MBING - KIB 6.4.4, MBING - VIS 4.4.7

Hybride Simulation des Verhaltens von Bauwerken in Wasser

Übertragung eines physikalischen Modells in die Numerik

Abschlussbericht der Veranstaltung im Sommersemester 2015

M. Sc. Andrea Mayer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff

Lehr- und Forschungsgebiet für Wasserwirtschaft und Wasserbau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **II**

1. Einleitung **1**

2. Physikalisches Modell **2**

2.1 Aufbau *2*

2.2 Messtechnik *3*

2.3 Messprogramm *5*

2.4 Ergebnisse *6*

3. Numerisches Modell **9**

3.1 Modellerstellung *9*

3.2 Kalibrierung *10*

3.3 Ergebnisse *12*

4. Plausibilitätskontrolle **16**

5. Ausblick **18**

6. Zusammenfassung **19**

Literaturverzeichnis **20**

Anlagen ..... **I**

A1 Fotos während den Messungen ..... *II*

A2 Ergebnisse der Labormessungen ..... *V*

Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen: V

Messschriebe der Wägezellenmessungen VI

A3 Darstellung der gemittelten Kräfte über den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit ..... *XXVI*

A4 Ergebnisse der numerischen Rechnung ..... *XXXIV*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemskizze des physikalischen Versuchsaufbaus im Labor (bearbeitet nach Hett, 2012) 2
Abbildung 2: Rinne und Störkörper mit Wägezelle im Labor 3
Abbildung 3: Durchflusseinstellung und Converter des MID 3
Abbildung 4: Skizze zur Validierung der Wägezelle (Ansicht) 4
Abbildung 5: Skizze zur Verdeutlichung der Messrichtungen (Draufsicht) 5
Abbildung 6: Nachweis zur Verschiebung des Störkörpers während der Messung (beispielhaft Q = 40 l/s) 6
Abbildung 7: Ergebnisse der Kraftmessung quer zur Fließrichtung, beispielhaft für α = 45°, Q=25 l/s 6
Abbildung 8: Auswertungen der gemittelten Kräfte über den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit für α = 45° 7
Abbildung 9: Strömungsverhältnisse am Störkörper bei α = 45° (links: Q = 10 l/s, rechts: Q = 25 l/s) 8
Abbildung 10: Grundmodell mit Angabe der Zellgrößen im Mesh 9
Abbildung 11: Punkt der Auswertung für die Kalibrierung des Modells (Hintergrund: Beispielhaft Wasserhöhen bei Q=40 l/s) 11
Abbildung 12: Ergebnisse der Kalibrierung anhand von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit für α = 45° 12
Abbildung 13: Analyse der Auswertungszeiträume beispielhaft für α = 45° und Q=25 l/s 13
Abbildung 14: Druck auf den Störkörper in Fließrichtung beispielhaft für α = 45° 14
Abbildung 15: Druckkraft auf den Störkörper quer zur Fließrichtung beispielhaft für α = 45° 14
Abbildung 16: Ausrichtung des Störkörpers in der Versuchsrinne 15
Abbildung 17: Auszuwertende Zellen für die Druckbestimmung 16
Abbildung 18: Skizze zur Berechnung des Hydrostatischen Druckes 17
Abbildung 19 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 5 l/s II
Abbildung 20 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 10 l/s II
Abbildung 21 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 15 l/s III
Abbildung 22 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 25 l/s III
Abbildung 23 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 40 l/s IV
Abbildung 24 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 5 l/s VI
Abbildung 25 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 10 l/s VI

