

GÖTTINGER HOCHDRUCK-TURBULENZ-ANLAGE

GÖTTINGEN HIGH-PRESSURE TURBULENCE FACILITY

Holger Nobach, Haitao Xu, Eberhard Bodenschatz

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen

Die Erforschung von fundamentalen Gesetzmäßigkeiten der Turbulenz erfordert Strömungen mit hohen Reynoldszahlen unter reproduzierbaren Randbedingungen. Die verwendete Messtechnik muss dabei in der Lage sein, die Strömung von den größten bis zu den kleinsten räumlichen und zeitlichen Skalen sowohl zeitlich als auch räumlich zu erfassen. Auf der Erde findet man die größten turbulenten Skalen (Reynoldszahl $\approx 10^7$) in der atmosphärischen Grenzschicht. Selbst die heftigsten Strömungen auf der Erde, wie vulkanische Eruptionen, haben ähnliche Turbulenzskalen. Die Beobachtung natürlicher Strömungen ist schwierig, sie sind selten stationär und die Spannbreite der relevanten Skalen sind sehr groß. In einer Wolke z.B. sind die größten relevanten Skalen in der Größenordnung von 100m, die kleinsten sind kleiner als 1mm. Ein weiteres Problem sind die mittleren Geschwindigkeiten mit denen der Wind die Wolkenformation bewegt. Alle relevanten Skalen der Dynamik einer Wolke zu vermessen, ist mit der heutigen Messtechnik schwierig bis unmöglich. Zusätzlich kommt hinzu, dass die Mechanismen der Turbulenzgenerierung in der Natur vielfältig sind und eine Untersuchung, wie die Eigenschaften der Turbulenz von ihrer Erzeugung abhängen, damit schwierig wird. Numerische Strömungssimulationen werden auf absehbare Zeit weder so große Reynoldszahlen noch natürliche Randbedingungen erreichen können. Deshalb sind Strömungsexperimente bei hohen Reynoldszahlen für die Erforschung der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Turbulenz unersetzlich.

Eine Möglichkeit so hohe Reynoldszahlen zu erreichen besteht in der Verwendung von Tieftemperaturgasen (z.B. He). Die damit erreichbaren Reynoldszahlen sind sehr groß, allerdings sind die räumlichen und zeitlichen Skalen so klein, dass sie von der verfügbaren Messtechnik nicht vollständig erfasst werden können. Außerdem versagen bei so tiefen Temperaturen viele Messgeräte und -verfahren. Eine zweite Möglichkeit hohe Reynoldszahlen unter Laborbedingungen zu erzeugen bietet die Kompression des Strömungsmediums.

In Göttingen steht eine Anlage kurz vor der Fertigstellung, die durch die Verwendung von schwerem SF₆-Gas bereits bei moderaten Drücken und Raumtemperatur sehr hohe Reynoldszahlen erreicht. Zu der Anlage (Abb. 1) gehört eine Verdichter- und Handhabungsstation mit einem Tanklager, das 11t SF₆ aufnimmt. Das Gas wird für Strömungsexperimente in zwei Geräten verwendet – einem Turbulenzwindkanal und einem Druckzylinder (U-Boot).

Hauptanliegen der beiden Druckgeräte ist die Erforschung turbulenter Strömungen bei sehr hohen Reynoldszahlen. Ein erster Schwerpunkt bildet die Untersuchung von Lagrangeschen Statistiken turbulenter Strömungen. Es ist vorgesehen die Strömung mit passiven oder Inertialteilchen zu versehen und sowohl einzelne Trajektorien als auch die Interaktion mehrerer Teilchen zeitlich und räumlich hoch aufgelöst zu verfolgen.

Außer den Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut wird auch für externe Wissenschaftler die Möglichkeit bestehen, die Anlage für die Untersuchungen von Turbulenzphänomenen bei hohen Reynolds- und Rayleighzahlen unter reproduzierbaren Randbedingungen zu nutzen.

