Hintergründe zu der Studie zur ITCZ und der Hadley-Zirkulation

geschrieben von Chris Frey | 25. Dezember 2025

Andy May

Alles begann vor acht Jahren, als ich die ersten drei Artikel von Ronan und Michael Connolly über ihre Ideen zur „molaren Dichte-Schnittstelle“ las und rezensierte, die sich direkt unterhalb der Tropopause befindet. Ich mochte Michael Connolly sehr, der leider im August 2025 plötzlich verstorben ist. Wir alle vermissen ihn sehr.

Wie ich in meinem Artikel (May 2025) erkläre, bildet das molare Dichteprofil der Atmosphäre zwei sich schneidende Linien der kleinsten Quadrate, wenn es gegen den Luftdruck aufgetragen wird, wie in Abbildung 1 dargestellt. Der Schnittpunkt der Connollys ist durch die horizontale gestrichelte Linie gekennzeichnet:

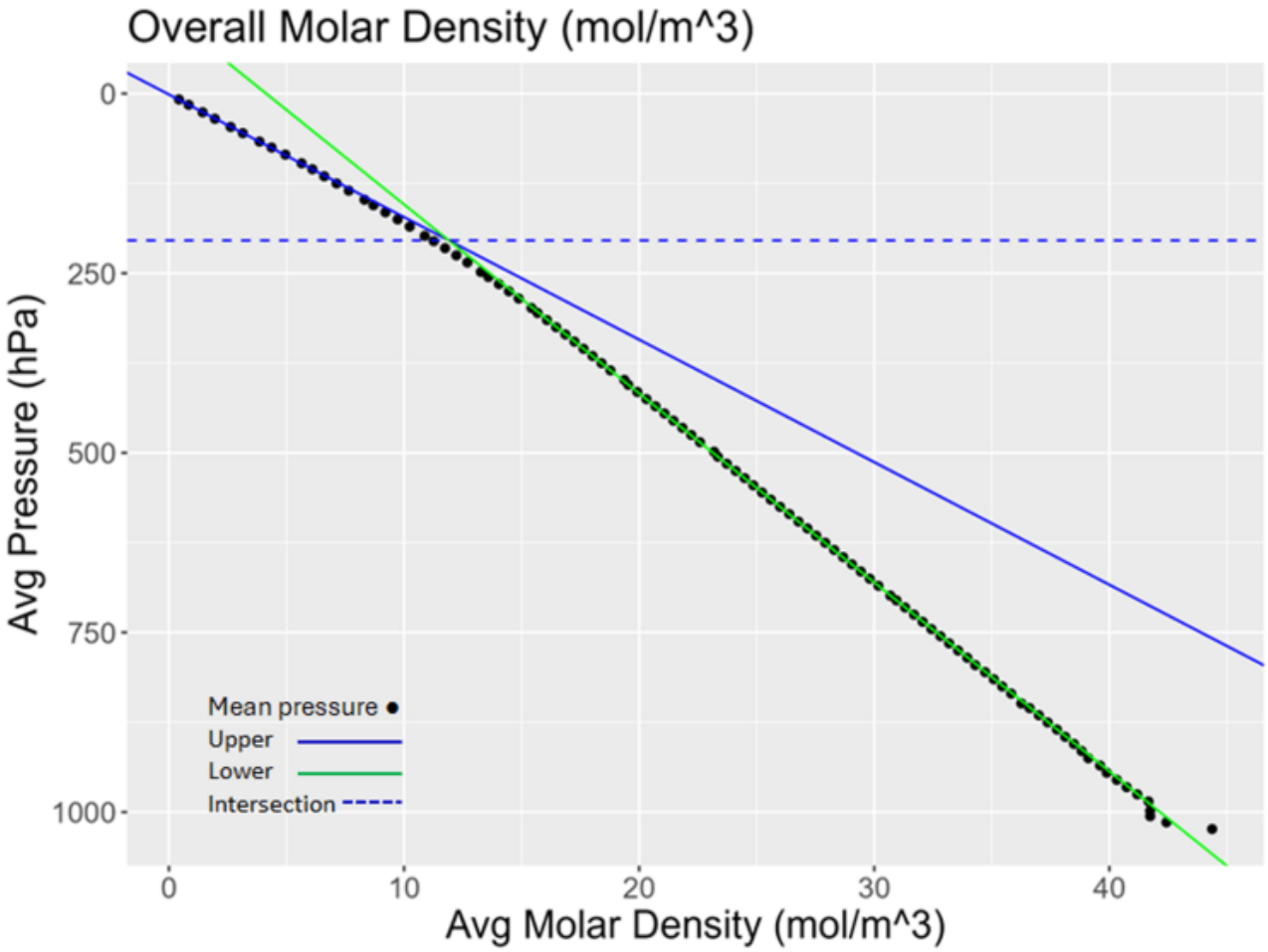

Abbildung 1. Der Schnittpunkt der molaren Dichte ist durch die horizontale gestrichelte Linie markiert. Es handelt sich um den Schnittpunkt der blauen Linie der kleinsten Quadrate der oberen