Abbildung 26 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 15 l/s VII
Abbildung 27 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 25 l/s VII
Abbildung 28 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 40 l/s VIII
Abbildung 29 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 5 l/s..... VIII
Abbildung 30 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 10 l/s.....IX
Abbildung 31 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 15 l/s.....IX
Abbildung 32 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 25 l/s..... X
Abbildung 33 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 40 l/s..... X
Abbildung 34 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 5 l/s XI
Abbildung 35 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 10 l/s XI
Abbildung 36 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 15 l/s XII
Abbildung 37 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 25 l/s XII
Abbildung 38 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 40 l/s XIII
Abbildung 39 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 5 l/s..... XIII
Abbildung 40 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 10 l/s.....XIV
Abbildung 41 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 15 l/s.....XIV
Abbildung 42 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 25 l/s..... XV
Abbildung 43 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 40 l/s..... XV
Abbildung 44 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 5 l/s XVI
Abbildung 45 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 10 l/s XVI
Abbildung 46 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 15 l/s XVII
Abbildung 47 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 25 l/s XVII
Abbildung 48 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 40 l/s XVIII
Abbildung 49 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 5 l/s..... XVIII
Abbildung 50 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 10 l/s.....XIX
Abbildung 51 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 15 l/s.....XIX
Abbildung 52 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 25 l/s..... XX
Abbildung 53 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 40 l/s..... XX
Abbildung 54 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 5 l/s XXI
Abbildung 55 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 10 l/s XXI
Abbildung 56 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 15 l/s XXII
Abbildung 57 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 25 l/s XXII
Abbildung 58 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 40 l/s XXIII
Abbildung 59 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 5 l/s..... XXIII

Abbildung 60 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 10 l/s..... XXIV
Abbildung 61 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 15 l/s..... XXIV
Abbildung 62 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 25 l/s..... XXV
Abbildung 63 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 40 l/s..... XXV
Abbildung 64 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 0°. XXVI
Abbildung 65 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 0° XXVI
Abbildung 66 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 0° XXVII
Abbildung 67 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 25° XXVIII
Abbildung 68 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 25° XXVIII
Abbildung 69 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 25° XXIX
Abbildung 70 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 30° XXX
Abbildung 71 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 30° XXX
Abbildung 72 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 30° XXXI
Abbildung 73 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 45° XXXII
Abbildung 74 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 45° XXXII
Abbildung 75 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 45° XXXIII
Abbildung 76 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 5 l/s XXXIV
Abbildung 77 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 15 l/s XXXIV
Abbildung 78 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 40 l/s XXXV
Abbildung 79 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 5 l/s XXXVI
Abbildung 80 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 15 l/s XXXVI
Abbildung 81 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 40 l/s XXXVII
Abbildung 82 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 5 l/s XXXVII
Abbildung 83 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 15 l/s XXXVIII

Abbildung 84 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 40 l/s XXXVIII
Abbildung 85 Rechenergebnisse für Q = 5 l/s XXXIX
Abbildung 86 Rechenergebnisse für Q = 10 l/s XXXIX
Abbildung 87 Rechenergebnisse für Q = 15 l/s XL
Abbildung 88 Rechenergebnisse für Q = 25 l/s XL
Abbildung 89 Rechenergebnisse für Q = 40 l/s XLI

1. Einleitung

Dieser Abschlussbericht dient zur Dokumentation der Master-Veranstaltung „Hybride Simulation des Verhaltens von Bauwerken in Wasser“. Die Masterveranstaltung wurde im Sommersemester 2015 erstmalig im Zuge des Moduls MBING-KIB 4.4.7 (Sonderkapitel des konstruktiven Ingenieurbaus II) bzw. MBING-VIS 6.4.4 (Sonderkapitel Verkehrs- und Infrastruktursysteme II) angeboten und durchgeführt. Der Bericht umfasst die Zusammenstellung der Ergebnisse des physikalischen und numerischen Modells, die sich aus den studentischen Arbeiten ergeben haben, sowie eine kritische Betrachtung des Ablaufes und der Organisation mit Verbesserungsvorschlägen.

Im Sommersemester 2015 wurde die Veranstaltung von vier Studenten belegt. Neben der Vermittlung von theoretischen Inhalten standen Modellversuche im Wasserbaulabor und die numerische Simulation dieser Versuche im Vordergrund. Dabei liegt der hybride Ansatz darin, physikalische Modelle und mathematische Modelle gleichzeitig zur Lösung von Problemstellungen einzusetzen.

Die physikalischen Modellversuche umfassen Kraftmessungen auf einen würfelförmigen Störkörper in einem Fließgewässer. Die Studenten sollen dabei die Erstellung und Anpassung des physikalischen Modells sowie die Durchführung der Messungen eigenständig durchführen. Dieses Modell wird mit Hilfe des Programes FLOW-3D im numerischen Modell nachgebildet. Abschließend sollen Versuchsverläufe, Ergebnisse und Probleme in einem Bericht erläutert werden.