Die **Gasbehandlungsanlage** evakuiert zunächst die Druckgeräte auf 1mbar, bevor die Füllung mit SF₆ erfolgt. Bis zu einem Maximaldruck von 15bar wird das SF₆ aus den Lagertanks in die Druckgeräte gepumpt und konstant gehalten. Nach dem Experiment wird das SF₆ aus den Druckgeräten abgepumpt, gereinigt und flüssig in den Lagertanks aufbewahrt. Alternativ kann auch Luft als Arbeitsmedium verwendet werden. Die Druckgeräte können unabhängig voneinander evakuiert und mit verschiedenen Arbeitsmedien befüllt werden.

Der **Windkanal** (Abb. 2) mit seinen zwei langen, geraden Messstrecken dient v.a. der Verfolgung von Teilchenbahnen in der turbulenten Strömung hinter aktiven Gittern. Es handelt sich um eine geschlossene, aufrecht stehende Röhre. Die beiden abnehmbaren Bögen haben einen Durchmesser von 1,6m. Die geraden Abschnitte haben einen Durchmesser von 1,8m und bilden die beiden Messstrecken von 6,8m bzw. 7,8m Länge und einem Querschnitt von 2m². Die mechanische Antriebsleistung beträgt 210kW. Der Motor ist aktiv gekühlt. Die Versorgung des Motors mit elektrischem Strom und Kühlwasser erfolgt durch die Druckhülle mittels entsprechender Druckdurchführungen. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist kontinuierlich einstellbar zwischen 0,5m/s und 5m/s (SF₆, 15bar). Der Motor ist gekapselt und sowohl vakuum- als auch druckverträglich (alle Arbeitsmedien). Außerdem können problemlos Teilchen (Öl, Wasser, Feststoffe) für die Strömungsexperimente eingebracht werden. Der Plattenwärmetauscher hat eine Gesamtkühlleistung von 240kW. Er besteht aus zwei nacheinander durchflossenen, um 180° gedrehten Registern, die im gleichen Umlaufsinn durchflossen werden. Dadurch werden Temperaturgradienten in der Strömung minimiert.

Zur Generierung der Turbulenz in den Messstrecken werden wahlweise passive (incl. fraktale) als auch aktive Gitter verwendet. In den Messstrecken sollen verschiedene Messmethoden eingesetzt werden. Für erste Testmessungen und die Charakterisierung der Strömung sind Prandtlsonden und Thermoelemente eingebaut. Für folgende Experimente werden Hitzdraht-, Laser-Doppler- und Particle-Tracking-Messsysteme installiert. Letztere werden zur besseren Teilchenverfolgung auf einem Schlitten montiert, der mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit parallel zur Strömung mitbewegt wird (Abb. 3). Der Antrieb des Schlittens erfolgt durch magnetisch gekoppelte Linearmotoren auf besonders steifen Untergestellen (optische Bänke), die die Gesamtlängen der beiden Messstrecken ausfüllen. Die eingesetzte Messtechnik soll vorzugsweise innerhalb des Windkanals installiert werden. Die elektrische Versorgung und der Abtransport der aufgenommenen Daten erfolgt durch die Kanalwand mittels installierter Kabeldurchführungen.

Die Design- und die zu erwartenden Strömungsparameter sind in Tab. 1-3 zusammengestellt.

Der **Druckzylinder (U-Boot)** dient der Erforschung von Mischprozessen und turbulenten thermischen Konvektionsströmungen. Er besteht aus einer 5,3m langen, horizontalen Röhre mit einem Durchmesser von 2,5m und einem aufgesetzten Dom mit einer Höhe von 1,5m und einem Durchmesser von 1,2m (Abb. 4). Das U-Boot wird genau wie der Windkanal wahlweise mit SF₆ oder Luft zwischen 1mbar und 15bar befüllt. Mit diesem Gerät können Rayleigh-Zahlen von bis zu 7×10^{14} erreicht werden. Abb. 5 zeigt den Aufbau eines turbulenten Konvektionsexperimentes im Druckzylinder.

