

Kelvin-Helmholtz-Wellen

Dieter Etling

Den Druckfehler auf der Titelseite von Heft 1 nehmen wir zum Anlass, den Begriff Kelvin-Helmholtz-Wellen näher zu erläutern. Im Bereich der verschiedenen Wissenschaften ist es durchaus üblich, Phänomene, Erfindungen oder Objekte nach deren Entdeckern zu benennen. Als Beispiele seien Röntgen-Strahlung, Otto-Motor, Humboldt-Strom oder Hadley-Zirkulation genannt. So ist es auch mit den Kelvin-Helmholtz-Wellen: diese sind benannt nach dem britischen Physiker, Mathematiker und Ingenieur Lord Kelvin (1824-1907) und dem deutschen Mediziner, Physiker und Mathematiker Hermann von Helmholtz (1821-1894). Wegen ihrer umfangreichen wissenschaftlichen Tätigkeit auf verschiedenen Fachgebieten werden diese beiden Herren in der Literatur gelegentlich auch als Universalgenies bezeichnet.

Lord Kelvin, auch mit Baron Kelvin oder Kelvin of Largs bezeichnet, trug vor seiner Erhebung in den Ritterstand im Jahr 1866 den Namen William Thomson. Er war über 50 Jahre lang als Professor für Theoretische Physik in Glasgow tätig. Seine Hauptarbeitsgebiete waren die Elektrizitätslehre sowie die Thermodynamik. Im letztgenannten Gebiet führte er unter anderem die heute nach ihm benannte absolute Temperaturskala ein und formulierte den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Durch sein Interesse für die Schifffahrt entwickelte er das harmonische Verfahren zur Berechnung der Gezeiten und konstruierte die erste Gezeitenrechenmaschine. Als Ingenieur war er unter anderem an der Verlegung des ersten transatlantischen Tiefseetelegraphenkabels beteiligt und entwickelte den Trockenkompass. Kelvin ist übrigens der Name eines Flusses durch die Stadt Glasgow, in der William Thomson die meiste Zeit seines Lebens verbrachte.

Hermann von Helmholtz (den Titel „von“ erhielt er im Jahr 1883 durch die Erhebung in den Adelstand) war zunächst auf dem Gebiet der Medizin, besonders im Bereich der Physiologie tätig. Er beschäftigte sich hier unter anderem mit Hören und Sehen und entwickelte dabei Theorien zur Akustik und Optik. Für die medizinische Praxis erfand er den heute noch gebräuchlichen Augenspiegel. In seiner späteren Laufbahn konzentrierte er sich auf die Gebiete Physik und Mathematik. Zu nennen sind hier die Formulierung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik und der nach ihm benannten Wirbelsätze der Hydrodynamik sowie theoretische Erklärungen zu verschiedenen Phänomenen der Meteorologie. Helmholtz war auch Mitbegründer und erster Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, der Vorgängerin der heutigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Zu seinen Ehren wird der Zusammenschluss verschiedener Großforschungseinrich-

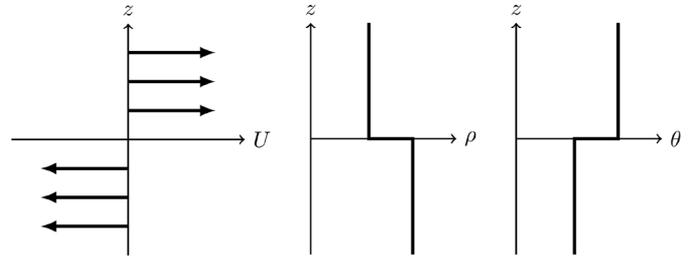


Abb. 1 Schematische Darstellung der Vertikalprofile von Wind (U), Dichte (ρ) und potenzieller Temperatur (θ) in einer stabil geschichteten Scherströmung mit Dichte- und Geschwindigkeitsprung (Grafik: Lennart Böske).

tungen in Deutschland (u. a. AWI, DLR, FZJ, GEOMAR, KIT) Helmholtz-Gemeinschaft genannt.

