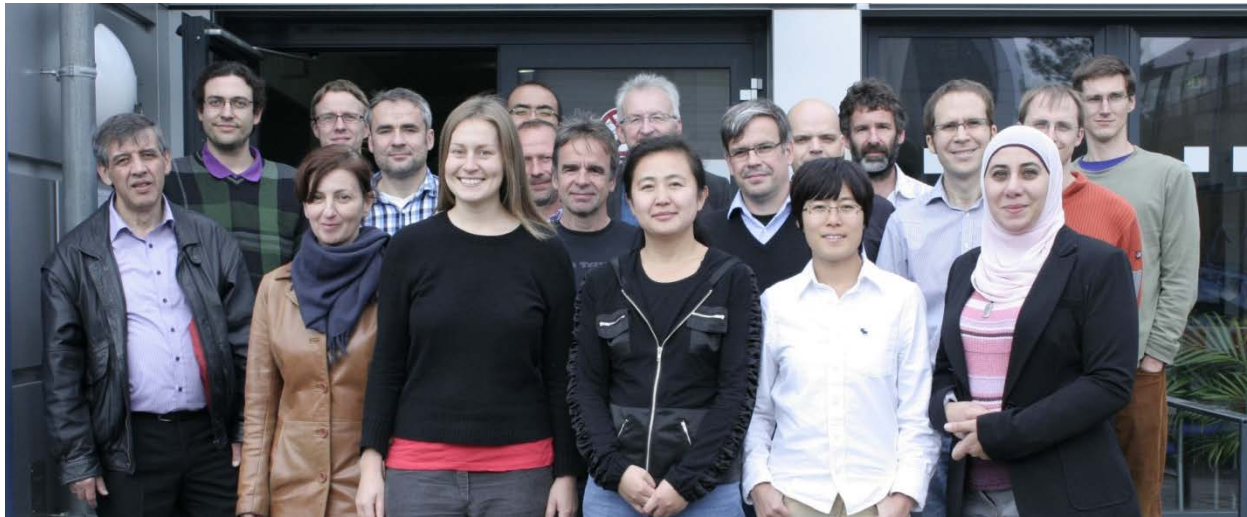


Wandnahe Transport- und Strukturbildungsprozesse in turbulenten Rayleigh-Bénard-, Taylor-Couette- und Rohr-Strömungen

Begutachtung der überregionalen interdisziplinären DFG-Forschergruppe FOR1182 für die 2. Phase



Sprecher: Prof. C. Egbers (Cottbus)

Stellvertreter: Prof. J. Schumacher (Ilmenau), Prof. B. Eckhardt (Marburg)

Philipps



Universität
Marburg



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG



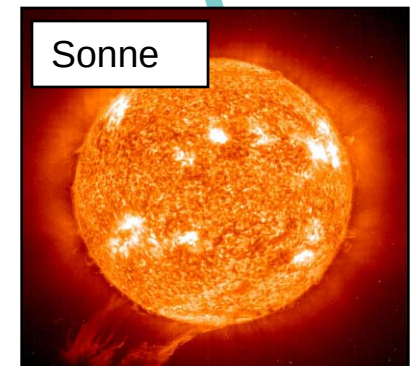
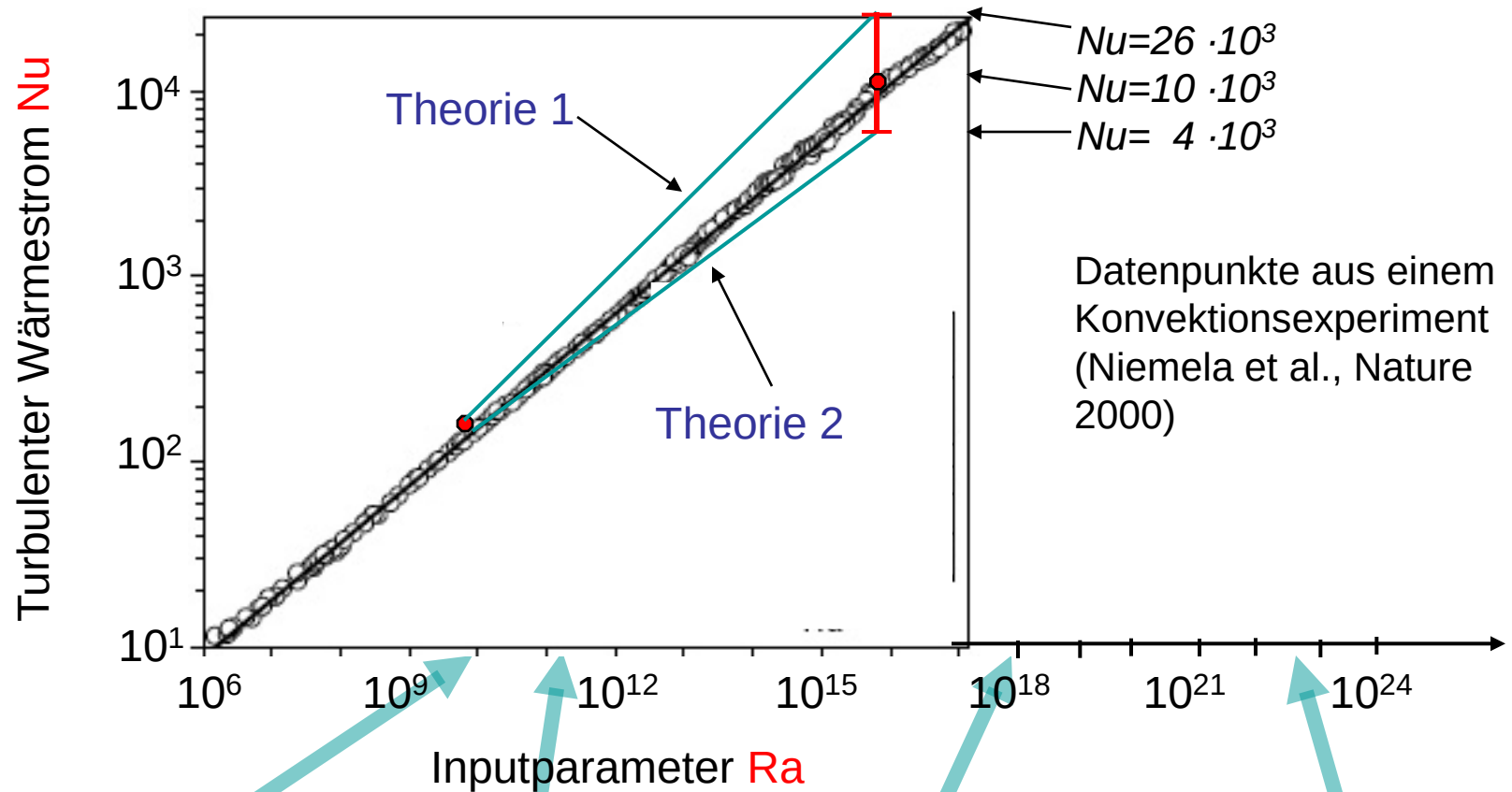
Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus



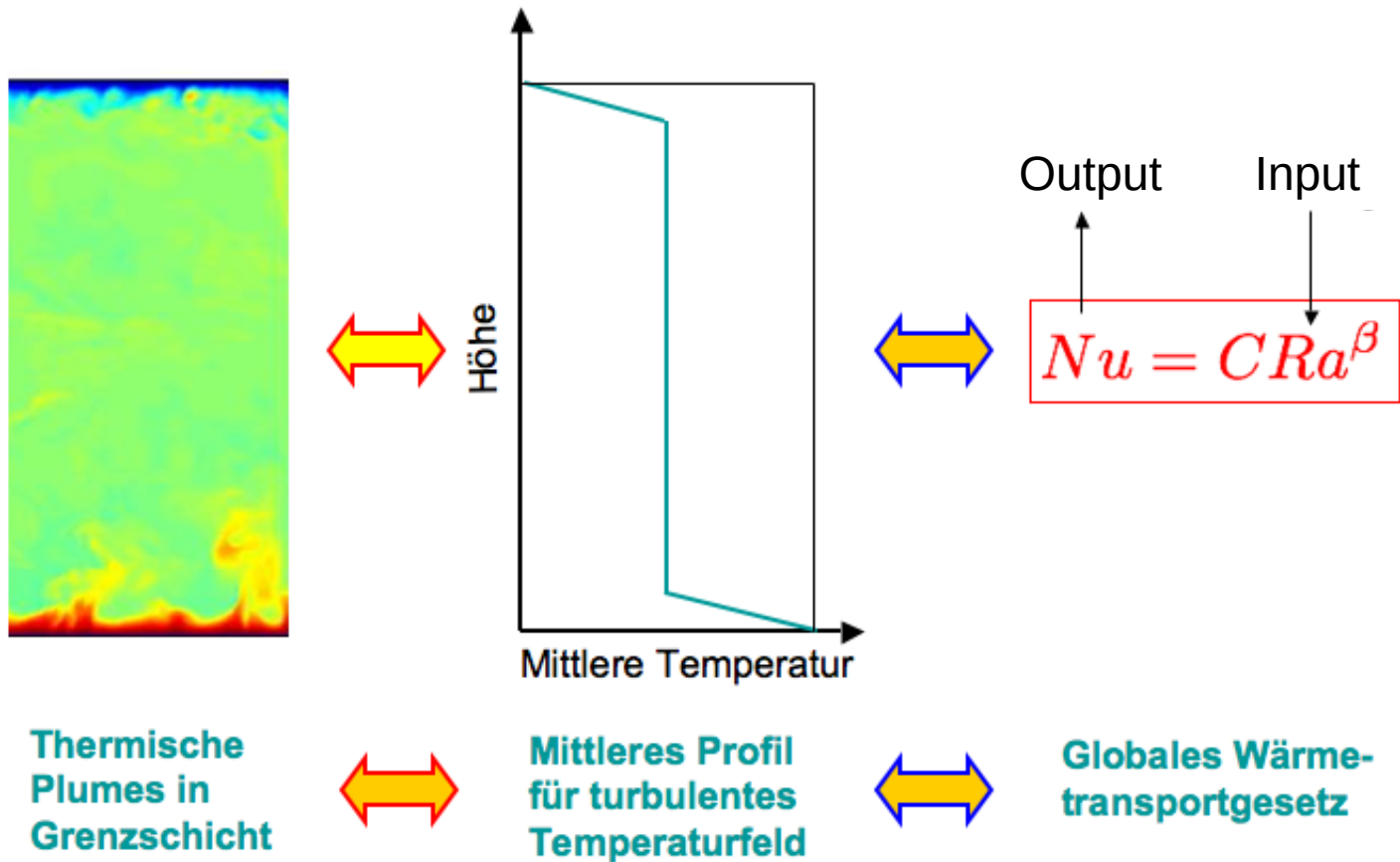
th. TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
ILMENAU

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Warum sind Transportgesetze wichtig?



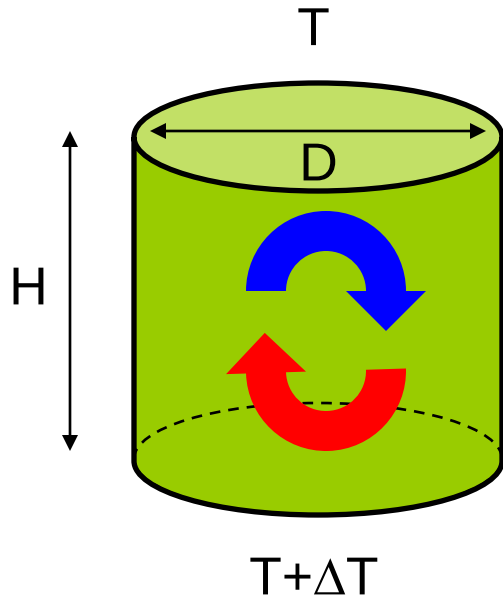
Von lokaler Struktur zu globalem Transport



Drei fundamentale Strömungen

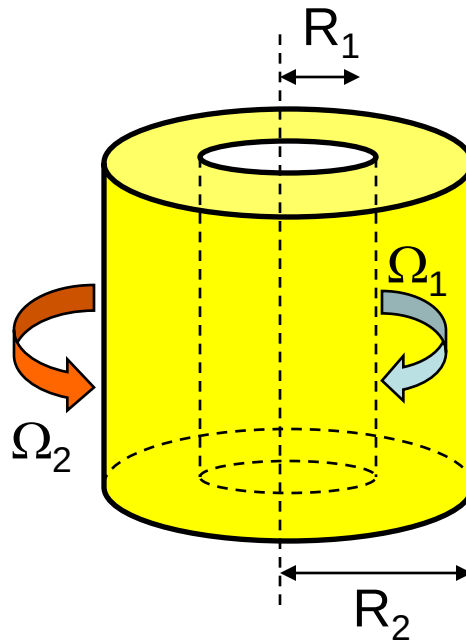
Rayleigh-Bénard-Konvektion (RB)

$$Ra = \frac{g\alpha\Delta TH^3}{\nu\kappa}$$



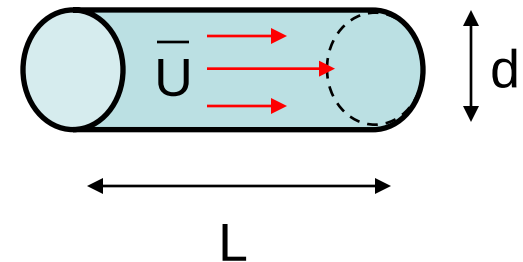
Taylor-Couette-Strömung (TC)

$$Re_{1,2} = \frac{\Omega_{1,2} R_{1,2} d}{\nu}$$



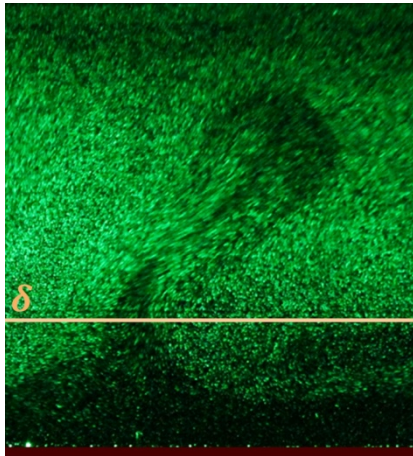
Rohrströmung (RS)

$$Re = \frac{\bar{U} d}{\nu}$$

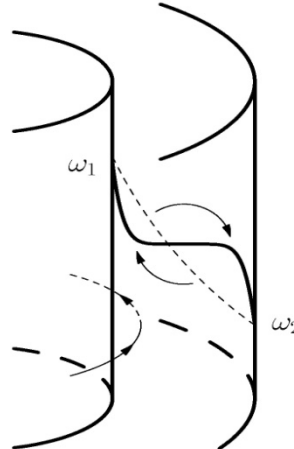
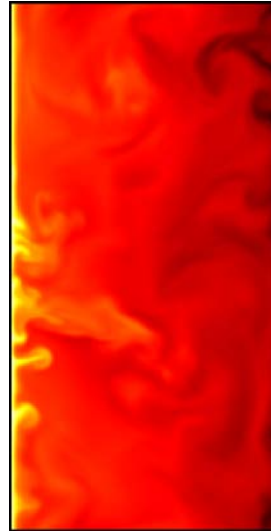