Atmosphäre und der grünen Linie der kleinsten Quadrate der unteren Atmosphäre. Die Punkte sind globale Durchschnittswerte von 10-hPa-Bins von 1030 bis 0 hPa. Quelle: (May 2025).

Die für die Erstellung von Abbildung 1 verwendeten Daten stammen von 1.136 Wetterstationen, die jeweils mehrere Wetterballon-Radiosondenaufstiege pro Tag von 1990 bis 2025 durchgeführt haben. Dies ist eine Teilmenge der vollständigen IGRA2-Radiosondendatenbank mit 2.921 Wetterstationen. Die verwendeten Radiosondendaten umfassen Aufstiege mit mindestens 90 Druckstufen, sodass sie die Troposphäre gut definieren. Dieser Teil wurde vertikal auf 10-hPa-Bins (ein Hektopascal entspricht 100 Pascal oder einem Millibar) reduziert. Somit ist Abbildung 1 das Gesamtdiagramm der globalen durchschnittlichen molaren Dichte und zeigt immer noch eine deutliche Knickstelle und Schnittstelle bei 204 hPa (~11,8 km). Diese Änderung der Steigung ist unerwartet; die Formel für die molare Dichte lautet:

$$D = \frac{P}{RT} \quad \text{(Eq. 1)}$$

In der Gleichung ist „D“ die Molardichte in mol/m³, „P“ der Druck in Pascal, „R“ die Gaskonstante (= 8,3145) und „T“ die Temperatur in Kelvin. Wie aus der Gleichung hervorgeht, sollte die Steigung der Molardichte-Druck-Kurve eine Linie mit konstanter Steigung sein, wenn sich die Zusammensetzung und der Zustand der Atmosphäre nicht ändern. Wie Abbildung 1 jedoch zeigt, findet im Durchschnitt in einer Höhe von etwa 11,8 km eine deutliche Veränderung statt. In dieser Höhe beträgt die durchschnittliche Molardichte 11,9 mol/m³, die durchschnittliche Temperatur -53,8 °C und die relative Luftfeuchtigkeit 21 %. Der Schnittpunkt liegt überall auf der Erde knapp unterhalb der klassischen Tropopause der WMO, außer am sehr kalten Südpol, wo weder die klassische Tropopause der WMO noch die Schnittpunkttechniken sehr gut funktionieren (WMO & Ashford, 1957) und (Xian & Homeyer, 2019).

Die klassische Tropopause der WMO mit ihrer Lapse-Rate funktioniert in höheren Breitengraden im Allgemeinen nicht sehr gut. Sie definiert häufig mehrere Tropopausen, wahrscheinlich weil atmosphärische Rossby-Wellen eine Vermischung von troposphärischer und stratosphärischer Luft verursachen (Xian & Homeyer, 2019). Aufgrund dieser Verwirrung wurden viele Ersatzdefinitionen vorgeschlagen (Connolly et al., 2024), (Reichler et al., 2003) und (Reutter & Spichtinger, 2025). Diese basieren auf Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit, der Ozonkonzentration und anderen Veränderungen, die in diesem Bereich der Atmosphäre stattfinden. Die weltweit einheitlichste Messgröße ist jedoch die molare Dichte-Schnittstelle. Das einzige Problem ist, dass wir nicht wirklich wissen, warum sie auftritt oder warum sie so konsistent ist.

Aber unabhängig von der Ursache ist sie ein guter Marker, und ihre Erkennung kann automatisiert werden. Der R-Code zu ihrer Erkennung ist in den ergänzenden Materialien zu meiner Arbeit sowie im Anhang der Arbeit verfügbar (May 2025).

Michael und Ronan haben ihre Wetterballon-Ergebnisse nicht kartografisch dargestellt; sie haben die Ergebnisse immer anhand von atmosphärischen Profilen betrachtet und nie in 3D. Als Michael Connolly einen Vortrag in Tuscon, Arizona, hielt (Connolly M., 2025), erhielt er eine interessante Frage von John Clauser (Connolly M., 2025) (siehe hier, etwa bei Minute 38) zu Ozeanwirbeln und der Hadley-Zirkulation. Kurz gesagt, Dr. Clauser ist der Meinung, dass die Wirbel ein Beweis für die Hadley-Zirkulation sind (Hadley, 1735), während Dr. Michael Connolly dies nicht glaubt (Connolly et al., 2021).