Kommen wir nun zu den Kelvin-Helmholtz-Wellen (K-H-Wellen) selbst. In der Literatur findet man auch den Begriff Kelvin-Helmholtz-Instabilität, welcher das Phänomen besser benennt. In der Tat sind K-H-Instabilitäten wellenförmige Instabilitäten einer Scherströmung. Daher werden diese auch als Scherungswellen oder Scherungsinstabilität bezeichnet. Der Begriff Instabilität deutet schon darauf hin, dass es sich bei den K-H-Wellen um ein zeitlich begrenzt auftretendes Phänomen handelt – im Gegensatz

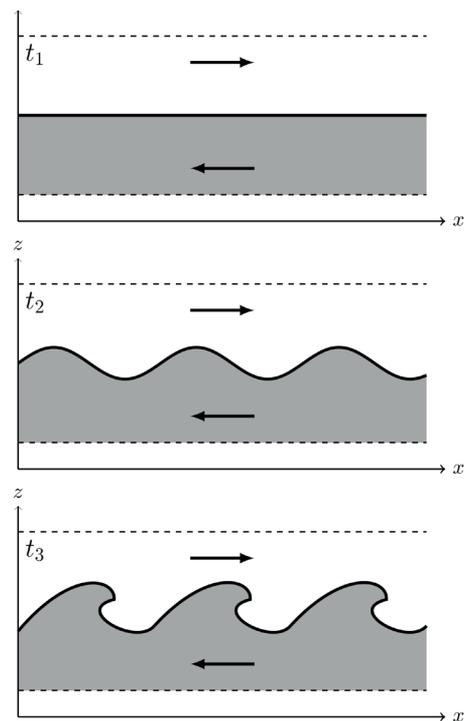


Abb. 2 Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung von Kelvin-Helmholtz-Wellen an der Grenzfläche der Scherströmung aus Abb. 1. Die grau markierte untere Schicht kann zum Beispiel mit dem Oberrand einer Wolke identifiziert werden (vergleiche Zeitpunkt t_3 mit dem Wolkenfoto in Abb. 3). Grafik: Lennart Böske.



Abb.3 Wolkenformation verursacht durch eine Kelvin-Helmholtz Welle , vergleichbar mit dem Entwicklungsstand zum Zeitpunkt t_3 in Abb. 2 (Foto: Brooks Martner, NOAA/ETL/SCATCAT).

etwa zu Schwerwellen (siehe Aufsatz „Schwere Wellen“ in Heft 1/2014), die sich in Form von Leewellen über viele Stunden halten können.

Die einfachste Strömungskonfiguration für die Entstehung von K-H-Wellen, wie sie auch in den Originalarbeiten von Kelvin (1871) und Helmholtz (1868) behandelt wurde, ist in Abb.1 dargestellt. In diesem extremsten Fall einer Scherströmung liegen zwei Schichten mit unterschiedlicher Dichte ρ , bzw. in meteorologischen Anwendungen unterschiedlicher potenzieller Temperatur θ , übereinander. Zu diesem Dichte-/Temperatursprung kommt noch ein Geschwindigkeitssprung: die Schichten bewegen sich mit jeweils konstanter Geschwindigkeit U gegeneinander. Wenn die Grenzfläche zwischen beiden Schichten in der Vertikalen ausgelenkt wird ist diese Strömungskonfiguration nicht mehr stabil. Die zeitliche Entwicklung der Grenzfläche ist in Abb. 2 dargestellt. Die Amplitude der anfangs wellenförmigen Störung der Grenzfläche wächst mit der Zeit an. Durch die Geschwindigkeitsscherung werden die Wellenberge und -Täler gegeneinander versetzt, wodurch die Grenzfläche die Form einer brechenden Welle annimmt, wie sie auch typisch für Wolkenfotos von K-H-Wellen sind, wie auf dem Titelbild von Heft 1 oder hier in Abb. 3 zu sehen. Die brechende Grenzflächenwelle führt schließlich zu Turbulenz und zur Vermischung der beiden Dichte- bzw. Temperaturschichten. Dies ist sehr anschaulich in Filmen von Laborversuchen und Computersimulationen zur K-H-Instabilität zu sehen, wie sie heutzutage unter youtube oder anderen Quellen im Internet angeschaut werden können.

Die in Abb.1 gezeigte einfache Konfiguration einer stabil geschichteten Scherströmung tritt in der Atmosphäre natürlich nicht in Form eines Temperatur- und Windsprungs auf, sondern in Form einer starken Wind- und Temperaturänderung über einen kleinen Höhenbereich, wie schematisch in Abb. 4 dargestellt. Hier ist ergänzend die Windscherung dU/dz gezeigt. Der Grund ist folgender: spätere Analysen des Kelvin-Helmholtz-Problems mit kontinuierlichen Geschwindigkeits- und Temperaturprofilen haben gezeigt, dass eine Scherströmung nur dann instabil wird, wenn die Scherung ein Extremum (Maximum oder Minimum) aufweist, wie es in Abb. 4 dargestellt ist. Es reicht für die Bildung von K-H-Wellen also nicht aus, dass z.B. der Wind kontinuierlich mit der Höhe zunimmt, was er ja meist auch macht. Daher treten K-H-Wellen auch nicht

