

# Abschließender Sachbericht

## **Titel des Vorhabens:**

Leipzig Aerosol Cloud Turbulence Tunnel (LACTT)

Leibniz-Einrichtung: Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)

Aktenzeichen: SAW-2013-lfT-2

Projektlaufzeit: 01.06.2013 – 31.05.2017

Ansprechpartner: Dr. Frank Stratmann

## **Executive summary SAW-2013-Ift-2**

Obwohl sich in den letzten Jahrzehnten unser Verständnis hinsichtlich Wolken im Allgemeinen, und der in ihnen ablaufenden Prozesse im Besonderen, maßgeblich verbessert hat, stehen wir immer noch einigen fundamentalen Fragen in Bezug auf ihr Verhalten und ihre Eigenschaften gegenüber. Dies liegt darin begründet, dass Wolken hochgradig instationäre, inhomogene, und intermittierende Gebilde sind, und einen enormen Bereich räumlicher (Mikrometer bis hunderte von Kilometern) und zeitlicher (Mikrosekunden bis Stunden und Tage) Skalen umfassen. Skalenübergreifende Wechselwirkungen zwischen turbulenter Fluidynamik und wolkenmikrophysikalischen Prozessen beeinflussen das Wolkenverhalten und die Wolkenentwicklung. Ferner treten Wolken an gewöhnlich schwer zu erreichenden Orten (hoch über dem Erdboden) auf, was die wissenschaftlich notwendige umfassende Charakterisierung von Wolken und ihrer Umgebung sehr erschwert. Darüber hinaus ist keine Wolke wie die andere, was die Betrachtung einer großen Anzahl von Wolken erforderlich macht. In anderen Worten, die Untersuchung atmosphärischer Wolken ist ein ehrgeiziges, sehr teures und teilweise unmögliches Unterfangen.

Um das Verhalten von Wolken, und speziell die Wechselwirkungen zwischen Turbulenz und wolkenmikrophysikalischen Prozessen, besser verstehen und quantifizieren zu können, sind deshalb atmosphärische Beobachtungen alleine bei Weitem nicht ausreichend. Daher bilden Laboruntersuchungen unter wohl definierten und reproduzierbaren Bedingungen einen unersetzlichen Bestandteil der Wolkenforschung.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren, aufgrund der hohen experimentellen Anforderungen bzgl. der Genauigkeit und der Reproduzierbarkeit der experimentellen Parameter, nur sehr wenige bzw. gar keine experimentellen Aufbauten zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Turbulenz und wolkenmikrophysikalischen Prozessen im Labor verfügbar. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes SAW-2013-Ift-2 am TROPOS ein neuartiger Feuchtluft-Windkanal aufgebaut, in Betrieb genommen und in ersten Messungen getestet.

Im Zuge dieser Arbeiten wurde zunächst über eine 3-dimensionale Charakterisierung der fluiddynamischen und thermodynamischen Zustände im Windkanal die prinzipielle Funktion des Kanals geprüft und nachgewiesen. Im nächsten Schritt wurden ein digitales in-line Holographiesystem (HoloPi) und der Aerosolsensor wlas 2300 am Windkanal installiert und erfolgreich zur Charakterisierung von Aerosolpartikeln und aktivierten Wolkentropfen eingesetzt. Unter Verwendung dieser Geräte konnte klar gezeigt werden, dass es möglich ist, Wolkenaktivierungsprozesse unter turbulenten Strömungsbedingungen im Kanal zu untersuchen. In ersten diesbezüglichen Experimenten ließ sich bereits der Einfluss der Aerosolpartikelkonzentration auf die Wolkentropfenanzahl, und erste Indizien für den Einfluss turbulenter Übersättigungsfluktuationen auf das Aktivierungsverhalten von Wolkentropfen beobachten.

Der Windkanal und die ersten an ihm gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse wurden im Rahmen des „International Workshop on Cloud Microphysics - Turbulence Interaction“, und internationalen Konferenzen (ICCP in Manchester, UK (2016); EGU General Assembly in Vienna, Austria (2017); DFD meeting in Denver, CO, USA (2017)), einem breitem Fachpublikum vorgestellt. Der Windkanal wird in der Fachwelt bereits als Infrastruktur zur Erforschung von Turbulenz-Wolkenmikrophysik-Wechselwirkungsprozessen wahrgenommen.

Mit 16 Erscheinungen in mehrheitlich überregionalen Medien (Print, Radio, Fernsehen) wurde der Windkanal auch in das Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit gebracht.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeine Angaben .....	3
1.1	Vorhaben/Geschäftszeichen .....	3
1.2	Antragstellende Leibnizeinrichtung .....	3
1.3	Förderline .....	3
1.4	Thema des Vorhabens .....	3
1.5	Berichts-/Förderzeitraum .....	3
1.6	Liste der Publikationen .....	3
2.	Arbeits- und Ergebnisbericht.....	4
2.1	Ausgangsfragen und Ziele des Vorhabens .....	4
2.2	Entwicklung der durchgeführten Arbeiten .....	4
2.3	Darstellung der erreichten Ergebnisse und Diskussion.....	5
2.3.1	Darstellung des Feuchtluft-Windkanals.....	5
2.3.2	Charakterisierung des Windkanals.....	8
2.3.3	Funktionsprinzip und Installation des holographischen Systems .....	14
2.3.4	Erste Experimente am Windkanal mit HoloPi und welas 2300 .....	15
2.3.5	Fazit der ersten Wolkenuntersuchungen am neuen Feuchtluft-Windkanal.....	19
2.4	Anwendungsperspektiven und Folgevorhaben .....	19
2.5	Wirtschaftliche Verwertbarkeit.....	20
2.6	Kooperationspartner im In- und Ausland.....	20
2.7	Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses .....	20
2.8	Mittelverwendung .....	21
2.9	Literatur .....	21
	Appendix 1: Medienercheinungen.....	22

## Sach- und Verwendungsbericht zum Vorhaben

### 1. Allgemeine Angaben

- 1.1 Vorhaben/Geschäftszeichen: SAW-2013-IfT-2
- 1.2 Antragstellende Leibnizeinrichtung: Institut für Troposphärenforschung, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig
- 1.3 Förderlinie: „Particularly innovative and high-risk projects“
- 1.4 Thema des Vorhabens: Leipzig Aerosol Cloud Turbulence Tunnel (LACTT)
- 1.5 Berichts-/Förderzeitraum: 01.06.13 – 31.05.17 (kostenneutrale Verlängerung)

### 1.6 Liste der Publikationen:

#### Konferenzbeiträge:

Voigtländer, J., D. Niedermeier, H. Siebert, J. Schumacher, R. A. Shaw, and F. Stratmann (2016), LACIS-T - A wind tunnel for investigating the interactions between cloud microphysics and turbulence, paper presented at 17th International Conference on Clouds and Precipitation (ICCP), International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS), Manchester, UK, 25 - 29 July 2016.

Voigtländer, J., D. Niedermeier, H. Siebert, R. Shaw, J. Schumacher, and F. Stratmann (2017), LACIS-T - A humid wind tunnel for investigating the interactions between cloud microphysics and turbulence, paper presented at EGU General Assembly 2017, European Geosciences Union, Vienna, Austria, 23 - 28 April 2017.

Niedermeier, D., J. Voigtländer, H. Siebert, N. Desai, R. A. Shaw, K. Chang, S. Krüger, J. Schumacher, and F. Stratmann (2017), LACIS-T - A moist air wind tunnel for investigating the interactions between cloud microphysics and turbulence, paper presented at 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, CO, USA, 19 - 21 November 2017.

#### Workshopbeiträge:

Stratmann, F., J. Voigtländer, and D. Niedermeier (2017), Can we understand clouds without turbulence?, paper presented at International Workshop on Cloud Microphysics - Turbulence Interaction, Leipzig, Germany. 28 February - 1 March 2017.

Stratmann, F., D. Niedermeier, J. Voigtländer, D. Busch, J. Schumacher, and R. A. Shaw (2017), The new turbulent Leipzig Aerosol Cloud Interaction Simulator (LACIS-T): Design and first results, paper presented at 2nd International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya, Japan, 8 - 10 March 2017. (eingeladener Vortrag)

### Liste der Pressemitteilungen und Medienberichte:

Im Einzelnen erfolgten eine Pressemitteilung zur Eröffnung des Windkanals, sowie 9 Erscheinungen in Printmedien, 4 im Radio, und 3 im Fernsehen. Ferner sind uns 13 Online-Erscheinungen bekannt. Im Rahmen des Projektes wurden weiterhin ein internationaler Workshop und die offizielle Einweihung des Windkanals organisiert. Eine detaillierte Aufstellung der Medienerscheinungen ist in Appendix 1 zu finden.

## **2. Arbeits- und Ergebnisbericht**

### **2.1 Ausgangsfragen und Ziele des Vorhabens**

Vor über 50 Jahren publizierte Henry Houghton einen Aufsatz mit dem Titel "Cloud physics: Not all questions about nucleation, growth, and precipitation of water particles are yet answered" (1). Obwohl sich seitdem unser Verständnis hinsichtlich der in Wolken ablaufenden Prozesse maßgeblich verbessert hat, stehen wir immer noch einigen der fundamentalen Fragen gegenüber, auf die Houghton damals die Aufmerksamkeit richtete. Warum ist dies so, und warum ist unser Wissen über Wolken immer noch unvollständig?

Atmosphärische Wolken sind hochgradig instationär, inhomogen, intermittierend, und umfassen einen enormen Bereich räumlicher (Mikrometer bis hunderte von Kilometern) und zeitlicher (Mikrosekunden bis Stunden und Tage) Skalen. Skalenübergreifende Wechselwirkungen zwischen turbulenter Fluidodynamik und wolkenmikrophysikalischen Prozessen beeinflussen das Wolkenverhalten und die Wolkenentwicklung. Turbulenz treibt Prozesse wie Entrainment und Mischung an und führt zu starken Fluktuationen in Temperatur, Feuchte, Aerosolpartikelkonzentrationen, Wolkentropfenanzahl und -größe (3). Sie beeinflusst sowohl Phasenübergangsprozesse wie Wolkentropfenbildung, -wachstum / -verdampfung und -gefrieren, als auch die Kollision und das Zerplatzen von Wolkentropfen. Diese Prozesse wiederum können über Auftriebs- und Widerstandskräfte Rückwirkungen auf die Turbulenz haben und wolkendynamische Prozesse bis hin zu den größten Skalen beeinflussen (5,6,7,8).

Wolken sind nicht nur hochkomplexe Systeme, sie treten darüber hinaus an gewöhnlich schwer zu erreichenden Orten (hoch über dem Erdboden) auf. Dieser Umstand macht die wissenschaftlich notwendige umfassende Charakterisierung von Wolken und ihrer Umgebung sehr schwierig. Darüber hinaus ist keine Wolke wie die Andere, was die Betrachtung einer großen Anzahl von Wolken erforderlich macht. Die Untersuchung atmosphärischer Wolken ist somit ein ehrgeiziges, sehr teures und teilweise unmögliches Unterfangen.

Um das Verhalten von Wolken im Allgemeinen, und die Wechselwirkungen zwischen Turbulenz und wolkenmikrophysikalischen Prozessen im Speziellen, besser verstehen und quantifizieren zu können, sind deshalb atmosphärische Beobachtungen alleine bei Weitem nicht ausreichend, und intensive Laboruntersuchungen unter wohl definierten und reproduzierbaren Bedingungen bilden einen unersetzlichen Bestandteil der Wolkenforschung (9).

