur: www.bielefeldt.de/akklimd-add.htm
- Piezo-elektrischer Drucksensor: www.mst.izet.de/mst-sensdruck.html
- Meeresspiegel: www.bodenseehochwasser.at/umrechnung.html
- Geoide und Referenzhöhenflächen: www.informatik.uni-leipzig.de