Dieses Gespräch hat mich motiviert, und ich habe einige R-Programme geschrieben, um die Windgeschwindigkeit und -richtung zu kartieren und zu profilieren. Es hat sich herausgestellt, dass die Hadley-Zirkulation real ist und tatsächlich mit den Ozeanwirbeln zusammenhängt. Abbildung 2 zeigt die Zirkulation in einem Diagramm.

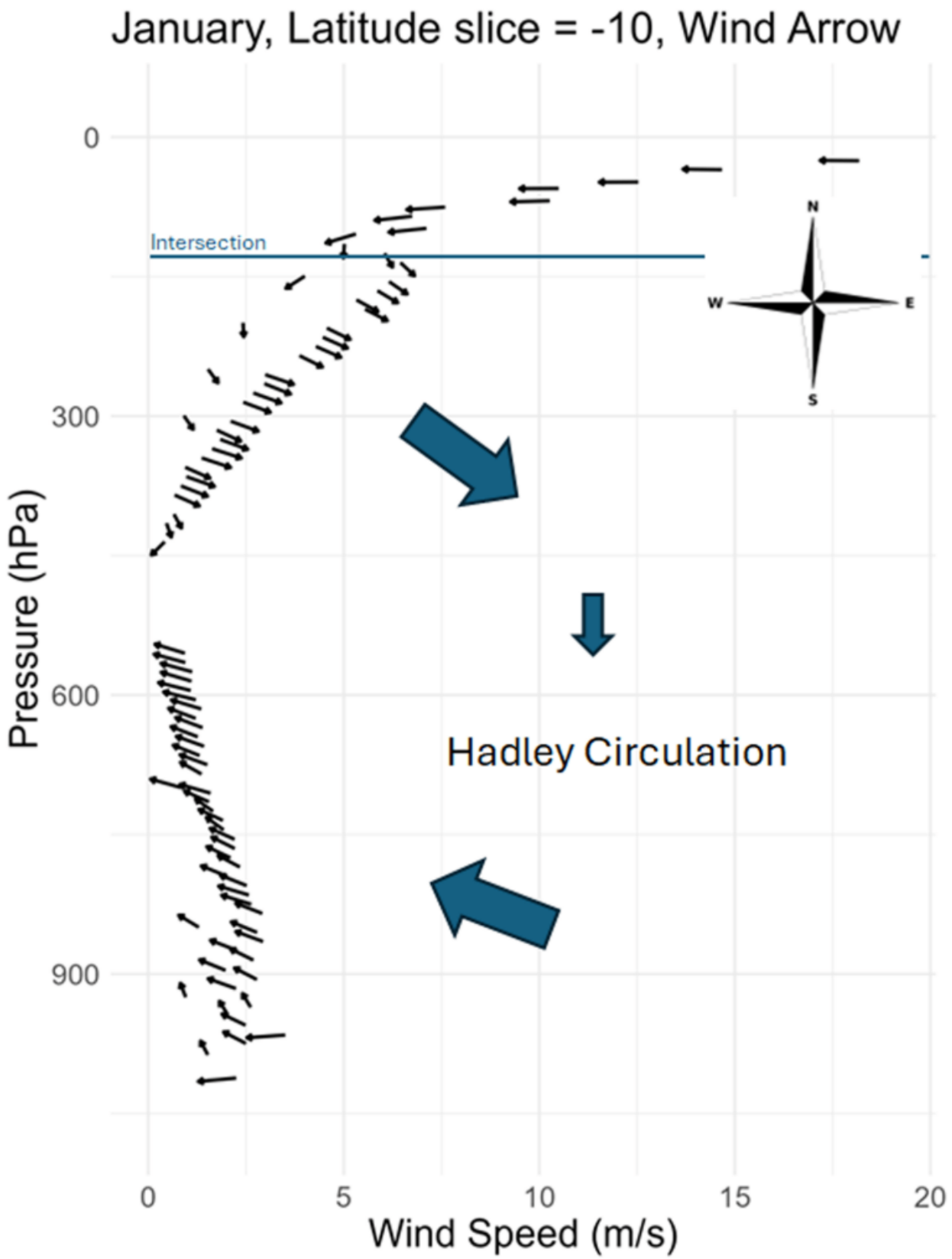

Abbildung 2. Schematische Darstellung eines Teils der Hadley-Zirkulation.