Allerdings waren aufgrund der hohen experimentellen Anforderungen bzgl. der Genauigkeit und der Reproduzierbarkeit der experimentellen Parameter (z.B. Temperatur, Feuchte, Partikeleigenschaften, Turbulenzparameter) zum Zeitpunkt der Antragstellung nur sehr wenige bzw. gar keine derartigen experimentellen Aufbauten für Untersuchungen im Labor verfügbar.

Daher wurde im Rahmen des geförderten Projektes am TROPOS ein neuartiger Feuchtluft-Windkanal aufgebaut, in Betrieb genommen und in ersten Messungen getestet. Über die in diesem Zusammenhang durchgeführten Arbeiten und die dabei gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wird in Abschnitt 2.3. berichtet.

### **2.2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten**

Die im Rahmen des Projektes geplanten Arbeiten konnten in vollem Umfang durchgeführt werden. Allerdings mussten, aufgrund von Personalangelegenheiten (familienbedingter Wechsel des Projektbearbeiters in ein anderes Beschäftigungsverhältnis) und

unvorhersehbaren bautechnischen Problemen und Verzögerungen, speziell beim Aufbau der externen Versorgungseinrichtungen (Kältemaschinen, Stromversorgung, etc.) des Windkanals, zwei kostenneutrale Verlängerungen des Projektes beantragt werden.

## 2.3 Darstellung der erreichten Ergebnisse und Diskussion

### 2.3.1 Darstellung des Feuchtluft-Windkanals

Im Rahmen des Projektes wurde im Wolkenlabor des TROPOS (Abb. 1, oben links) ein neuartiger Feuchtluft-Windkanal (Abb. 1) errichtet, in Betrieb genommen, und getestet.

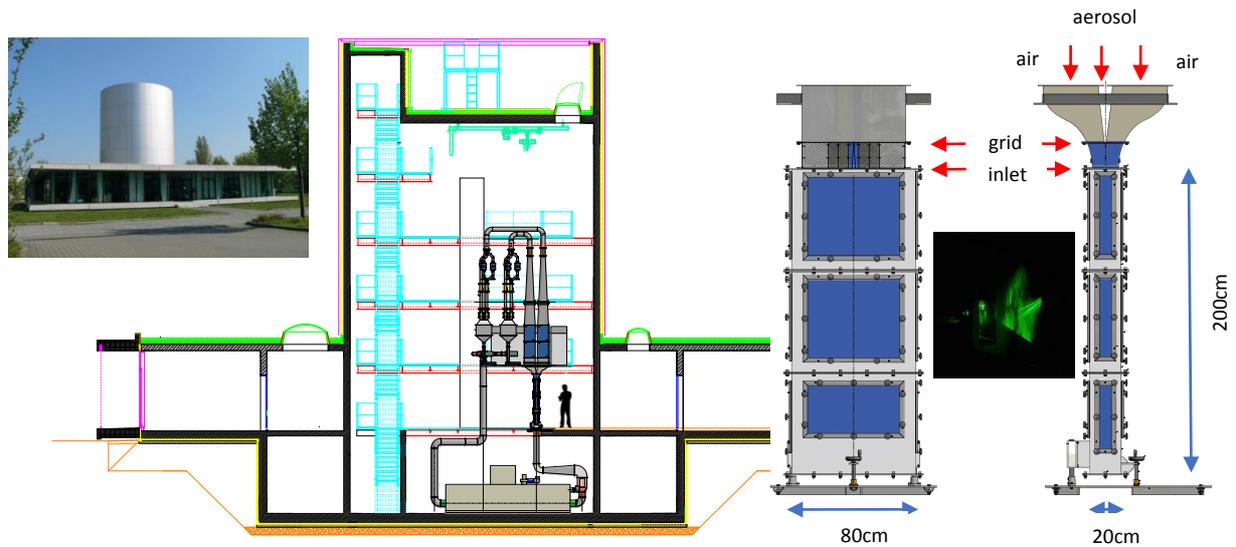


Abb. 1: Schematische Darstellung des Feuchtluft-Windkanals im TROPOS Wolkenlabor und Foto des Wolkenlaborgebäudes (linkes Bild). Auf der rechten Seite ist die Messstrecke schematisch dargestellt sowie deren Abmessungen angegeben. Die Position der Partikelinjektion befindet sich an dem Punkt, an dem sich die beiden partikelfreien Luftströme „air“ (s. rechtes Bild, oben) zu vermischen beginnen („inlet“).

Bei dem Kanal handelt es sich um einen geschlossenen Kanal, in dem die Luft kontinuierlich mit einem Volumenstrom von bis zu 10000 l/min zirkuliert. Die eigentliche Messstrecke (Abb. 1, rechts) des Kanals hat eine Länge von 2 m, eine Breite von 80 cm und eine Tiefe von 20 cm. Die Wolkenbildung (Foto der „Wolke“ in Abb. 1, rechts) erfolgt über turbulente Mischung dreier konditionierter Ströme (d.h. zwei partikelfreie Luftströme, „air“, und ein Aerosolstrom, „aerosol“) und wird am Eintritt in die Messstrecke initiiert. Die zur Mischung der Ströme notwendige Turbulenz wird über zwei passive, planare Gitter in den Luftströmen (je ca. 5000 l/min) erzeugt. Die Maschenweite der Gitter beträgt 19 mm, die Kantenlänge der Streben 5 mm. Dadurch werden ca. 30% des Flusses gestaut. Die Luftströme werden über Nafion-Befeuchter (Permapure Inc.) definiert befeuchtet und über zwei separate Wärmetauscher temperiert. Der Aerosolstrom (ca. 3 l/min) wird in die Mischungszone der beiden Luftströme eingebracht, 20 cm unterhalb der Turbulenzgitter. In der Messstrecke erfolgt die Charakterisierung der jeweiligen fluid- und thermodynamischen Zustände, sowie der mikrophysikalischen Eigenschaften der gebildeten Wolke (Tropfengröße, Tropfenanzahl, usw.). Nach dem Passieren der Messstrecke erfolgt die Trocknung des gesamten Stromes, der dann wieder in zwei Ströme aufgespalten wird, welche durch Gebläse angetrieben und durch Filter gereinigt werden, bevor wiederum die Befeuchtung erfolgt.

Nachstehend werden, zur Vermittlung eines optischen Eindrucks des Windkanals, dessen wichtigste Komponenten (Gebläse, Filter, Befeuchter, Wärmetauscher, Messstrecke,

Trockner) mittels Fotografien vorgestellt. Auf die detaillierte Angabe der genauen Spezifikationen der einzelnen Komponenten wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, weil sie den Rahmen dieses Berichtes sprengen würde.



*Abb. 2: Links: Zwei Gebläse dienen als Antrieb für den Windkanal, jeweils ein Gebläse pro Luftstrang. Rechts: Über jedem Gebläse befindet sich jeweils ein Partikelfilter. Darüber liegen die pneumatisch angetriebenen Ventile mit denen der gewünschte Volumenfluss eingestellt werden kann.*



*Abb. 3: Links: Das Befeuchtungssystem des Windkanals. In jedem Luftstrang befinden sich jeweils drei Nafion Befeuchter mit denen die Luft im Windkanal auf eine definierte Wasserdampfmenge befeuchtet werden kann (definierter Taupunkt). Dafür werden die Nafionröhren innerhalb eines Befeuchters von Wasser mit einer definierten Temperatur (diese entspricht der Taupunktstemperatur) umspült. Die drei Befeuchter eines Stranges befinden sich deshalb jeweils in einem geschlossenen Wasserkreislauf (Bild rechts oben), der durch jeweils eine Pumpe betrieben wird. Darin befindet sich jeweils ein Wärmetauscher, der mit jeweils einem Thermostat (Huber Kältemaschinenbau AG) verbunden ist (Bild rechts unten). Zusätzlich zu den drei Befeuchtern pro Strang ist noch je eine Leitung ohne Befeuchtung vorhanden, um durch Mischen von trockener und befeuchteter Luft Taupunkte unterhalb von 0°C einstellen zu können, bzw. um trockene Luft in die Messstrecke einspeisen zu können.*

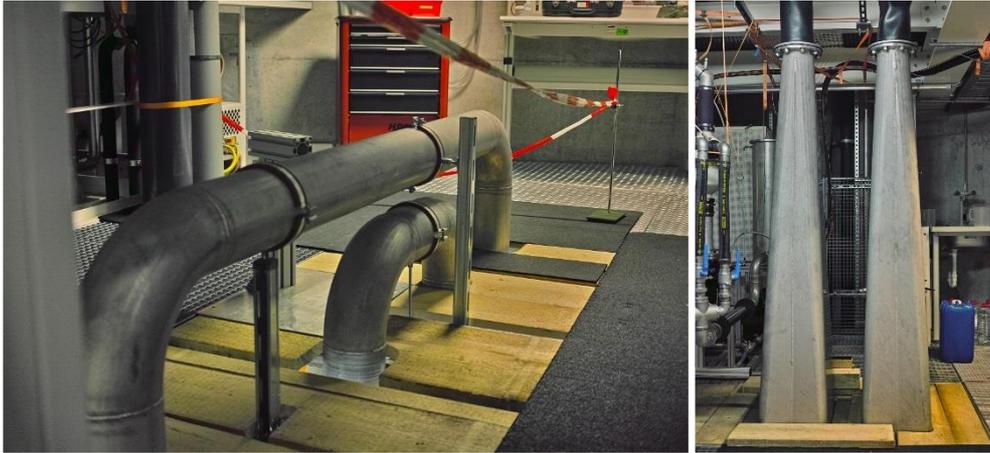


Abb. 4: Im oberen Stockwerk des Wolkensturms werden die beiden Luftströme umgelenkt (linkes Bild), um danach wieder nach unten geführt werden zu können. Dabei werden sie durch jeweils einen Diffusor (rechtes Bild) geleitet, um von einem runden Querschnitt auf einen rechteckigen Querschnitt zu gelangen. Dieser wird für den Eingang in die Kühler benötigt.