Hersteller:

Windkanal:	TLT Turbo GmbH, Zweibrücken
Gasbehandlungsanlage:	DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Babenhausen
Druckzylinder:	Ludwig Elkuch AG, Bendorf, Liechtenstein

Finanzierung:

Max-Planck-Gesellschaft
VW Stiftung

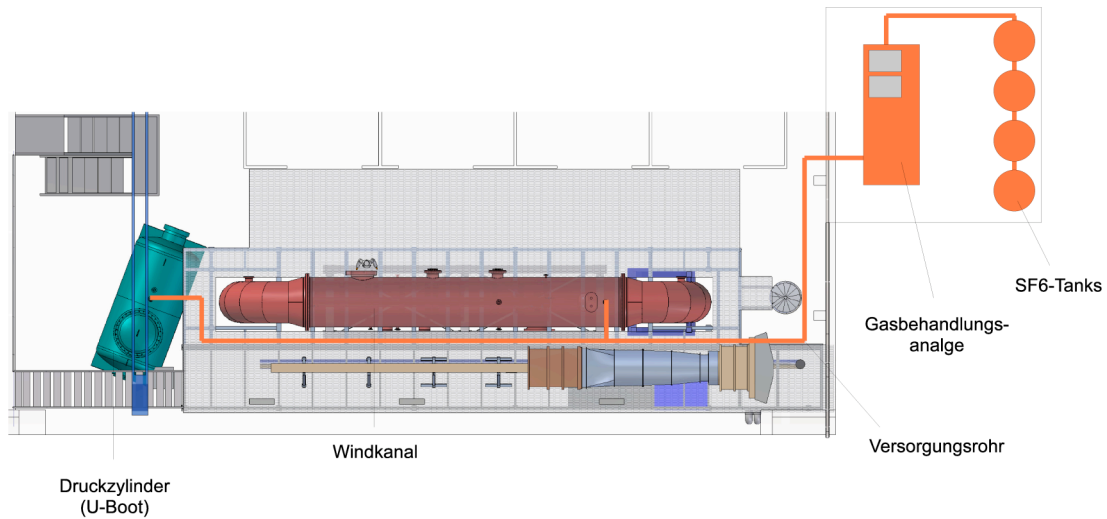


Abb. 1: Schematische Darstellung der Anlage

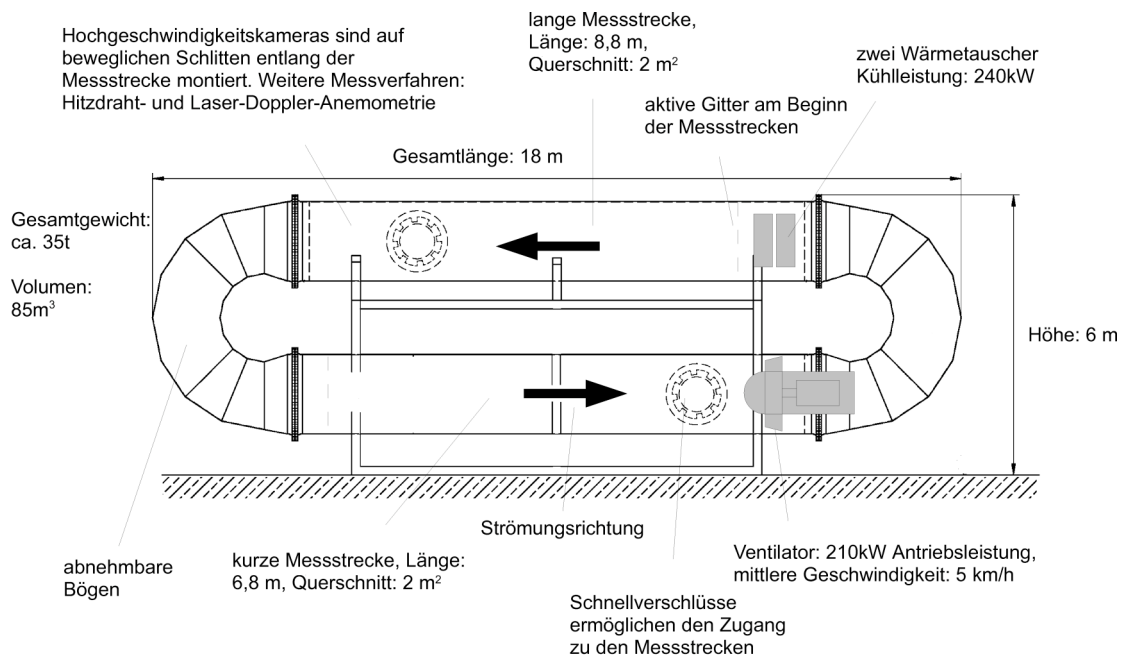


Abb. 2: Schamatische Darstellung des Windkanals

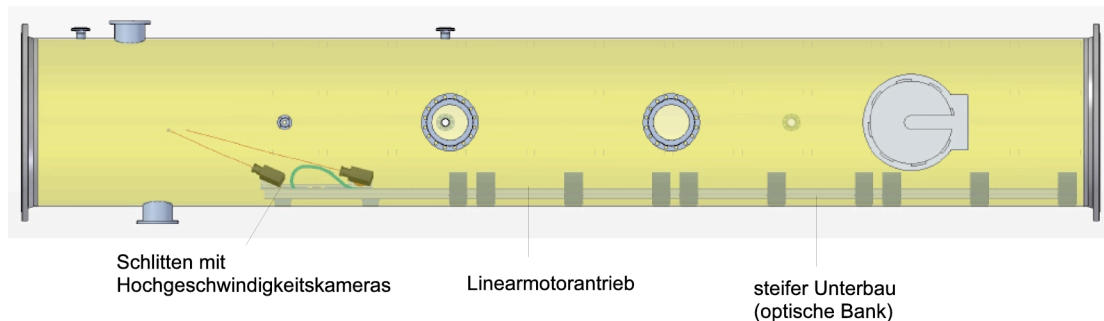


Abb. 3: Schlitten mit Antriebssystem

Tab. 1: Design- und erwartete Strömungsparameter des Windkanals

Länge:	18m	U_{max} :	5m/s
Höhe:	6m	$u_{rms,max}$:	1m/s
innerer Durchmesser:	1.8m	L_{max} :	0.45m
Druck:	1mbar-15bar (abs.)	$R_{\lambda,max}$:	10000
Temperatur:	20-35°C	ϵ_{max} :	1.2W/kg
mech. Antriebsleistung:	210kW	η :	>8µm
Kühlleistung (total)	280kW	τ_{η} :	>0.4ms
kin. Viskosität SF ₆ (15bar):	$1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$		

Tab. 2: Erwartete Strömungsparameter bei passiven Gittern (integrales Längenmaß $L=0.05D=0.075\text{m}$, Turbulenzgrad $u'/U=5\%$)

Working fluid	Pressure (bar)	ρ (kg/m ³)	ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	Motor Power (kW)	\bar{U} (m/s)	u' (m/s)	ϵ (m ² /s ³)	Re	R_{λ}	η (µm)	τ_{η} (ms)
SF ₆	15	106.6	0.16	2.7	5.0	0.25	0.19	1.2×10^5	1300	12	0.92
SF ₆	1	5.86	2.64	0.2	5.0	0.25	0.19	7.2×10^3	330	99	3.7
Air	15	19.4	0.93	0.5	5.0	0.25	0.19	2.0×10^4	550	45	2.2
Air	1	1.29	14.0	< 0.1	5.0	0.25	0.19	1.4×10^3	140	345	8.5

Tab. 3: Erwartete Strömungsparameter bei aktiven Gittern (integrales Längenmaß $L=0.45D=0.68\text{m}$, Turbulenzgrad $u'/U=25\%$)

Working fluid	Pressure (bar)	ρ (kg/m ³)	ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	Motor Power (kW)	\bar{U} (m/s)	u' (m/s)	ϵ (m ² /s ³)	Re	R_{λ}	η (µm)	τ_{η} (ms)
SF ₆	15	106.6	0.16	168	5.0	1.0	1.33	4.2×10^6	8000	7.5	0.35
SF ₆	15	106.6	0.16	1.3	1.0	0.2	0.01	8.2×10^5	3500	25	4.0
SF ₆	10	65.6	0.24	104	5.0	1.0	1.33	2.8×10^6	6500	10	0.43
SF ₆	1	5.86	2.64	9.2	5.0	1.0	1.33	2.6×10^5	2000	61	1.4
Air	15	19.4	0.93	31	5.0	1.0	1.33	7.3×10^5	3300	38	1.0
Air	15	19.4	0.93	0.23	1.0	0.2	0.01	1.4×10^5	1500	95	9.6
Air	10	12.9	1.4	20	5.0	1.0	1.33	4.8×10^5	2700	38	1.0
Air	1	1.29	14.0	2.0	5.0	1.0	1.33	4.8×10^4	850	210	3.2

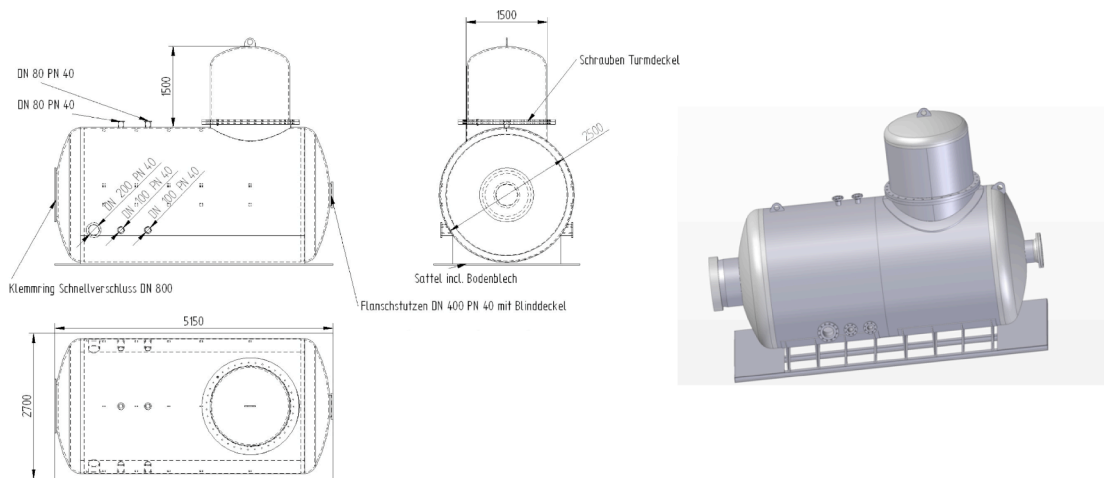


Abb. 4: Aufbau des Druckzylinders

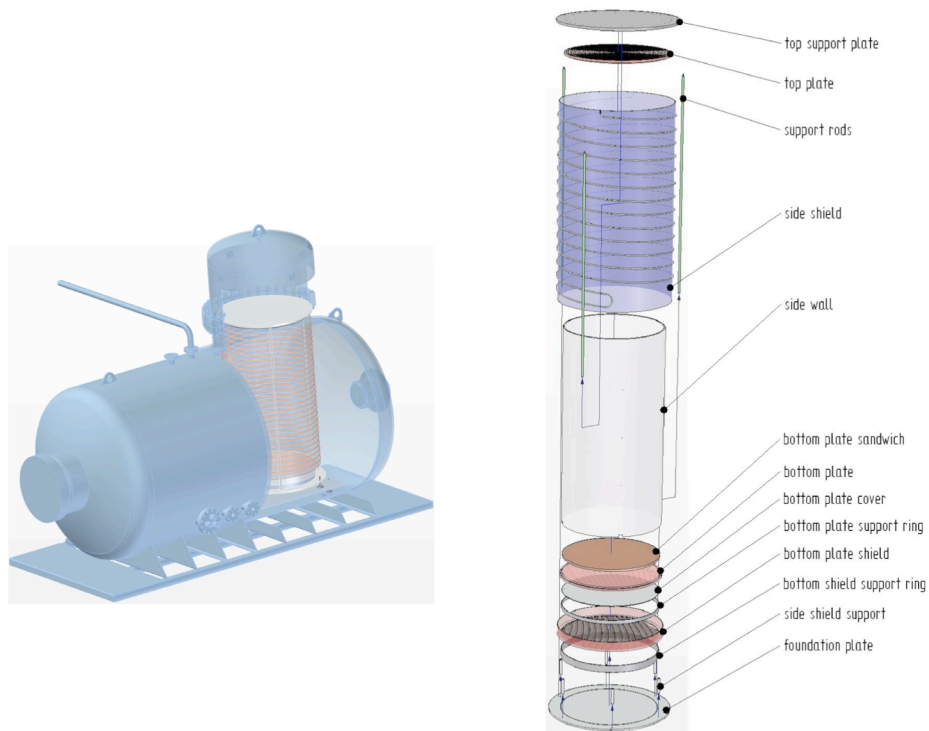


Abb. 5: Turbulente Konvektionszelle im Druckzylinder

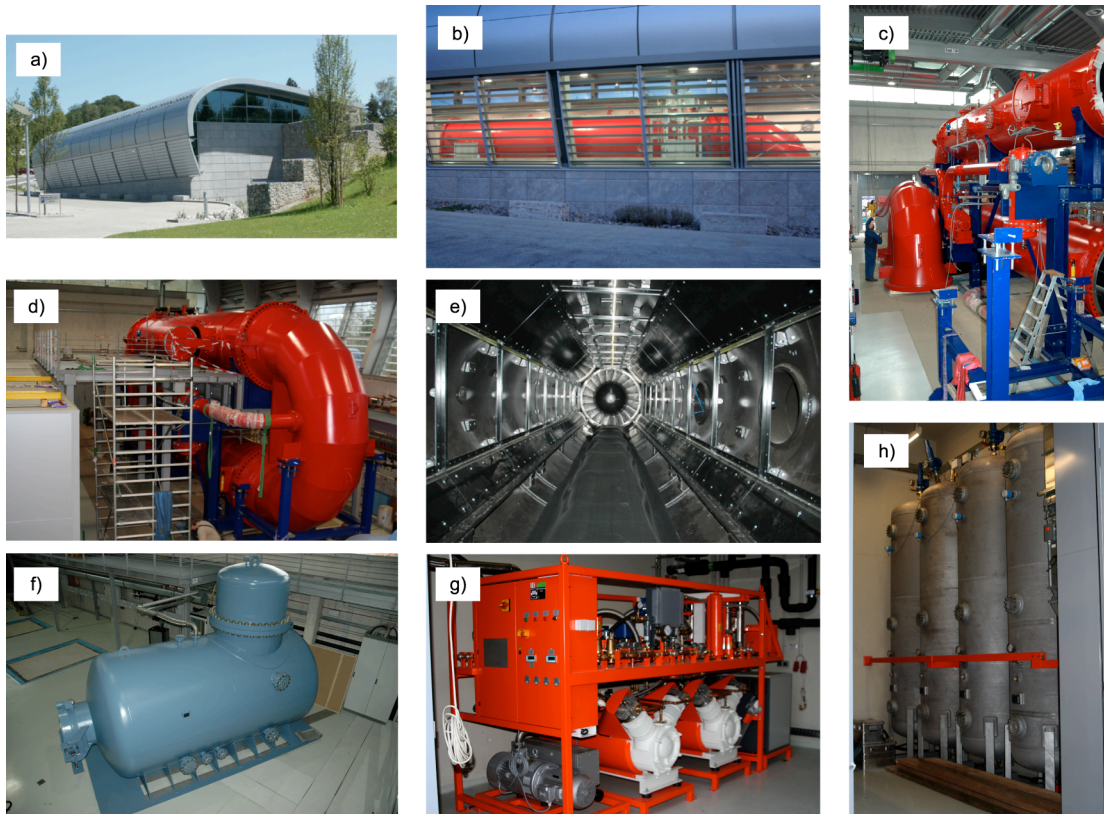


Abb. 6: Fotos der Windkanalanlage: a,b) Experimentierhalle Windkanal; c,d) Windkanal; e) Blick entlang der Messstrecke auf den Ventilator; f) Druckzylinder; g) Gasbehandlungsanlage; h) SF₆-Speichertanks