Abbildung 2 (sowie die Abbildungen 3, 4 und 5) zeigen geschwindigkeitsgewichtete, vektor-gemittelte „Windpfeile“, wobei die x-

Achse die Windgeschwindigkeit, die y-Achse den Luftdruck und die Pfeile die Windrichtung anzeigen (entgegen der meteorologischen Konvention). Die Details zur Berechnung der Windrichtung und der R-Code sind in den ergänzenden Materialien und in Anhang A des Artikels zu finden. Abbildung 2 bezieht sich nur auf den Monat Januar und auf Wetterstationen zwischen 10° südlicher Breite und dem Äquator (Scheibe „-10“, Scheiben sind nach ihrer südlichen Grenze benannt). Die Windrichtung ändert sich, wenn die Windgeschwindigkeit zwischen etwa 450 und 500 hPa abnimmt. Oberhalb dieser Abnahme weht der Wind vom Äquator und der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ, im Januar durchschnittlich etwa 5°S) weg, und die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu. Unterhalb dieser Abnahme kehrt sich der Wind um und weht in Richtung Äquator (in diesem Fall nach Nordwesten), wobei die Geschwindigkeit zur Oberfläche hin leicht zunimmt.

Das Hauptproblem bei der Diskussion über die Molardichte in Connolly und Connolly (2014 und 2014a) war, dass sie ihre Ergebnisse nicht kartografisch dargestellt haben. Daher konnten sie keine Hinweise auf die Hadley-Zirkulation (Hadley, 1735) erkennen und spekulierten, dass diese möglicherweise nicht existiert (Connolly et al., 2021). Im Mai 2025 argumentiere ich, dass sie sehr wohl existiert, es sich jedoch um eine komplexe 3D-Zirkulation handelt und nicht um eine einfache 2D-Nord-Süd-Zirkulation, wie sie oft in der Literatur dargestellt wird (Dima & Wallace, 2003) und (Cook & Webster, 2004). Eine ähnliche Sichtweise einer komplexeren 3D-Hadley-Zirkulation wird in (Karnauskas & Ummenhofer, 2014) vertreten, wo auch einige der damit verbundenen Prozesse erläutert werden.

Hoch in der Troposphäre wird die aufsteigende Luft in der ITCZ horizontal abgelenkt, wenn sie auf die homogen geschichtete Stratosphäre trifft, und bewegt sich in beiden Hemisphären polwärts. Die Kraft der aufsteigenden Luft in der ITCZ drückt auch die tropische Stratosphäre auf über 14 km Höhe*. Dann beginnt sie einen langen Weg hinunter zur Oberfläche, während Wasserdampf aus ihr ausfriert, was die Luftdichte erhöht (Wasserdampf hat ein Molekulargewicht von 14 gegenüber 29 für trockene Luft). Wenn die dehydrierte Luft die Oberfläche erreicht, erwärmt sie sich und schafft eine trockene Hochdruckregion.

**Einschub des Übersetzers dazu: Gemeint ist in diesem Satz die Grenze zur Stratosphäre, also die Tropopause. Die Höhe derselben ist jedoch nicht von der Konvektion abhängig, sondern der viel größeren Schichtdicke der Troposphäre im Vergleich zu kälteren troposphärischen Bereichen. Die tropische Konvektion hat also viel mehr Raum nach oben als die Konvektion in kälteren Bereichen. M. a. W. die hoch reichende Konvektion ist eine Folge der höher liegenden Tropopause und nicht deren Ursache. Ein Anheben der Tropopause durch Konvektion kommt nur stellenweise bei besonders starken Gewitter-Entwicklungen zustande, dem sog. „Overshooting“, und ist sehr kurzlebig. Ein solches Overshooting ist im Eingangsbild oben erkennbar – der Wolkenbuckel, der über die Obergrenze des CB-Schirms hinausragt. – Ende Einschub.*

Die Hadley-Zirkulation ist schwer zu erkennen, da sich das Gebiet mit aufsteigender feuchter tropischer Luft, das Zentrum der ITCZ, mit dem Wechsel der Jahreszeiten ständig mit der Sonne nach Norden und Süden bewegt. Man muss die Luftströmung am richtigen Ort und zur richtigen Zeit überprüfen. Glücklicherweise liegt die ITCZ im Januar durchschnittlich bei etwa 5° südlicher Breite (May 2025) und im Winter der nördlichen Hemisphäre ist die Hadley-Zirkulation etwas stärker als in anderen Monaten (Nguyen et al., 2013).

