

Ermittlung der Nachlaufstrukturen und Oberflächenkräfte bei der Umströmung eines undulierten stumpfen Körpers mittels direkter numerischer Simulation am Beispiel der Seehundvibrisse



M. Michael
Universität Rostock
Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
mark.michael@uni-rostock.de



Übersicht

- **Projektbeschreibung**
- **Numerisch untersuchte Geometrien**
- **Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Übersicht

- **Projektbeschreibung**
- Numerisch untersuchte Geometrien
- Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$
- Zusammenfassung und Ausblick

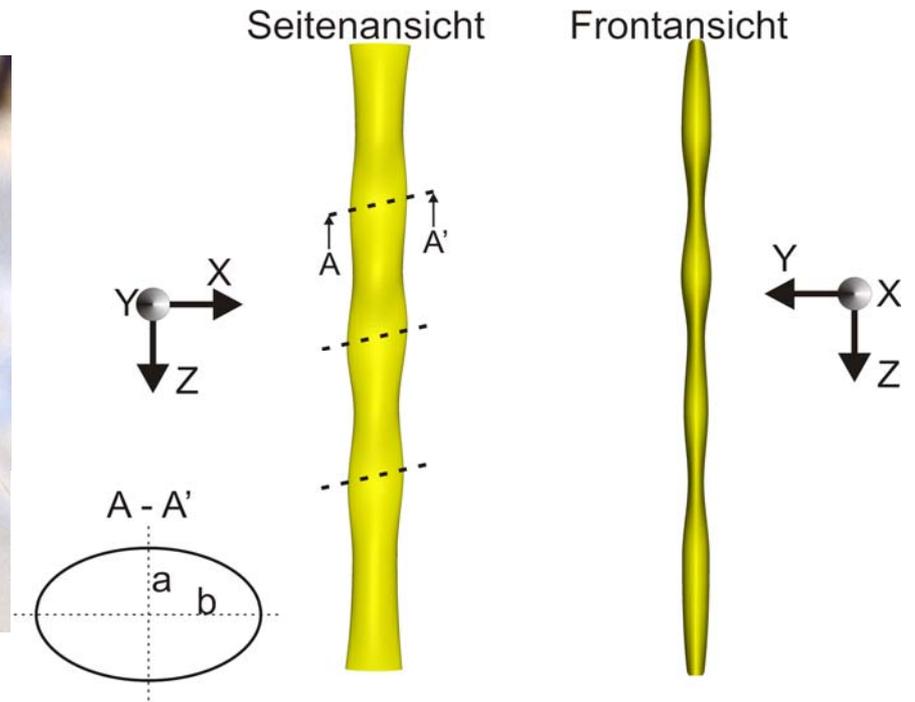
Seehund bei der Spurverfolgung



**Guido Dehnhardt & Lars Miersch
Institut für Biowissenschaften
AG Sensory & Cognitive Ecology**



Barthaare des Seehundes : Vibrissengeometrie



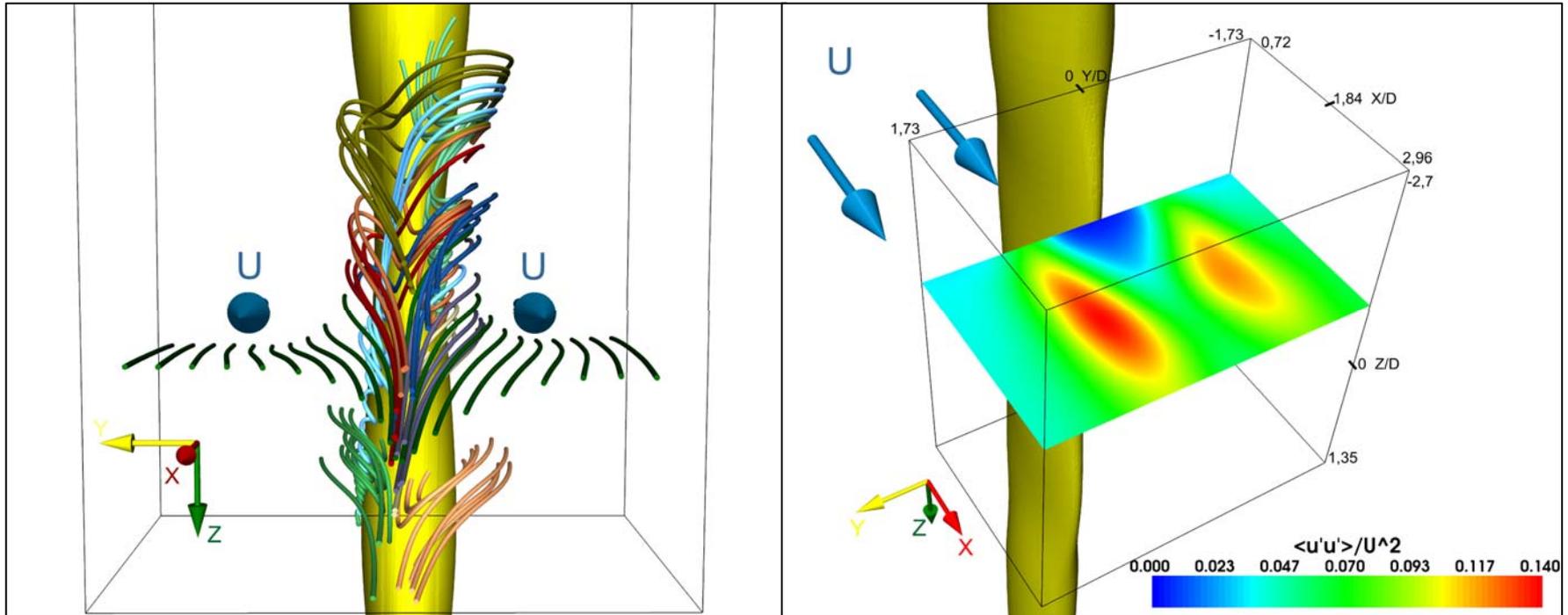
Physikalisches Prinzip der Vibrisse als Nachlaufsensoren

- These:
- Die dreidimensional modulierte Geometrie verhindert die typische Karmansche Wirbelstrasse ?!
 - dadurch geringere strömungsinduzierte Kräfte Wirkung auf der Vibrissenoberfläche



Experimentelle Voruntersuchungen des Seehundbarthaars

- Reynoldsspannungen weisen auf Ähnlichkeit zur axialsymmetrischen Scherschchicht hin
- Vermutung: Unterdrückung der Karmanschen Wirbelstraße

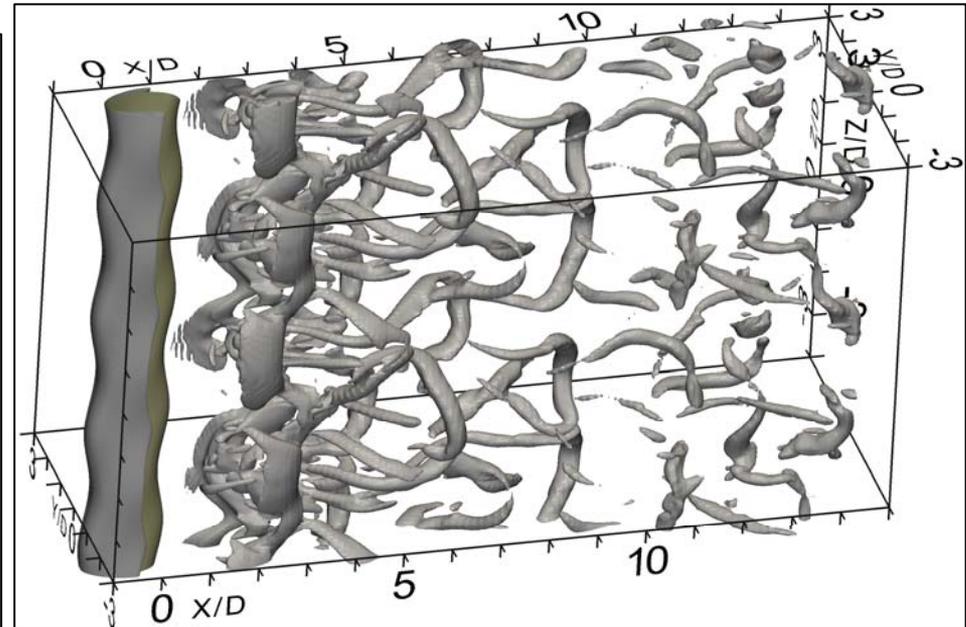
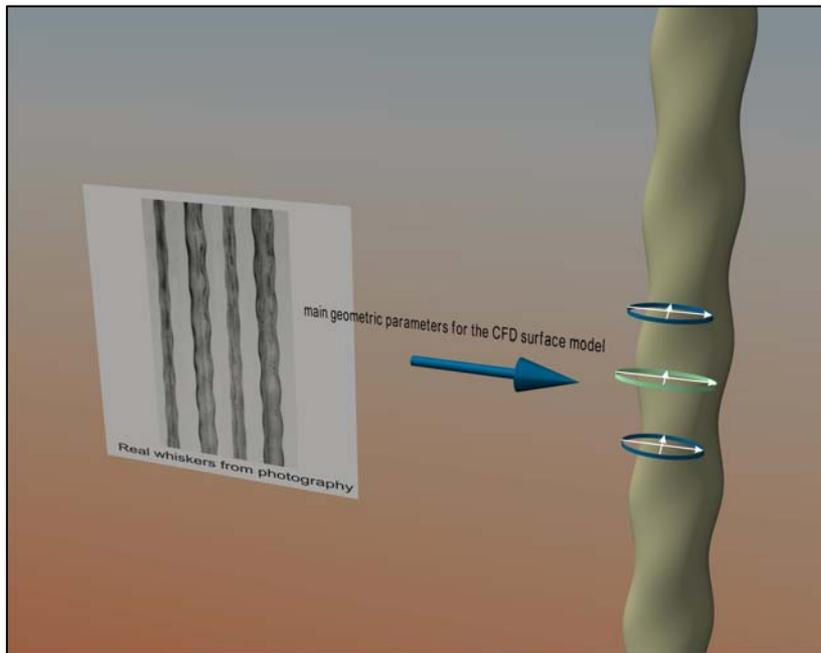


Stromlinien und Reynoldsspannungen hinter Seehundvibrisse

- nur zeitgemittelte Volumendatensätze
- keine Frequenzanalysen möglich (1Hz Messfrequenz)
- instationäres Wirbelabschwimmen aus den PIV-Snapshots erkennbar -> aber keine Aussagen über die räumliche Ausdehnung der Strukturen möglich



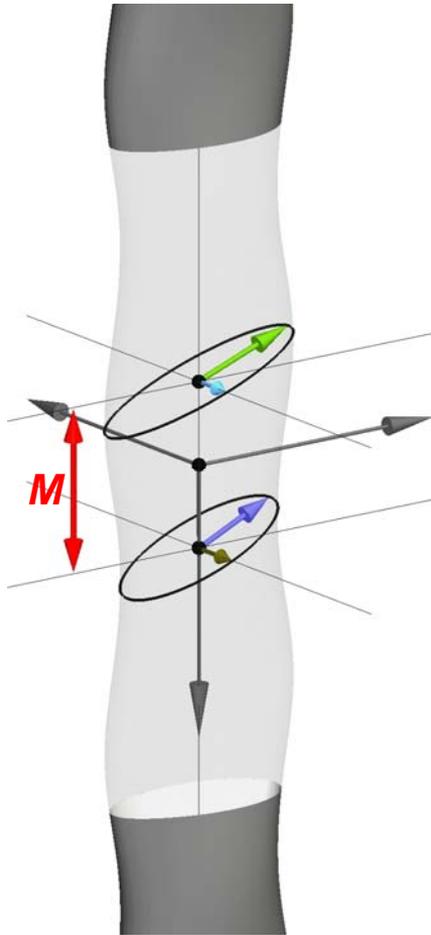
Numerische Voruntersuchungen der Umströmung einer idealisierten Vibrissengeometrie bei $Re = 500$



Isofläche des Wirbelkriteriums $Q=0.5D^2/U^2$ der Vibrissenumströmung

- Validierung der Numerik mit hoher Ergebnisqualität
- Idealisieretes Vibrissenmodell erstellt (abgeleitet aus Messungen an echten Vibrissen)
- Grundsätzlich andere Strömungstopologie des Vibrissennachlaufs im Vergleich zum Zylinder
- Produktion der energietragenden Strukturen weiter stromab
- Die Karmansche Wirbelstraße wird durch komplexere Wirbelstrukturen verhindert

Fragestellung

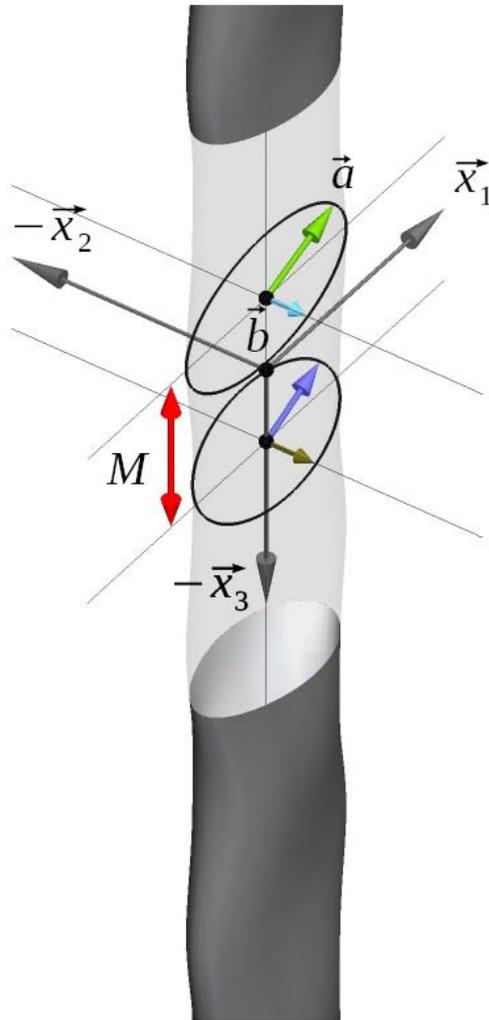


- Einfluss der undulierten Vibrissengeometrie auf die strömungsinduzierten Oberflächenkräfte
- Abhängigkeit der Nachlaufstrukturen von den einzelnen geometrischen Eigenschaften
- Vergleich zur bekannten Umströmung eines quer angeströmten unendlich langen Zylinder

Übersicht

- Projektbeschreibung
- **Numerisch untersuchte Geometrien**
- Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$
- Zusammenfassung und Ausblick

Idealisierte Vibrissengeometrie



$$a_\alpha = \begin{pmatrix} 1,1121 \cdot \cos(15,2^\circ) \\ 0 \\ 1,1121 \cdot \sin(15,2^\circ) \end{pmatrix} \cdot mm$$

$$b_\alpha = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,4849 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot mm$$

$$k_\alpha = \begin{pmatrix} 0,8843 \cdot \cos(17,6^\circ) \\ 0 \\ 0,8843 \cdot \sin(17,6^\circ) \end{pmatrix} \cdot mm$$

$$l_\alpha = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,5838 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot mm$$

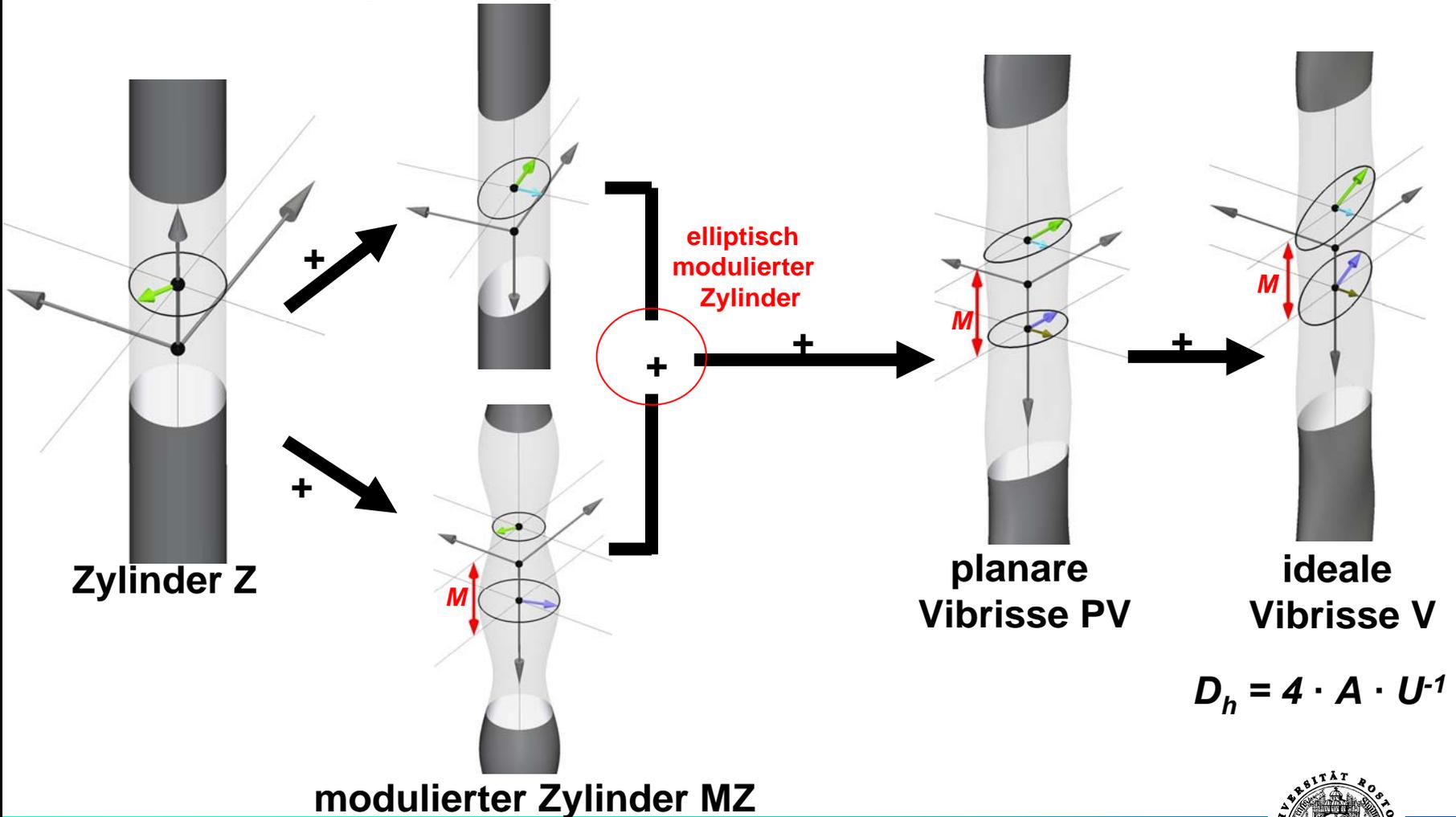
Gemittelte idealisierte Vibrisse	Ellipse \vec{a} \vec{b}	Ellipse \vec{k} \vec{l}
$A [mm^2]$	1.6941	1.6219
$U [mm]$	5.2125	4.6606
D_h	1.3000	1.392
Gemitteltes D_h	1.346	

$$D_h = 4 \cdot A \cdot U^{-1} = 1.346 \text{ mm}$$

$$M = 2,8292 \text{ mm}$$

Geometrisch evolutionärer Prozess

elliptischer Zylinder EZ

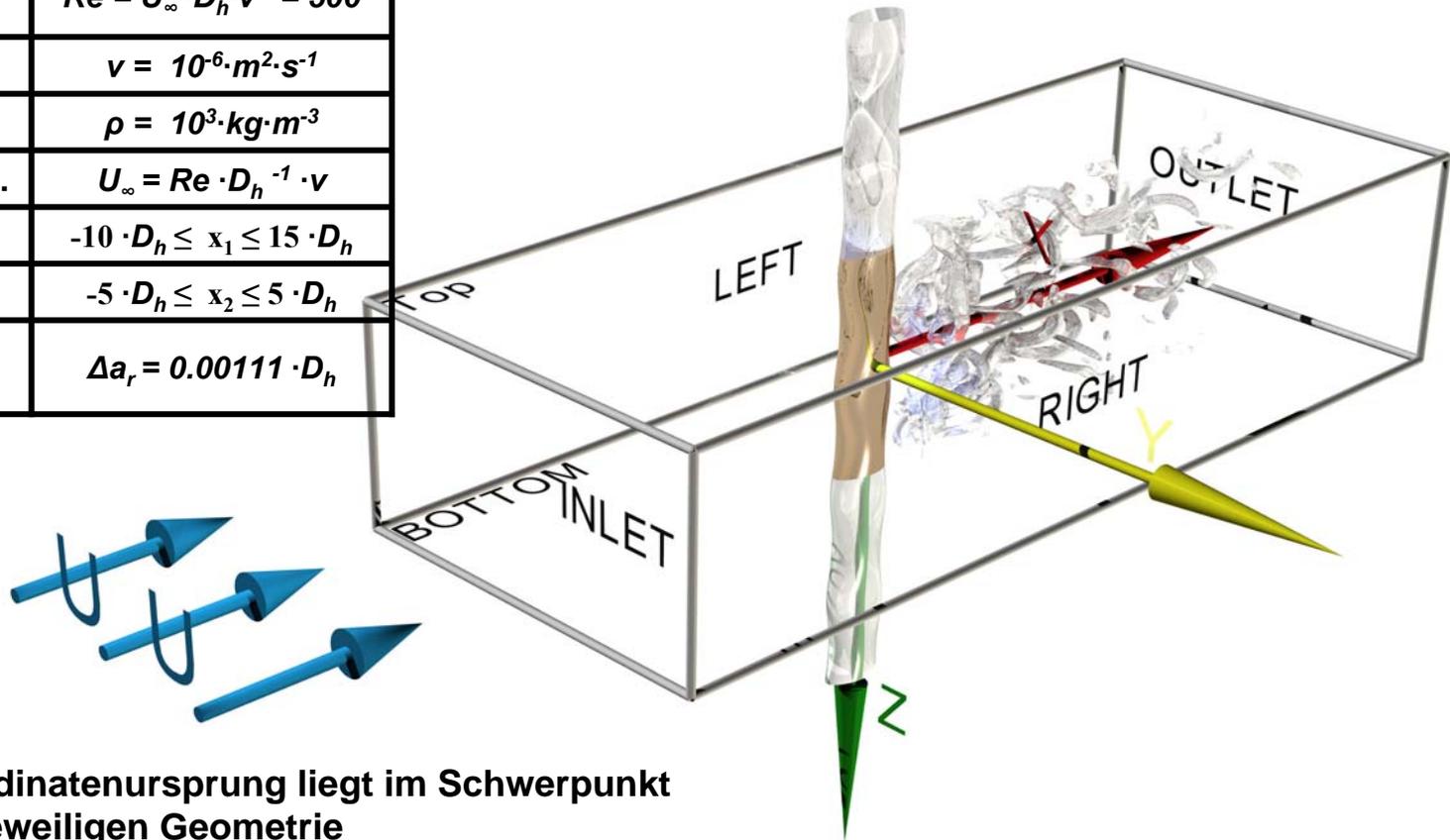


$$D_h = 4 \cdot A \cdot U^{-1}$$

Rechengebiete

Kenngröße	Definition
Reynoldszahl	$Re = U_\infty \cdot D_h \cdot \nu^{-1} = 500$
Kin. Viskosität	$\nu = 10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
Dichte	$\rho = 10^3 \cdot kg \cdot m^{-3}$
Anströmgeschw.	$U_\infty = Re \cdot D_h^{-1} \cdot \nu$
Wertebereich x_1	$-10 \cdot D_h \leq x_1 \leq 15 \cdot D_h$
Wertebereich x_2	$-5 \cdot D_h \leq x_2 \leq 5 \cdot D_h$
wandnahesten Zelle	$\Delta a_r = 0.00111 \cdot D_h$

- Spannweiten $x_3 = z$ ist abhängig von der Periodizität der einzelnen Geometrien

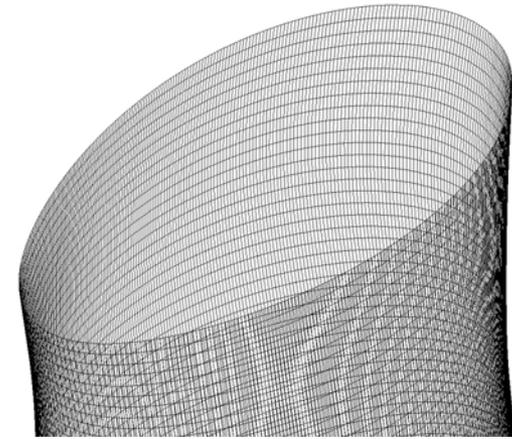
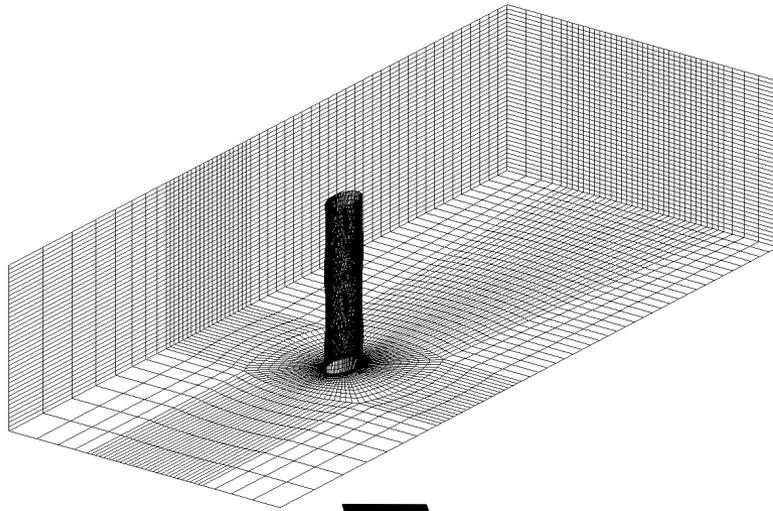


- Koordinatenursprung liegt im Schwerpunkt der jeweiligen Geometrie

Numerischer Algorithmus

$$\int_V \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} dV = \int_S u_\alpha n_\alpha dS = 0$$

$$\int_V \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} dV + \int_S u_\beta u_\alpha n_\beta dS - \int_S \nu \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right) n_\beta dS = - \int_V \frac{\partial p}{\partial x_\alpha} dV$$



+ Δt

$$f_\alpha(x_\alpha, t) = \rho \cdot p \cdot S_\alpha + \mu \cdot \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \cdot S_\beta$$



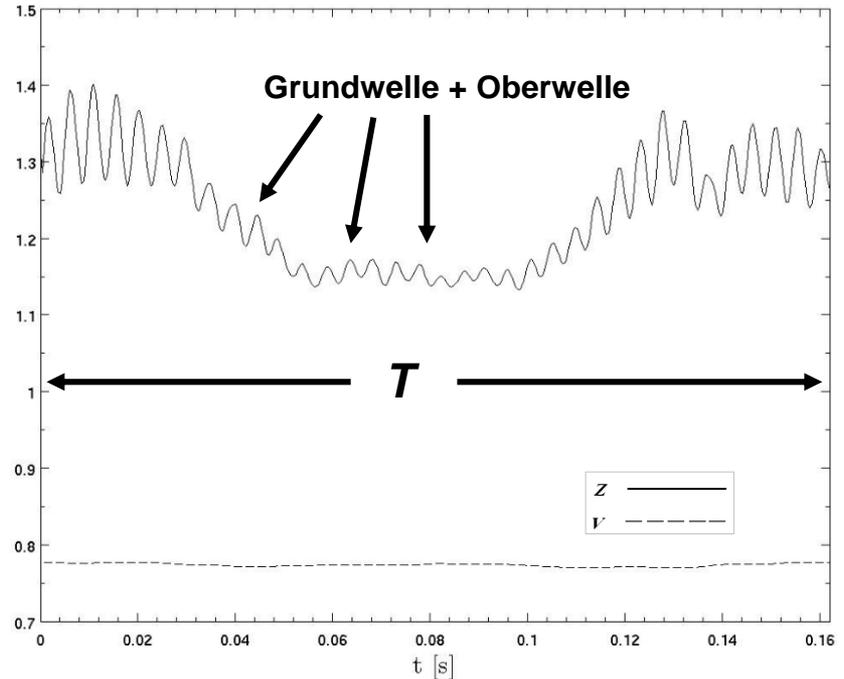
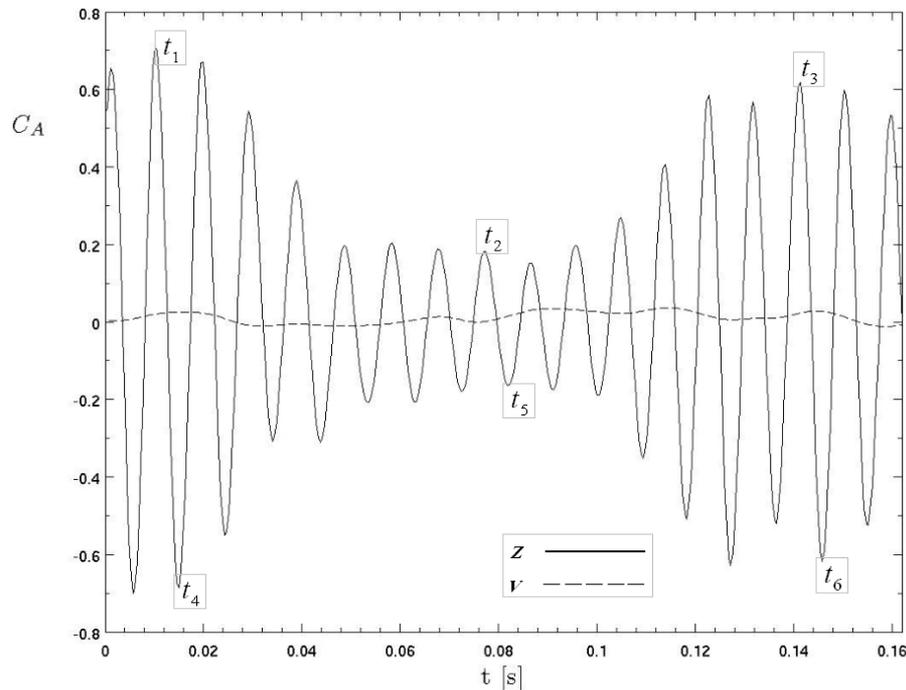
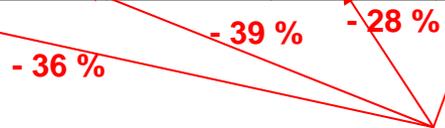
Übersicht

- Projektbeschreibung
- Numerisch untersuchte Geometrien
- **Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$**
- Zusammenfassung und Ausblick

Strömungsinduzierte Kräfte

$\overline{C_W}$

V	PV	MZ	EZ	Z
0.77	0.74	1.21	0.87	1.21

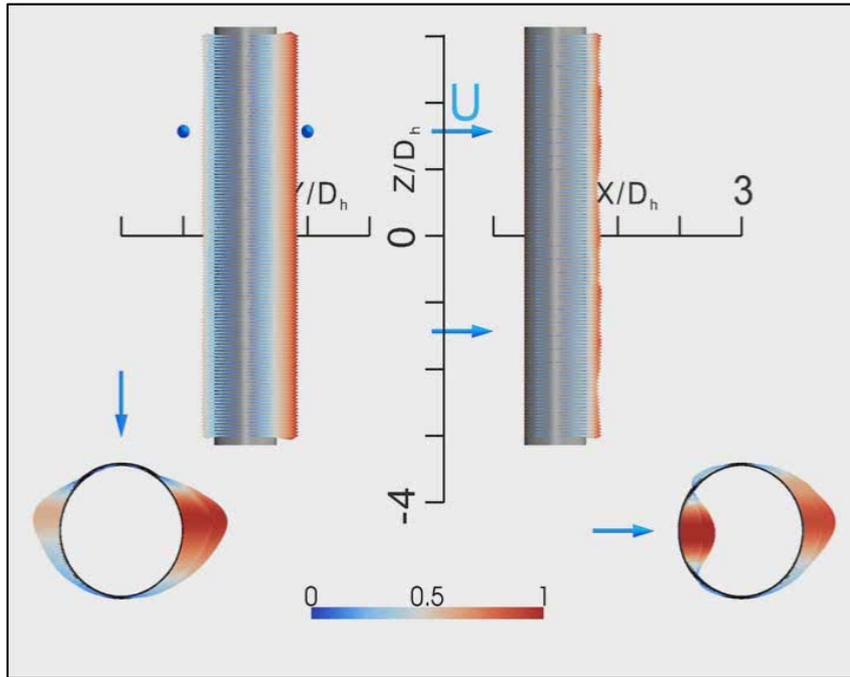
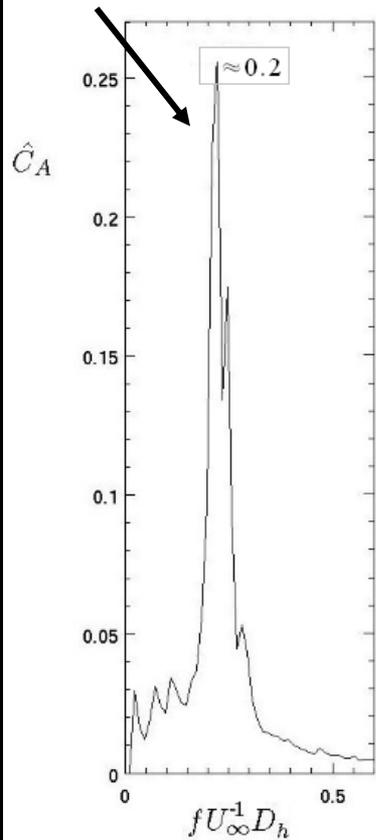


- Zylinder stark dynamisch belastet durch eine Grund- und Oberwelle
- Oberflächenkräfte der Vibrisse sind stationär
- keine nennenswerte Kraftwirkung in Spannweitenrichtung

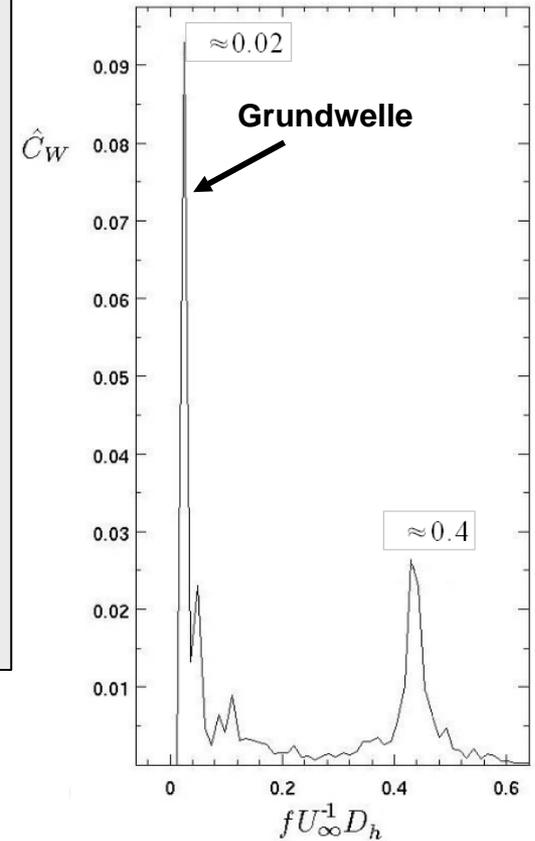


Strömungsinduzierte Kräfte am Zylinder

Oberwelle = Strouhalzahl



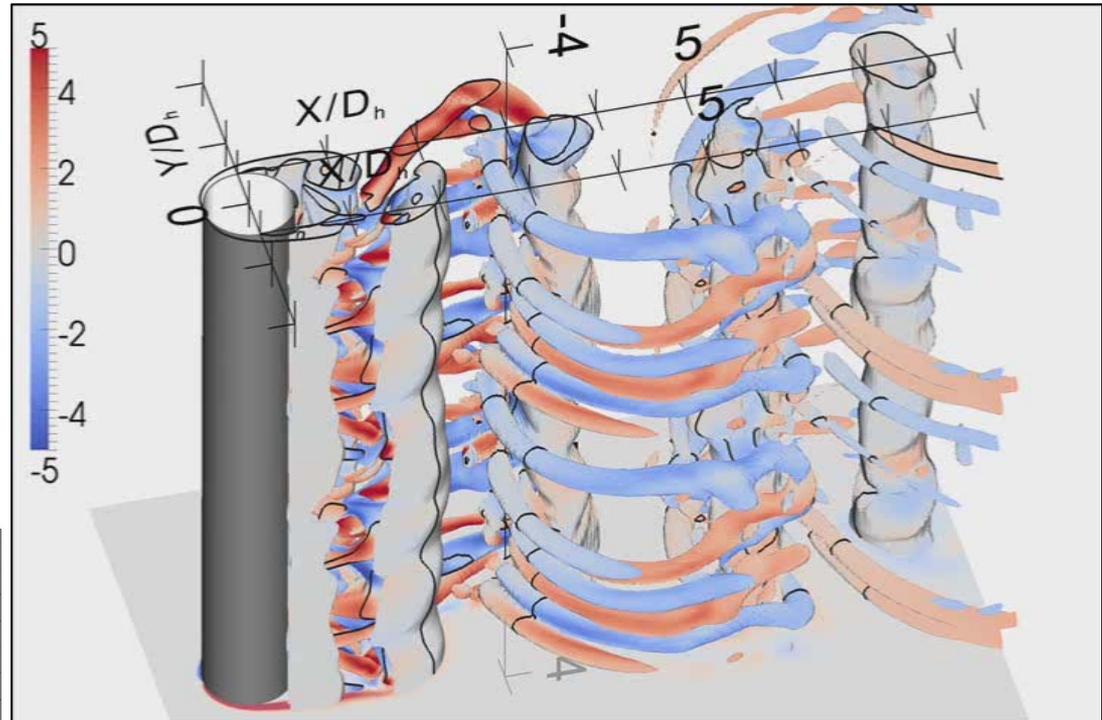
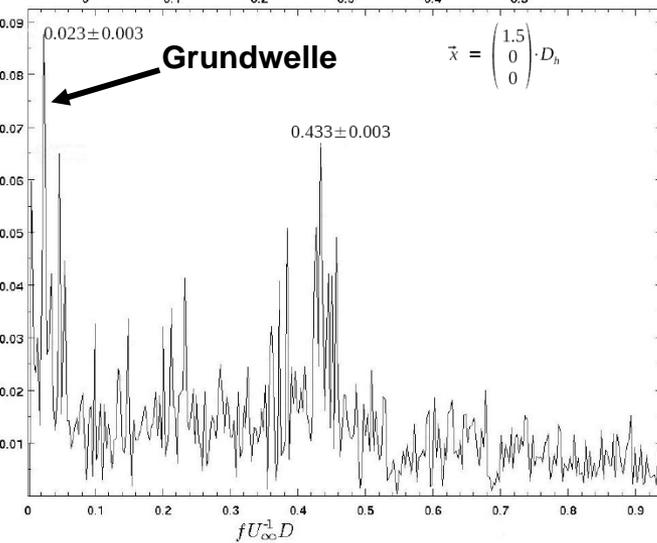
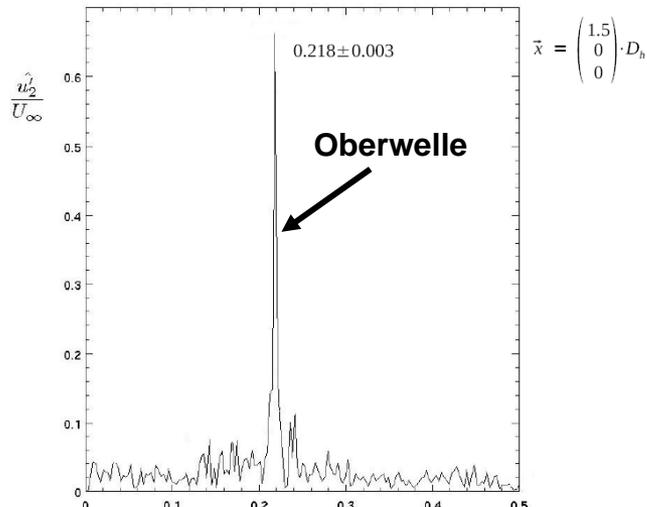
$$\frac{f_2(x_\alpha, T)}{\max(f_\alpha(x_\alpha, t))} \quad \frac{f_1(x_\alpha, T)}{\max(f_\alpha(x_\alpha, t))}$$



- die Oberflächenkräfte sind ausschlaggebend druckinduziert
- die Scherung besitzt keinen Einfluss

Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$

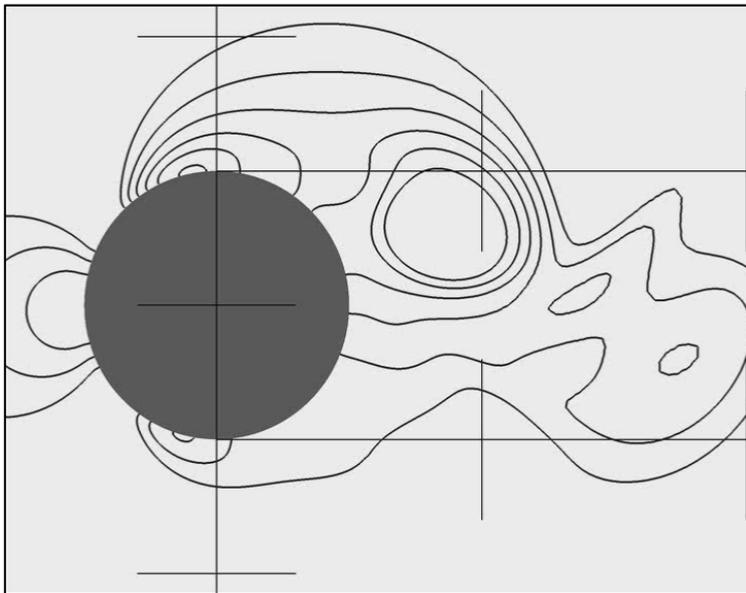
Instationäre Strukturen im Nachlauf des Zylinders



Isofläche des Wirbelkriteriums
 $Q(T) \cdot U_\infty^{-2} \cdot D_h^2 = 0.6$ koloriert mit $\omega_1 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h$

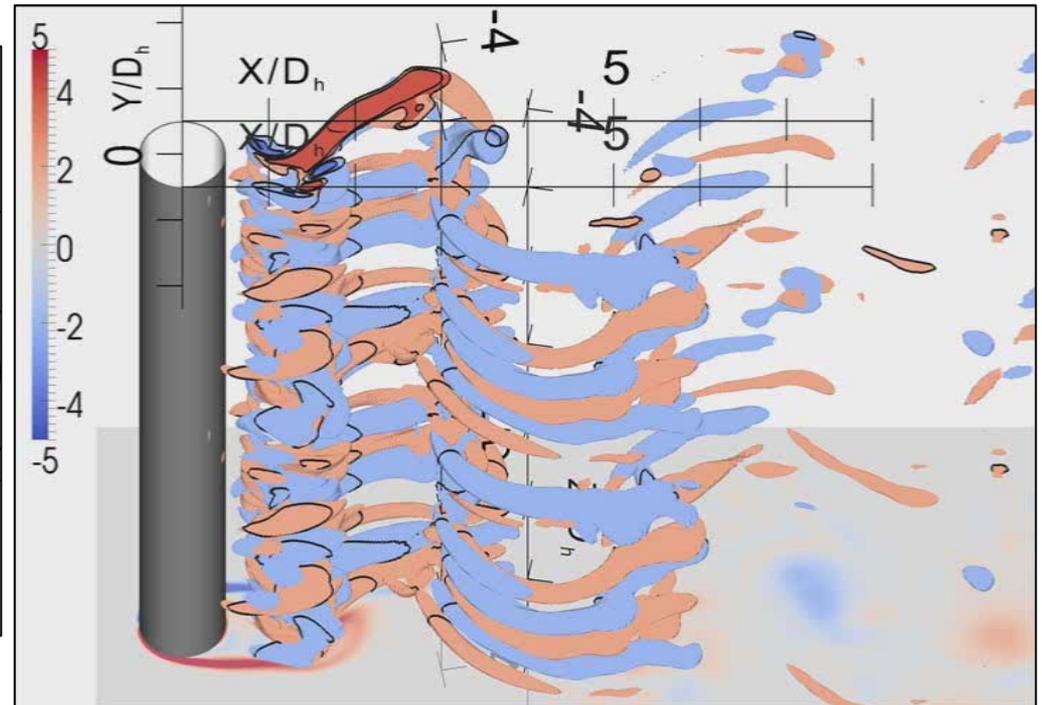
- Primär- und Sekundärwirbel der B – Mode im Nachlauf eines Zylinder bei $Re = 500$

Verlagerung der Wirbelproduktion im Zylindernachlauf bei $Re = 500$



Isolinien des Druckbeiwertes

$$-1.6 \leq C_p(T) \leq +1$$

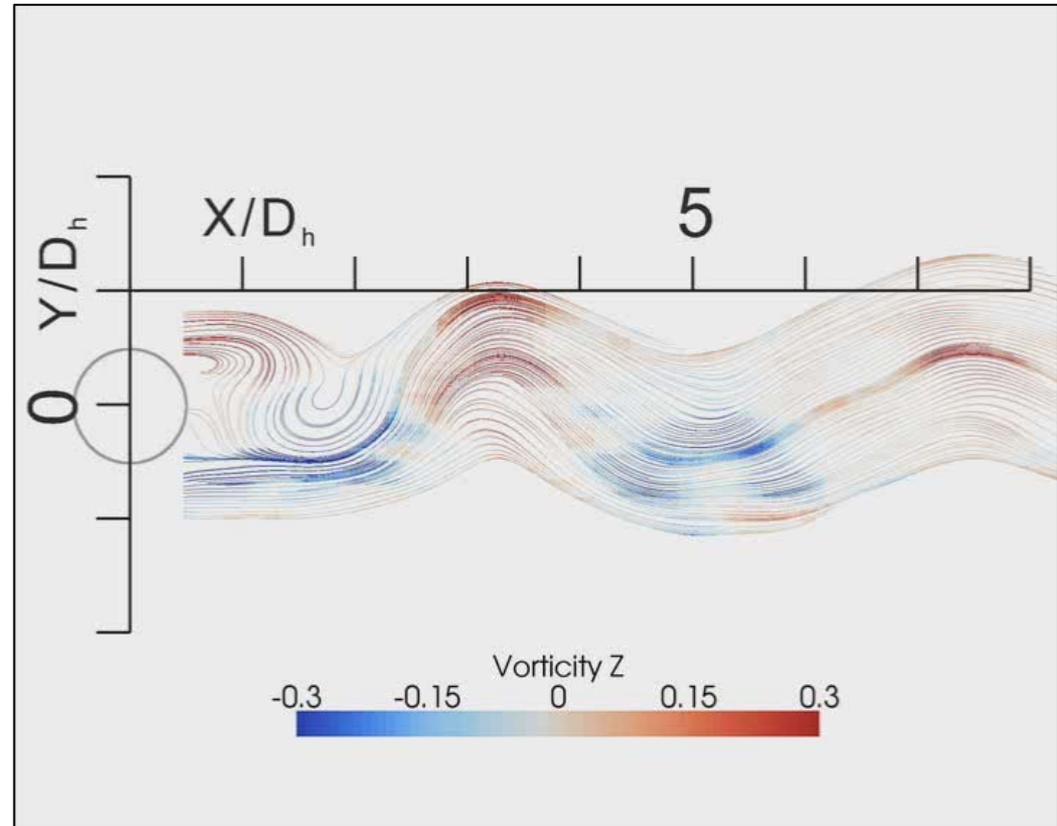
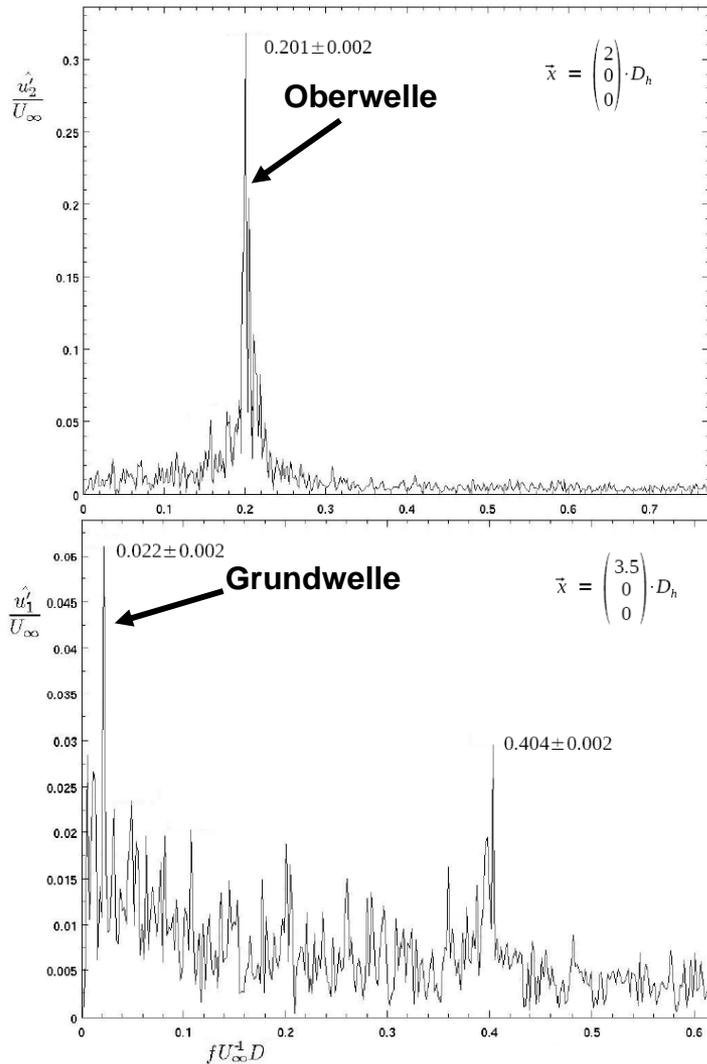


Isoflächen der Wirbelstärkekomponente

$$\omega_1(T) \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h = (+- 2 ; +- 4)$$

- die Oberwelle ($0.2 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h$) entsteht durch die Druckinduzierung der wechselseitigen Karmanwirbel
- die Grundwelle ($0.02 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h$) identifiziert ein Verlagern des Produktionsortes der Wirbelstrukturen stromab von $x_1 = 1 \cdot D_h$ nach $x_1 = 1.5 \cdot D_h$

Validierung der instationäre Strukturen mittels zeitaufgelöster PIV - Messungen im Nachlauf eines Zylinders bei $Re = 500$

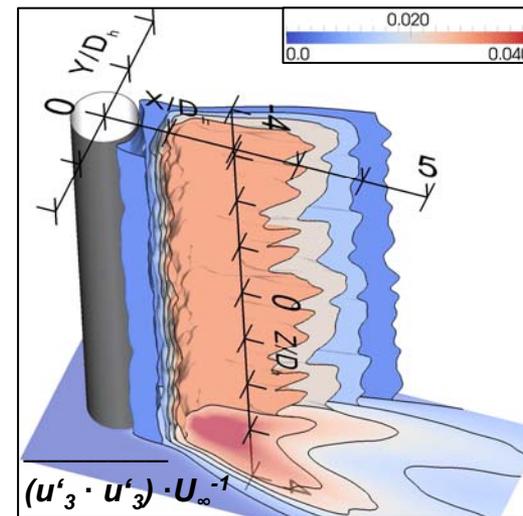
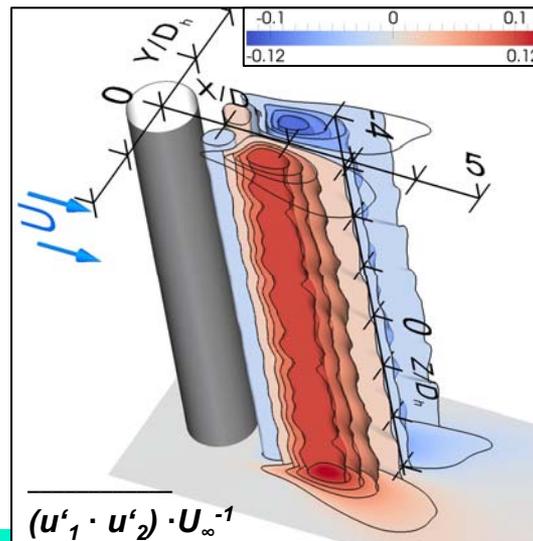
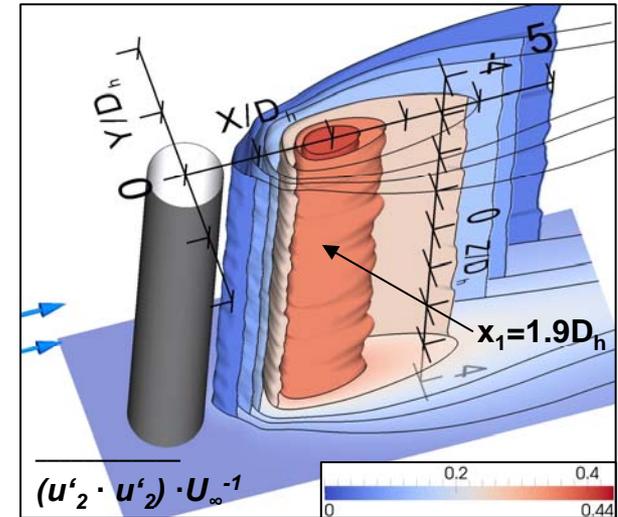
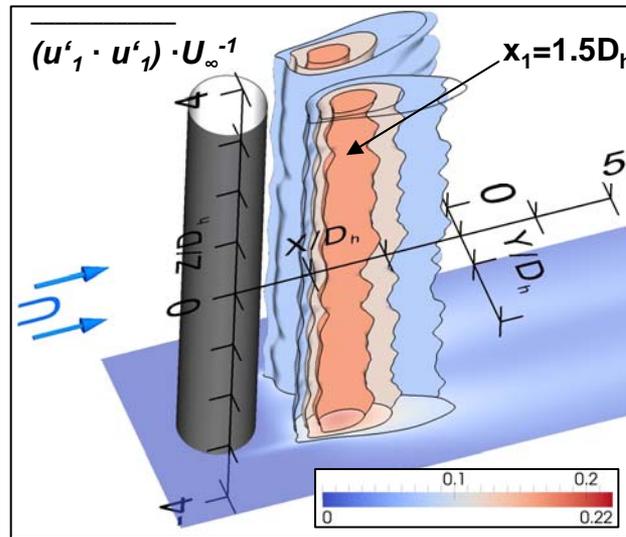


Stromlinien $\Psi(T)$ koloriert mit $\omega_3 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h$

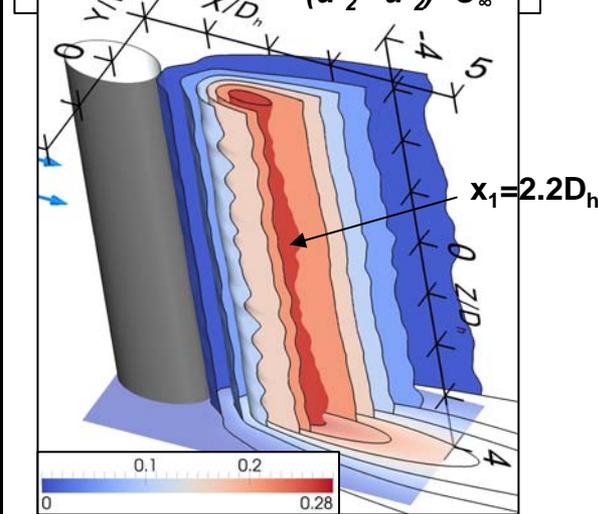
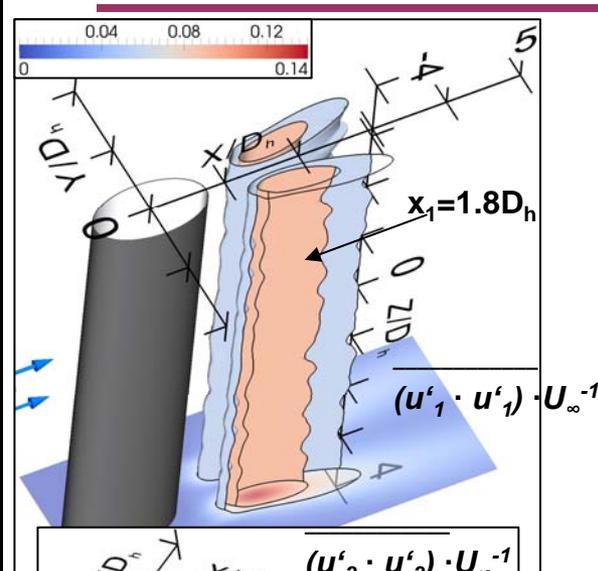
Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$

Reynoldsspannungen im Nachlauf des Zylinders

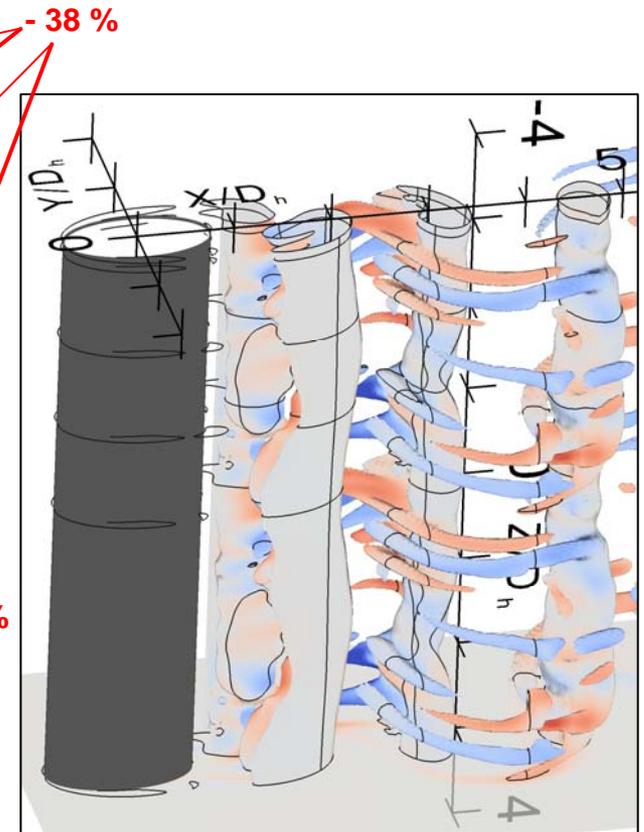
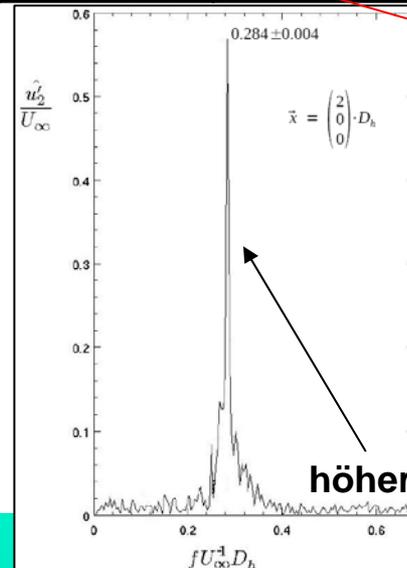
Extrema	Z
$\overline{(u'_1 \cdot u'_1)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.220
$\overline{(u'_1 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.120
$\overline{(u'_1 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.005
$\overline{(u'_2 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.440
$\overline{(u'_2 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.005
$\overline{(u'_3 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.040



Nachlaufstrukturen des elliptischen Zylinders bei $Re = 500$



Extrema	Z	EZ
$\overline{(u'_1 \cdot u'_1)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.220	+ 0.140
$\overline{(u'_1 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.120	+ 0.085
$\overline{(u'_1 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.005	+ 0.006
$\overline{(u'_2 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.440	+ 0.280
$\overline{(u'_2 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.005	+ 0.006
$\overline{(u'_3 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.040	+ 0.013



Isofläche des Wirbelkriteriums
 $Q(t_1) \cdot U_\infty^{-2} \cdot D_h^2 = 0.6$ koloriert mit
 $-5 \leq \omega_1 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h \leq +5$

- 38 %
 - 77,5 %

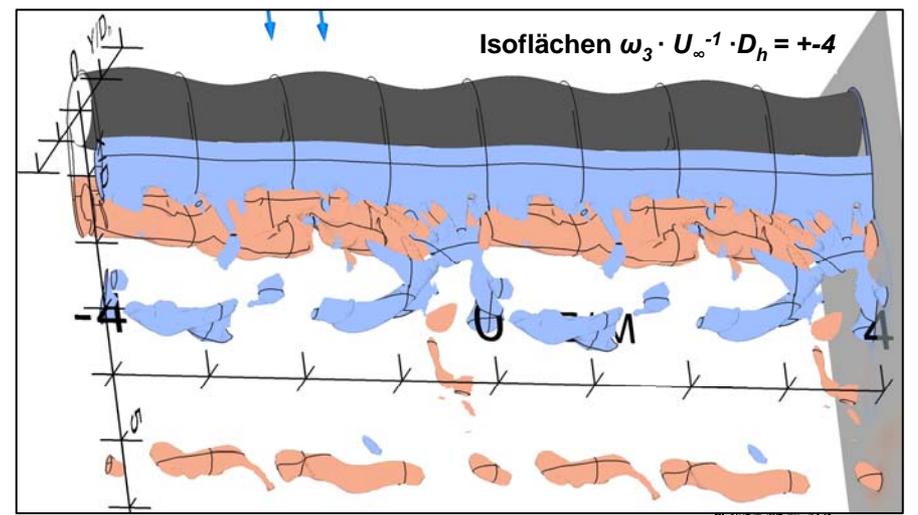
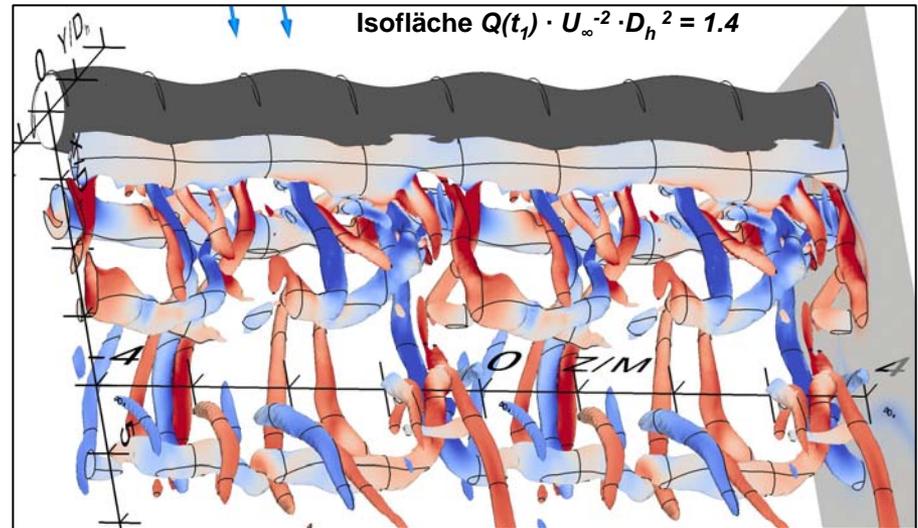
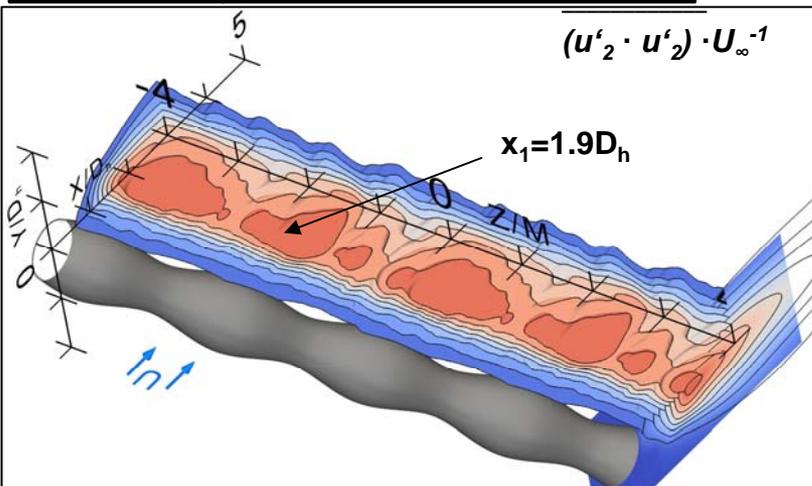
höherer Strouhalzahl 0.28



Nachlaufstrukturen des modulierten Zylinders bei $Re = 500$

Extrema	Z	EZ	MZ
$\overline{(u'_1 \cdot u'_1)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.220	+ 0.140	+ 0.240
$\overline{(u'_1 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	++ 0.120	++ 0.085	++ 0.140
$\overline{(u'_1 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	++ 0.005	++ 0.006	++ 0.027
$\overline{(u'_2 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.440	+ 0.280	+ 0.480
$\overline{(u'_2 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	++ 0.005	++ 0.006	++ 0.036
$\overline{(u'_3 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.040	+ 0.013	+ 0.059

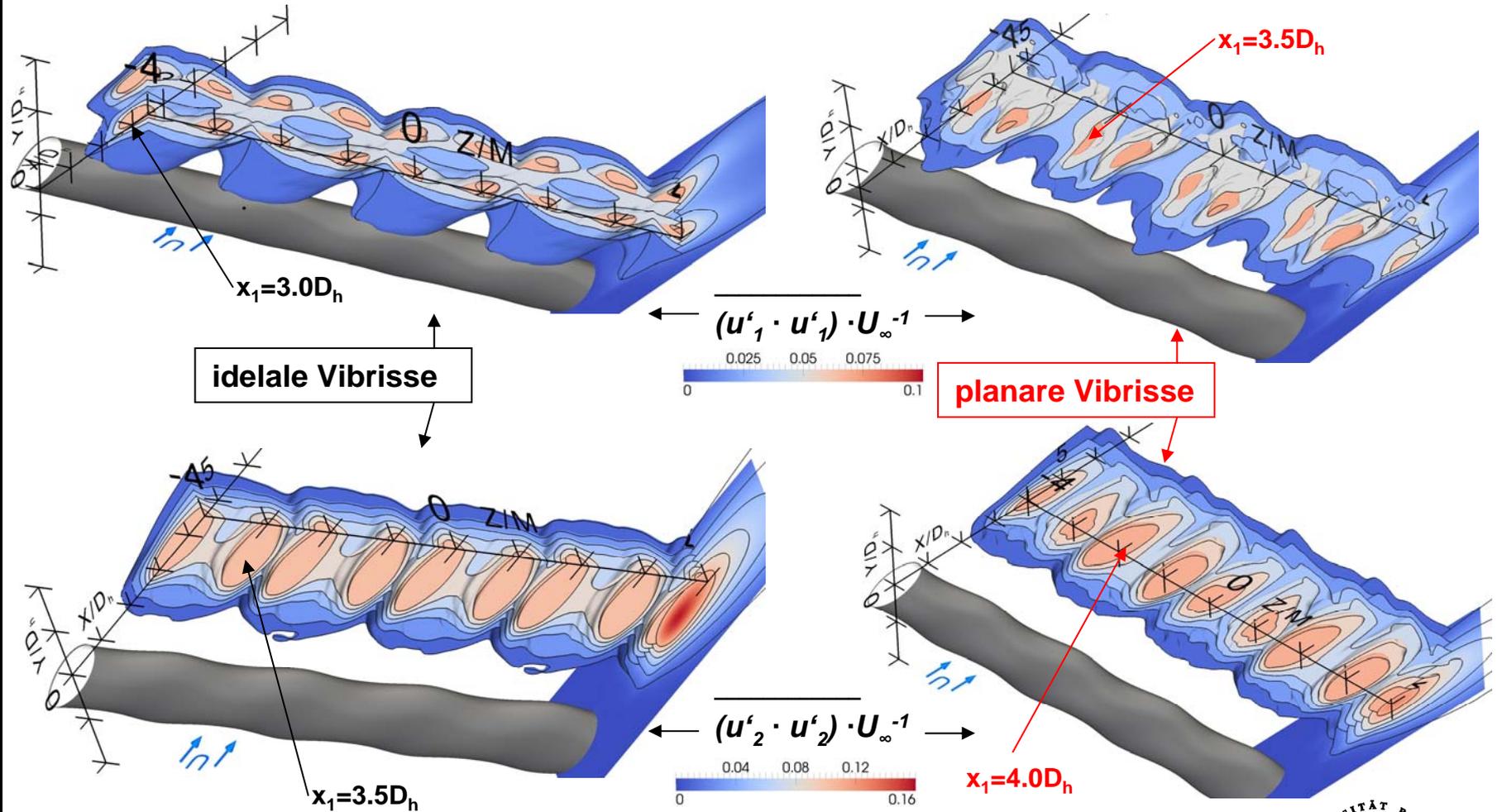
+ 32 %



Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$



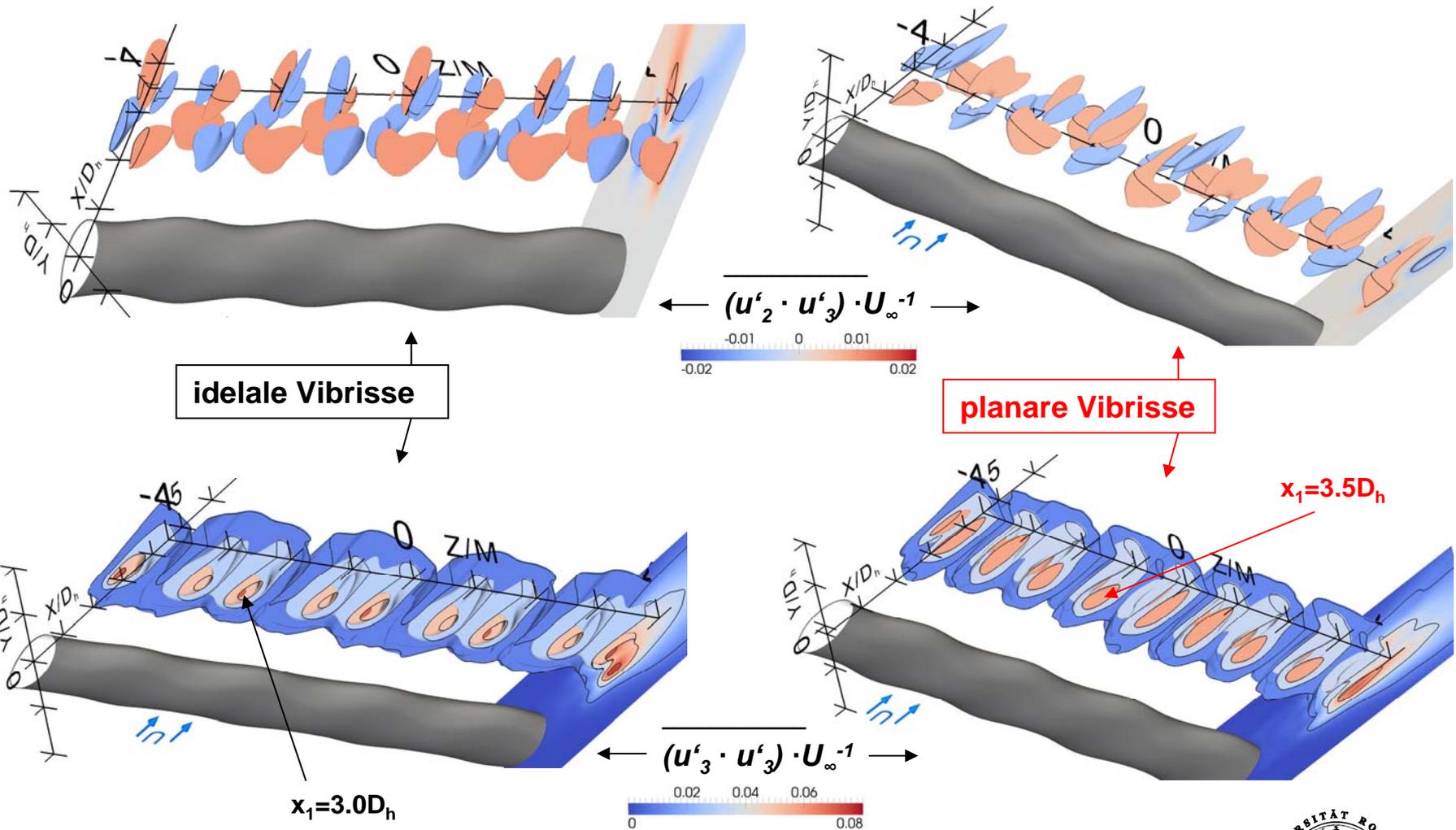
Reynoldsspannungen der idealen und planaren Vibrisse



Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei
Re = 500



Reynoldsspannungen der idealen und planaren Vibrisse

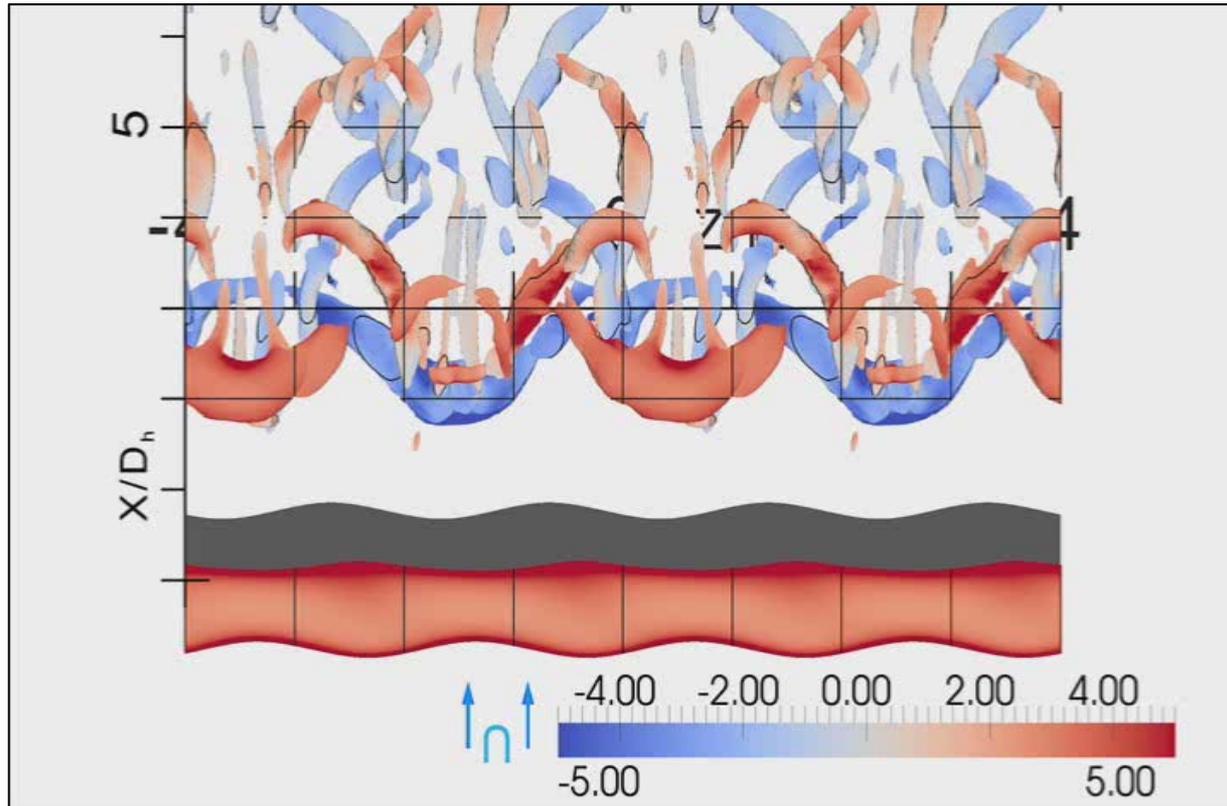


Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei
Re = 500

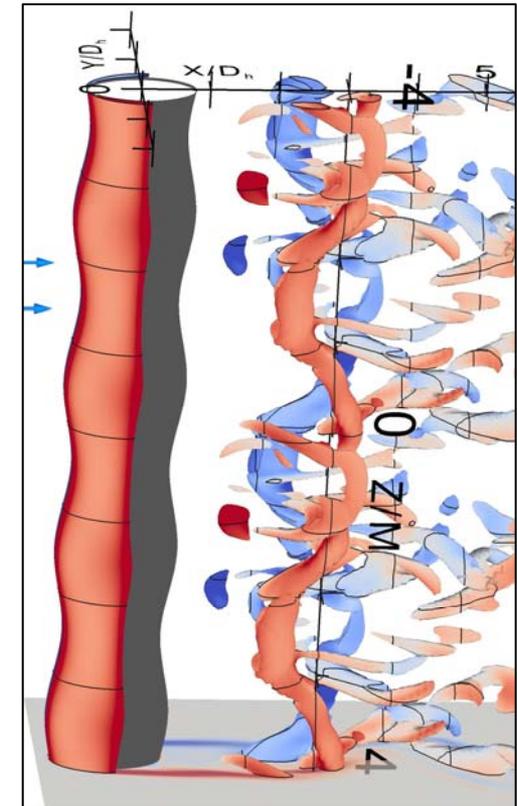


Nachlaufstrukturen der idealen und planaren Vibrisse bei $Re = 500$

ideale Vibrisse



planare Vibrisse



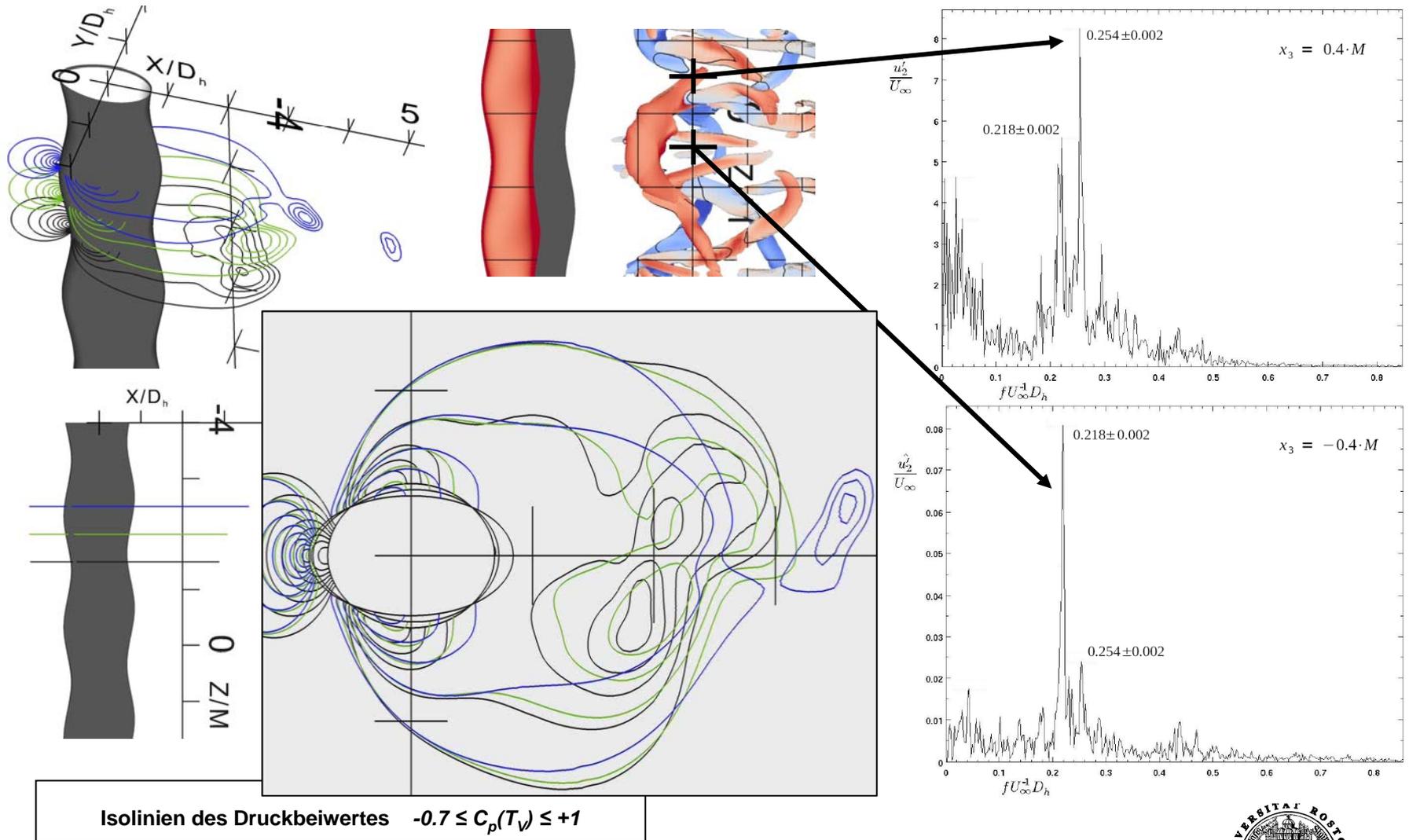
- Separierte phasenverschoben Entstehung der Nachlaufstrukturen benachbarter Modulationsperiode $2 \cdot M$ im Vibrissennachlauf

Isofläche des Wirbelkriteriums

$$Q(T_V) \cdot U_\infty^{-2} \cdot D_h^2 = 0.7 \text{ koloriert mit } \omega_3 \cdot U_\infty^{-1} \cdot D_h$$



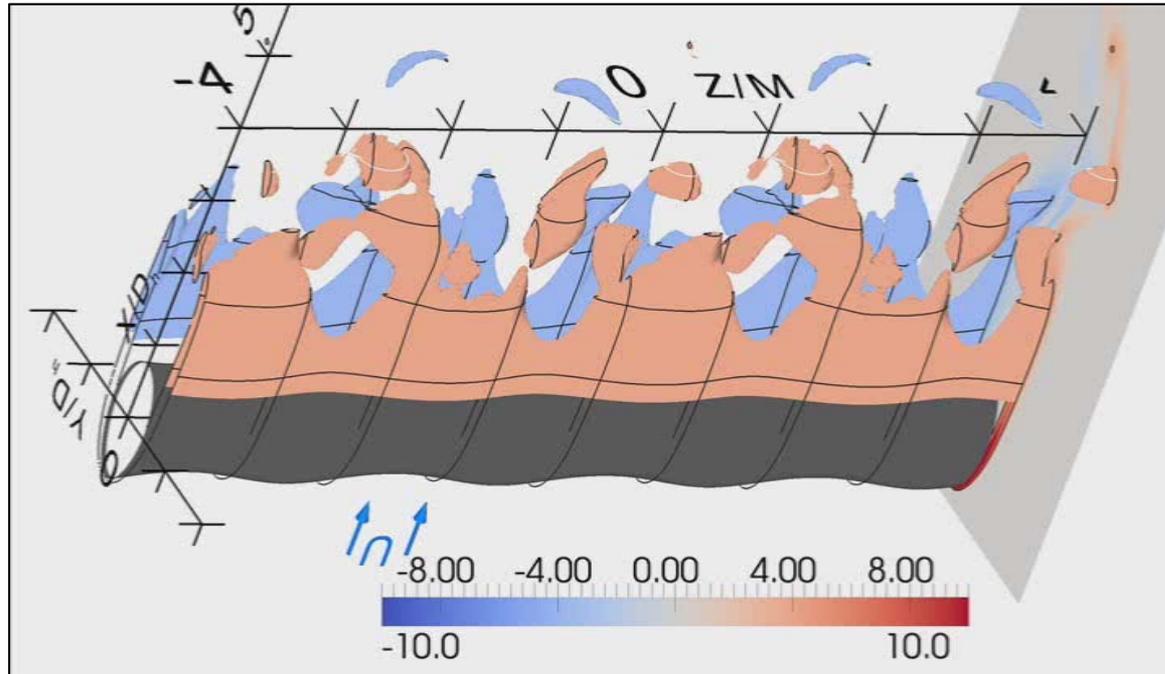
Separierte Nachlaufstrukturen der Vibrissen bei $Re = 500$



Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$

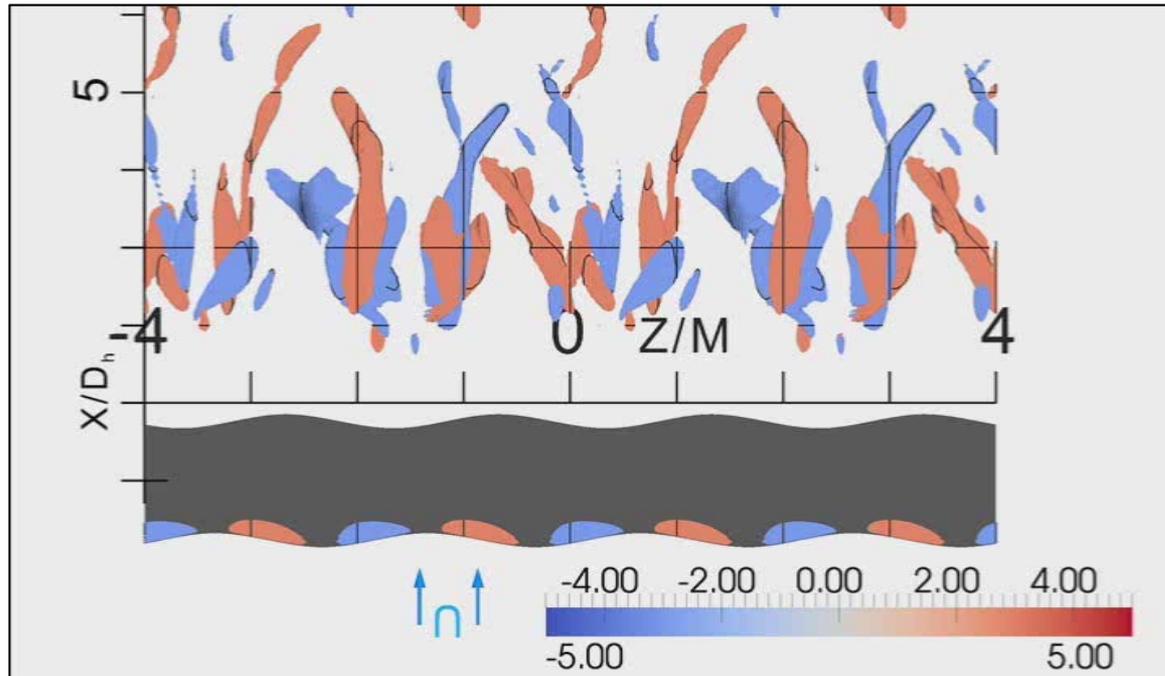


Wirbelstärkekomponente $\omega_3(t) \cdot U_\infty^{-1} \cdot Dh = \pm 4$ im Nachlauf der Vibrisse bei $Re = 500$



- kein ausgeprägtes Aufrollen von Scherschichten um die Spannweitenrichtung wie beim Zylinder

Wirbelstärkekomponente $\omega_1(t) \cdot U_\infty^{-1} \cdot Dh = \pm 3$ im Nachlauf der Vibrisse bei $Re = 500$



- sofortiges Entstehen von Wirbeln mit ein Drehsinn in Strömungsrichtung
- Wirbelentstehung findet stetz zwischen einem Modulationsmaxima und -minima der Vibrisse statt

Übersicht

- Projektbeschreibung
- Numerisch untersuchte Geometrien
- Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$
- **Zusammenfassung und Ausblick**

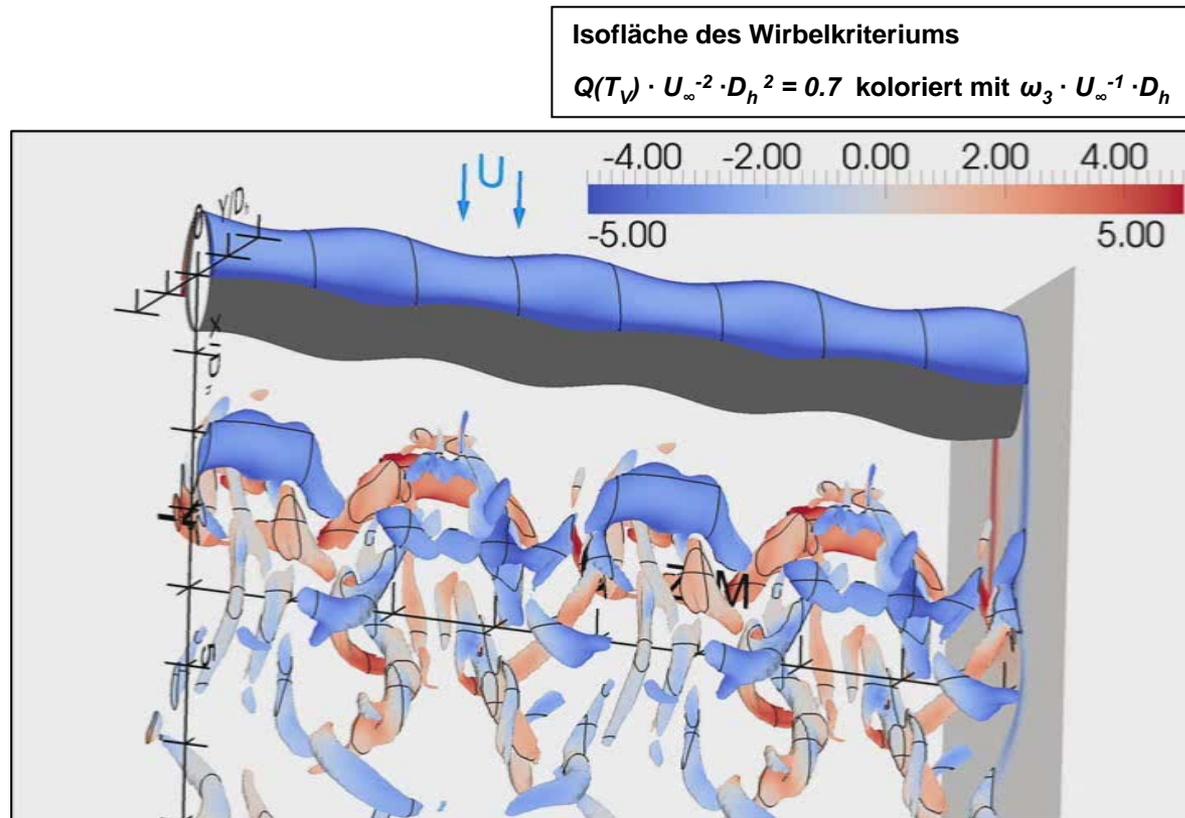
Reynoldssche Spannungskomponenten

Extrema	Z	EZ	MZ	PV	V
$\overline{(u'_1 \cdot u'_1)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.220	+ 0.140	+ 0.240	+ 0.100	+ 0.100
$\overline{(u'_1 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.120	-+ 0.085	-+ 0.140	-+ 0.060	-+ 0.070
$\overline{(u'_1 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.005	-+ 0.006	-+ 0.027	-+ 0.028	-+ 0.034
$\overline{(u'_2 \cdot u'_2)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.440	+ 0.280	+ 0.480	+ 0.160	+ 0.170
$\overline{(u'_2 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	-+ 0.005	-+ 0.006	-+ 0.036	-+ 0.022	-+ 0.020
$\overline{(u'_3 \cdot u'_3)} \cdot U_\infty^{-1}$	+ 0.040	+ 0.013	+ 0.059	+ 0.070	+ 0.080

- Extrema der Reynoldsschen Spannungskomponenten verdeutlichen die Veränderung der Nachlaufstrukturen
- die elliptische Grundform produziert energieärmere Nachlaufstrukturen mit höherer Frequenz
- eine Modulation über die Spannweite verstärkt die Sekundärwirbelproduktion in schmalen Modulationsbereichen
- die Modulation unterbricht die primär aufrollenden Scherschichten
- Superposition erzeugt Ähnlichkeit zu axialsymmetrischen Scherschichten bei den Vibrissengeometrie
- separierte und phasenverschobene Wirbelproduktion im Vibrissennachlauf
- Druckminima entstehen weit stromab im Nachlauf der Vibrissen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Übersicht

- Projektbeschreibung
- Numerisch untersuchte Geometrien
- Oberflächenkräfte und Nachlaufstrukturen bei $Re = 500$
- Zusammenfassung und Ausblick
- Anhang

Oberflächenkräfte der Vibrisse



Frequenzanalyse des elliptischen Zylinders



Frequenzanalyse des Zylinders mittels PIV - Messungen