2. Physikalisches Modell

2.1 Aufbau

Für die physikalischen Messungen wurde ein bereits vorhandenes Modell im Labor des Lehr- und Forschungsgebietes für Wasserwirtschaft und Wasserbau genutzt. Dazu wird Wasser durch einen geschlossenen Kreislauf gepumpt. Dieser beinhaltet zwei Speicherbecken. Aus einem im Boden eingelassenen Becken wird das Wasser über Rohrleitungen in ein Hochbecken gepumpt, von wo es in eine angeschlossene Rinne überläuft. Die Wassermenge wird mittels Durchflussregler und angeschlossenen Magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät (MID) eingestellt und gemessen. Für einen regelmäßigen Zufluss läuft das Wasser im Zulaufbereich durch ein aufgesetztes Rohrpacket vom Hochbecken in die Rinne. Abbildung 1 zeigt eine Systemskizze des Wasserkreislaufes im Labor (hier für eine andere Rinne).

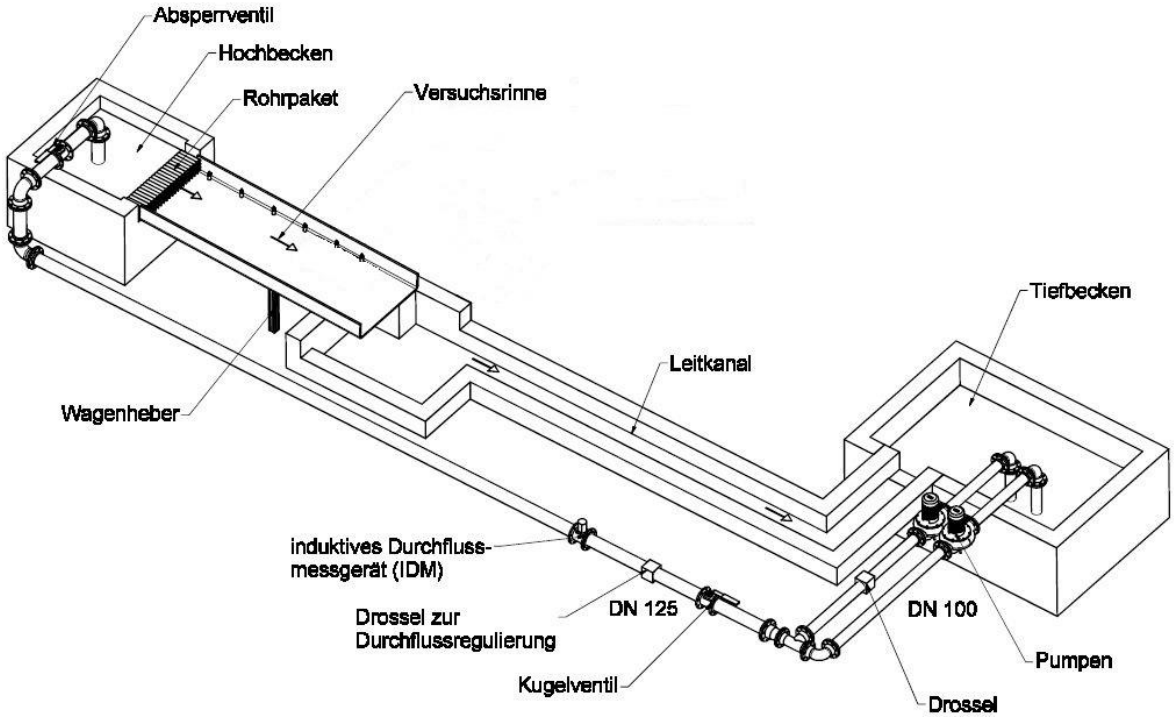

Abbildung 1: Systemskizze des physikalischen Versuchsaufbaus im Labor (bearbeitet nach Hett, 2012)

Die verwendete Rinne ist aus einer Plexiglas-Stahl-Konstruktion gefertigt. Sie hat eine Länge von 9 m und eine Innenbreite von 80 cm. Die Sohle der Rinne ist mit grober Dachpappe ausgekleidet, die die Rauheit erhöhen soll (siehe Abbildung 2). Das Modell hat eine Längsneigung von 1 %.