Ein weiterer Beweis für die Existenz der Hadley-Zirkulation sind die subtropischen Wüsten wie die Sahara, das australische Outback und die Atacama-Wüste. Diese Wüstenregionen sind in Abbildung 3 eingekreist:

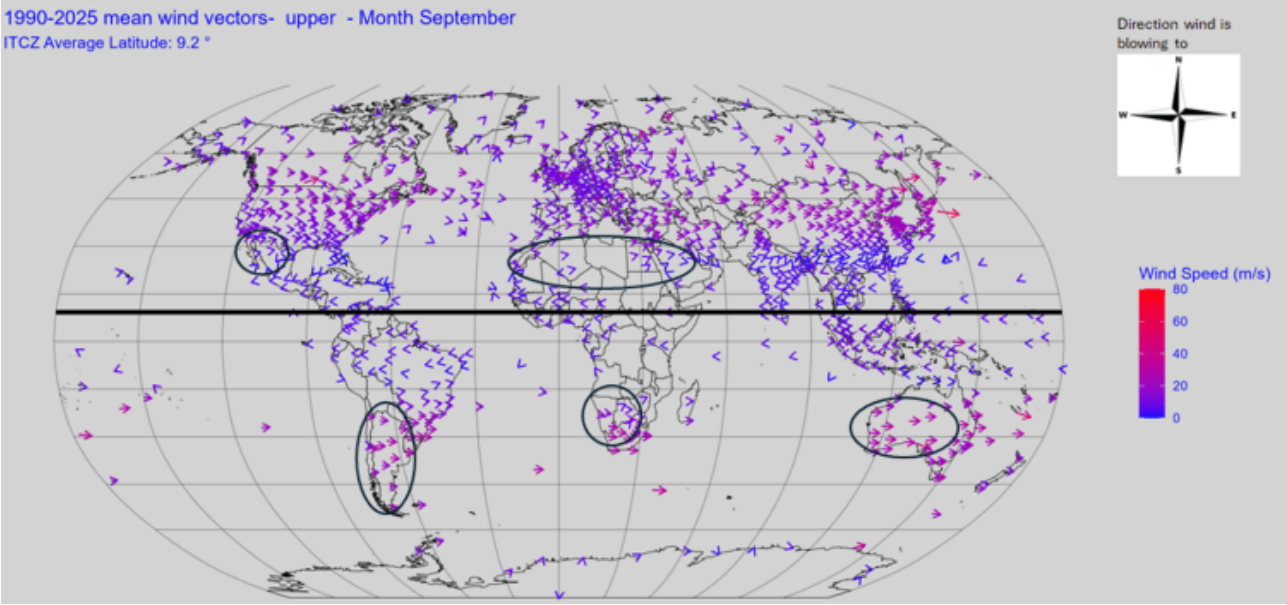

Abbildung 3. Windpfeile (die die Windrichtung anzeigen) für alle Wetterstationen in der oberen Troposphäre. Die angezeigte Windrichtung ist ein geschwindigkeitsgewichteter Vektordurchschnitt für September aus den Jahren 1990 bis 2025. Die subtropischen Wüstenregionen sind eingekreist.

Der Wind in der oberen Troposphäre in den Wüstenregionen weht in die entgegengesetzte Richtung wie die tropischen Winde und oft mit einem leicht polwärts gerichteten Vektor. Diese Wüsten entstehen dort, wo die Winde in der oberen Troposphäre ihre Richtung umkehren und die geringste horizontale Windgeschwindigkeit aufweisen. Sie befinden sich also über Hochdruckgebieten, in denen die Luft absinkt und austrocknet. Die Ozeanwirbel, die ebenfalls aus dieser Zirkulation resultieren, sind in der oberen Troposphäre sichtbar, jedoch nicht so deutlich wie in der unteren Troposphäre, wie in Abbildung 4 dargestellt:

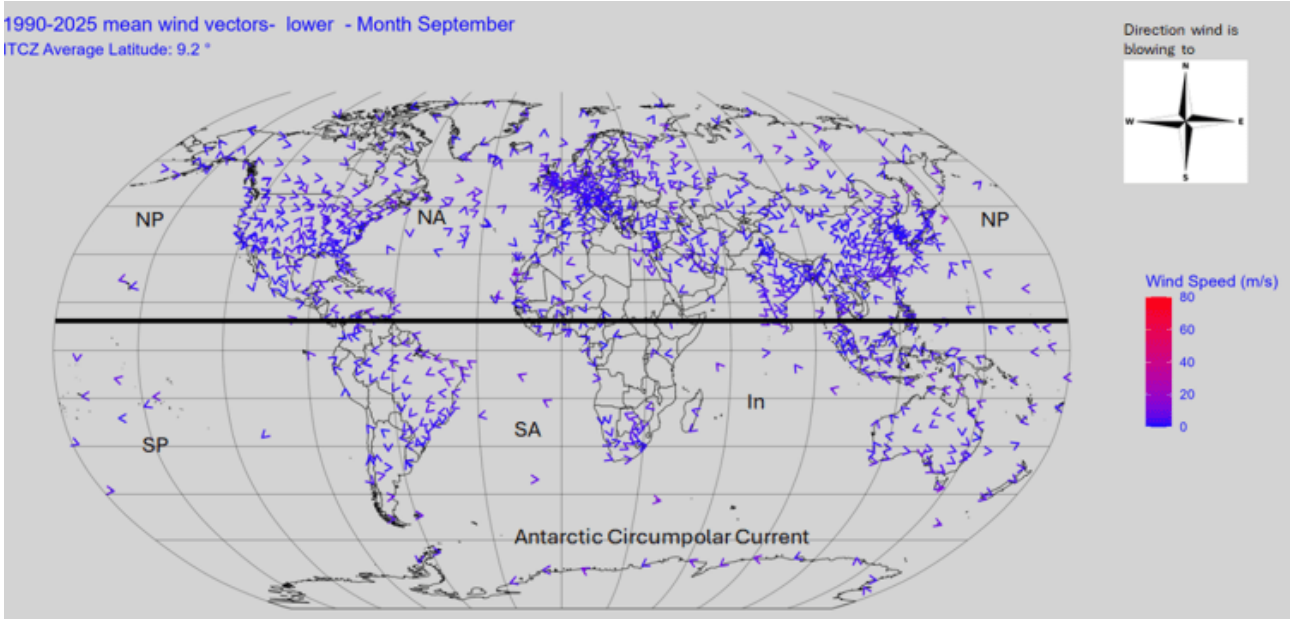

Abbildung 4. Die mittleren Radiosonden-Windvektoren für den Zeitraum 1990–2025. Die normalen Ost-West-Winde in den Tropen bilden zusammen mit aufsteigender Luft an der ITCZ und absinkender trockener Luft bei etwa 20°–30° N/S sowie den kontinentalen westlichen Beckenrändern die Ozeanwirbel. Die Wirbel sind wie folgt gekennzeichnet: „In“ Indischer Ozean, „NP“ Nordpazifik, „SP“ Südpazifik, „SA“ Südatlantik, „NA“ Nordatlantik. Zusätzlich ist die antarktische zirkumpolare West-Ost-Strömung gekennzeichnet.

Abbildung 4 zeigt, wie die Lage der Kontinente in Verbindung mit der Umkehrung der Windrichtung in der unteren Troposphäre bei niedrigen Windgeschwindigkeiten zwischen 20° und 30° nördlicher/südlicher Breite zur Bildung der Wirbel beiträgt. Die Ausbreitung der Umkehrung der Windrichtung bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ist in Abbildung 5 dargestellt:

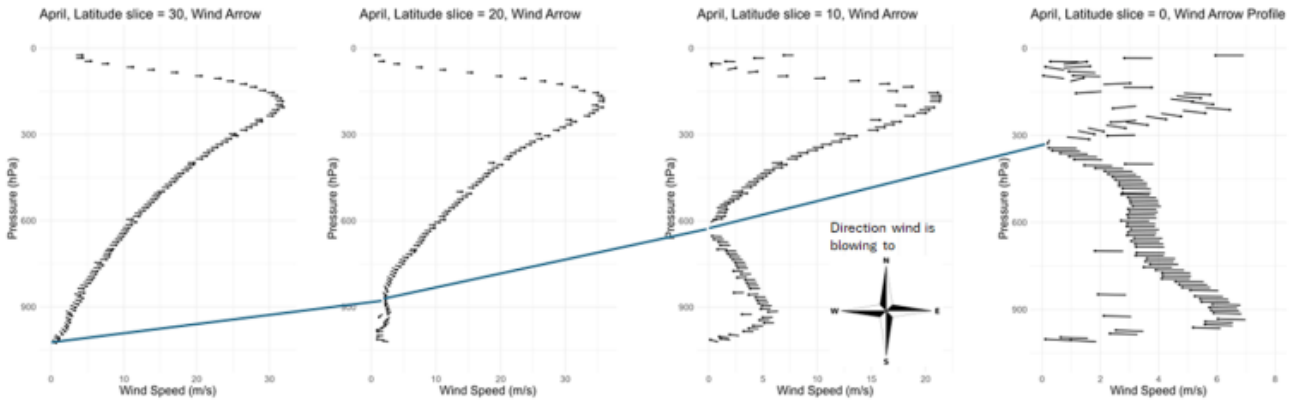

Abbildung 5. Die Ausbreitung der Umkehrung der Richtung der niedrigen Windgeschwindigkeit vom Äquator (rechts) zum Breitengrad 30°-40° N auf der linken Seite.