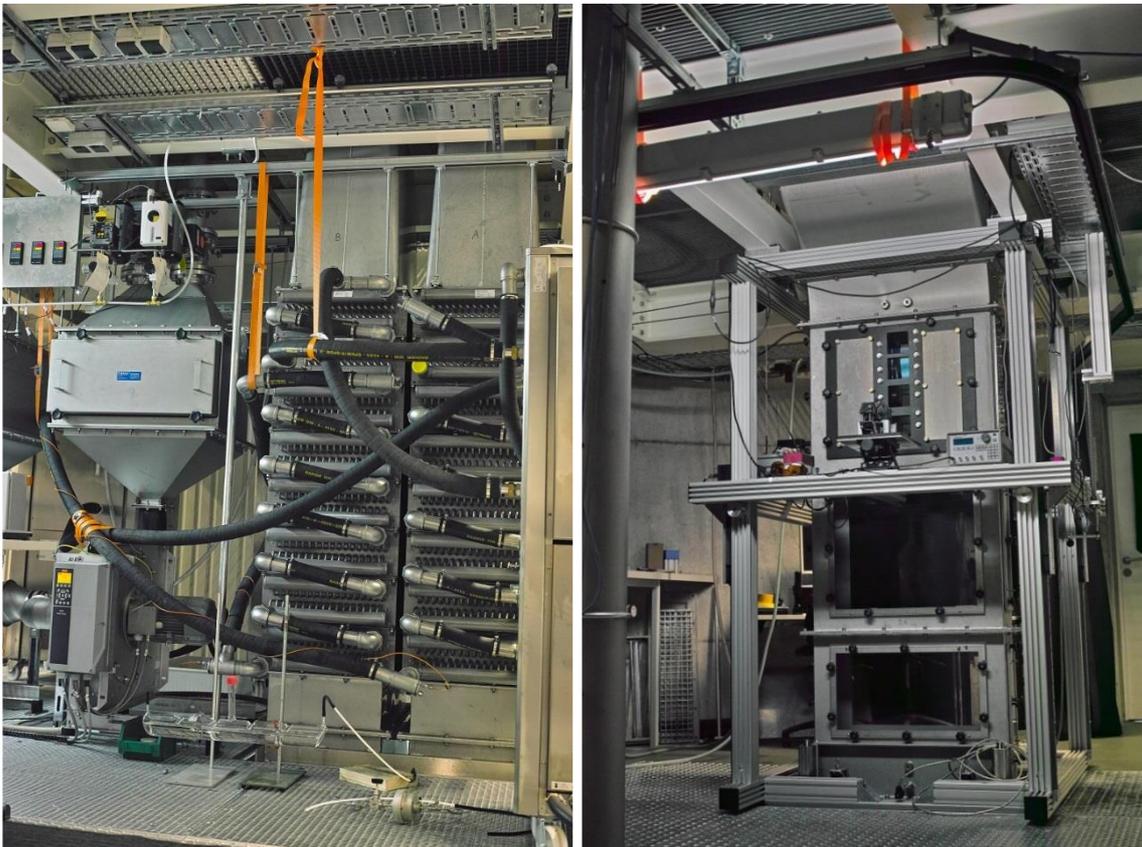


Abb. 5: Linkes Bild: Auf der rechten Seite des Bildes sind die Kühler zu sehen. Diese bestehen jeweils aus einem Vor- und einem Nachkühler. In jedem Kühler befindet sich eine Kühlflüssigkeit, welche über Thermostate (Huber Kältemaschinenbau AG, nicht im Bild) auf eine definierte Temperatur geregelt werden kann. Rechtes Bild: Foto der Messstrecke. Um diese wurde ein Rahmen geschaffen, an dem geeignete Messgeräte installiert werden können (in diesem Fall das digitale in-line holographische System, s. Kap. 2.3.3 und 2.3.4). An den Seitenwänden des Windkanals wurden spezielle Glasfenster für die Messungen mit dem holographischen System angebracht.



*Abb. 6: Im Keller des Wolkenlabors befindet sich der Trockner zur Rekonditionierung des Durchflusses auf eine vorgegebene Taupunkt- und Luftvorlauftemperatur. Damit ist der Kreislauf komplett und der Zyklus wird erneut gestartet.*

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass am TROPOS mit dem im Rahmen dieses Projektes errichteten, in Betrieb genommenen und getesteten neuen Feuchtluft-Windkanals ein weltweit einzigartiges Laborexperiment zur Verfügung steht, mit dem die Wechselwirkungen zwischen Turbulenz und wolkenmikrophysikalischen Prozessen untersucht werden können. In naher Zukunft sollen an diesem neuen Feuchtluft-Windkanal die Auswirkungen von Turbulenz auf das hygroskopische Wachstum von Aerosolpartikeln sowie die Wolkentropfenaktivierung und das Gefrieren von unterkühlten Wolkentropfen untersucht werden.

### **2.3.2 Charakterisierung des Windkanals zur Ermittlung geeigneter Randbedingungen für experimentelle Untersuchungen**

Die Charakterisierung des Windkanals umfasste die strömungstechnischen und thermodynamischen Eigenschaften innerhalb der Messstrecke. Konkret wurden hochauflösende Messungen von Geschwindigkeit (d.h. Hot-Wire Anemometer von Dantec Dynamics für Fluktuationen und Mittelwert), Temperatur (d.h. Thermoelemente und Pt100 Sensoren für Mittelwerte und Cold-Wire Sensor von Dantec Dynamics für Fluktuationen) und mittlerer relativer Luftfeuchtigkeit (d.h. Taupunktspiegel MBW 973 von MBW Calibration) auf der Dezimeter- bis hin zur Kolmogorov-Skala durchgeführt, um sicherzustellen, dass die gewünschten Spezifikationen des Windkanals erfüllt werden, bzw. um mögliche Probleme und Erfordernisse zu identifizieren. Parallel dazu wurden zur exakten Bestimmung der Strömungs- und thermodynamischen Bedingungen in der Messstrecke numerische Strömungsmechanik Simulationen (CFD Simulationen) mit Ansys Fluent und OpenFOAM durchgeführt und mit den experimentellen Daten verglichen. Die numerischen Simulationen sollen auch die Randbedingungen für die späteren Experimente liefern, die zur Auslegung und Planung der Experimente herangezogen werden.

Zunächst wurden das Strömungsfeld und die turbulenten Fließeigenschaften für einen einfachen Fall mit trockener Luft und ohne Temperaturgradienten untersucht, d.h. beide Luftströme hatten die gleiche Temperatur ( $T = 22,85^{\circ}\text{C}$ , entsprechend 296 K) und das Befeuchtungssystem wurde umgangen. In Abb. 7 ist die mittlere Geschwindigkeit, deren Fluktuation sowie die daraus abgeleitete Dissipationsrate, wie sie 30 cm unterhalb des

Turbulenzgitters gemessen/bestimmt wurden, dargestellt. Abgesehen von den Bereichen nahe der Kanalwand und in der Mitte des Kanals (bei ausgeschaltetem Aerosolfluss) ist das mittlere Geschwindigkeitsprofil homogen. Durch Einschalten des Aerosolflusses (isokinetische Flussbedingungen) wird letztere Inhomogenität in der Kanalmitte ebenfalls beseitigt. Somit werden sich auf die Untersuchungen negativ auswirkende Schereffekte vermieden. Ein ähnliches Verhalten trifft auf die Fluktuationen zu, welche als RMS-Geschwindigkeitswert dargestellt sind. Die Dissipationsrate liegt im Bereich von  $2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^3$ , ein Wert wie er in der Atmosphäre in Cumulus-Wolken vorkommt.

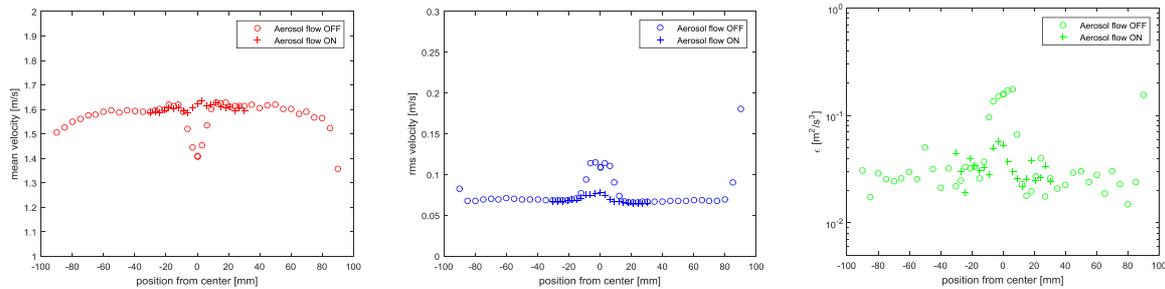


Abb. 7: Zeitgemittelte Geschwindigkeits-, RMS-Geschwindigkeits- und Dissipationsratenprofile entlang des mittleren Bereichs (Position 0 entspricht der Mitte des Kanals, entsprechend 10 cm von beiden Seitwänden entfernt) und 30 cm unterhalb der Gitterposition. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Hot-Wire-Messungen (bei 6000 Hz), die im mittleren Bereich des Windkanals unter einer Gitteröffnung durchgeführt wurden. Gemessen wurde mit (Kreuze) und ohne (offene Kreise) eingeschaltete Aerosolströmung.

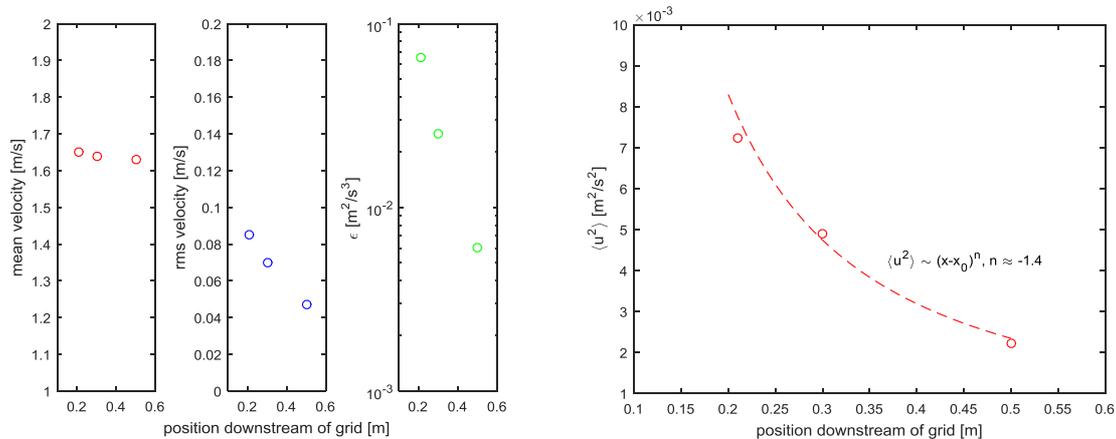


Abb. 8: Die in Abb. 7 gezeigten Studien wurden für drei verschiedene Höhen unterhalb des Turbulenzgitters durchgeführt. Die Werte für mittlere Geschwindigkeit, RMS-Geschwindigkeit und Dissipationsrate werden im Bereich von -50 mm bis +50 mm (eingeschalteter Aerosolfluss) gemittelt und sind in den drei linken Abbildungen dargestellt. In der rechten Abbildung ist der Abfall der turbulenten kinetischen Energie dargestellt (Geschwindigkeitsschwankungen quadriert und dann gemittelt). Er folgt einer Potenzfunktion mit einem Exponenten von -1.4.

In Abbildung 8 sind die über den homogenen Bereich gemittelten Werte für mittlere Geschwindigkeit, RMS-Wert sowie Dissipationsrate für drei verschiedene Abstände zum Turbulenzgitter dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die mittlere Geschwindigkeit konstant bleibt, während die Fluktuationen und damit auch die Dissipationsrate mit zunehmenden Abstand zum Turbulenzgitter abnehmen. Diese beobachtete Abnahme der turbulenten kinetischen Energie folgt einer Potenzfunktion (Abb. 8, rechtes Bild). Der Exponent liegt bei -1.4 und ist vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Windkanal-Untersuchungen (10).

Das turbulente Spektrum für die Geschwindigkeitsfluktuationen ist beispielhaft in Abb. 9 dargestellt. Eine rote Linie mit  $-5/3$  Steigung, die für den Inertialbereich der turbulenten

Energiekaskade erwartet wird, ist als Referenz dargestellt. Dadurch wird ersichtlich, dass sich der Inertialbereich über weniger als eine Größenordnung erstreckt, was aufgrund der geringen Maschenweite des Turbulenzgitters allerdings auch zu erwarten war.