Analogien im globalen Transport

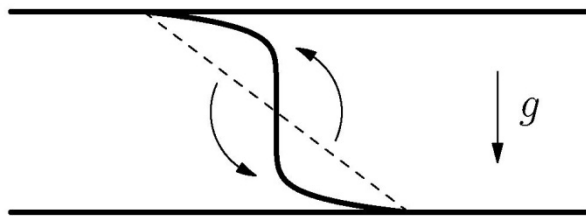
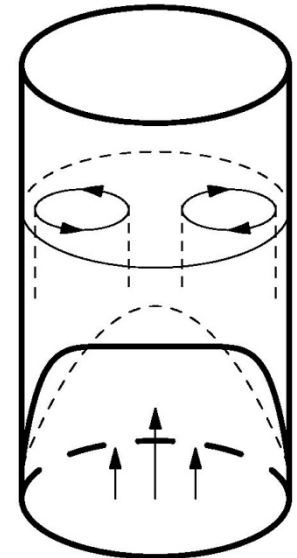
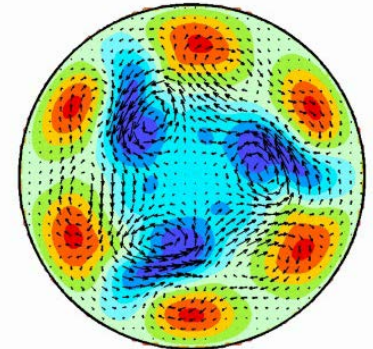
Rayleigh-Bénard-Konvektion (RB)



Taylor-Couette-Strömung (TC)



Rohrströmung (RS)



Beobachtung: Extern aufgeprägte Antriebe führen zu transversalen Strömungen.
Frage: Was können wir über das Skalierungsverhalten aussagen?

Korrelationen & Dissipationsraten

Folgende Korrelationen gehen in die globalen Transportgesetze ein

	Korrelation	Dissipationsrate
RB	$\langle u_z T \rangle$	$\epsilon_T = g(Ra)$
TC	$\langle u_r u_\phi \rangle$	$\epsilon = g(Re_{1,2})$
RS	$\langle u_r u_z \rangle$	$\epsilon = g(Re)$

z.B. bei RB: $Nu = 1 + \frac{H}{\kappa \Delta T} \langle u_z T \rangle_{v,t}$ und $\epsilon_T = \frac{Nu}{\sqrt{RaPr}}$

Analogien im globalen Transport

Rayleigh-Bénard-Konvektion (RB)

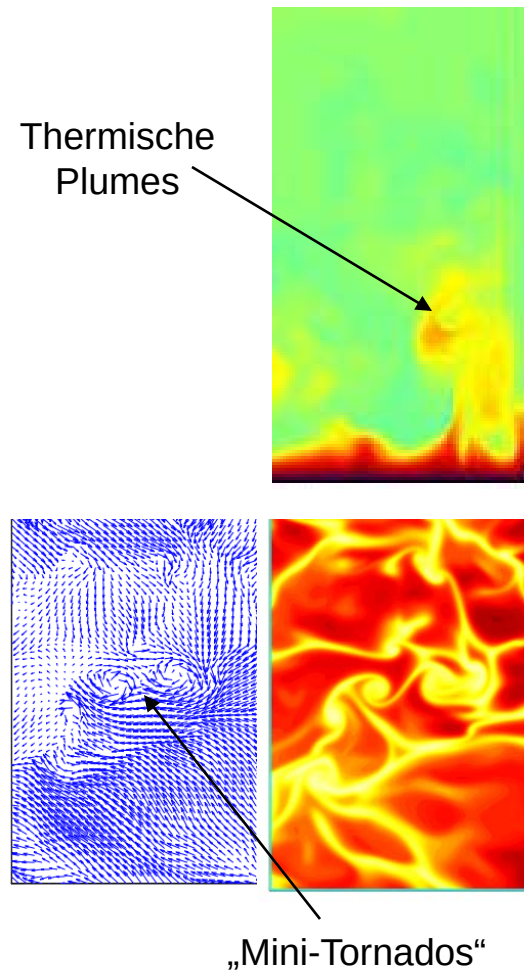
Taylor-Couette-Strömung (TC)

Rohrströmung (RS)

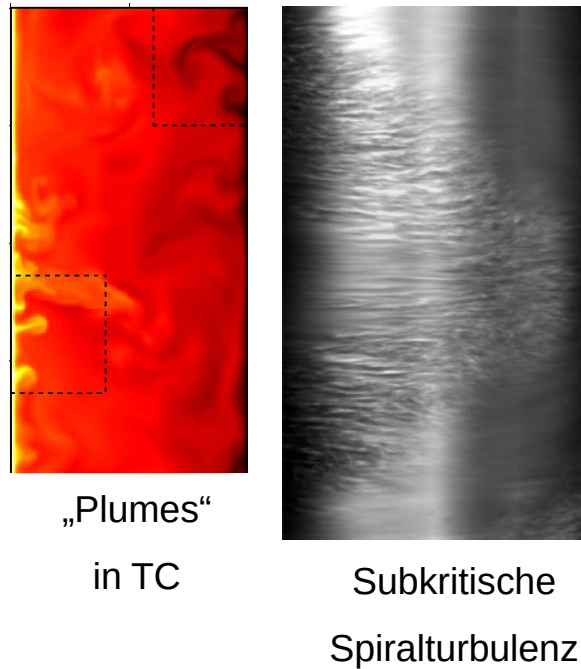
Input	Temperatur-differenz	Ra	Drehzahl	Re_1, Re_2	Volumen-strom	Re
	Material	Pr	Geometrie	η		
Output	Wärme-strom	Nu	Drehimpuls-strom	Nu_ω	Impulsstrom	Nu_z
	„Wind“	Re	„Wind“	Re_w	„Wind“	Re_w

Strukturen

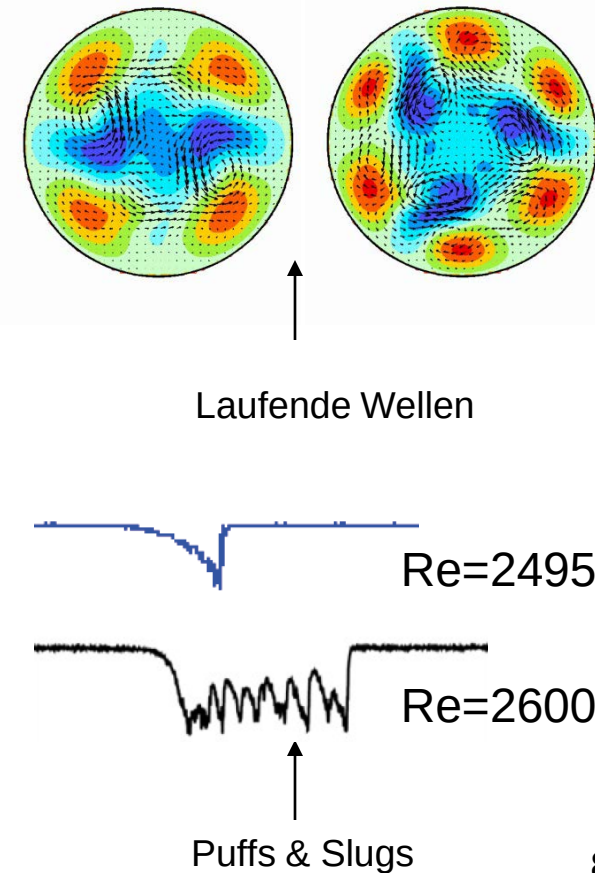
Rayleigh-Bénard-Konvektion (RB)



Taylor-Couette-Strömung (TC)



Rohrströmung (RS)



Warum diese drei Strömungen?

