

EXPERIMENTELLE VERFAHREN DER  
STRÖMUNGSMECHANIK,  
DLR GÖTTINGEN

---

## Wetter, Druck und Höhe & Tornado

---

Praktikanten: Kevin Lüdemann,  
Email: kevin.luedemann@stud.uni-goettingen.de  
Durchgeführt am: 07.12.2015  
Abgegeben am: 02.01.2016

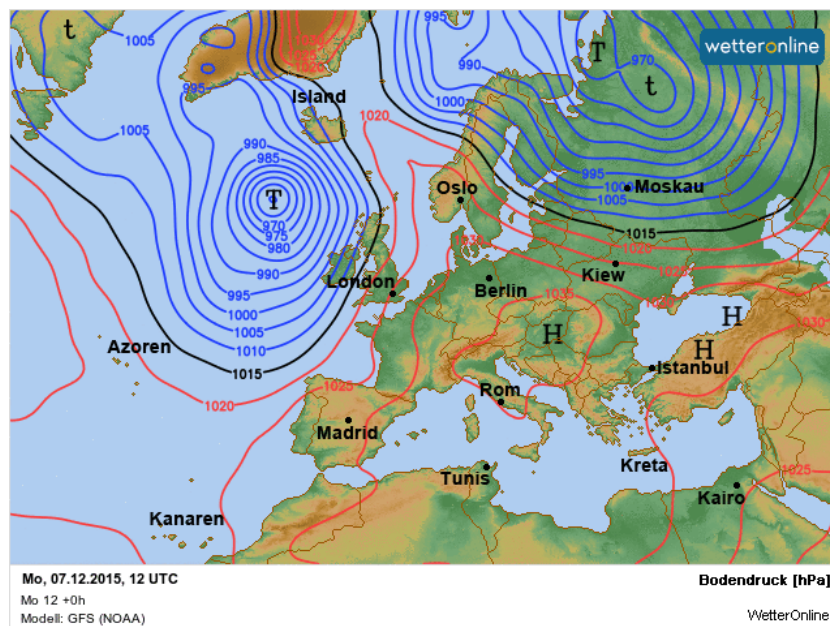
# 1 Wetter

## 1.1 Momentane Lage

In der Stunde der Durchführung waren am Himmel so gut, wie nur Stratos Wolken zu sehen. An einigen Wolkenlöchern konnte man aber auch ein paar Altocumulus Wolken erkennen. Dies deutet auf eine durchgehend homogene Bewölkung aufgrund von Zwischenzonenwetter hin. Dies wird weiter von dem nur leichten Wind bestätigt. Dieser lies sich aber aufgrund seiner nur sehr geringen Stärke keine ausgeprägten Richtung zuordnen. Dies sind ähnliche Bedingungen, wie im Rücklagenwetter, allerdings zeigt sich dieses auch durch eine geringe Bewölkung. Ebenfalls regnete es zum Zeitpunkt der Messung nicht, aber im Laufe des Nachmittags gab es einige Regentropfen. Die Temperatur war eher Mild und rund um 13°C. Diese schwankten aber auch nicht stark im Laufe des Nachmittags.

Hierraus lässt sich ableiten, dass sich das Wetter auch in den weiteren Stunden nicht stark ändern wird. Ohne Wind können sich die Wolken nicht weiter bewegen und somit bleibt auch die Temperatur annähernd konstant, wenn es keinen spontanen Regenschauer mehr giebt.