Wie Abbildung 5 zeigt, beginnt die Windrichtungsumkehr im April bei etwa 300 hPa (~9 km) am Äquator und verschwindet an der Oberfläche im Bereich zwischen 30° und 40° nördlicher Breite. Die Windrichtung an der Oberfläche (wiederum ein geschwindigkeitsgewichteter Vektordurchschnitt) ist im Bereich zwischen 10° N und 20° N leicht polwärts, dreht jedoch im Bereich zwischen 20° N und 30° N äquatorwärts. Ein ähnliches Muster ist auch in der südlichen Hemisphäre zu beobachten.

Diskussion

Bei der Untersuchung eines 3D-Problems ist es am besten, dies mit 3D-Werkzeugen zu tun. Einfache 2D-Diagramme reichen dafür nicht aus. Wenn die Radiosondendaten mithilfe von geschwindigkeitsgewichteten Vektor-Durchschnittswindpfeilen kartiert und profiliert werden, zeigt sich die Hadley-Zirkulation. In 2D-Diagrammen der Windrichtung ist sie nicht zu erkennen, da die allgemeine Windrichtung in den kritischen Breiten entweder Ost-West (Tropen) oder West-Ost (mittlere Breiten) ist und die kritische Windrichtungsänderung bei niedrigen Geschwindigkeiten normalerweise nicht zu sehen ist. Die Richtungsänderung des Windes mit niedriger Geschwindigkeit in den Subtropen ist gering und verschiebt sich ständig mit den Jahreszeiten. Dieses Muster ist auf den Karten in den ergänzenden Materialien zu sehen, auf denen die monatlichen Bewegungen der ITCZ verzeichnet sind.

Die gesamte Hadley-Zirkulation ist nur selten in einem Profil zu sehen, wie in Abbildung 2 dargestellt, da es sich um ein komplexes 3D-Windmuster handelt, das sich mit der Zeit ständig verändert. Man könnte es als komplexes 4D-Windmuster bezeichnen. Abbildung 2 ist ideal gelegen, sodass sich die ITCZ in diesem Monat immer in diesem Breitengrad befindet und nahe am Äquator liegt, wo die aufsteigende feuchte Luft die molare Dichtekreuzung sehr hoch gedrückt hat. Die ITCZ ist relativ schmal, insbesondere der Teil mit der aufsteigenden Luftsäule, sodass sie schwer zu lokalisieren ist. Die Region, in der die kühle, dehydrierte Luft in beiden Hemisphären absinkt, ist sehr groß, aber die meridionale Windkomponente ist gering.

Die einfachste und konsistenteste Methode, die Hadley-Zirkulation zu beobachten, ist die Profilerstellung der in Abbildung 5 dargestellten Umkehrung der Fallwindrichtung bei niedriger Geschwindigkeit. Dieser Bereich mit niedriger Geschwindigkeit erreicht die Oberfläche bei etwa 30° N/S, den Breitengraden der großen Ozeanwirbel. Dies ist auch der Breitengrad der subtropischen Wüsten, die in Abbildung 3 zu sehen sind. Es ist die Bewegung der Windrichtungsänderung bei niedriger Geschwindigkeit, die die Hadley-Zirkulation am besten und deutlichsten charakterisiert.

All dies wird in meiner neuen Abhandlung ausführlich behandelt, die hier heruntergeladen werden kann. Sie steht im Widerspruch zu dem, was Michael geschrieben und geglaubt hat, aber ich bin sehr traurig, dass er verstorben ist, bevor ich diese Arbeit fertiggestellt habe. Wie ich ihn

kenne, wäre er nicht verärgert gewesen, sondern hätte sich über die Darstellung der Daten gefreut und wäre begeistert gewesen, mit mir über die Ideen zu diskutieren. Er war immer ein sehr datenorientierter Mensch.

Kommentar des Übersetzers hierzu: Hier wird exemplarisch dargestellt, wie die Diskussion über verschiedene Standpunkte stattfinden sollte – nämlich konstruktiv und sachlich und nicht verzerrt durch Propaganda, wie es derzeit so weit verbreitet der Fall ist.

Code availability

Eine ZIP-Datei mit dem R-Code, zusätzlichen Diagrammen, die im Text der Arbeit erwähnt werden, sowie einigen Testdaten kann hier oder (May, 2025b) heruntergeladen werden. Die ZIP-Datei enthält auch einige Code-Dokumentationen und die Diagramme, die zur Auswahl der ITCZ-Breitengrade für jeden Monat verwendet wurden.