Rayleigh-Bénard-Konvektion (RB)

linear instabil

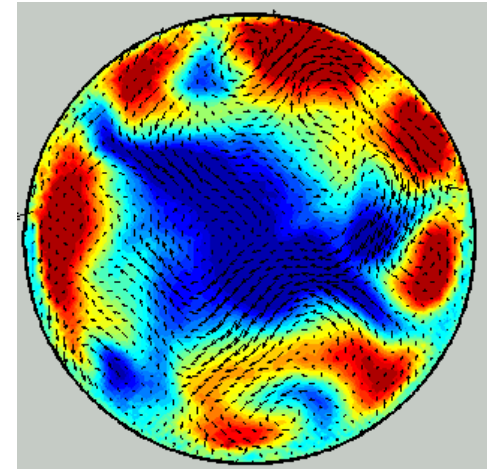
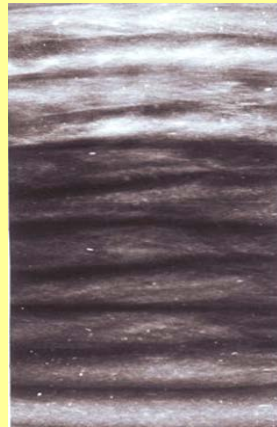
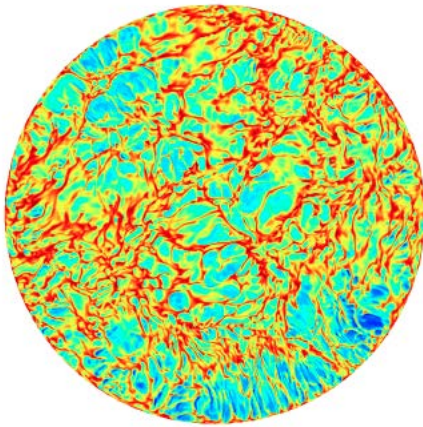
Taylor-Couette-Strömung (TC)

linear instabil / stabil

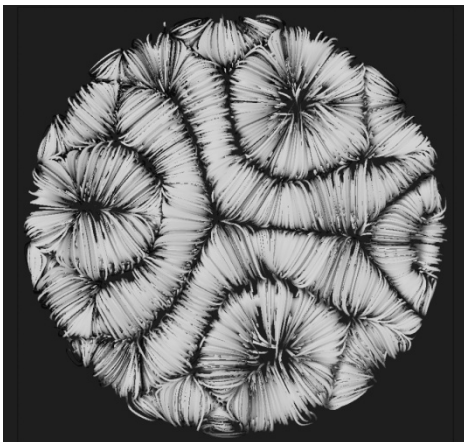
Rohrströmung (RS)

linear stabil

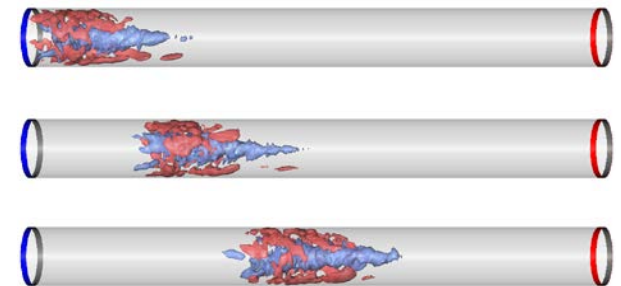
Turbulenz



Übergang
zur
Turbulenz



lokalisierte Bänder



lokalisierte Flecken (Puffs)

Fragestellungen

Globaler Transport

- Welche Form haben die mittleren Profile der Felder und Korrelationen?
- Wie variiert der globale Transport zwischen linear stabilen/instabilen Strömungen?
- Wie unterscheidet sich die Grenzschicht mit/ohne Auftrieb?
- Werden die prognostizierten Skalengesetze beobachtet?

Lokale Strukturbildung

- Welche Gemeinsamkeiten haben die wandnahen Strukturen?
- Welche charakteristischen Lebensdauern haben die Strukturen?
- Welchen dynamischen Zyklen unterliegen die Strukturen?
- Wie hängen ihre Abmessung und Dynamik von der Geometrie ab?
- Welches statistische Gewicht haben die Strukturen?

Forschergruppenstruktur

Experiment

TU Ilmenau
du Puits, Resagk, Thess
Ingenieurwissenschaften

MPI Göttingen
Hof
Physik

Uni Erlangen
Ertunç, Lienhart, Delgado
Ingenieurwissenschaften

DNS/Theorie

TU Ilmenau
Schumacher
Ingenieurwissenschaften

BTU Cottbus
Egbers
Ingenieurwissenschaften

Uni Erlangen
Avila
Ingenieurwissenschaften

Koordination

Uni Marburg
Eckhardt
Physik

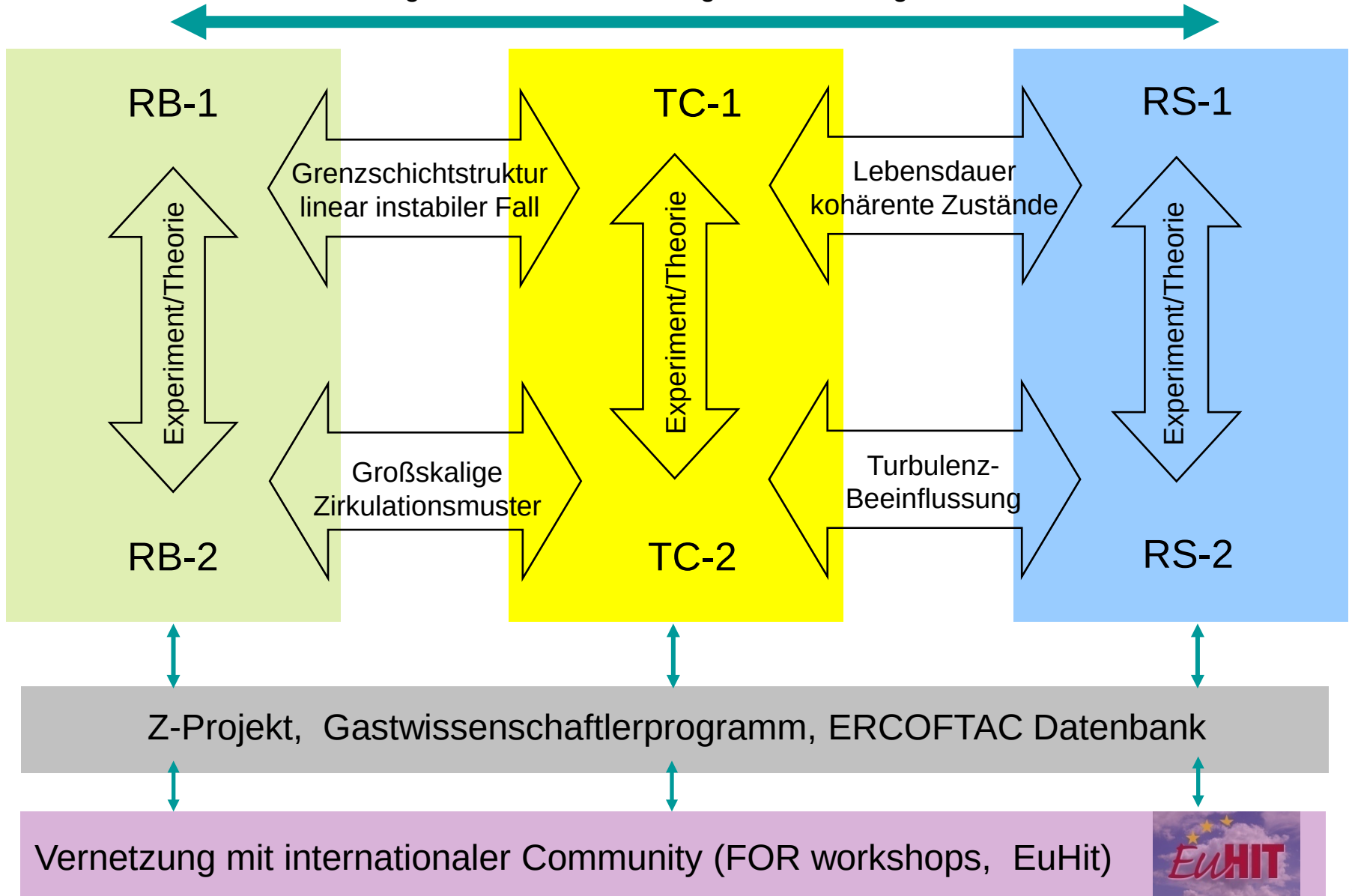
Uni Marburg
Eckhardt
Physik

Z-Projekt

ERCOTAC-Datenbank, Gastwissenschaftlerprogramm, FOR-workshops

Vernetzung

Vergleich vertikaler Profile, globaler Skalengesetze



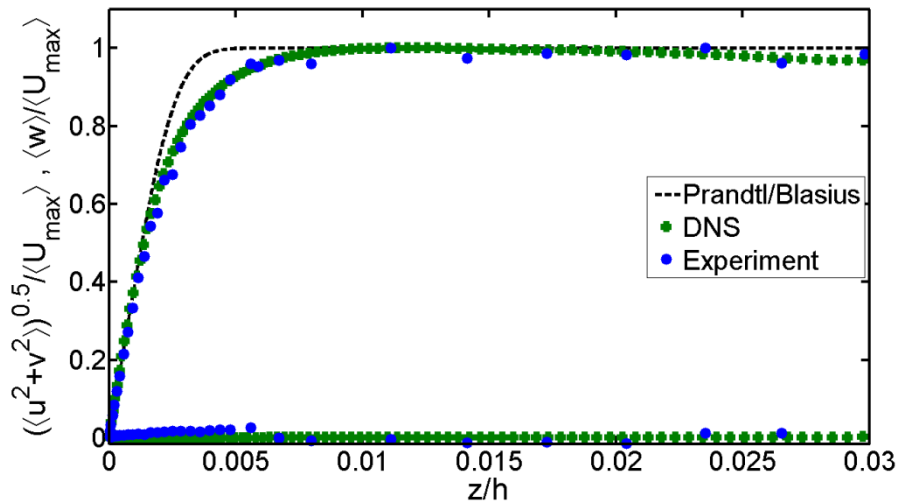
Resultate in RB: Experiment

Zielstellungen:

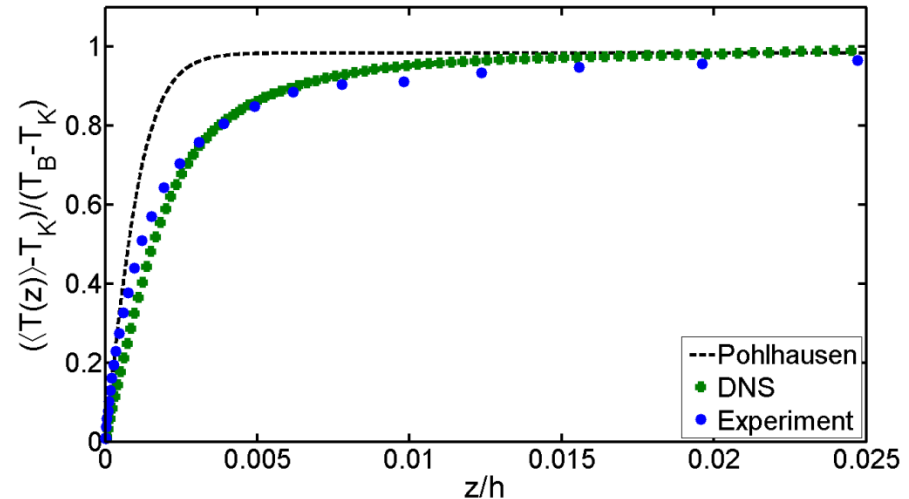
- Lokaler Impuls- und Wärmetransport in den Grenzschichten
- Vergleich von experimentellen Messwerten mit numerischen Daten

Ergebnisse:

Profile der mittleren Geschwindigkeit



Profile der mittleren Temperatur



Fazit:

Die gemittelten Profile der Geschwindigkeit und der Temperatur weichen deutlich von den theoretischen Vorhersagen für eine laminare Plattengrenzschicht ab.

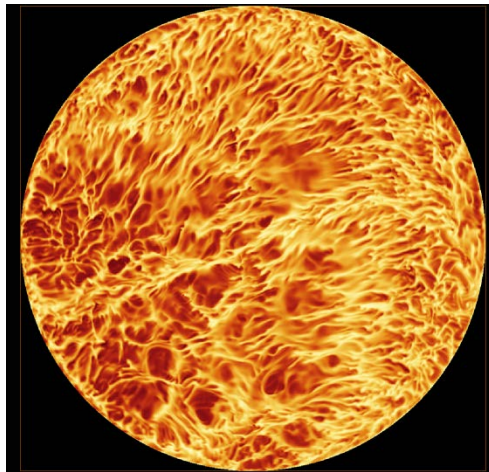
Resultate in RB: DNS/Theorie

Zielstellungen:

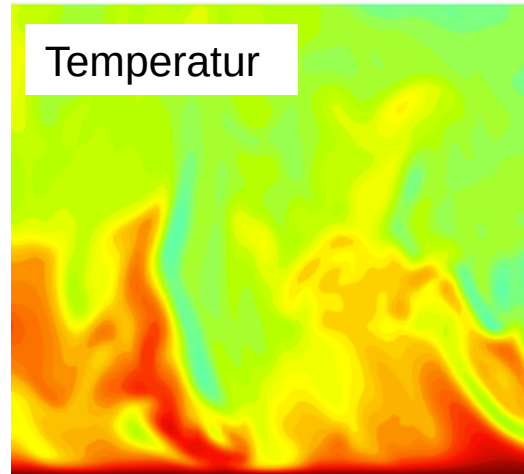
- Analyse der Grenzschichtdynamik und Vergleich mit Messdaten
- Zusammenhang von wandnahen Strukturen und globalem Wärmetransport

Ergebnisse:

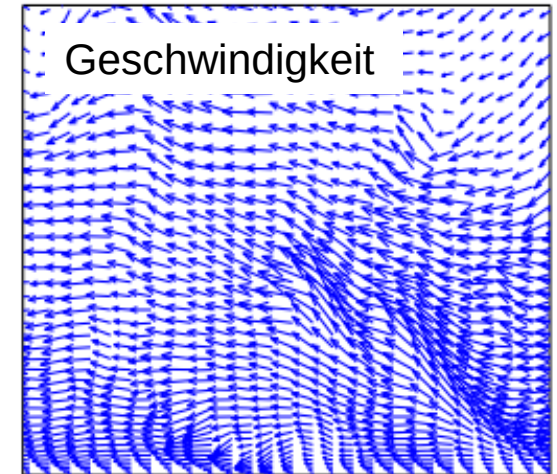
$$Ra = 3 \times 10^{10}, \quad Pr = 0.7, \quad \Gamma = 1$$



Thermische Plumes in der Grenzschicht



Plumeablösung in der Grenzschicht in einer Seitenansicht



Fazit:

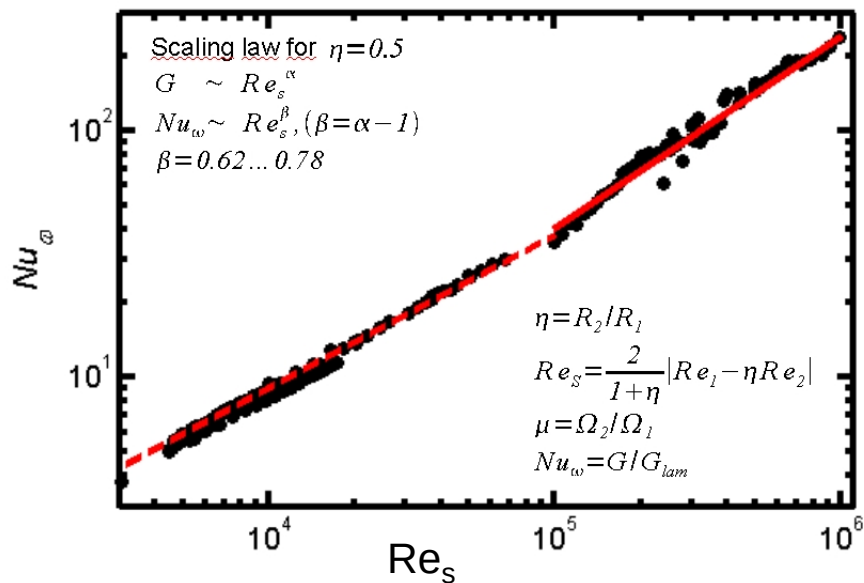
Die Ablösung von thermischen Plumes in der Grenzschicht ist ein dreidimensionaler dynamischer Prozess, der die Geschwindigkeitsprofile aktiv beeinflusst und so zu Abweichungen von den klassischen Blasiusprofilen führt.

Resultate in TC: Experiment

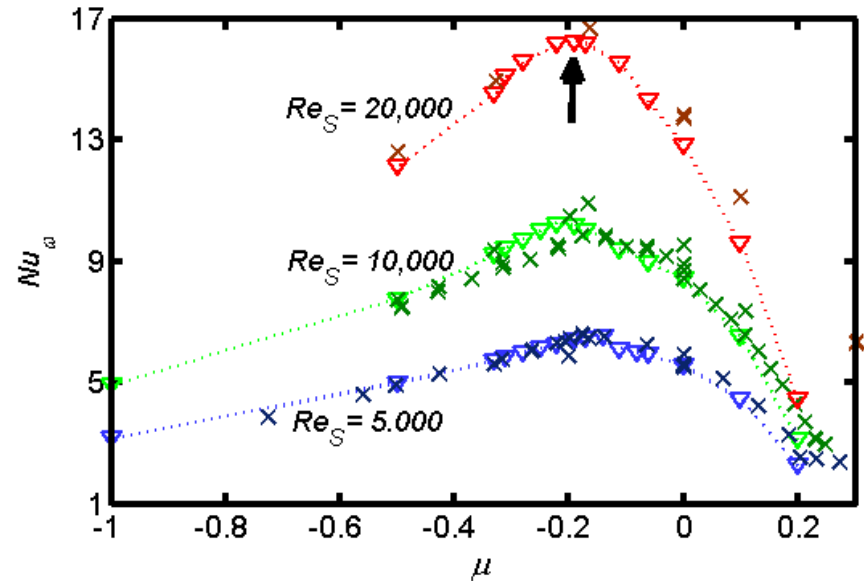
Zielstellungen:

- Messungen von Drehimpulstransport, Geschwindigkeitsprofilen (Radienverhältnis $\eta = 0.5$), Skalierung
- Zusammenhang von Strömungsstrukturen und globalem Impulstransport

Ergebnisse:



J Phys Conf Ser. **318**
 082017 (2011)



PRL
 submitted (2012)

Fazit:

Skalierung für weite Spalte: $G \sim Re_S^\alpha$, $\alpha = 1.62 \dots 1.78$;

optimales Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten $\mu = -0.2$

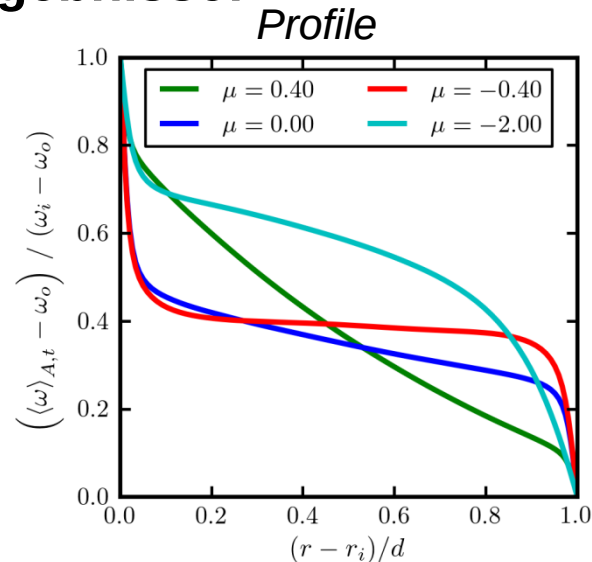
Sehr gute Übereinstimmung von Experiment (BTU) und Numerik (Marburg)

Resultate in TC: DNS/Theorie

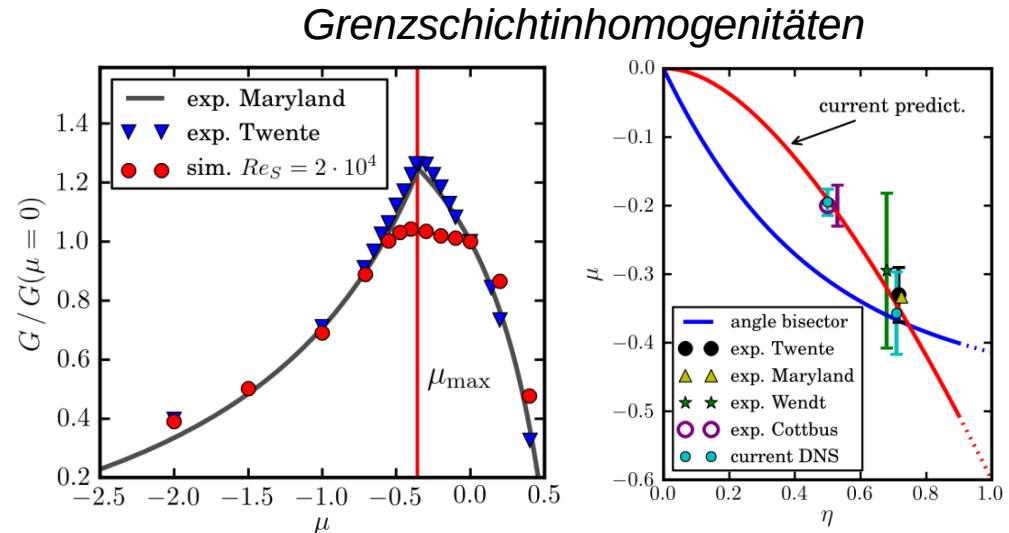
Zielstellungen:

- Bestimmung von Profilen und Drehmomenten bei unabh. Rotation
- Erweiterung der Skalentheorie auf unabh. rotierende Zylinder und rotierende Scherströmungen

Ergebnisse:



JFM, (under revision)
arXiv: 1206.1286



Fazit:

Simulationen erreichen voll-turbulenten Bereich

Modell für Zusammenbruch der Grenzschichten in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen

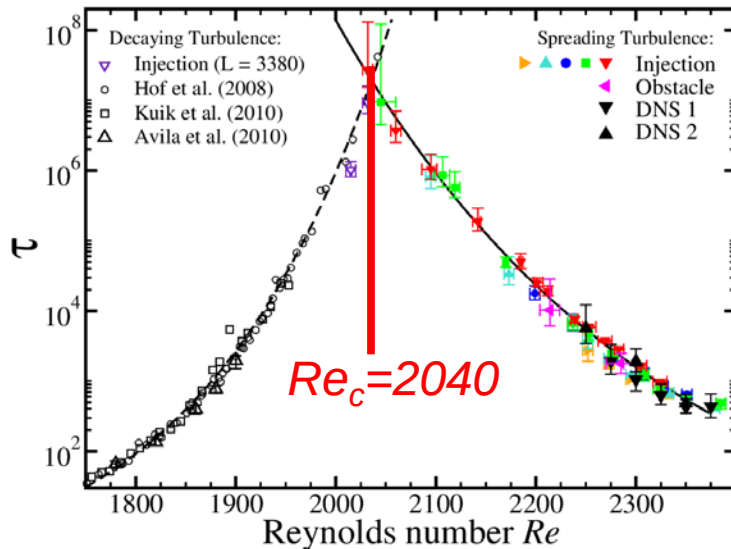
Resultate: Analogie zwischen RS und TC

Zielstellungen:

- Analogien zwischen Turbulenzübergang in Rohrströmung und TC
- Lebenszeiten und Ausbreitungsprozesse charakterisieren

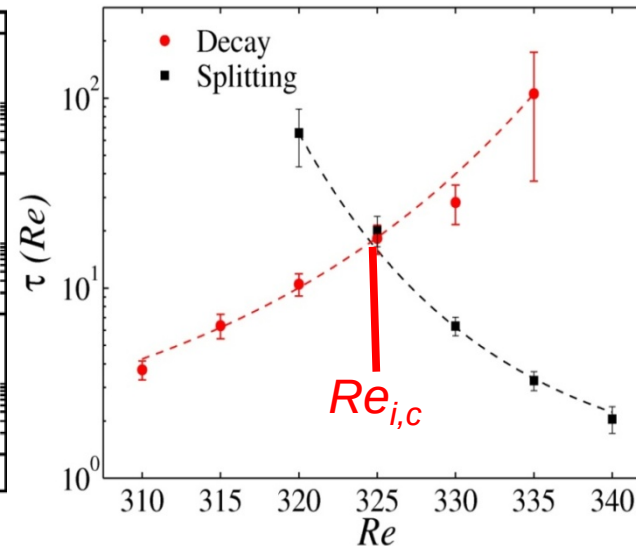
Ergebnisse:

Rohr Experiment + DNS:



Science **333**, 192 (2011)

TC DNS ($\eta=0.993$):



TC Experiment:



Fazit:

Wettbewerb zwischen Ausbreitung und Absterben lokalisierter Strukturen bestimmt den kritischen Punkt.

Turbulenzübergang ist ein Nichtgleichgewichts-Phasenübergang 2. Ordnung.

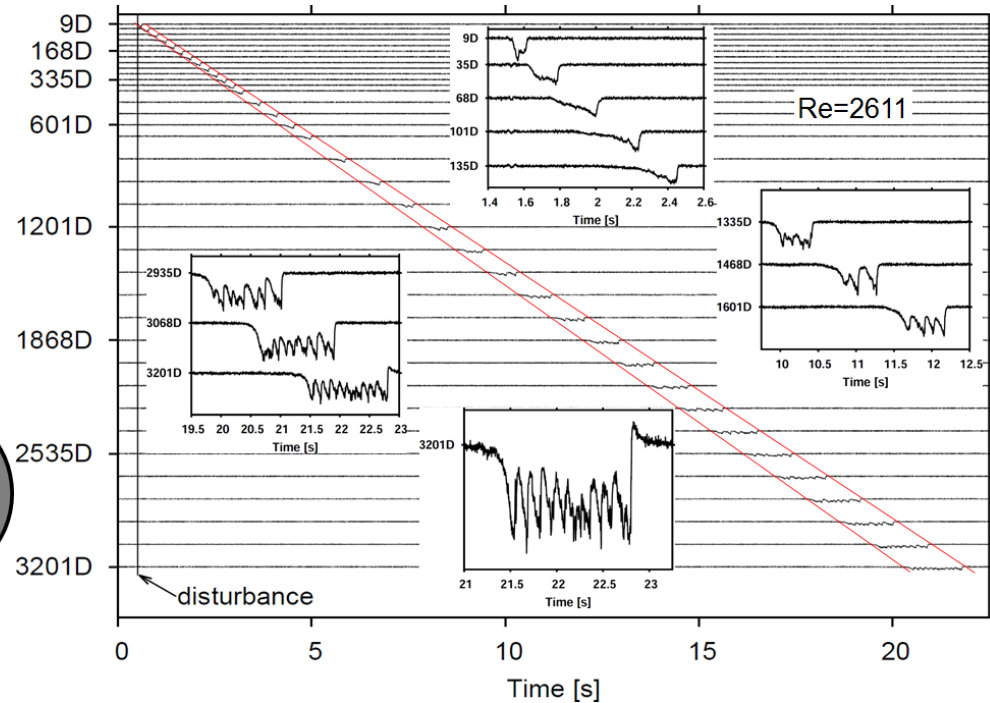
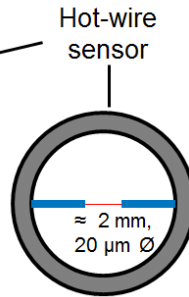
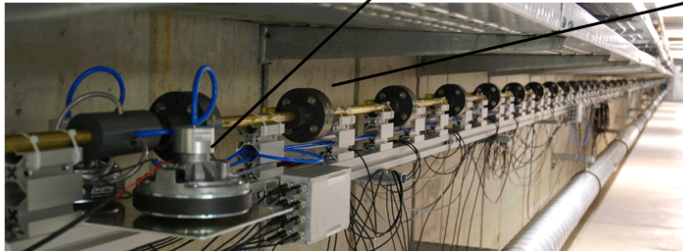
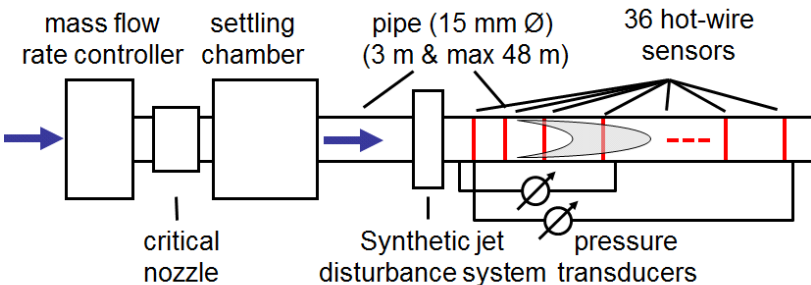
Resultate in RS: Experiment

Zielstellungen:

- Kinematik und Dynamik von transitionalen Strukturen
- Der Zusammenhang zwischen den TW und der Erzeugung von Puffs und Slugs

Ergebnisse:

Strukturverfolgung: 3200 D Versuchstand und eine Beispielmessung



Fazit:

Die Strukturverfolgungsmethode wird zum besseren Verständnis der Dynamik und Kinematik von gespalteten Puff und Slug Strukturen benutzt.

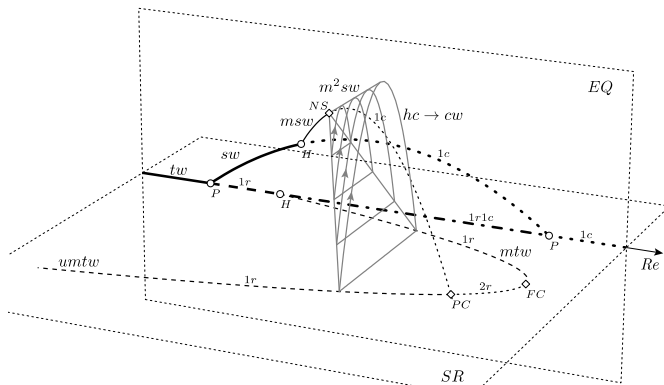
Resultate in RS: DNS/Theorie

Zielstellungen:

- Aufklärung der globalen Bifurkationen auf dem Weg zur Turbulenz
- Raum-zeitliche Dynamik
- Beeinflussung und Stabilisierung der Strömung

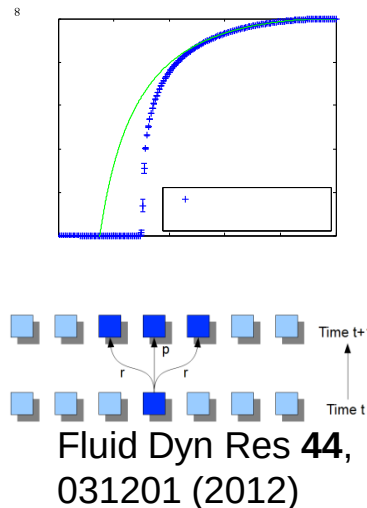
Ergebnisse:

Entstehung der Strukturen Bifukationsdiagramm



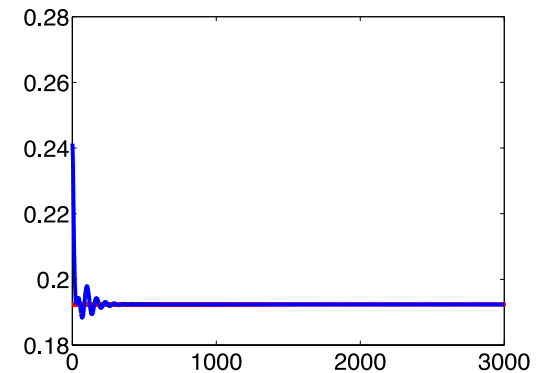
JFM **670**, 96 (2011)
JFM **709**, 149 (2012)

Raum-zeitliche Vernetzung



Fluid Dyn Res **44**,
031201 (2012)

Stabilisierung



J Phys Conf Ser. **318**,
032005 (2008)

Fazit:

Bifurkationen vom Entstehen bis zur Turbulenz aufgeklärt
Automatenmodell zur direkten Perkolationsentwicklung
Erste Ergebnisse zur Stabilisierung in der ebenen Couette Strömung

Weitere „highlights“ der ersten Phase

- **Rufe auf Professuren:**

- Björn Hof (Göttingen) : Professur an der Universität Oslo (nicht angenommen)
Professur am IST (Wien)
- Marc Avila (Göttingen): Professur an LSTM, Universität Erlangen
- Birgit Futterer (BTU-Cottbus):
Dorothea-Erxleben-Professur für 2012/13
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

- **Preise und Auszeichnungen:**

- **Meyer-Struckmann-Wissenschaftspreis** 2011 der BTU an Björn Hof
- **ERC starting grant** 2012 für Björn Hof (Göttingen)
- **Young scientist award** (EFMC 2010) für Dr. Birgit Futterer, BTU Cottbus
- **Young scientist award** (EFMC 2012) für Hannes Brauckmann, Uni Marburg

- Bundeswettbewerb " **Deutschland, 365 Orte, Land der Ideen** " für
Christoph Egbers (BTU Cottbus), Auszeichnung für Geoflow (2012)

Weitere „highlights“ der ersten Phase

- **Publikationen:**

- Turbulenzübergang im Rohr von Kerstin Avila, Marc Avila und Björn Hof
Science 2011
dazu News & Views von Bruno Eckhardt (2011)
- **Spektrum der Wissenschaft**, Ausgabe 03/2012 von Kerstin Avila & Björn Hof
- Focus Issue „New perspectives in high Rayleigh number turbulent convection“
New J. Phys. mit Jörg Schumacher (Ko-Editor)
- Review: Thermal convection, J. Schumacher und F. Chillà **EPJ E** (2012)

- **Plenarvorträge:**

- Bruno Eckhardt: **EFMC 8** in Bad Reichenhall (2010) und
„**IUTAM Symposium on 50 Years of Chaos**“, Kyoto (2011)
- Jörg Schumacher: „**ETC13**“ in Warschau (2011).
- Bruno Eckhardt & Björn Hof: „**Int. Symp. on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics**“ in Barcelona (2011).

- **Tagungsorganisation:**

- 17./18./19. **GALA**-Fachtagungen, Erlangen (2009), Cottbus (2010), Ilmenau (2011)
- Internationaler **DFG-FOR 1182 Workshop** im September 2011 in Bad Dürkheim
- Bruno Eckhardt & Jörg Schumacher:
Mitorganisatoren (Transition, Mixing) bei **ICTAM** 2012 in Peking.

Nachwuchs- und Frauenförderung

- **Turnusmäßige halbjährliche Treffen** aller Mitglieder
Separate Treffen der Doktorandinnen und Doktoranden
im Juni 2011 in Cottbus und
im Juli 2012 in Erlangen
- **European Postgraduate Conference** in Göttingen, August 2011,
mit 75 Teilnehmern
Organisiert von Matthew Salewski, Marburg,
und Kerstin Avila, Göttingen
- **Wissenschaftliche Mitarbeiterinnen** in den Projekten:
Ilmenau (RB 1 und RB 2): Ling Li und Nan Shi
Göttingen (TC 1): Kerstin Avila
Marburg (TC 2 und RS2): Korinna Allhoff und Marina Pausch (Phase 2)
Erlangen (RS 1): Nesrin Talat und Alena Taranka (Phase 2)
Cottbus (Z): Dr. Rodica Borcia (Koordination Z-Projekt)
Cottbus (weibl. Nachwuchsgruppe) Dr. Birgit Futterer (+ 2 Doktorandinnen)

Z-Projekt

- (i) Gastwissenschaftler-Programm, Workshops und halbjährliche Arbeitstreffen,
- (ii) Workshop "Dynamics of Coherent Structures in Turbulent Flows",
97 Teilnehmer, 26 internationale Gäste, 14 eingeladene Vorträge, 19.09-21.09.2011 (in Bad Dürkheim)
- (iii) Gemeinsame Datenbasis (ERCOFTAC Datenbasis):
enthält Datensätze
zur Konvektion in Grenzschichten (3+2 aus FOR1182)
zur Rohrströmung (2)
zum Taylor-Couette-Problem (0+1 aus FOR 1182)
- (iv) Gemeinsame Webseite
<http://www.tu-cottbus.de/for1182>

Beantragt (2. Phase)

Struktur wie bisher

Fortführung der Kooperation mit Björn Hof in Wien

Neuer Antragsteller: Marc Avila in Projekt RS2

Internationaler Workshop für 2014