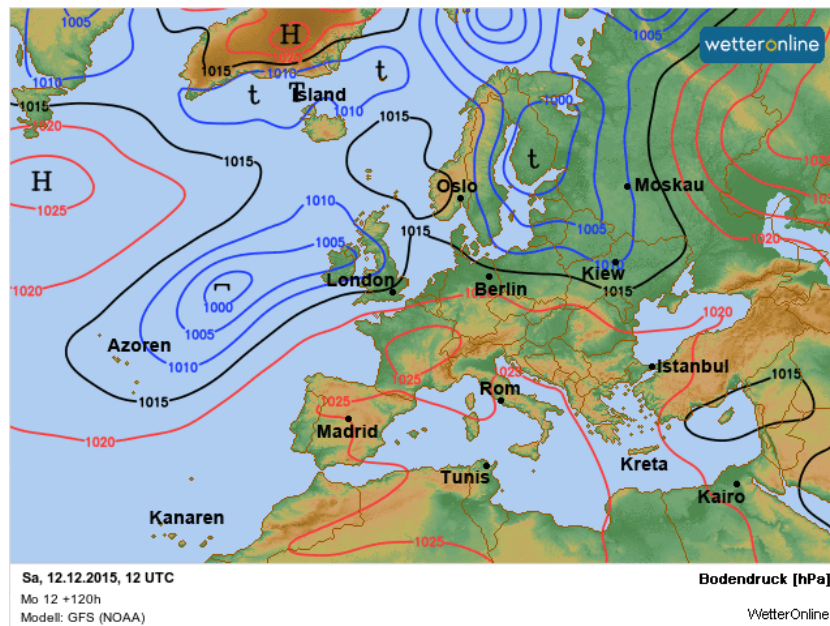
## 1.2 Wetter aus Druckkarten



**Abbildung 1:** Druckkarte Europas für den 07.12.2015 entnommen aus [wetteronline.de](http://wetteronline.de)

Die Druckkarte vom Tag der Praktikumsdurchführung dem 07.12.2015 ist in der Abbildung 1 zu sehen. Aus dieser Druckkarte kann man entnehmen, dass über Russland

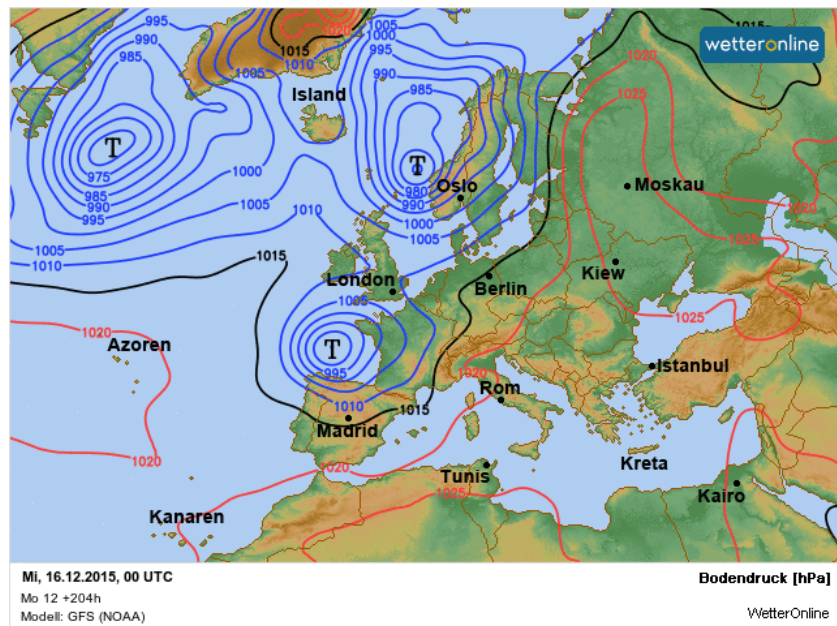
und Nordeuropa, sowie über dem Atlantik südlich von Island sich jeweils ein starksausgeprägtes Tiefdruckgebiet befindet. Dem gegenüber liegt über Zentraleuropa ein stark ausgeprägtes Hochdruckgebiet. Dieses Hoch bestimmt das Wetter in ganz Deutschland. Speziell für die Region Göttingen ist ein kleiner Druckgradient zu erkennen, welcher an den weit auseinander liegenden Isobaren zu sehen ist. Dies bedeutet, dass es eher keinen bzw. leichten Wind gibt. Diese kommt aufgrund der Rechtsdrehung des Hochdruckgebietes aus Süd-Westen, somit ist die Windrichtung Nord-Ost.



**Abbildung 2:** Druckkarte Europas für den 12.12.2015 entnommen aus [wetteronline.de](http://wetteronline.de)

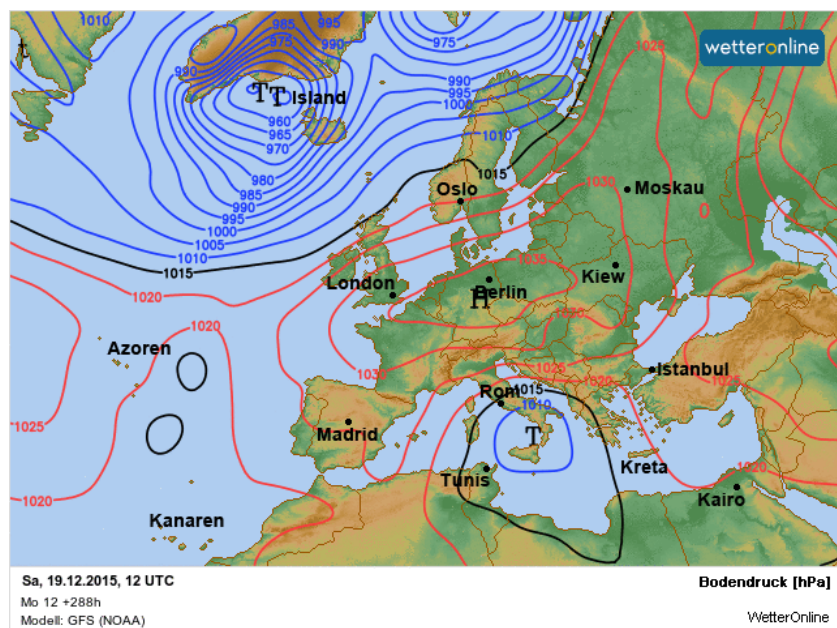
Die Druckvorhersage für den 12.12.2015 ist in der Abbildung 2 zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass sich das Hochdruckgebiet in Richtung Süd-Süd-Ost bewegt. Desweiteren bewegen sich die Tiefdruckgebiete aufeinander zu und scheinen sich zu einem Gebiet zu vereinigen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass das neu verbundene Tiefdruckgebiet deutlich schwächer ist im Gegensatz zum Hochdruckgebiet, dass immernoch gut ausgeprägt ist. Diese Bewegung sorgt für eine Wetteränderung in der Region Göttingen, da nun langsam der Druck sinkt und sich die Ausläufer des Tiefs bemerkbar machen. Dies sorgt für zunehmenden Wind, der vermehrt aus Westen kommt.

Die Druckvorhersage für den 16.12.2015 ist in der Abbildung 3 zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass die Tiefdruckgebiete nun in Richtung Mitteleuropa wandern und auch an Stärke zulegen. Zu dem zieht ein weiteres Tiefdruckgebiet von Nord-Westen nach Europa. Das Hochdruckgebiet, dass sich noch über Mitteleuropa befand wandert weiter Richtung Nord-Ost und somit nach Russland. Die Tiefdruckgebiete über dem Raum Göttingen werden für stärkeren Wind und vermehrt für Regen sorgen. Speziell für den Raum Göttingen bleibt die eher milde Westwindströmung erhalten. Dies sorgt weiterhin



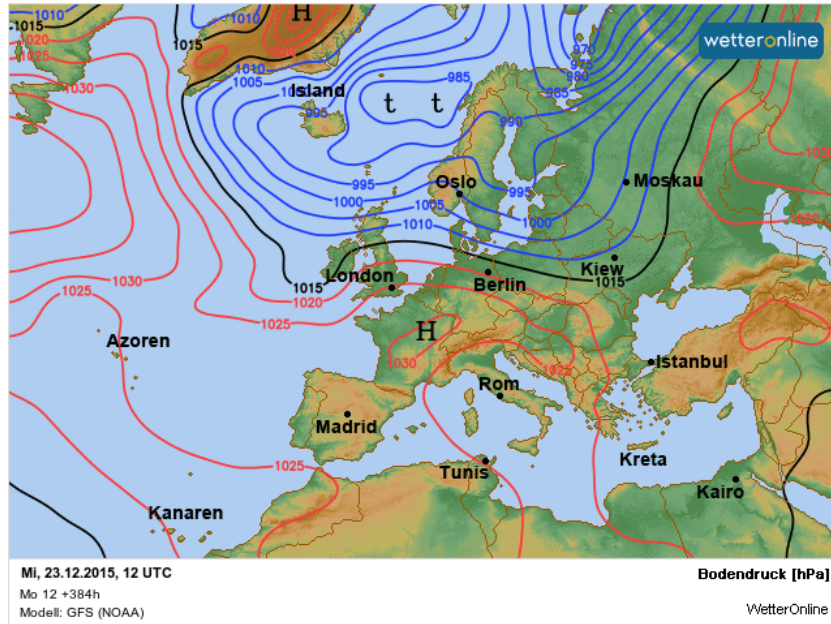
**Abbildung 3:** Druckkarte Europas für den 16.12.2015 entnommen aus wetteronline.de

für milde Temperaturen und fehlenden Schnee.



**Abbildung 4:** Druckkarte Europas für den 19.12.2015 entnommen aus wetteronline.de

Für den 19.12.2015 ist die Druckvorhersage in der Abbildung 4 zu sehen. Hier zeigt sich jetzt, dass sich eines der Tiefdruckgebiete gelöst hat und weiter richtung Süd-Osten





## 2 Druck und Höhe

### 2.1 Theoretische Grundlagen

Die Höhe hängt logarithmisch von der Höhe ab. Dies ergibt sich aus der Eulergleichung[1, S. 114]

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g}$$

für den statischen und stationären Fall. Sprich das Geschwindigkeitsfeld ist konstant. Hierbei ist  $\vec{g}$  die Erdbeschleunigung, welche in Richtung  $-z$  zeigt und nur mit  $g$  bezeichnet wird. Somit vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\begin{aligned} \nabla p &= -\rho \vec{g} \\ \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g \end{aligned}$$

und somit zu einer reinen Höhenabhängigkeit in die  $z$  Richtung. Ersetzt man die Dichte aus der Idealgasgleichung[1, S. 260] mit  $\rho = \frac{pM}{RT}$ , wobei  $M$  die Masse,  $T$  die Temperatur und  $R$  die Gaskonstante ist, bekommt man eine Abhängigkeit von der sogenannten Druckscalenhöhe  $h_s = \frac{RT}{Mg}$ . Diese Gleichung lässt sich jetzt durch integration Lösen und ergibt die Barometrische Höhenformel

$$\Delta h(h) = h_s \ln \frac{p(h_0)}{p(h)}, \quad (2.1.1)$$

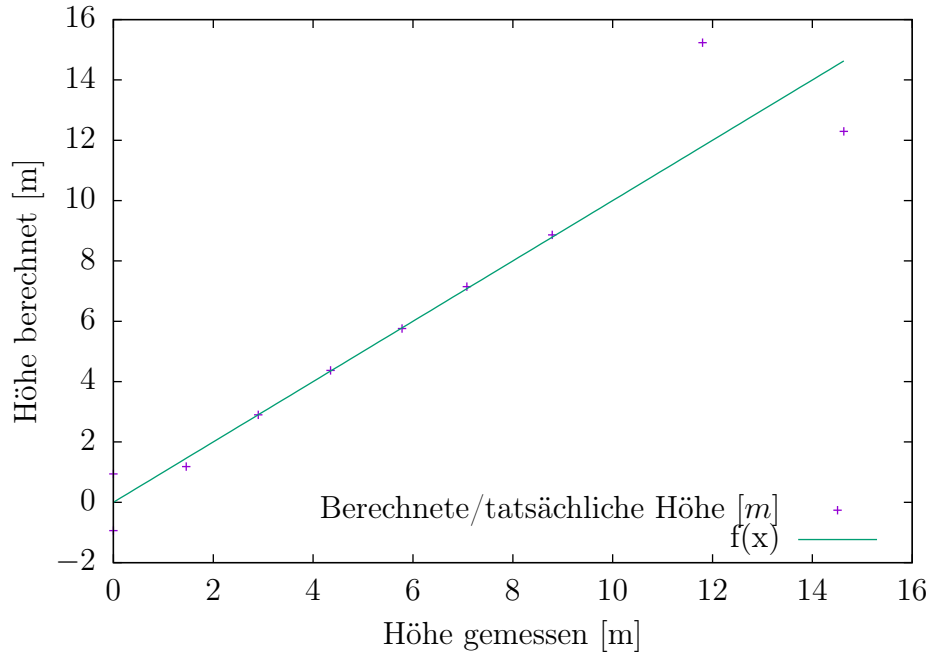
wobei  $\Delta h$  die Höhendifferenzen von  $h_0$  und  $h$  ist.

### 2.2 Durchführung

Um die Abhängigkeit von der Höhe und dem Druck zu messen, wird ein Druckmessgerät mit einer maximalen Auflösung von  $\sigma_p = 1\text{Pa}$  verwendet. Es wird das Gebäude des DLR\_School\_lab von der untersten Ebene bis zur höchsten in einzelnen Schritten vermessen. Um die Fehler gering zu halten muss die Druckmessung möglichst schnell erfolgen, da wie man anhand der Gleichung (2.1.1) erkennen kann der Druck von der Temperatur abhängt und diese in Gebäuden um mehrer grad Kelvin schwanken kann. Dennoch müssen Schwankungen in der Elektrik ausgeglichen werden, in dem über einen gewissen Zeitraum gemittelt wird. Dieser betrug bei der Messung etwa 30s.

Im Anschluss an die Messung des Drucks wird mithilfe eines Maßbandes die Höhendifferenz der einzelnen Etagen mit einer Genauigkeit von  $\sigma_h = 3\text{cm}$  vermessen, welche durch das Maßband und die unzugänglichkeit der Etagen zu begründen ist.

## 2.3 Ergebnisse



**Abbildung 6:** Zusammenhang zwischen gemessener Höhe und aus dem Druck berechneter Höhe. Zur Veranschaulichung wurde eine Ursprungsgerade mit Steigung 1 gezeichnet.

Die gemessenen Daten sind in der Abbildung 6 zu sehen. In dieser Abbildung ist die Höhe mithilfe der Gleichung (2.1.1) aus den gemessenen Druckdaten umgerechnet worden. Hierbei ist der Logarithmus aufgrund der kleinen Höhenänderung linear approximiert worden. Die gemessenen Höhendaten sind als x-Achse aufgetragen. Mithilfe der eingezeichneten Ursprungsgeraden mit Steigung 1, lässt sich das Gesetz der Barometrischen Höhenformel und der Linearisierung für die im Gebäude erreichten Höhen gut darstellen. Es ist zu erkennen, dass die Höhe gerade für die ersten 10m mit der Theorie übereinstimmt.

Ab dieser Höhe aber weichen die Werte stark von den zu erwartenden Werten ab. Die ist unter anderem mit der höheren Ungenauigkeit der Messung mithilfe des Maßbandes zu erklären. Für die letzten zwei Messpunkte war das genau ablesen nicht mehr einfach möglich, aufgrund der Geometrie des Gebäudes. Zu dem war das Maßband aufgrund seines Eigengewichtes nicht mehr in einer stabilen Position zu halten. Diese beiden Fehlerquellen erhöhen den Messfehler auf mindestens  $\sigma_h = 1\text{dm}$ . Desweiteren, war das Gebäude beheizt, was zu Änderungen der Temperatur führte, je höher man sich im Gebäude befindet. Dennoch ist für die meisten Messwerte das Gesetz nachgewiesen worden.

Um die Messung zu optimieren, müssen die freien Parameter eliminiert werden. Dieser ist im Fall der Druckmessung die Temperatur. Diese muss für die gesamte Messung konstant

gehalten werden, sprich auch für die gesamte Höhe. Da warme Luft aufsteigt, darf das Gebäude nicht beheizt werden, bzw. muss, wenn es beheizt wird eine homogene Temperatur annehmen. Letzteres ist aber nur schwer umzusetzen. Die praktikable Lösung ist hier das Gebäude in thermisches Gleichgewicht mit der umgebenen Luft zu bringen, so hat jede Höhenmessung auch die gleiche Temperatur, da die Außentemperatur als konstant für die Dauer der Messung angenommen werden kann.

## 3 Tornadoexperiment

### 3.1 Theorie

Tornados sind in der Theorie noch nicht im Detail verstanden. Es gibt aber zur Beschreibung einiger Parameter ein einfaches Modell.

Für die Geschwindigkeit  $v$  innerhalb und außerhalb des Tornados gibt es das Modell des Rankin Wirbels<sup>1</sup>. Der Tornado wird somit als ein Wirbel beschrieben. Ebenfalls nimmt das Modell an, dass der Wirbel einen Durchmesser  $R$  hat. Für die Geschwindigkeit ergibt sich somit

$$v(r) = \begin{cases} \omega r & \text{falls } r \leq R \\ \omega \frac{R^2}{r} & \text{falls } r > R \end{cases} \quad (3.1.1)$$

eine Abhängigkeit im Wirbel, die mit  $r$  dem Radius linear wächst und außerhalb des Wirbels, wie  $\frac{1}{r}$  abfällt. Hierbei ist  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit des Wirbelkerns.

### 3.2 Durchführung

Im Experiment wird ein vom DLR bereitgestellter Tornadosimulator verwendet. Dieser bietet die Möglichkeit das Geschwindigkeitsfeld des Wirbels an verschiedenen Stellen über den Betrag der Geschwindigkeit zu bestimmen. Dazu wird eine Messsonde in den Wirbel eingebracht und diese kann den Betrag der Geschwindigkeit messen. Der Tornado befindet sich in einem geschlossenen Messaufbau und kann deswegen als Zylindersymmetrisch angenommen werden. Dadurch braucht die Geschwindigkeitsänderung nur radial nach außen gemessen zu werden. Dies wird für verschiedene Höhen wiederholt.

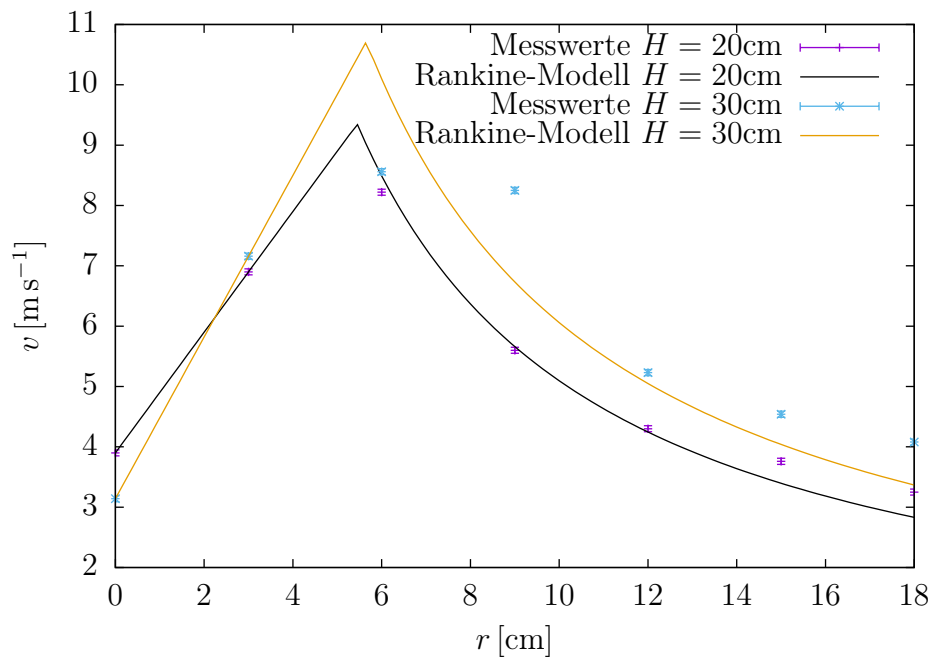
### 3.3 Ergebnisse

Die Anwendung des Rankin Wirbel Modells ist in der Abbildung 7 zu sehen. Hierbei sind die Messwerte der Geschwindigkeit für die zwei verschiedenen Höhen gegen die jeweilige Tiefe im Wirbel aufgetragen. Da bei der Messung der Wirbelkern nicht genau zu erkennen war, wurde ebenfalls angenommen, dass die Messreihe den Kern nicht zwangsweise

---

<sup>1</sup>[https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbel\\_\(Strömungslehre\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbel_(Strömungslehre))





**Abbildung 7:** Ergebnisse der Messung des Betrags der Geschwindigkeit im Tornado-simulator. Es wurde die Geschwindigkeit gegen die Tiefe des Wirbels aufgetragen. Die Kurven bilden das jeweils angepasste Rankin Wirbel Modell nach Gleichung (3.1.1).

erreicht hat. Die Kurven, die in der Abbildung zu erkennen sind, stellen das jeweilige Modell der Gleichung (3.1.1) dar. Hierbei, war auch der Radius des Tornados einer der Parameter.

Wie man erkennen kann stellt das Modell den Betrag der Geschwindigkeit in radialer Richtung bei einer Höhe von 20cm gut dar.

Bei der Kurve für eine Höhe von 30cm liegen einige der Werte außerhalb des Wirbels nicht mehr auf der vorausgesagten Kurve. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei dieser Messung zum einen die Geschwindigkeit nicht ganz radial nach außen gemessen werden konnte. Dabei war die Hauptfehlerquelle die Annahme, dass der Wirbel ortsfest und Zylindersymmetrisch ist. Im Experiment zeigte sich, dass der Wirbel, die ganze Zeit in Bewegung war und somit nicht genau gemessen werden konnte. Dieser Fehler tritt stärker auf, je höher sich die Sonde befindet, da aufgrund der Bauweise des Simulators in Bodennähe die größte Stabilität harschte.

## Literatur

- [1] Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. 24. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-12893-6.