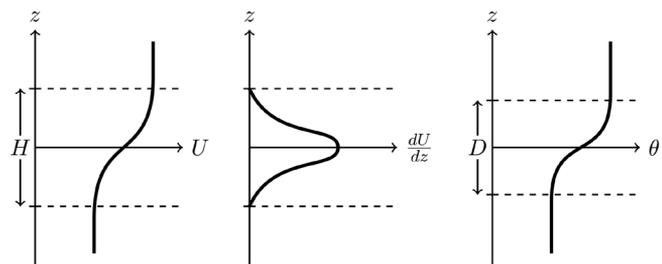


Abb. 4 Idealierte Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit U , der Windscherung dU/dz und der potenziellen Temperatur θ in der Atmosphäre, wie sie für die Entwicklung von Kelvin-Helmholtz-Wellen günstig sind. Die vertikale Erstreckung der Scherschicht ist mit H und die der Temperaturinversion mit D bezeichnet (Grafik: Lennart Böske).

so häufig auf wie die normalen Schwerwellen, die ja praktisch ständig in der Atmosphäre vorhanden sind. Günstig für die Entwicklung von K-H-Wellen ist ein Geschwindigkeitsmaximum im Windprofil (Strahlstrom, Jetstream), wie es z. B. an Inversionen am Oberrand der atmosphärischen Grenzschicht oder im Bereich der Tropopause auftritt. Da hierbei die Scherung am Windmaximum verschwindet, ist es sehr wahrscheinlich, dass sich oberhalb oder unterhalb des Windmaximums ein Extremum der Windscherung ausbildet. In der Tat werden Kelvin-Helmholtz-Wellen häufig im Bereich des Strahlstroms im Tropospaunenbereich beobachtet, zwar selten als optische Erscheinung in Wolkenformationen (siehe aber Foto von K-H-Wellen in Cirren auf Seite 3 in Heft 3/2013), sondern vielmehr in Form von Turbulenz, wie sie gelegentlich von Flugzeugen in diesen Höhenbereichen erfahren wird. Daher gelten Kelvin-Helmholtz-Wellen neben brechenden Schwerwellen auch als eine der Ursachen von Clear-Air Turbulence (CAT), deren Vorhersage nach wie vor Schwierigkeiten bereitet (siehe promet, Jahrg. 39, Heft 1/2 : Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie II).

Zum Abschluss seien ein paar Zahlen zu Kelvin-Helmholtz-Wellen genannt, wie sie aus Beobachtungen und numerischen Simulationen erhalten wurden. Die Wellenlänge (L) ergibt sich zu etwa dem 5-8-fachen der vertikalen Mächtigkeit der Scherschicht, in Abb. 3 mit H bezeichnet ($L \approx 5-8 H$). Die maximale Amplitude beträgt etwa $0.1-0.2 L$. Die Spannweite der möglichen Wellenlängen und Amplituden ergibt sich daraus, dass die K-H-Instabilität nicht nur vom Betrag der Windscherung und des Temperaturgradienten abhängt, sondern auch von der relativen Mächtigkeit der Scherschicht (H) und der Inversion (D). Nehmen wir als typischen Wert im Bereich des Oberrandes der atmosphärischen Grenzschicht von $H = 100$ m an. Damit ergeben sich Wellenlängen von etwa 500-800 m, und somit kürzer als bei Schwerwellen üblich. Die typischen Amplituden ergeben sich dann zu 50-160 m. Die Lebensdauer von K-H-Wellen vom Beginn der Instabilität (z. B. Zeitpunkt t_1 in Abb. 2) bis zum Brechen der Wellen (Zeitpunkt t_2) und deren anschließender Auflösung in Form von dreidimensionaler kleinräumiger Turbulenz liegt im

Bereich 10-20 Minuten. Aus letzterem ist zu ersehen, dass die Wahrscheinlichkeit K-H-Wellen zu beobachten weit geringer ist als die von normalen Schwerewellen, welche z. B. in Form von Leewellen, sichtbar gemacht durch parallel zum Gebirge angeordnete Kumulus- oder Lenticularis-Wolken, stundenlang am Himmel stehen können.

Literaturhinweise

KELVIN, Lord, 1871: Hydrokinetic solutions and observations. - Phil. Mag., 42, 362-377.

HELMHOLTZ, H. von, 1868: Über discontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen. - Monatsber. Königl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, 23, 215-228.