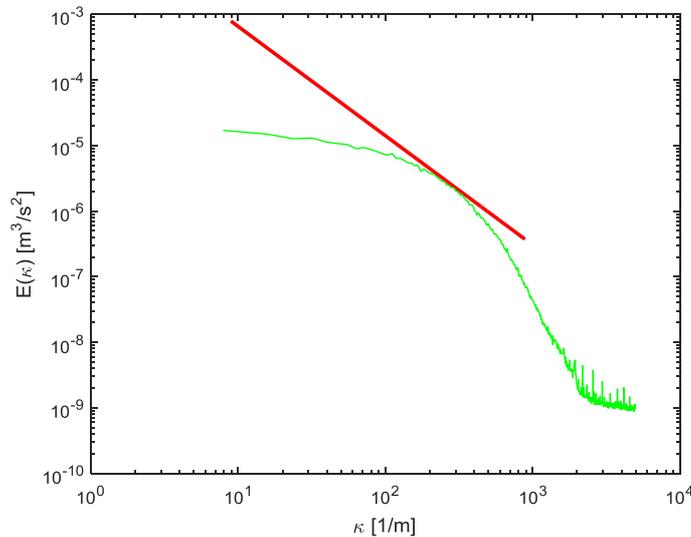


Abb. 9: Turbulentes Geschwindigkeitsleistungsspektrum als Funktion der Wellenzahl für die in Abb. 8 dargestellten Bedingungen bei +40 mm Abstand vom Zentrum (grüne Linie) und 30 cm unterhalb des Gitters. Eine rote Linie mit -5/3 Steigung, die für den Inertialbereich der turbulenten Energiekaskade erwartet wird, ist als Referenz dargestellt. Taylors „Frozen Flow“ Hypothese wurde benutzt, um von der Zeit- in die Raumsphäre zu transferieren.

Abbildung 10 zeigt zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofile in vier verschiedenen Höhen einschließlich der Vorhersage aus dem numerischen Modell (Fluent-Simulation). Es wird eine vereinfachte Darstellung für eine Seite der Messstrecke gewählt, da sich die Messstrecke nahezu symmetrisch verhält. Die Diagramme zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Werten für die zeitgemittelte Geschwindigkeit. Im Detail prognostiziert das numerische Modell etwas höhere Werte für die mittlere Geschwindigkeit im nahen Wandbereich.

Die bisherigen Untersuchungen wurden für isotherme und trockene Bedingungen durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde für weiterhin trockene Verhältnisse ein Temperaturunterschied von  $\Delta T = 9$  K zwischen beiden Strängen eingestellt. Die gemessene mittlere Temperatur, sowie die RMS-Temperaturwerte sind in Abb. 11 dargestellt. Außerdem sind die Ergebnisse der Simulationen für die mittlere Temperatur ebenfalls in der Abbildung enthalten. Die Verwendung eines stationären Modells in den Simulationen erlaubt es, die numerischen Ergebnisse mit den zeitgemittelten Temperaturmessungen zu vergleichen. Abb. 11 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Daten. Weiter flussabwärts (Abb. 11, unten) überschätzt das numerische Modell die Breite der turbulenten Mischzone. In den RMS-Temperaturen wird die Breite der Mischzone ebenfalls deutlich. Zusätzlich führen thermische Wandeffekte zu einer Erhöhung der RMS-Temperatur zur Wand hin. Dieser Wandeffekt, welcher in naher Zukunft durch eine geeignete Isolation der Messstrecke beseitigt werden wird, wirkt sich jedoch vernachlässigbar auf die Mischzone aus.

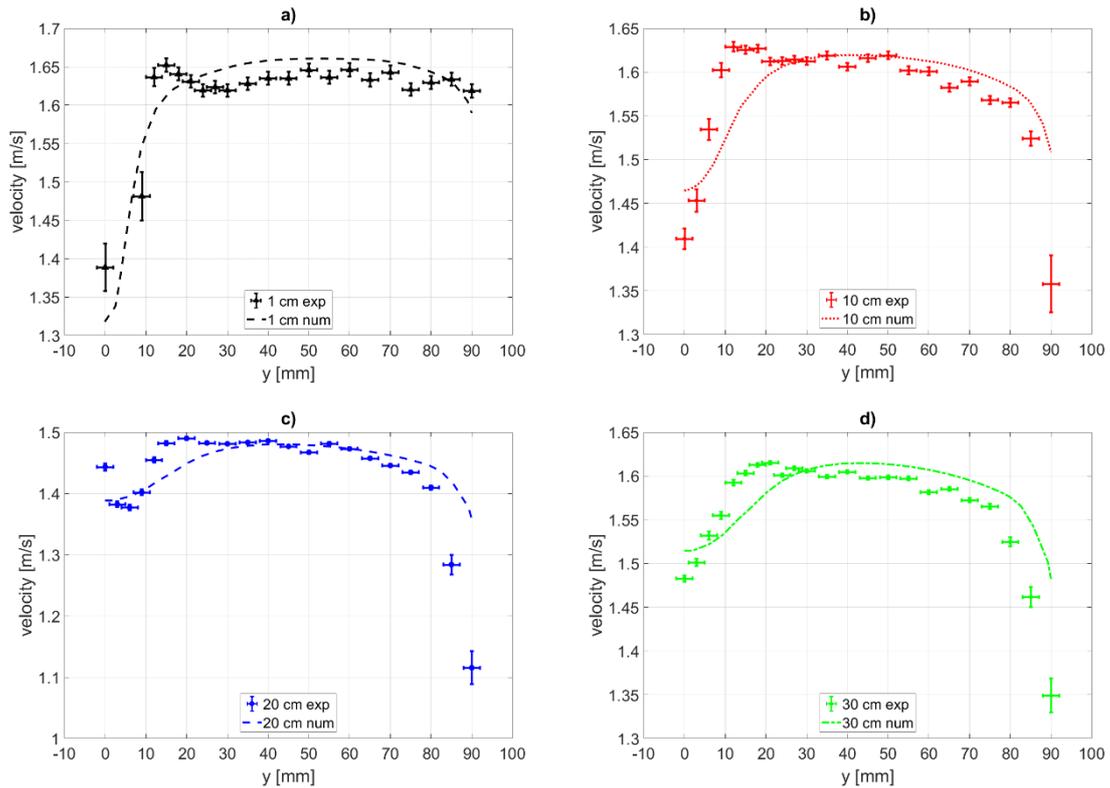


Abb. 10: Vergleich der Fluent-Simulationen mit Messungen der mittleren Geschwindigkeit in vier versch. Höhen unterhalb des Turbulenzgitters.

Nach der Untersuchung der turbulenten Temperaturmischung in trockener Luft wird nun der Fall mit feuchter Luft betrachtet. Die Feuchte im Kanal wird durch die Einstellung der Taupunkttemperatur  $T_d$  am Befeuchtungssystem kontrolliert. Die Taupunkttemperatur wurde in beiden Strängen auf  $12^\circ\text{C}$  eingestellt, die Temperatureinstellungen entsprachen denen des vorherigen Testfalls. Der mittlere Taupunkt im Kanal wurde mit einem Taupunktspiegel (MBW 973) ermittelt. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde aus der Taupunkttemperatur und der Luftströmungstemperatur berechnet, basierend auf der empirischen August-Roche-Magnus-Formel. Im Folgenden werden die zeitgemittelten Werte dargestellt, exemplarisch für die Bedingungen 50 cm unterhalb des Turbulenzgitters.

Die Daten in Abb. 12 zeigen eine nahezu konstante Taupunkttemperatur. Die Unterschiede (etwas geringere Werte bei positiven  $y$ -Positionen) liegen im Bereich der Unsicherheit des Befeuchtungssystems ( $\pm 0,3$  K). Wie in den vorangegangenen Testfällen wurde die Temperatur für jede Sensorposition entlang eines horizontalen Profils aufgezeichnet. Das numerische Modell überschätzt die Breite der turbulenten Mischzone erneut. Da die Taupunkttemperatur entlang des Profils nahezu konstant ist, hängt die relative Luftfeuchtigkeit im Wesentlichen nur von der Temperatur ab, und das numerische Modell weist äquivalente Abweichungen auf. Die Temperaturwerte zeigen ein sehr ähnliches Verhalten wie in Abb. 11 (unteres linkes Bild). Der Einfluss der erhöhten Luftfeuchtigkeit im Luftstrom auf die Temperaturkurve ist sehr gering.

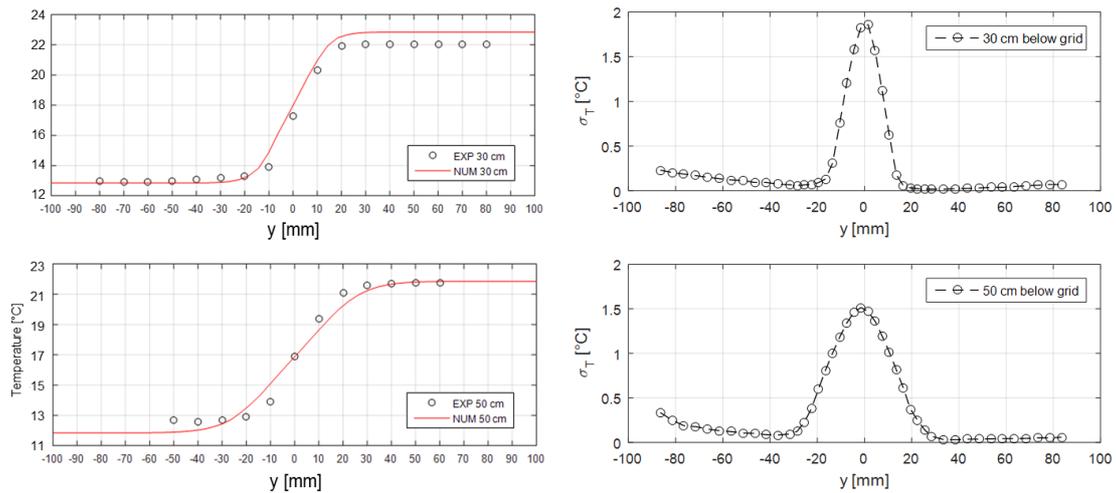


Abb. 11: Mittlere Temperatur (linke Bilder) gemessenen mit einem Pt100 und deren Fluktuationen (rechte Bilder) gemessen mit einem Cold-Wire Anemometer (Dantec Dynamics) an zwei unterschiedlichen Positionen unterhalb des Turbulenzgitters: 30cm (obere Bilder) und 50cm (untere Bilder). Zusätzlich sind in den linken Bildern die entsprechenden Simulationsergebnisse für die mittlere Temperatur dargestellt. Der Temperaturunterschied zwischen beiden Strängen beträgt 9K. Die Luft in beiden Strängen ist trocken ( $T_d = -15^\circ\text{C}$ ).

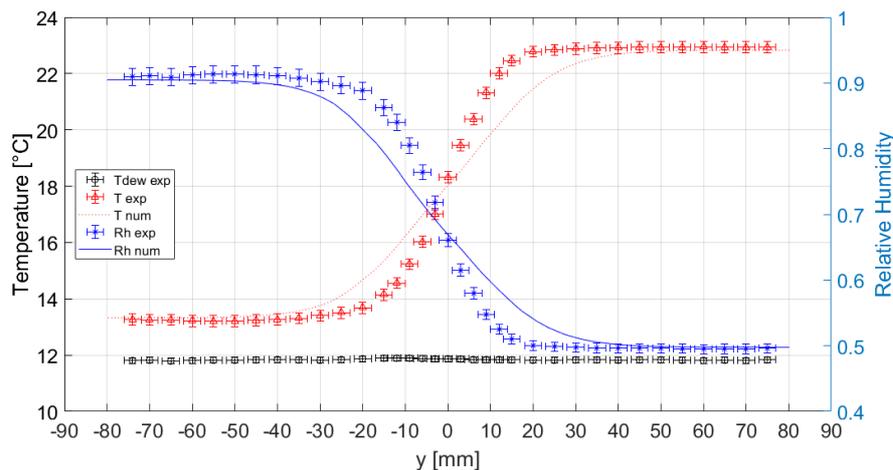


Abb. 12: Mittlere Temperatur- und RH-Profile für nicht-isotherme ( $\Delta T = 10\text{K}$ ) und feuchte Bedingungen ( $T_d = 12^\circ\text{C}$ , schwarze Punkte) gemessen 50 cm unter des Turbulenzgitters. Zusätzlich befinden sich die entsprechenden Simulationsergebnisse für die mittlere Temperatur und relative Feuchte im Bild.

Erste Strömungssimulationen wurden auch mit dem Open-Source-CFD-Code OpenFOAM durchgeführt. Um einen noch detaillierteren Einblick in die turbulente Schwankungen von Geschwindigkeit, und – später – Temperatur und Luftfeuchtigkeit, zu erhalten, wurde dabei eine Large Eddy Simulation (LES) für die Turbulenzmodellierung eingesetzt. Als beispielhaftes Ergebnis ist der zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsbetrag in verschiedenen Ebenen in Abb. 13 links dargestellt. Die beiden vertikalen Ebenen befinden sich unterhalb eines Stabes des Turbulenzgitters (rechte Ebene) bzw. unterhalb der Mitte zwischen zwei Gitterstäben (linke Ebene). Die vier horizontalen Ebenen befinden sich in den Höhen, in denen Messungen durchgeführt wurden. Es sind verschiedene Merkmale der Strömung zu erkennen. So ist z.B. das Gittermuster in der Höhe des Aerosoleinlasses noch zu beobachten, und der Geschwindigkeitsabfall unterhalb des Aerosoleinlasses verschwindet nur langsam entlang der Strömung. Die Diagramme in Abb. 13 rechts zeigen einen Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für den zeitlich gemittelten Turbulenzgrad in den horizontalen Ebenen

aus Abb. 13 links entlang der y-Achse. Sowohl qualitativ als auch quantitativ kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, auch wenn die Simulation die Turbulenzintensität leicht überbewertet.

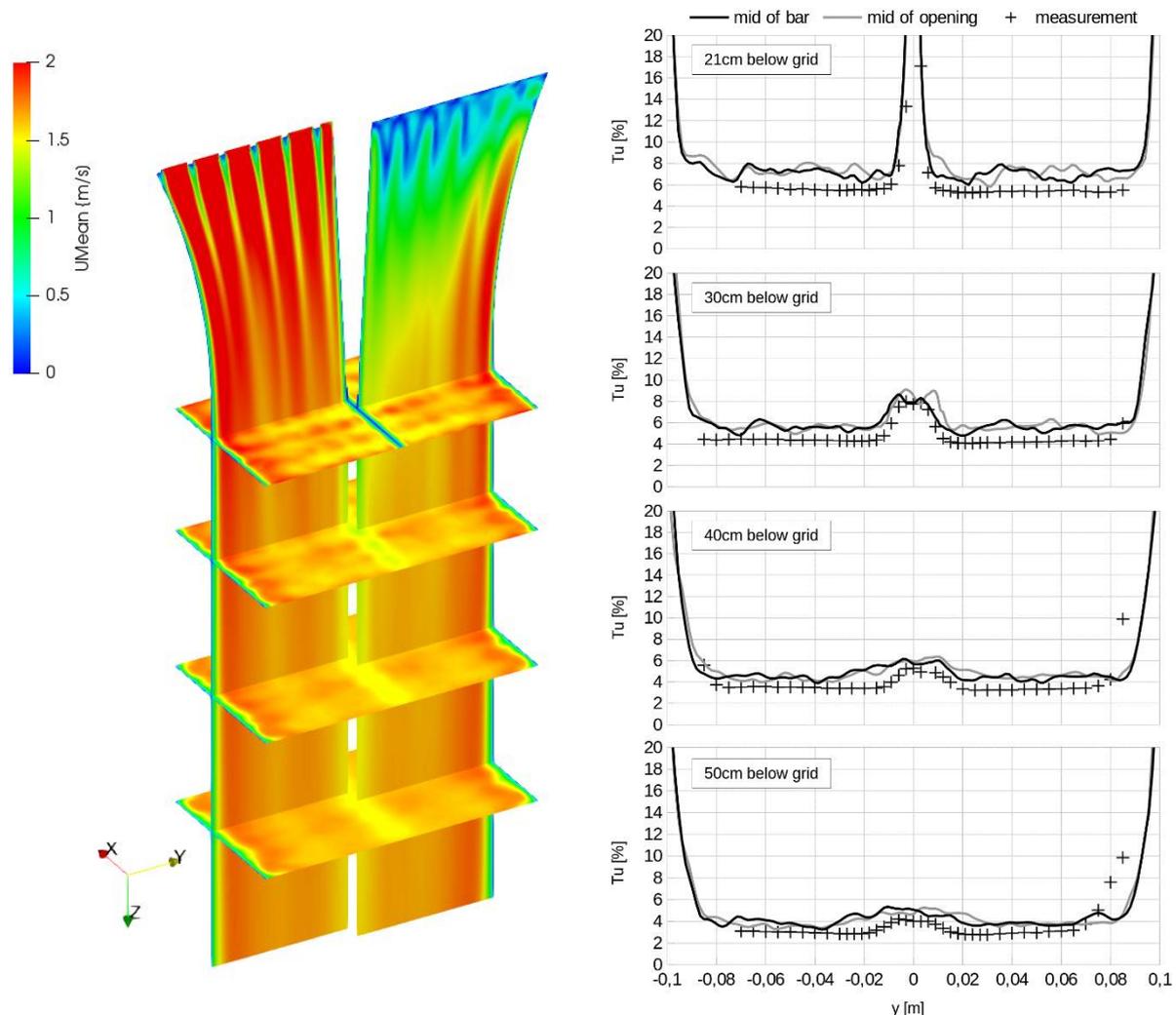


Abb. 13: Ergebnisse der Large-Eddy-Simulationen (LES) mit OpenFOAM; Links: Konturplot der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit in zwei vertikalen und vier horizontalen Ebenen; Rechts: Vergleich des Turbulenzgrades  $Tu$  aus den Simulationen (durchgezogene Linien) mit Messungen (Kreuze) in vier verschiedenen Höhen unterhalb des Aerosoleinlasses; Simulationsergebnisse jeweils in einer Ebene unterhalb eines Stabes des Turbulenzgitters (schwarz) und in einer Ebene in der Mitte zwischen zwei Gitterstäben (grau).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das gemessene Strömungsfeld und die numerischen Simulationen gut übereinstimmen. Die ermittelten Dissipationsraten sind ähnlich mit denen in atmosphärischen Wolken. Die Abnahme der turbulenten kinetischen Energie mit zunehmender Entfernung vom Turbulenzgitter ist vergleichbar mit anderen Windkanälen. Die turbulente Mischungszone verbreitert sich im erwartenden Maße mit zunehmender Entfernung vom Turbulenzgitter. Der Einfluss von Randeffekten im Untersuchungsbereich ist vernachlässigbar. Insgesamt zeigen die Charakterisierungsuntersuchungen, dass Turbulenz-Wolkenmikrophysik-Wechselwirkungen im Windkanal potentiell untersuchbar sind. Die ersten Ergebnisse diesbezüglich werden im Abschnitt 2.3.4 vorgestellt. Die Detektion der Wolkenpartikel erfolgte mit Hilfe zweier verschiedener optischer Messverfahren. Zum einen wurde ein auf Weißlicht beruhendes optisches Partikelgrößenmesssystem verwendet

(welas 2300 Sensor mit Promo 2000 H von Palas GmbH), welches kommerziell erhältlich ist. Zum anderen wurde ein digitales in-line holographisches System, genannt „HoloPi“, verwendet, welches an der Michigan Technological University (MTU) entwickelt wurde. Das Funktionsprinzip und die Installation dieses holographischen Systems am Windkanal werden im Folgenden genauer erläutert.

### 2.3.3 Funktionsprinzip und Installation des holographischen Systems

Mit der digitalen in-line-Holographie ist es möglich, Größe, Form, dreidimensionale räumliche Verteilungen und Bewegungen von Wolkenpartikeln (Tropfen, Eiskristalle) zu messen. Die holographische Methode bietet den Vorteil einer klar definierten Probenvolumengröße, die unabhängig von der Partikelgröße ist. Bei typischen Tropfenzahldichten ermöglicht dies die Abschätzung der vollständigen Tropfengrößenverteilung aus einem einzigen Hologramm (11). Darüber hinaus liefert die holographische Messtechnik die räumliche Verteilung von Tröpfchen und damit Informationen über die Geometrie von Wolken-Luft-Grenzflächen und Tröpfchen-Inertial-Clustering (12, 13).

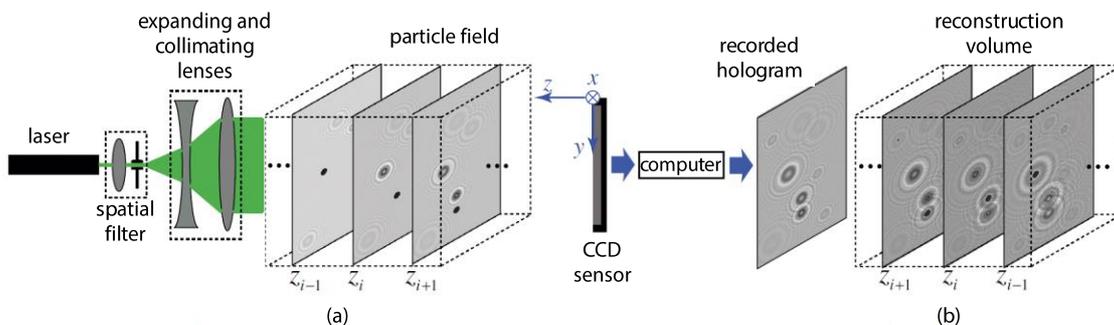


Abb. 14: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der digitalen In-line-Holographie, angewandt auf ein Partikelfeld: (a) Aufnahme und (b) Rekonstruktion von Partikeln (Bild aus (14)).

In Abbildung 14 ist das Funktionsprinzip der digitalen in-line-Holographie schematisch dargestellt. Mit einem Laser wird ein Objekt beleuchtet, das für die Untersuchung in Frage kommt - in der Abbildung ist es ein Partikelfeld. Der Laserstrahl wird zunächst gefiltert, um ein sauberes, zweidimensionales, gaußförmiges Intensitätsprofil zu erhalten. Dann wird das Laserlicht durch eine Kombination von Linsen geleitet, um den Laserstrahl zu erweitern und zu kollimieren. Während des Laserwellendurchgangs durch das Partikelfeld (die Partikeldurchmesser sind viel kleiner als der Querschnitt des Laserstrahls) wirken die Partikel wie kleine Lochblenden, die das Licht beugen und/oder streuen. Sowohl die von den Partikeln gestreute Welle als auch die kohärente Referenzwelle (vom Laser) werden von der CCD-Kamera erfasst. Die erfassten Muster, sogenannte Hologramme, enthalten sowohl Amplituden- als auch Phaseninformationen der interferierenden Wellen. Da die Wellenlänge der Referenzwelle bekannt ist, ist es möglich, die ursprüngliche Partikelwellenfront digital zu rekonstruieren, um die Position (in 3 Dimensionen) und Größe der einzelnen Partikel zu bestimmen.

Zum Aufbau des holographischen Systems HoloPi am Windkanal wurde zunächst der Laser (CryLaS Laser FDSS-532-Q4-1000-S, Wellenlänge 532 nm) auf einer Seite der Windkanal-Messstrecke installiert. Der Laserstrahl wird durch eine Objektivlinse geführt, um den Strahl zu fokussieren. Im Brennpunkt dieser Linse befindet sich ein Loch, um einen sauberen Gaußschen Strahl zu erhalten. Anschließend wird der Strahl wie oben beschrieben aufgeweitet und kollimiert.

Auf der anderen Seite der Messstrecke ist die Photron Fastcam SA2 Kamera so installiert, dass sie das vom Laser emittierte Licht erfassen kann. Für die nachfolgend vorgestellten Experimente betrug die verwendete Bildrate 500 Bilder pro Sekunde (pps). Das entspricht der maximal möglichen Bildrate, bei der vermieden wird, dass ein einziger Tropfen auf zwei aufeinanderfolgenden Hologrammen aufgezeichnet wird. Die Kamera verfügt über einen Sensor mit 2048 x 2048 Pixeln und einer Pixelgröße von 10  $\mu\text{m}$ . Der minimale detektierbare Partikeldurchmesser beträgt das Zweifache der Pixelgröße, d.h. etwa 20  $\mu\text{m}$ . Die zu erwartenden Tropfendurchmesser innerhalb des Windkanals sind viel kleiner und liegen im Größenbereich von wenigen Mikrometern. Um diese Tropfendurchmesser bestimmen zu können, wurde zusätzlich ein vergrößerndes K2 Distamax Objektiv an der Kamera montiert, und damit die untere Auflösungsgrenze auf 2,2  $\mu\text{m}$  verschoben. Das Kamera-Linsen-System wurde so eingestellt, dass der Brennpunkt des Objektivs 1 cm von der Mitte der Windkanal-Messstrecke entfernt war. Das Messvolumen betrug 2,2 x 2,2 x 20 mm<sup>3</sup>. Die von der Kamera aufgenommenen Hologramme wurden digital rekonstruiert und mit dem Open Source Code "HoloSuite", der an der MTU und der Universität Mainz entwickelt wurde, verarbeitet.

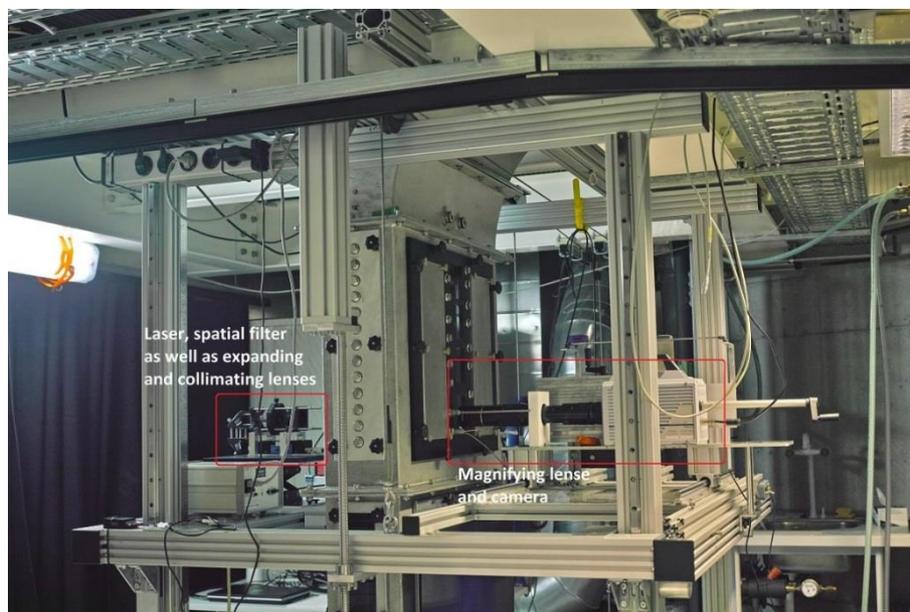


Abb. 15: Position des HoloPi-Systems am Windkanal. Zwischen dem Laser und der Kamera ist die Messstrecke des Windkanals zu sehen. An den Seitenwänden des Windkanals wurde spezielles Glas verwendet, um die Strahlreflexion zu minimieren.

### 2.3.4 Erste Experimente am Windkanal mit HoloPi und welas 2300

Die ersten mikrophysikalischen Experimente im Windkanal sind ein prinzipieller Beweis dafür, dass Wolkentropfenaktivierungsprozesse unter turbulenten Bedingungen untersucht werden können. Dazu wurden verschiedene Experimente mit unterschiedlichen thermodynamischen und Partikelinjektionsbedingungen durchgeführt. Für alle Experimente wurden Natriumchloridpartikel (NaCl) als Wolkenskondensationskeime (abgekürzt mit CCN für Cloud Condensation Nuclei) verwendet. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden im Folgenden vier Experimente beschrieben. Die ersten beiden Experimente wurden mit dem holographischen System HoloPi durchgeführt, die beiden anderen Experimente mit dem Weißlicht-Sensor welas 2300 von Palas GmbH.

## Experimente mit HoloPi

Im ersten Experiment wurden polydisperse NaCl-Partikel (lognormale Partikelverteilung, Durchmesserbereich von ca. 10 nm bis ca. 1000 nm bei einem Modendurchmesser von ca. 100 nm) mit einer Flussrate von 3 l/min in den Windkanal injiziert. Die Konzentration der injizierten Partikel betrug ca.  $2 \times 10^6$  Partikel pro  $\text{cm}^3$ . Die thermodynamischen Bedingungen innerhalb des Windkanals waren wie folgt: Die Vorlauftemperatur eines Luftstranges (A) wurde auf  $20^\circ\text{C}$  und die des anderen Stranges (B) auf  $10^\circ\text{C}$  eingestellt. Die Taupunkttemperaturen für jeden Zweig wurden entsprechend eingestellt,  $20^\circ\text{C}$  für den Strang A und  $10^\circ\text{C}$  für den Strang B, d.h. die einzelnen Luftströme in beiden Strängen waren gesättigt. Durch die turbulente Durchmischung innerhalb der Messstrecke werden übersättigte Bedingungen erreicht. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Tunnels betrug 1,2 m/s.

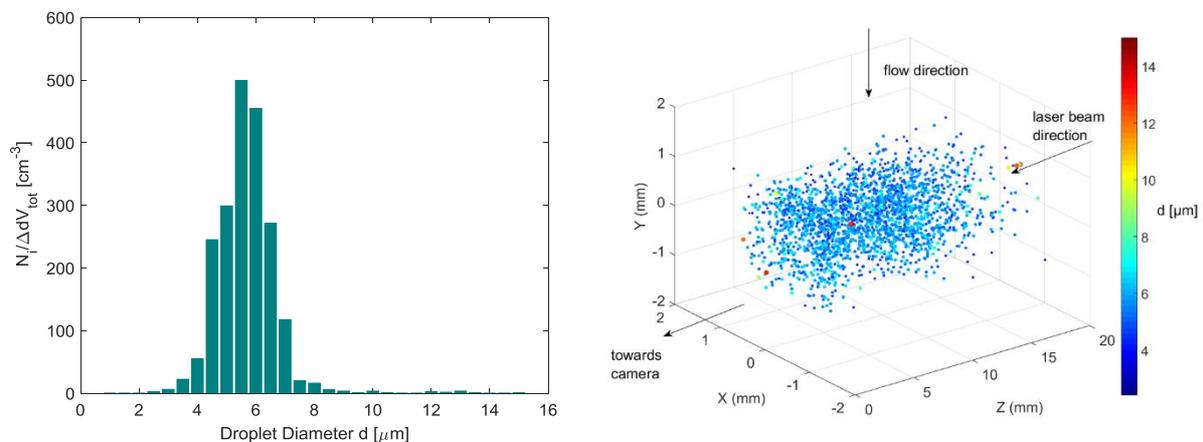


Abb. 16: Links: Gemessene Tropfengrößenverteilung durch Aktivierung von NaCl-Partikeln. Polydisperse NaCl-Partikel wurden in einer Konzentration von ca.  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  injiziert. Die Größenverteilung wird durch die Bin-Breite und das Messvolumen normiert. Rechts: Räumliche Tropfenverteilung und deren Größenverteilung durch Aktivierung der gleichen NaCl-Partikel. Tropfen, die in 23 einzelnen Hologrammen gefunden wurden, sind in einem einzigen Graphen dargestellt.

Auf der linken Seite von Abb. 16 ist die ermittelte Tropfengrößenverteilung dargestellt. Sie ergibt sich aus 23 Hologrammen, die von der Kamera mit einer Bildrate von 500 pps aufgenommen wurden. Generell liegen die erfassten Tropfendurchmesser deutlich über der Nachweisgrenze von  $2,2 \mu\text{m}$ . Der mittlere Tropfendurchmesser liegt bei ca.  $5,5 \mu\text{m}$  und es konnten Wolkentropfen mit einem Durchmesser von bis zu  $15 \mu\text{m}$  detektiert werden. Auf der rechten Seite von Abb. 16 ist die entsprechende räumliche Verteilung der Tropfen dargestellt, wobei die in allen 23 Einzelbildern detektierten Tropfen in einem einzigen Volumen aufgetragen sind. Dies zeigt, dass die Tropfen über das gesamte Messvolumen gestreut sind. Die größeren Tropfen sind jedoch nahe an den Rändern positioniert, so dass diese Tropfen Artefakte sein könnten. Dies muss in naher Zukunft geklärt werden.

Für das zweite Experiment wurde ein Scanning Mobility Particle Sizer System eingesetzt, um monodisperse NaCl-Partikel mit einem Durchmesser von  $250 \text{ nm}$  in zwei verschiedenen Konzentrationen bereitzustellen:  $2300 \text{ cm}^{-3}$  und  $5000 \text{ cm}^{-3}$ . In beiden Fällen wurden die monodispersen NaCl-Partikel mit einer Flussrate von 3 l/min in den Windkanal injiziert. Die thermodynamischen Bedingungen im Inneren des Windkanals waren die gleichen wie im ersten Experiment, d.h. die Temperatur und die Taupunkttemperatur des Stranges A wurden auf  $20^\circ\text{C}$  und die des Stranges B auf  $10^\circ\text{C}$  eingestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug ebenfalls 1,2 m/s.

In Abbildung 17 sind die ermittelten Tropfengrößenverteilungen dargestellt. Beide Verteilungen resultieren aus 300 Hologrammen, die von der Kamera mit einer Bildrate von 500 pps aufgenommen wurden. Es wird deutlich, dass bei der höheren Partikel-Einlasskonzentration die gemessene Tropfen-Anzahlkonzentration für  $d \leq 2 \mu\text{m}$  abrupt auf null sinkt, ein eindeutiger Hinweis, dass sich diese Messungen am Rande der minimalen Nachweisgrenze befinden. Es kann jedoch die interessante Beobachtung gemacht werden, dass mit abnehmender Partikelzahl die Anzahl der detektierten Tröpfchen ebenfalls abnimmt, während der mittlere Tropfendurchmesser zunimmt, von ca.  $4 \mu\text{m}$  bei  $5000 \text{ cm}^{-3}$  auf ca.  $5 \mu\text{m}$  bei  $2300 \text{ cm}^{-3}$ . Der Grund dafür ist, dass im letzteren Fall weniger Partikel als CCN zur Verfügung stehen und somit weniger Tropfen um den verfügbaren Wasserdampf konkurrieren. Es wurde in der Vergangenheit sowohl in atmosphärischen als auch in Laborstudien beobachtet, dass mit zunehmender Aerosolkonzentration die Wolkentropfen kleiner werden und die Tropfengrößenverteilungen schmaler werden (was wir aus unseren Experimenten aufgrund der verkürzten Verteilung für den  $5000 \text{ cm}^{-3}$ -Fall nicht sagen können). Dadurch wird die Kollision und Koaleszenz von Tröpfchen unterdrückt und die Lebensdauer der Wolken erhöht. Dieser Effekt wird als „Cloud Lifetime Effect“ bezeichnet (z.B. (15)).

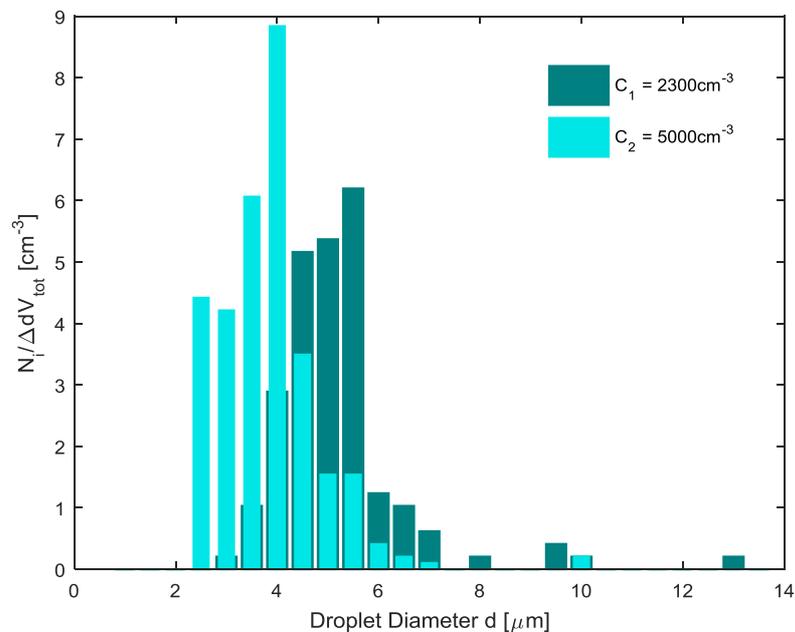


Abb. 17: Tropfengrößenverteilung für zwei verschiedene NaCl-Partikelinjektionskonzentrationen ( $d_p = 250 \text{ nm}$ ). Beide Größenverteilungen wurden durch die Bin-Breite und das Messvolumen normiert.

### Experimente mit welas 2300

Im dritten Experiment wurden Untersuchungen zur Deliqueszenz und zum hygroskopischen Wachstum von NaCl-Partikeln mit einem trockenen Durchmesser  $d_{p,dry}$  von  $320 \text{ nm}$  bei  $20^\circ\text{C}$  mit dem Sensor welas 2300 von Palas GmbH zur Partikeldetektion durchgeführt. Dieser wurde im Inneren des Kanals, unterhalb des Aerosoleinlasses positioniert. Bei diesen Untersuchungen betrug die Temperatur in beiden Strängen  $20^\circ\text{C}$ . Über das Befeuchtungssystem wurden verschiedene Taupunkttemperaturen eingestellt. Daraus ergaben sich unterschiedliche relative Feuchten in der Messstrecke. Die Partikel wurden sowohl trocken als auch bereits befeuchtet in den Windkanal eingebracht, d.h. es wurden Messungen auf dem Deliqueszenz-Ast bzw. auf dem Effloreszenz-Ast durchgeführt.

In Abbildung 18 ist der gewachsene Partikeldurchmesser im Verhältnis zur mittleren relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. Die blaue durchgezogene Linie stellt die entsprechende Köhler-Kurve (Effloreszenz-Ast) dar. Es konnte beobachtet werden, dass die Deliquescenz bei ca. 75% relativer Feuchte stattfindet, was sehr nahe am Deliquescenzpunkt für NaCl bei 20°C (75,4%) liegt. Einen offensichtlichen Einfluss der vorhandenen turbulenten Schwankungen auf die Deliquescenz ließ sich in den bisherigen Messungen nicht beobachten, die Untersuchungen werden aber noch weiter fortgesetzt. Nichtsdestotrotz schmälert dies nicht die Beobachtung, dass es möglich ist, bei einer Gesamtdurchflussmenge von 10000 l/min den Deliquescenzpunkt im Rahmen der Messunsicherheit detektieren zu können.

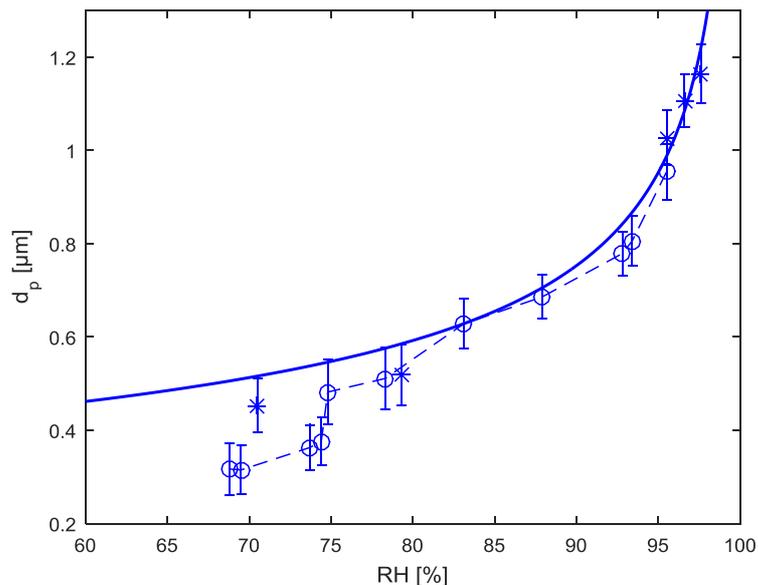


Abb. 18: Gemessene Deliquescenz- (offene Kreise) und Effloreszenzäste (Sternchen) der hygroscopischen Wachstumskurve für NaCl-Partikel mit einem trockenen Durchmesser von 320 nm bei  $T = 20^\circ\text{C}$  mit  $w_{\text{elas}} 2300$ . Als Referenz ist die theoretische Köhler-Kurve (durchgezogene Linie, Effloreszenz-Ast) dargestellt. Der Deliquescenzpunkt von NaCl liegt bei 75,4% bei 20°C.

Im letzten hier dargestellten Experiment (Abb. 19) wurden Untersuchungen zur Tropfenaktivierung durchgeführt - ebenfalls mit NaCl-Partikeln und dem  $w_{\text{elas}} 2300$  Sensor zur Partikel-/Tropfendetektion. In den Experimenten wurde eine feste maximale Übersättigung eingestellt und dann die trockene Partikelgröße variiert. Es konnte beobachtet werden, dass der überwiegende Teil der gemessenen Tropfendurchmesser unterhalb der kritischen Aktivierungsdurchmesser  $d_{\text{crit}}$  liegt ( $d_{\text{crit}} = 1,3 \mu\text{m}$  für  $d_{\text{p,dry}} = 100 \text{ nm}$ , und  $d_{\text{crit}} > 5 \mu\text{m}$  für  $d_{\text{p,dry}} = 400 \text{ nm}$ ). Bei trockenen Durchmessern von 100 nm und 200 nm reichen die Enden der Tropfengrößenverteilungen jedoch bis in den Bereich oberhalb der entsprechenden kritischen Durchmesser. Dies deutet darauf hin, dass vorhandene Fluktuationen in der Übersättigung zu einer Aktivierung eines Teils dieser Partikelgrößen führen. Dieses Ergebnis ist vielversprechend und wird in naher Zukunft genauer untersucht, verifiziert und quantifiziert.

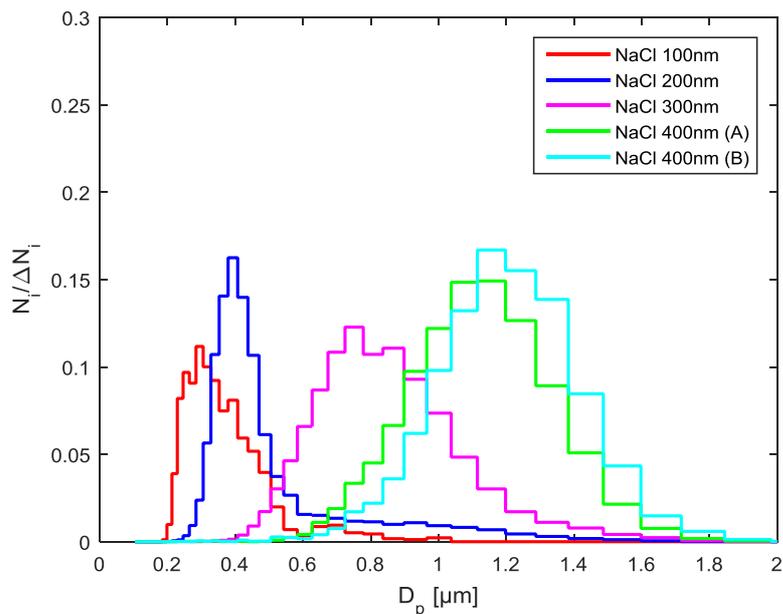


Abb. 19: Tropfenaktivierung: Gemessene Größenverteilungen mit dem welas 2300 für eine gegebene maximale Übersättigung für vier verschiedene trockene Partikeldurchmesser.

### 2.3.5 Fazit der ersten Wolkenuntersuchungen am neuen Feuchtluft-Windkanal

Zum einen konnte das digitale in-line holographische System HoloPi sowie den Aerosolsensor welas 2300 erfolgreich am Windkanal installiert werden. Zum anderen zeigten die ersten Experimente am Windkanal, dass es möglich ist, Wolkenaktivierungsprozesse zu untersuchen. Mit HoloPi konnten Wolkentropfen ab ca.  $2 \mu\text{m}$  charakterisiert werden. Mit welas 2300 sind sogar noch kleinere Wolkenpartikel detektierbar. In den ersten Experimenten ließ sich bereits der Einfluss der Aerosolpartikelkonzentration auf die Wolkentropfenanzahl beobachten. Die Beobachtungen stimmten mit atmosphärischen und anderen Laboruntersuchungen überein. Erste Indizien für den Einfluss turbulenter Übersättigungsfluktuationen auf das Aktivierungsverhalten wurden ebenfalls beobachtet. Insgesamt sind wir sehr zuversichtlich, was die Funktionalität des digitalen in-line holographischen Systems HoloPi, des welas 2300 Sensors von Palas GmbH sowie des Feuchtluft-Windkanals selbst angeht und wir freuen uns auf zukünftige vertiefende Untersuchungen sowie deren Ergebnisse. Des Weiteren wurde der Windkanal als auch dessen Funktionalität im Rahmen des „International Workshop on Cloud Microphysics - Turbulence Interaction“ sowie internationalen Konferenzen (ICCP in Manchester, UK (2016); EGU General Assembly in Vienna, Austria (2017); and the DFD meeting in Denver, CO, USA (2017)) einem breitem Fachpublikum vorgestellt. Der Windkanal wird bereits als wichtiger Bestandteil zur Erforschung von Turbulenz-Wolkenmikrophysik-Wechselwirkungen angesehen.

### 2.4 Anwendungsperspektiven und Folgevorhaben

Besonders hervorzuheben ist hier, dass im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbs 2019 ein Antrag zur Einrichtung einer Leibniz-Junior Research Group am Windkanal unter der Leitung von Dr. Dennis Niedermeier bei der Leibniz-Gemeinschaft eingereicht werden wird. Dieses Vorhaben ging als Gewinner aus einem institutsinternen Wettbewerb hervor, und wird auch durch den wissenschaftlichen Beirat des Institutes befürwortet.

Darüber hinaus sind gegenwärtig zwei wissenschaftliche Folgevorhaben in Vorbereitung bzw. angedacht. Im Einzelnen sind dies ein DFG-Projekt (Paketantrag in Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau und der Universität Magdeburg) zu den Einflüssen von Turbulenz auf die Aktivierung von Wolkentropfen (Einreichung voraussichtlich Frühjahr 2018), und die Beteiligung an einer DFG-Forschergruppe zum Thema Phasenübergänge (Einreichung des Vorantrages voraussichtlich Sommer 2018).

Der Kanal steht auch als Infrastruktur für andere Forscher zur Verfügung. So ist er bereits ein wichtiger Bestandteil des EU-geförderten (HORIZON 2020) Infrastrukturprojektes EUROCHAMP 2020. Er ist ferner Teil des durch das TROPOS geführten ACTRIS-D-Vorhabens (zurzeit in Begutachtung beim BMBF). Eine Beteiligung im Rahmen der nächsten Phase des EuHIT-Projekt ist geplant, einem HORIZON 2020-Infrastrukturprojekt, welches durch das MPI für Selbstorganisation und Dynamik geführten (Eberhard Bodenschatz) geführt wird.

## **2.5 Wirtschaftliche Verwertbarkeit**

Da es sich bei dem durchgeführten Projekt um Grundlagenforschung handelt, waren von vornherein keine wirtschaftlich verwertbaren Ergebnisse zu erwarten. Die Hauptanwendungen des Windkanals werden sicherlich im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt sein, es sind aber auch durchaus anwendungsorientierte Arbeiten, z.B. auf dem Gebiet der Vereisungsproblematik, vorstellbar.

## **2.6 Kooperationspartner im In- und Ausland**

Die wichtigsten Kooperationspartner im In- und Ausland sind:

- Raymond Shaw, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA
- Jörg Schumacher, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

Erste Absprachen, bzgl. zukünftiger Kooperationen erfolgten im Rahmen des Projektes mit:

- Gustavo Abade, University of Warsaw, Warschau, Polen
- Eberhard Bodenschatz, Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen, Deutschland
- Juan Pedro Mellado, Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, Deutschland
- Steven Krueger, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA
- Dominique Thevenin, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Deutschland

## **2.7 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses**

Das Projekt umfasste im Wesentlichen den Aufbau, die Inbetriebnahme und erste Testmessungen an einem völlig neuartigen Windkanal. Die im Zuge dieser Arbeiten zu erwartenden wissenschaftlich verwert- und publizierbaren Ergebnisse waren daher naturgemäß eher gering. Ungeachtet dessen, konnte ein Maschinenbaustudent der TU-Dresden im Rahmen des Projektes seine Diplomarbeit erfolgreich am Windkanal durchführen und abschließen. Da der wissenschaftliche Einsatz des Kanals angelaufen ist, bieten sich nun vermehrt Themen für Master- und Diplomarbeiten. Es sind bereits, oder werden in Kürze, an der Universität Leipzig und der TU-Dresden dementsprechende Aushänge platziert.

Ferner wird, wie bereits unter 2.3 ausgeführt im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbs 2019, ein Antrag zur Einrichtung einer Leibniz-Junior Research Group am Windkanal unter der Leitung von Dr. Dennis Niedermeier bei der Leibniz-Gemeinschaft eingereicht werden.

## 2.8 Mittelverwendung

Die bereitgestellten Mittel in Höhe von 1.348.140,00 EUR wurden vollständig wie im Verwendungsnachweis dargestellt für das Vorhaben ausgegeben.

## 2.9 Literatur

- (1) H. G. Houghton, *Science* 129, 307 (1959).
- (2) E. Bodenschatz, S.P. Malinowski, R.A. Shaw, F. Stratmann, *Science* 327, 970 (2010).
- (3) H. Siebert et al., *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 87, 1727 (2006)
- (4) R. A. Shaw, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 35, 183 (2003).
- (5) B. Stevens et al., *Mon. Weather Rev.* 133, 1443 (2005).
- (6) I. M. Held, M. Zhao, B. Wyman, *J. Atmos. Sci.* 64, 228 (2007).
- (7) C. Stan et al., *Geophys. Res. Lett.* 37, L01702 (2010).
- (8) S.P. Malinowski et al., *New J. Phys.* 10, (2008).
- (9) F. Stratmann et al., in *Clouds in the Perturbed Climate System*, MIT Press, Cambridge, MA, 149 (2009).
- (10) R. J. Hearst, PhD Thesis, University of Toronto (2015).
- (11) J. P. Fugal, R. A. Shaw, *Atmos. Meas. Tech.* 2, 259 (2009).
- (12) M. J. Beals et al., *Science* 350, 87 (2015).
- (13) J. Lu et al., *New J. Phys.* 10, 125013 (2008).
- (14) D. R. Guildenbecher, J. Gao, P. L. Reu, J. Chen, *Appl. Opt.*, 52, 3790 (2013).
- (15) K. K. Chandrakar et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 14243 (2016).

## Appendix 1: Medienerscheinungen

### Printmedien

Medium	Titel	Datum	Akteur/e*
Ostthüringer Zeitung	Windkanal im Wolkenlabor.	25.04.17	
DIE WELT, print und online	Klima. Forscher nehmen Windkanal in Betrieb.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann
BILD Leipzig, print und online	Wolkenmacher können jetzt auch Wind. Die Tüftler am Troposphären-Institut haben aufgerüstet.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier
Leipziger Volkszeitung, print und online	Neuer Windkanal im Wolkenurm. International einmalige Anlage am Tropos-Institut simuliert turbulente Prozesse in der Atmosphäre.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier
Sächsische Zeitung	Wolkenforscher im Windkanal. Leipziger Experten starten eine weltweit einzigartige Anlage. Sie soll helfen, Wetter und Klima besser zu verstehen.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier
Mitteldeutsche Zeitung, print und online	Turbulenzen im Wolkenlabor. Durch einen neuen, weltweit einzigartigen Windkanal erhofft sich das Leipziger Tropos-Institut neue Erkenntnisse bei der Erforschung des Klimas.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier
Leipziger Morgenpost	Leipzig hat jetzt einen Windkanal für Wolken.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann
Berliner Zeitung	Ein neuer Windkanal im Wolkenlabor. Wettervorhersagen könnten dadurch präziser werden.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann, Prof. Dr. Andreas Macke
DIE ZEIT, Wissen, print und online, audio unter <a href="http://zeit.de/audio">zeit.de/audio</a>	In Leipzig züchten Forscher Wolken, um große Fragen zu beantworten: Wann werden sie dunkel? Und welchen Einfluss haben sie auf das Klima?	21.06.17 Nr. 26/2017	Dr. Frank Stratmann

Medium	Titel	Datum	Akteur/e*
<b>Webauftritt von Printmedien</b>			
handelsblatt.com	Klimaforschung. Wolkenforscher im Windkanal.	26.04.17	
thueringer-allgemeine.de	Über den Wolken.	29.04.17	
giessener-allgemeine.de	Forscher in der Wolkenküche.	26.04.17	Dr. Frank Stratmann

## Radio

Medium	Titel	Datum	Akteur/e
mdr SACHSEN	Einzigartiges Wolkenlabor in Leipzig	25.04.17 10:40	Dr. Frank Stratmann
mdr Sachsen Kultur, Kultur kompakt	Leipzig: Erstmals künstliche Wolke erzeugt	25.04.17 17:30	Dr. Frank Stratmann
mdr 1 RADIO SACHSEN – Sachsen-Nachrichten	Windkanal in Leipziger Wolkenlabor nimmt Arbeit auf	25.04.17 18:30	Dr. Frank Stratmann
MDR Aktuell	Windkanal für Leipzigs Wolkenforscher	26.04.17 10:25	Dr. Frank Stratmann
<b>Webauftritt von Radiosendern</b>			
Radio Leipzig	Leipziger Wolkenlabor mit weltweit einzigartigem Windkanal	25.04.17	
Hitradio RTL	Einzigtiger Windkanal im Leipziger Wolkenlabor eröffnet	26.04.17	
Radio Leipzig	Einzigtiger Windkanal im Leipziger Wolkenlabor eröffnet	26.04.17	

## Fernsehen

Medium	Titel	Datum	Akteur/e
mdr Fernsehen, mdr Sachsenspiegel	Weltweit einzigartiger Windkanal im Leipziger Wolkenlabor	25.04.17 19:00 (01:42 min)	Prof. Dr. Andreas Macke, Dr. Frank Stratmann
mdr Fernsehen, mdr Aktuell	Wolkenlabor in Leipzig	25.04.17 21:45	Dr. Frank Stratmann
Leipzig Fernsehen	Wolkenlabor in Leipzig	25.04.17	Dr. Frank Stratmann

## Sonstige Online-Erscheinungen

Medium	Titel	Datum	Akteur/e
Mitteldeutsche Zeitung – TV (youtube channel der MZ)	Das Wolkenlabor. Durch einen neuen (..) Windkanal erhofft sich das Leipziger Tropos-Institut neue Erkenntnisse bei der Erforschung des Klimas.	25.04.17	Dr. Frank Stratmann
klimanavigator.de	Weltweit einzigartiger Windkanal im Leipziger Wolkenlabor hat Betrieb aufgenommen.	25.04.17	Dr. Frank Stratmann

## Veranstaltungen

Veranstaltung	Titel	Datum	Mitwirkende
Workshop	International Workshop on Cloud Microphysics - Turbulence Interaction	28.02. bis 01.03.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier
Einweihungsveranstaltung	Einweihung des Windkanals	25.04.17	Dr. Frank Stratmann, Dr. Jens Voigtländer, Dr. Dennis Niedermeier