Daten-Verfügbarkeit

Die verwendeten Daten können hier oder hier heruntergeladen werden. Die FTP-Seite ist wesentlich praktischer, erfordert jedoch eine FTP-Anwendung wie Filezilla.

Dieser Artikel ist auch auf Researchgate verfügbar.

Schlusswort

Manche werden fragen, warum ich diesen Artikel über OSF und außerhalb des üblichen Peer-Review-Verfahrens veröffentlicht habe. Die Antwort ist einfach: Ich bin im Ruhestand, und wenn ich nicht wie bei unserem AJES-Artikel eine spezielle Einladung für einen Artikel habe oder eine Befreiung von den Veröffentlichungsgebühren erhalte, ist es zu teuer und das Geld nicht wert. Wenn ich jünger wäre und das Prestige einer Fachzeitschrift mit Peer-Review kaufen müsste, wäre es das vielleicht wert, aber die Gebühren betragen mehrere tausend Dollar, und das interessiert mich nicht. Der wahre Wert liegt in der Studie, die ich durchgeführt habe, und darin, wie ich sie verfasst habe. In welcher Zeitschrift sie erscheint, ist reine Eitelkeit. Die Leute werden sie lesen und kommentieren, unabhängig davon, wo sie veröffentlicht wird.

Referenzen

Connolly, M. (2025). 20 Million weather balloons: How this data shows that all the climate models are based on wrong assumptions. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=48Hp9CqSlMQ&t=1026s

Connolly, M., Connolly, R., Soon, W., Velasco Herrera, V., Cionco, R., & Quaranta, N. (2021). Analyzing Atmospheric Circulation Patterns Using Mass Fluxes Calculated from Weather Balloon Measurements: North Atlantic

Region as a Case Study. *Atmosphere, 12*. https://doi.org/10.3390/atmos12111439

Connolly, M., Dingley, O., Connolly, R., & Soon, W. (2024). Comparing Different Tropopause Estimates From High-Resolution Ozonesondes. *Earth and Space Science, 11*(5). https://doi.org/10.1029/2024EA003584

Cook, K., & Webster, P. (2004). The Elementary Hadley Circulation. In H. F. Diaz, & R. S. Bradley, *The Hadley Circulation: Present, Past and Future.* https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8_2

Dima, I. M., & Wallace, J. M. (2003). On the Seasonality of the Hadley Cell. *Journal of the Atmospheric Sciences, 60*(12), 1522 – 1527. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<1522:OTSOTH>2.0.CO;2

Hadley, G. (1735). Concerning the cause of the general trade-winds. *Phil. Trans., 29*, 58-62.

Karnauskas, K., & Ummenhofer, C. (2014). On the dynamics of the Hadley circulation and subtropical drying. *Climate Dynamics, 42*, 2259-2269. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2129-1

May, A. (2025). The Molar Density Tropopause Proxy and its relation to the ITCZ and Hadley Circulation. *OSF*. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KBP9S, URL: https://osf.io/eq75t

May, A. (2025b, November 28). *Supplementary Materials: The Molar Density Tropopause Proxy and Its Relation to the ITCZ and Hadley Circulation.* https://doi.org/10.5281/zenodo.17752293

Nguyen, H., Evans, A., Lucas, C., Smith, I., & Timbal, B. (2013). The Hadley Circulation in Reanalyses: Climatology, Variability, and Change. *Journal of Climate, 26*(10), 3357 – 3376. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00224.1

Reichler, T., Dameris, M., & Sausen, R. (2003). Determining the tropopause height from gridded data. *Geophysical Research Letters, 30*(20). https://doi.org/10.1029/2003GL018240

Reutter, P., & Spichtinger, P. (2025). The frosty frontier: redefining the mid-latitude tropopause using the relative humidity over ice. *Atmos. Chem. Phys., 25*, 16303–16314. https://doi.org/10.5194/acp-25-16303-2025, 2025

WMO, & Ashford, O. M. (1957, October). Meteorology – A three-dimensional science, second session of the commission for aerology. *WMO Bulletin, 6*(4), 134-138.

Xian, T., & Homeyer, C. R. (2019). Global tropopause altitudes in radiosondes and reanalyses. *Atmospheric Chemistry and Physics, 19*(8), 5661–5678. https://doi.org/10.3390/atmos12111439

Link:
https://andymaypetrophysicist.com/2025/12/19/the-story-behind-my-paper-on-the-itcz-and-the-hadley-circulation/

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE