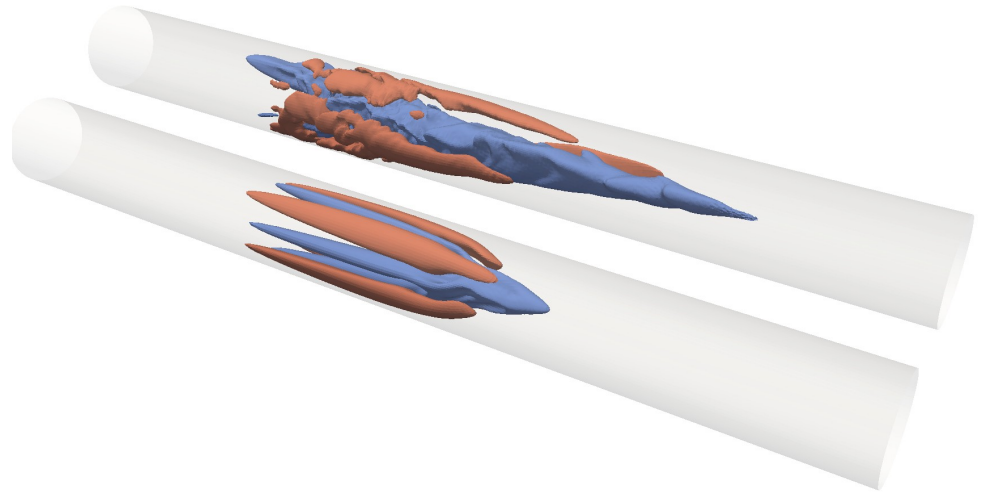
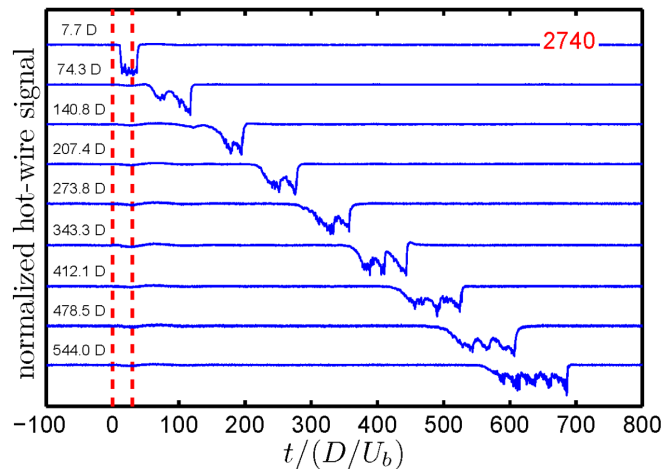


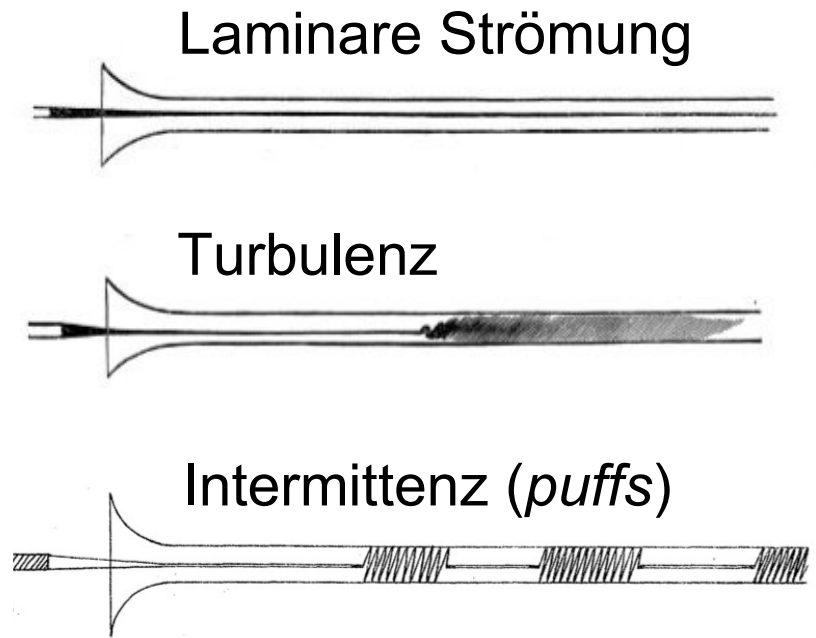
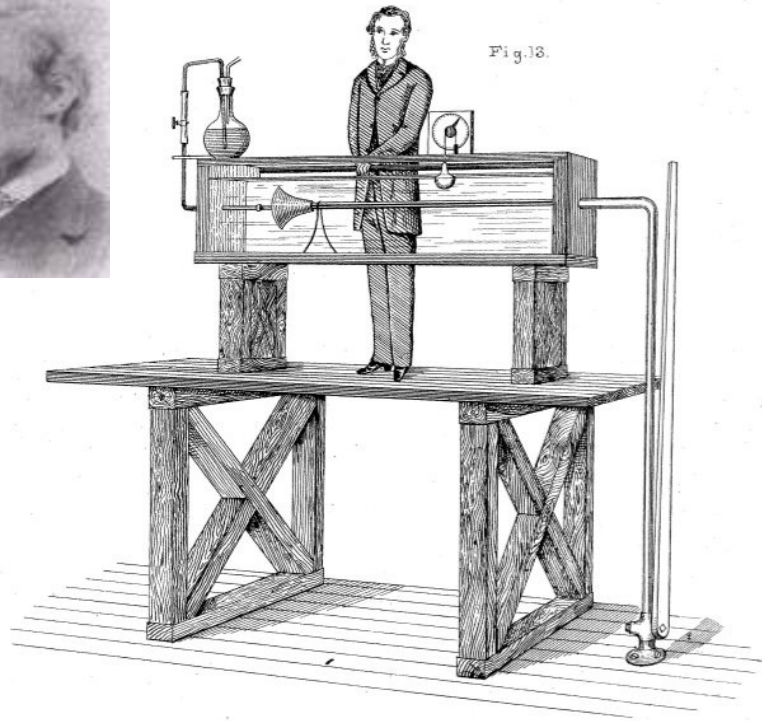
Strukturbildungsprozesse in turbulenten Rohrströmungen



Experimente: RS-1 Erlangen & TC-1 Göttingen

Theorie/Numerik: RS-2 Marburg & RS-2 Erlangen

Einsatz der Turbulenz in der Rohrströmung



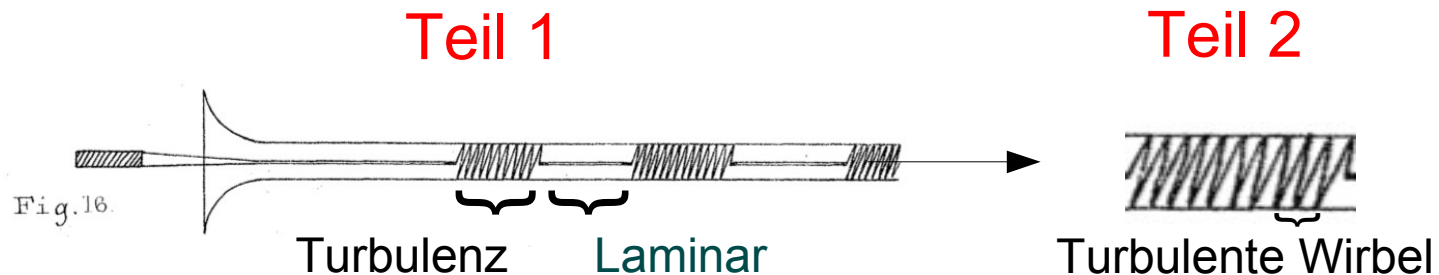
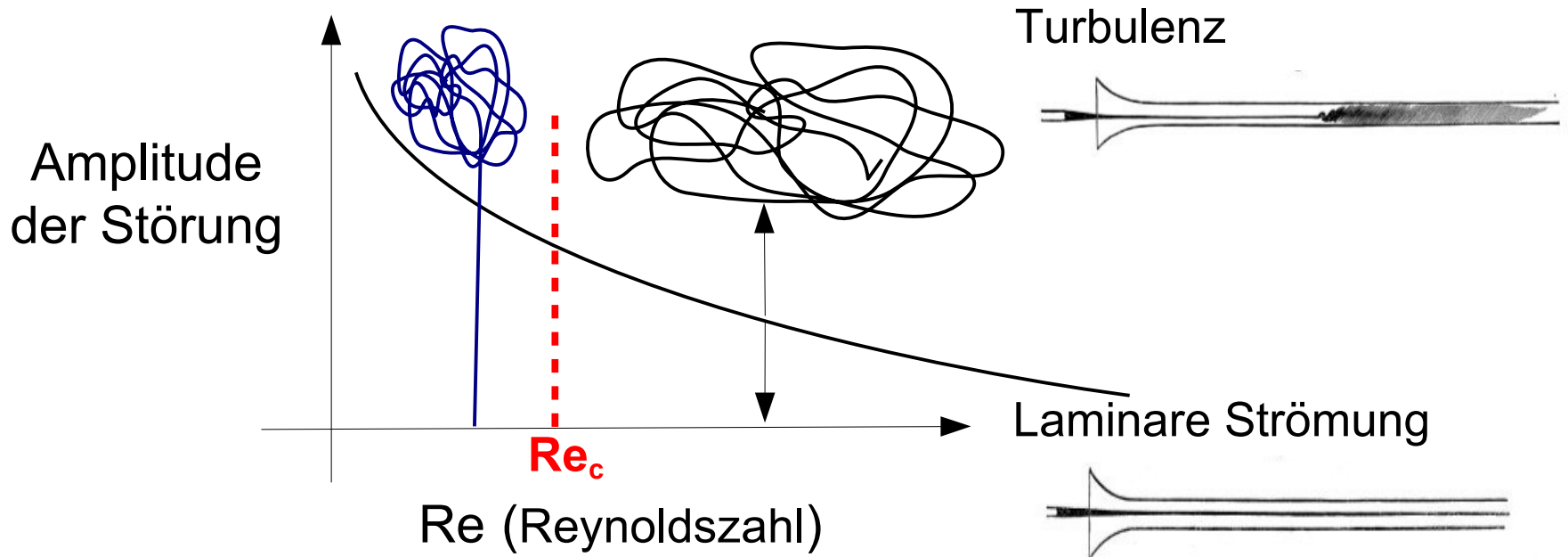
Osborne Reynolds, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* (1883)

puffs ($Re=2300$)

slug ($Re=2900$)

Der kritische Punkt: Re_c

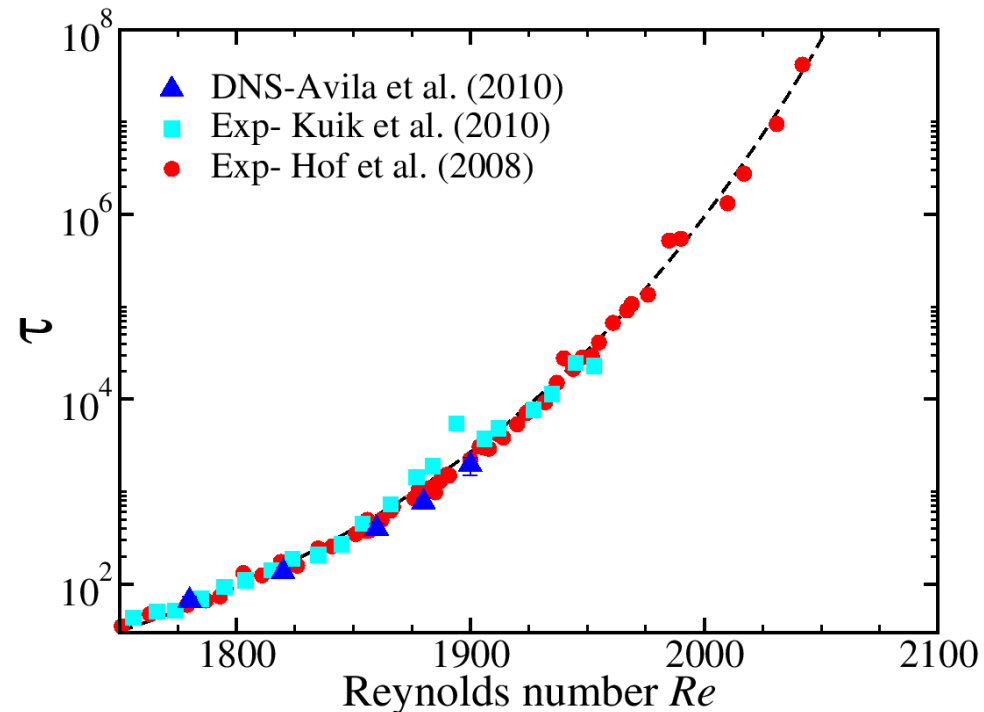
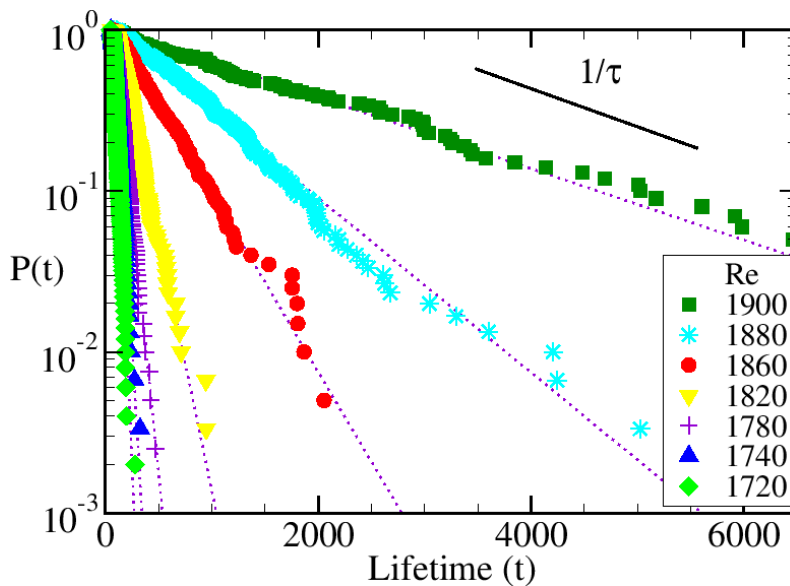
“ ... the real critical value.” (O. Reynolds)



Transiente Turbulenz

Re=1740

puff: Wirbelstärke (mitbewegter Beobachter). Bild: 25D, Simulation: 50D.



- ✓ Zerfallszeiten: superexponentiell
- ✓ Turbulente puffs: *immer* transient
- ✓ Quantitative Übereinstimmung:
Experiment und Numerik

TC-1 Göttingen:

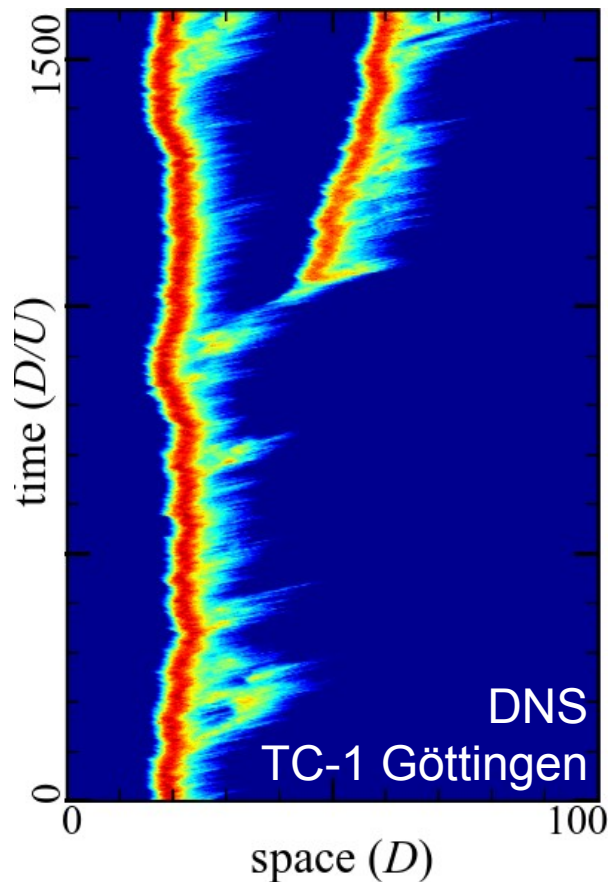
Hof et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2008

Avila, Willis & Hof, *J. Fluid Mech.*, 2010

Puff-splitting: Ausbreitung der Turbulenz

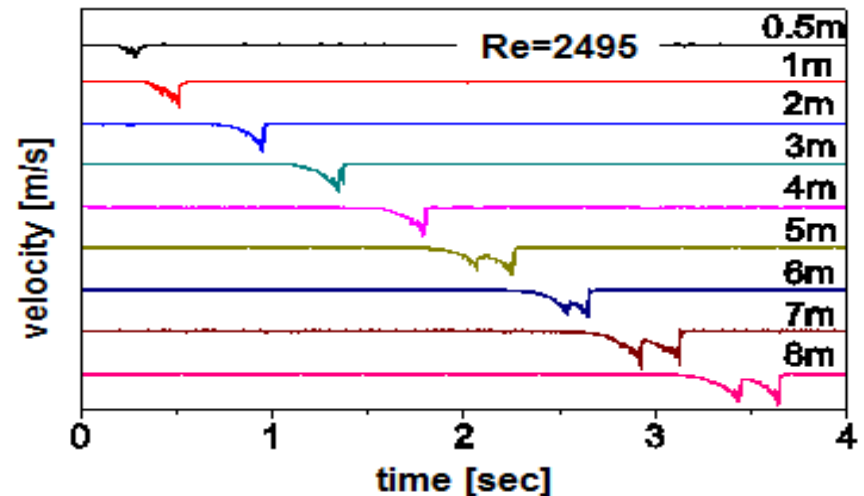
Re=2300

Wirbelstärke (mitbewegter Beobachter)



K. Avila *et al.*, *Science*, 2011

Geschwindigkeit im Rohrzentrum



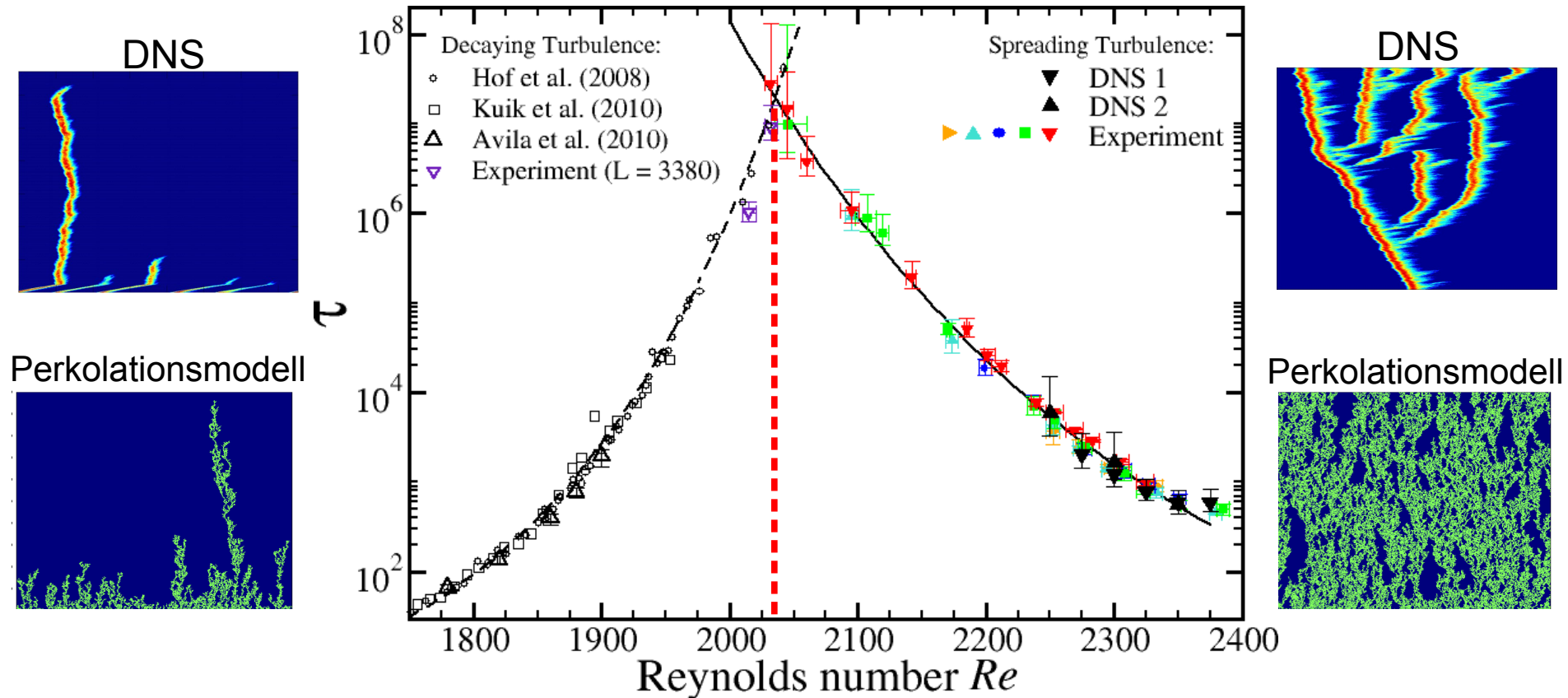
RS-1 Erlangen:

Nishi *et al.* (LSTM), *J. Fluid Mech.*, 2008

- ✓ Stochastischer Prozess
- ✓ Analyse: gedächtnislos

Der Einsatz dauerhafter Turbulenz

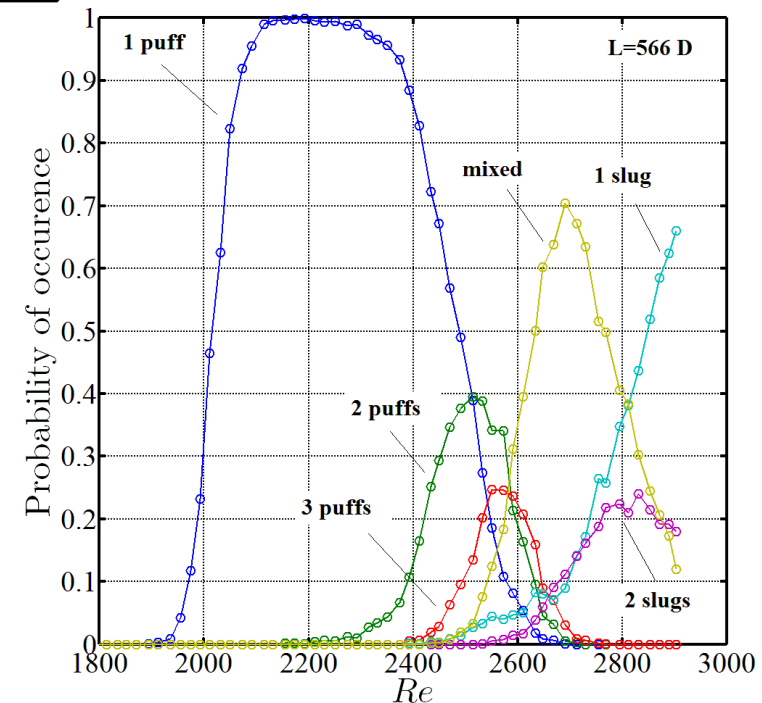
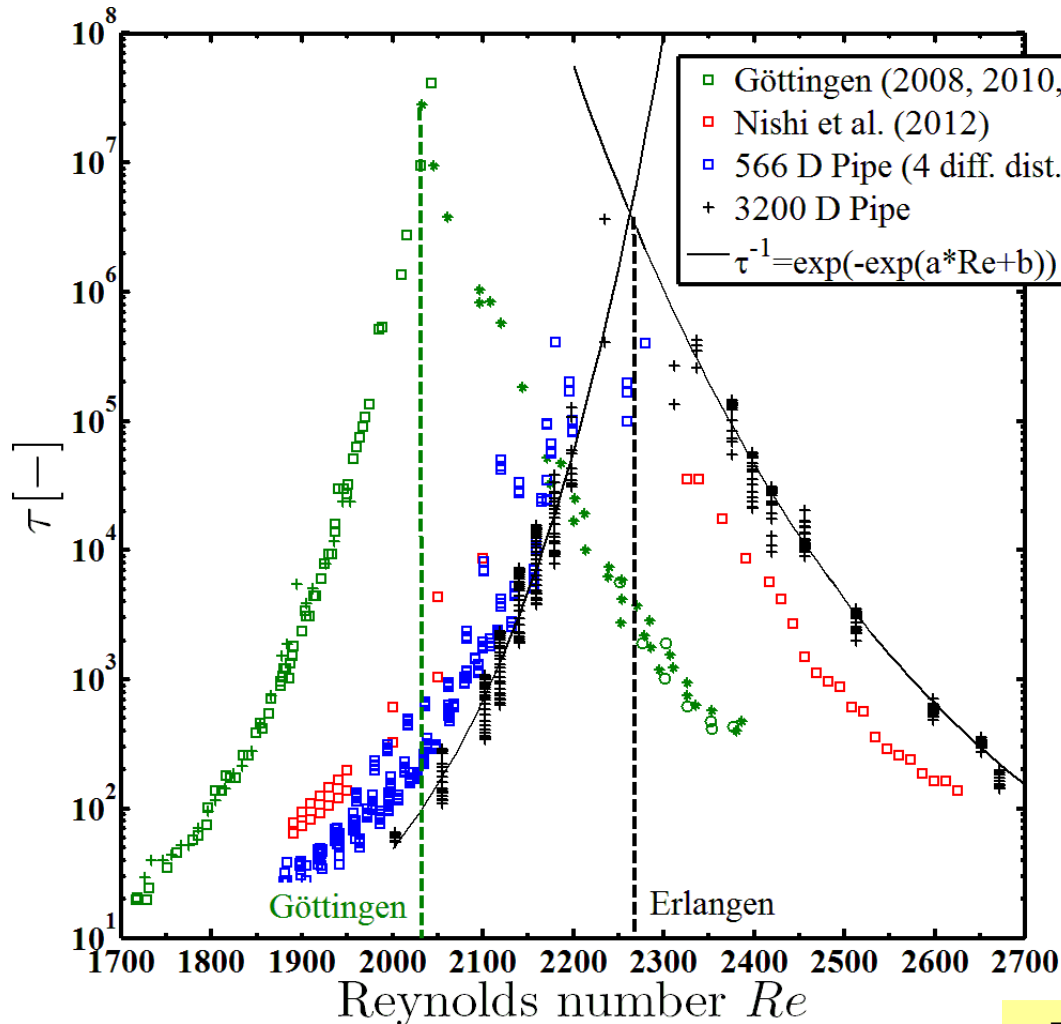
“real critical value”: $Re_c = 2040 \pm 10$



RS-2 Marburg: Modell von Allhoff & Eckhardt, *Fluid Dyn. Res.*, 2012

TC-1 Göttingen: K. Avila, Moxey, de Lózar, M. Avila, Barkley & Hof, *Science*, 2011

Der Einsatz dauerhafter Turbulenz (RS-1)

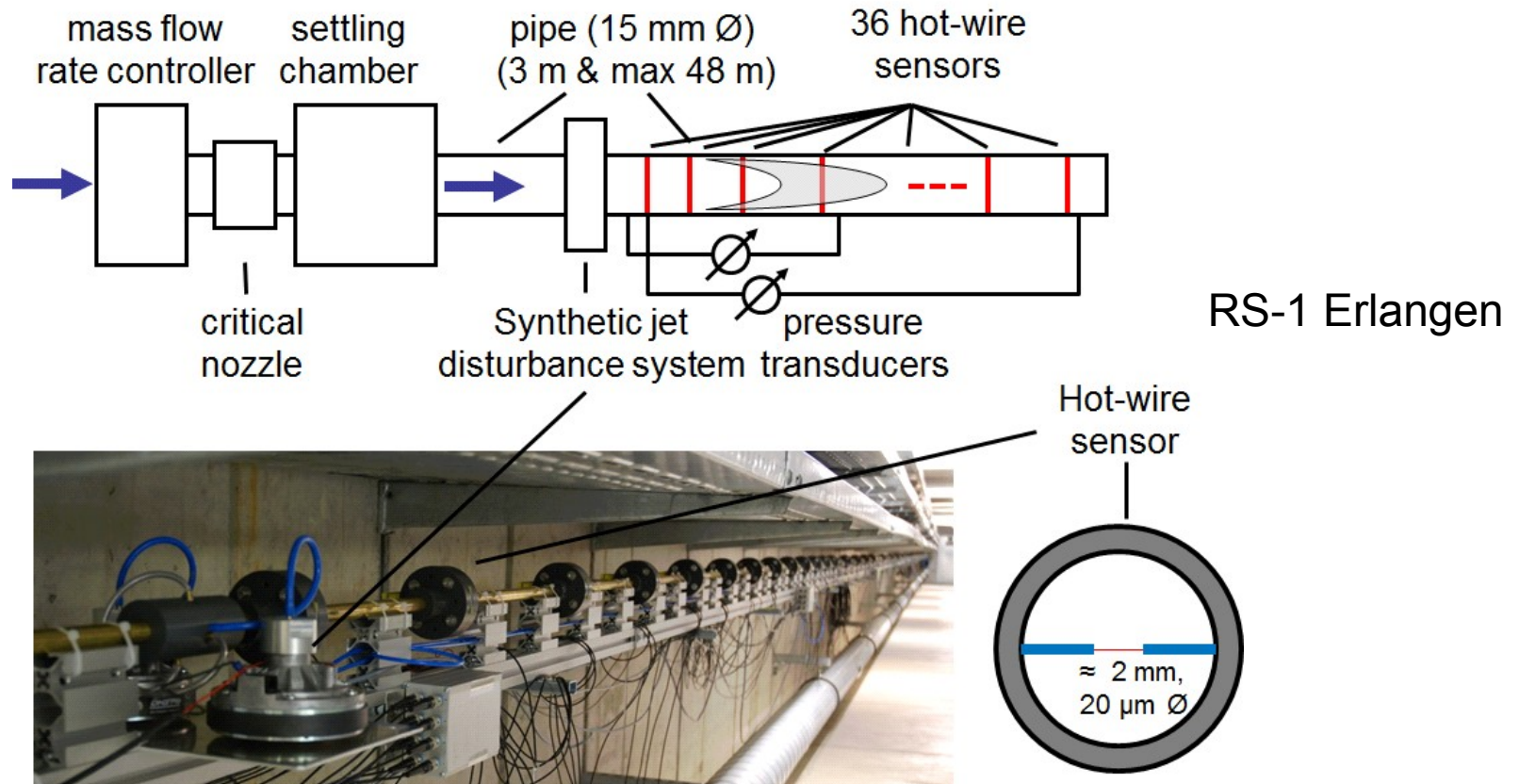


Krauß et al., *Notes on Num. Fluid Mech. & Multidisc. Design*, 2012

Nishi et al., *J. Fluid Mech.* (eingereicht)

- ✓ Zerfallszeiten superexponentiell
- ✓ Splittingzeiten: superexponentiell
- ✓ Konkurrenz definiert Re_c
- ✗ Diskrepanz in Reynoldszahl: warum?

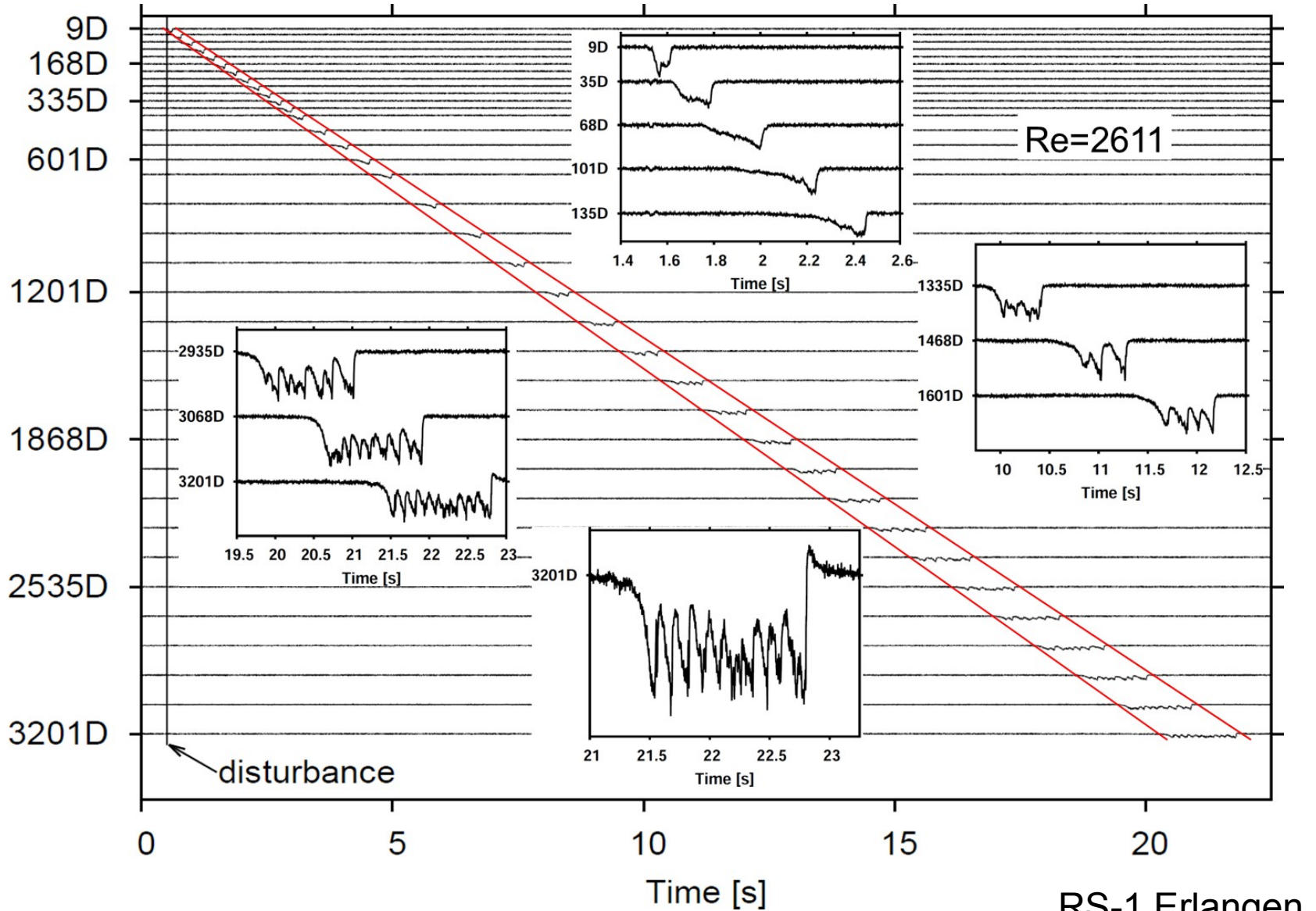
Neues Experiment: Erfassung der raum-zeitlichen Dynamik

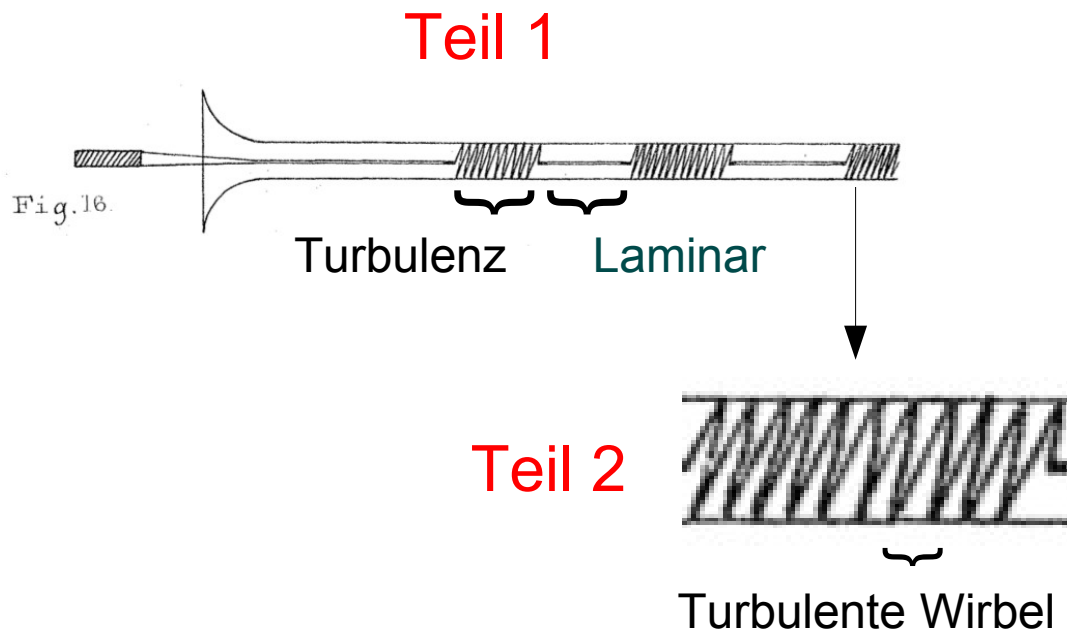


Rohrlänge: 48m (3200D)

Selbstentwickelte Sensoren und Störungseinheiten ($> 1D/U$ Störungszeit)

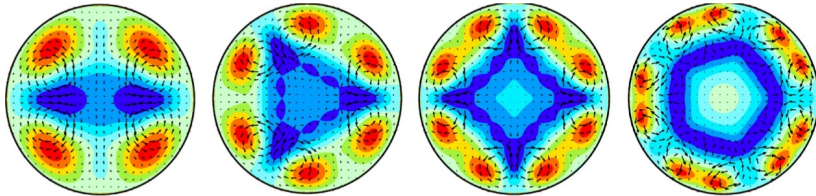
Strukturverfolgung im Experiment



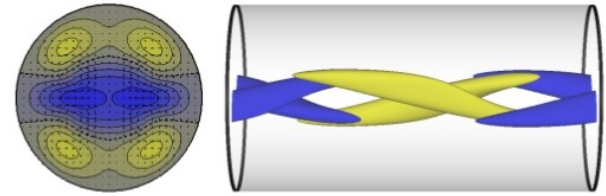


Der Phasenraum: kohärente Strukturen

Traveling waves (TW) sind instabile Lösungen der Navier-Stokes Gleichung:



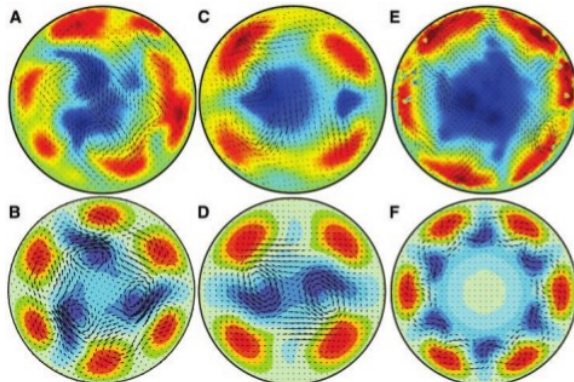
Faisst & Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.*, 2003



$$\vec{v}(r, \theta, z, t) = \vec{v}(r, \theta, z - c \Delta t, t + \Delta t)$$

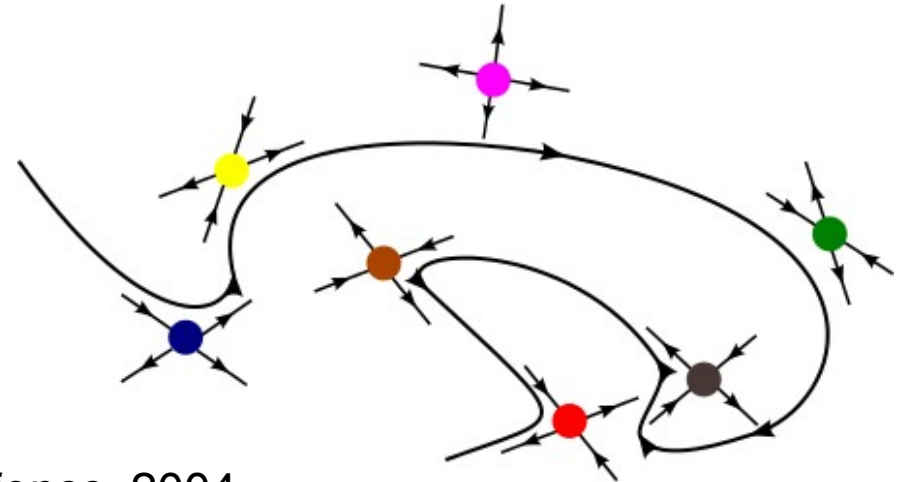
Fragen:

1. Von TW zur Turbulenz?
2. Kann man gezielt LW erzeugen?



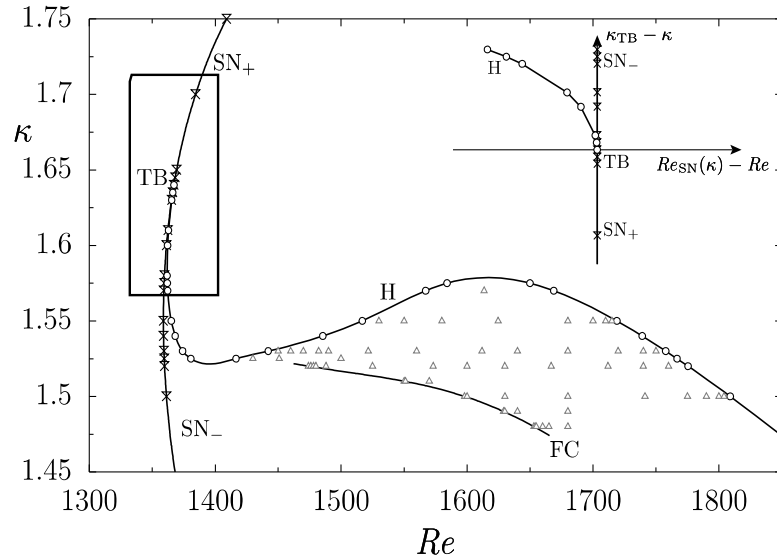
Experimente:
Hof et al., *Science*, 2004

Turbulenz als Pinball:

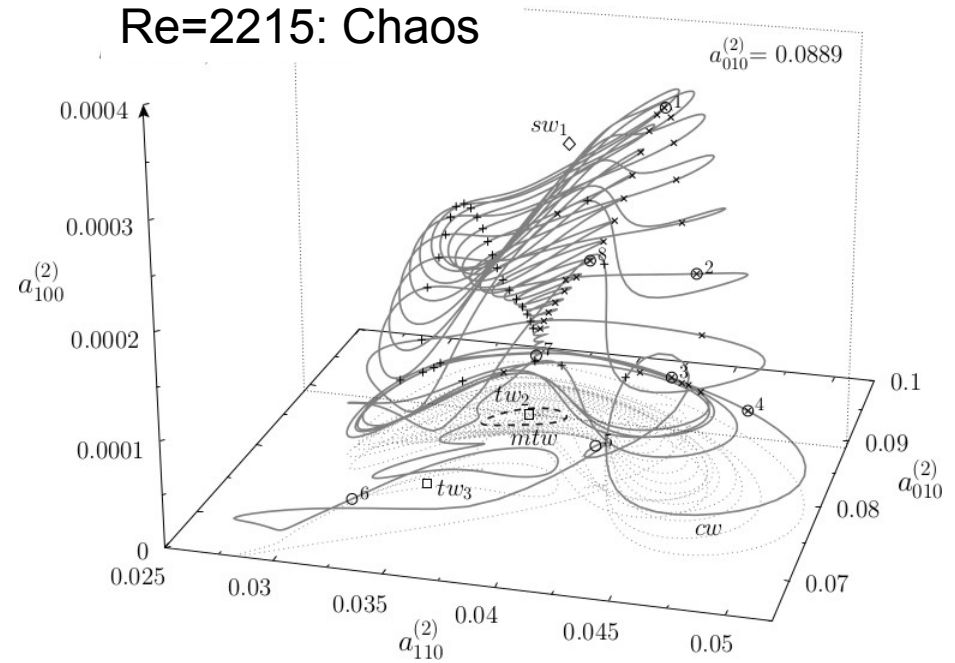


Von kohärenten Strukturen zur Turbulenz

Takens-Bogdanov Bifurkation:

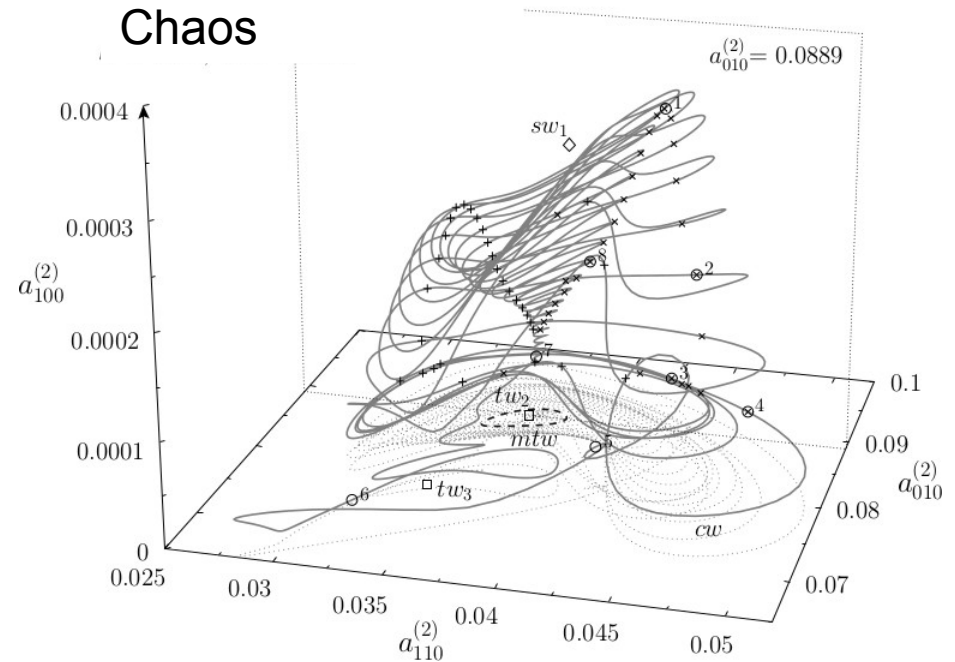
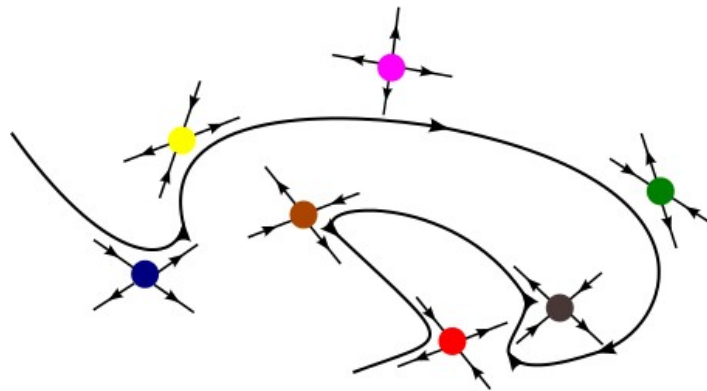


Re=2215: Chaos



Mellibovsky & Eckhardt, *J. Fluid Mech.*, 2011+2012

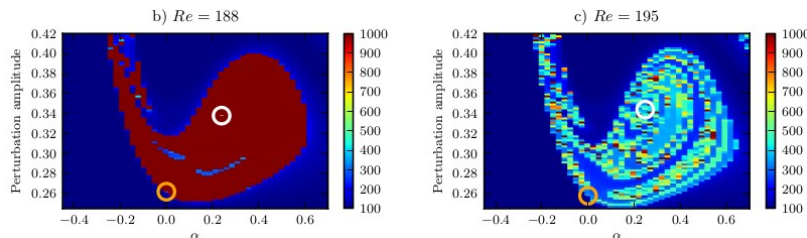
Von kohärenten Strukturen zur Turbulenz



Mellibovsky & Eckhardt, *J. Fluid Mech.*, 2011+2012

Chaos

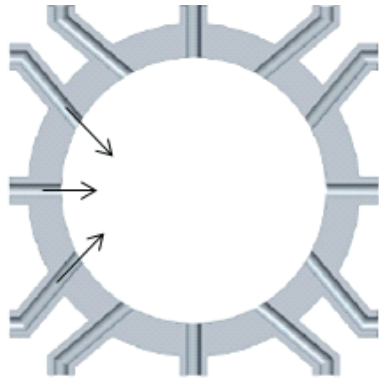
Transientes Chaos



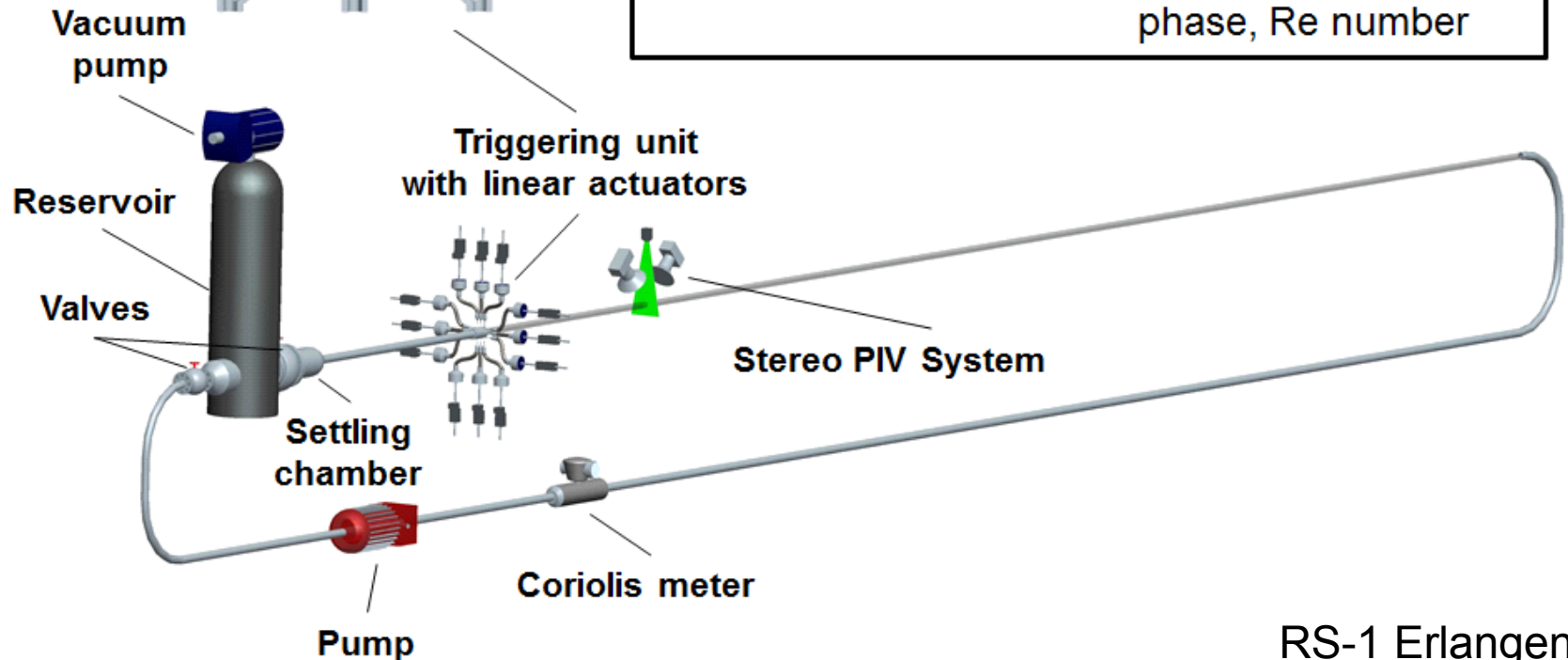
- ✓ Entstehung TW (Bifurkationen)
- ✓ Chaos durch Interaktion TW
- ✓ Globale Bifurkation: transientes Chaos

Kreilos & Eckhardt, *eingereicht*, 2012

Neues Experiment zur Anregung kohärenter Strukturen



Flowing medium	: Water
Particles for visualization	: Aluminum flitter
Measurement technique	: Stereo PIV
Distrubance generation	: Oscillating jets
Control parameters	: Amplitude, frequency, phase, Re number



Fragen und Ziele: Rohrströmung

RS-1 (Ertunç, Lienhart, Delgado): Experimente

- Kinematik & Dynamik: Strukturverfolgung von puffs und slugs
- Erzeugung kohärenter Strukturen durch optimierte Störungen
- Zusammenhang zwischen TW und puffs und slugs

RS-2 (Avila): Numerik (lange Rohre)

- Raum-zeitliche Dynamik der Turbulenz: puffs und slugs
- Entwicklung: optimale Störungen zur Erzeugung kohärenter Strukturen
- Entstehung transienter puffs ($Re \sim 1700$)

RS-2 (Eckhardt): Theorie & Numerik (kurze Rohre)

- Entwicklung: Modelle für die raum-zeitliche Dynamik der Turbulenz
- Phasenraum-Struktur:
 - Welche Bifurkationen ermöglichen Transienten?
 - Warum wachsen die Zerfallszeiten superexponentiell an?