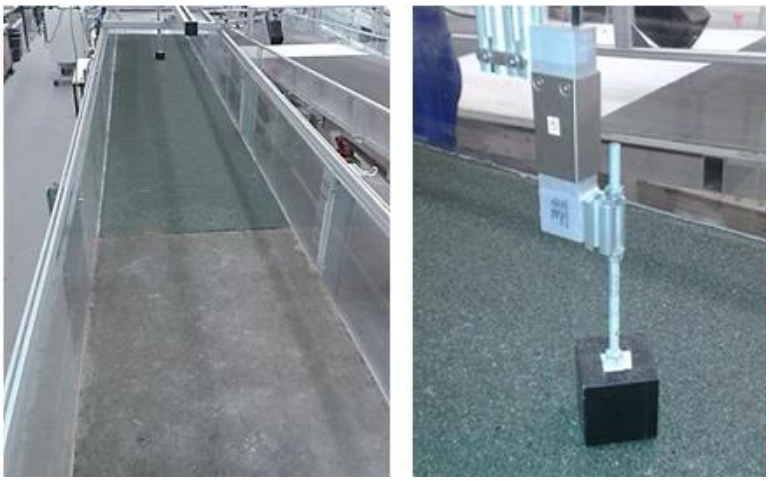

Abbildung 2: Rinne und Störkörper mit Wägezelle im Labor

Der Störkörper, an dem die auftretende Druckkraft gemessen werden soll, wird in der Mitte der Rinne (ca. 4,4 m nach dem Einlauf) angebracht. Er hat die Form eines Würfel mit einer Kantenlänge von 6 cm. Mittels einer Gewindestange und Anbauten des ISEL-Systems wird dieser mit der Wägezelle zur Druckkraftmessung verbunden und an der Oberkonstruktion der Rinne befestigt (siehe Abbildung 2, links). Dieser wird jeweils so angebracht, dass die herrschenden Kräfte auf den Störkörper einmal in Fließrichtung und einmal quer zur Fließrichtung gemessen werden können.

2.2 Messtechnik

MID (Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät): Zur Bestimmung der Durflussmengen ist im Rohrsystem des Labors ein MID der Firma KROHNE eingebaut. In dem elektrisch isolierten Messrohr wird ein Magnetfeld erzeugt. In der durchfließenden leitenden Flüssigkeit (Wasser) wird so eine Spannung induziert, welche mittels Elektroden aufgenommen wird. Diese Spannung verhält sich proportional zur Durchflussgeschwindigkeit (v), der primären Messgröße. Mittels bekanntem Rohrdurchmesser kann über die Kontinuitätsgleichung auf den Durchfluss (Q) als sekundäre Messgröße errechnet werden. Ausgegeben werden die Daten auf einem Converter (IFC 100) (wwwb, 2015).

Abbildung 3: Durchflusseinstellung und Converter des MID

Wägezelle: Die Kraftmessungen werden mit einer Plattform-Wägezelle der Firma Soemer (Typ 1040) durchgeführt. Diese hat eine angegebene Nennlast von bis zu 5 kg und einer Messgenauigkeit von 0,02 % der Nennlast. Die Messungen basieren auf einem Dehnungsmessstreifen im Inneren der Wägezelle. Von dieser wird ein zur Belastung proportionales Spannungssignal ausgegeben. Dieses wird im Messverstärker auf ±10 V erhöht und vom analogen Signal in ein digitales umgewandelt (wwwb, 2015). Die Wägezelle selber ist mittels eines Gewindestabes direkt mit dem Störkörper verbunden. Wie Voruntersuchungen gezeigt haben, hat die Länge des Stabes (Ausmitte zwischen Körper und Wägezelle) keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Validierung der Wägezelle

Für die vorhergehende Validierung der Wägezelle wird diese unverschieblich auf einen festen Untergrund montiert. Für die Kalibrierung der Zelle wird ein zuvor abgewogenes Gewicht von 230 g auf den waagerecht liegenden Körpers aufgebracht (siehe Abbildung 4). Die Ergebnisse der Messung über die belastete Wägezelle stimmen mit diesem Gewicht überein, sodass die Zelle als kalibriert angesehen werden kann.

In weiteren Versuchen, soll die Auswirkung des Kraftangriffspunktes ermittelt werden. Dazu wird die Ausmitte [e] zwischen belastetem Körper und der Wägezelle variiert. Die Messergebnisse zeigen keine Unterschiede. Die Ausmitte hat keinen Einfluss auf die Kraftmessung senkrecht zur Wägezelle.

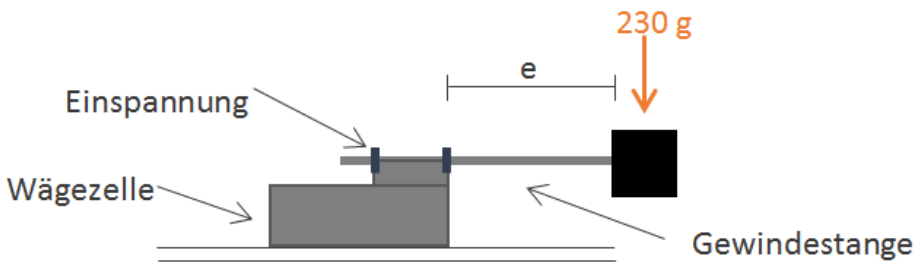

Abbildung 4: Skizze zur Validierung der Wägezelle (Ansicht)

Flügelrad-Anemometer: Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt mit einem kleinen Flügelrad-Anemometer und einem tragbaren Messgerät (Mini Air 20). Die Messungen werden etwa 1,5m vor dem Störkörper in der Mitte der Rinne durchgeführt. Bestimmt wird die über 10 Sekunden gemittelte Geschwindigkeit (wwwb, 2015).

Messlatte: Der Wasserstand für die verschiedenen Durchflüsse wird manuell mit einer dünnen Messlatte gemessen. Diese wird senkrecht ins Wasser gehalten und der Wasserstand abgelesen. Die Messung erfolgt ca. 1,5m vor dem Körper, um nicht im Einflussbereich eines möglichen Aufstaus zu liegen. Gemessen wird ca. 20cm vom Rand der Rinne entfernt.

2.3 Messprogramm

Jeder Student untersucht eine andere Position des Störkörpers. Der würfelförmige Körper wird aus der Draufsicht um 0°, 25°, 30° und 45° zur Fließrichtung gedreht. Für jede Stellung wurden drei Durchgänge mit insgesamt 15 Messungen durchgeführt. Gemessen wird jeweils für fünf verschiedene Durchflüsse: 5, 10, 15, 25 und 40 l/s. Es wird je Position ein Durchlauf für die Druckkräfte quer zur Fließrichtung und zwei in Fließrichtung gefahren (siehe folgende Abbildung). Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen sind unabhängig von der Drehung des Störkörpers und werden daher für jeden Winkel aufgenommen und über diese vier Werte gemittelt (Tabelle zu dem Ergebnissen, siehe Anhang 2).

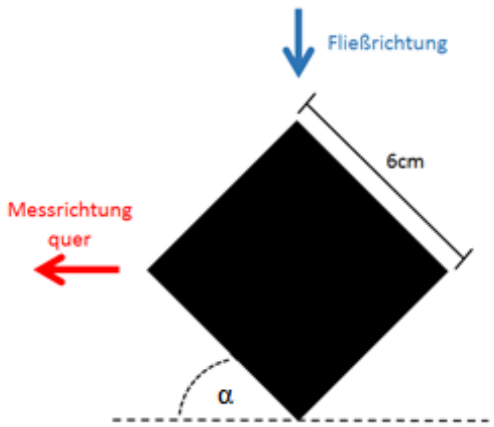

Abbildung 5: Skizze zur Verdeutlichung der Messrichtungen (Draufsicht)

Die Kraftmessungen erfolgen nach Erreichen des stationären Zustandes über je 10 Sekunden. Wasserstand und Geschwindigkeit werden zeitlich versetzt gemessen, um keinen Einfluss auf die Kraftmessung zu nehmen. Zusätzlich zu den Messungen werden bei jedem Durchfluss Fotos gemacht (siehe Anhang 1).

Mit diesen Bildern kann zusätzlich nachgewiesen werden, dass der Störkörper sich durch den Wasserdruck nicht so verschiebt, dass er am Rinnenboden aufsetzt. So kann von ungestörten Messungen ausgegangen werden.

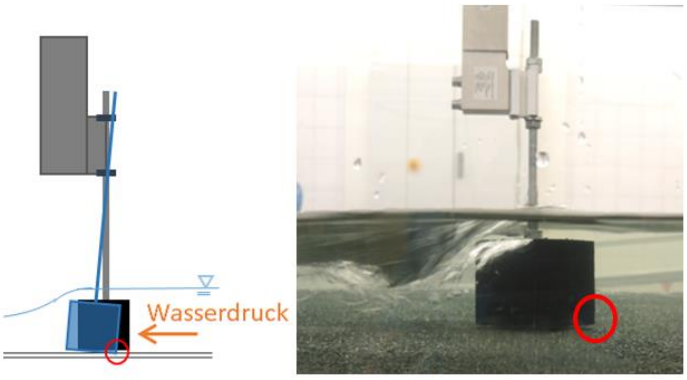

Abbildung 6: Nachweis zur Verschiebung des Störkörpers während der Messung (beispielhaft Q = 40 l/s)

2.4 Ergebnisse

Vom Messprogramm der Wägezelle werden 1000 Werte pro Sekunde aufgezeichnet. Bei der Auswertung der Kraftmessungen sind periodische Schwankungen zu erkennen. Diese lassen auf eine Vibration des Störkörpers durch das fließende Wasser schließen. Für die visuelle Auswertung wurde zusätzlich ein zentriert gleitender Mittelwert dargestellt, welcher immer 200 Werte mittelt (vgl. Abbildung 7). Alle Messschriebe sind in Anhang 2 zu finden.

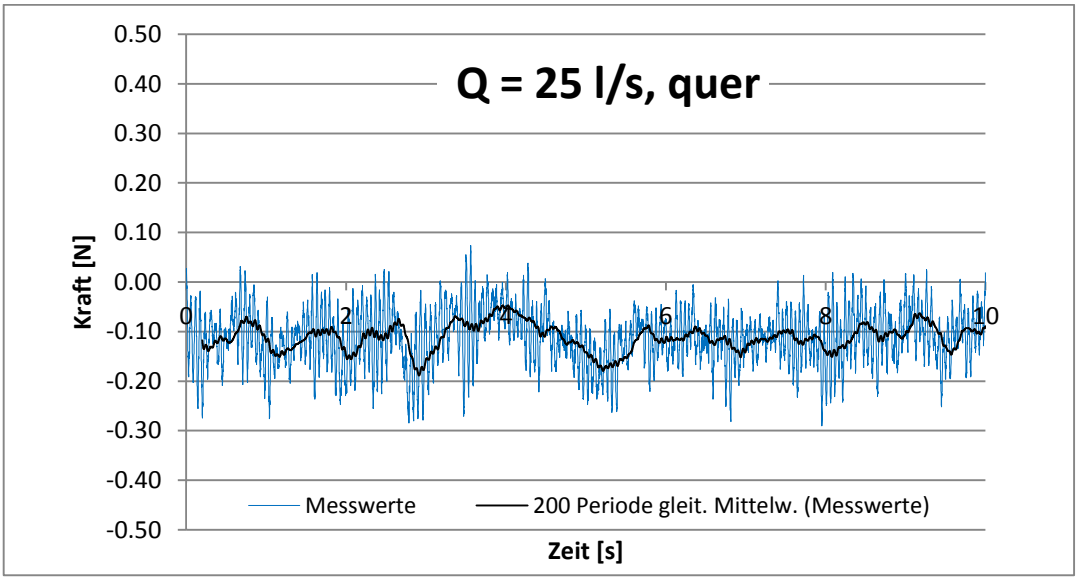

Abbildung 7: Ergebnisse der Kraftmessung quer zur Fließrichtung, beispielhaft für α = 45°, Q=25 l/s

Zur weiteren Auswertung wurden die Messwerte anhand der Diagramme analysiert, auf fehlerhafte, nicht plausible Werte untersucht und arithmetisch gemittelt.

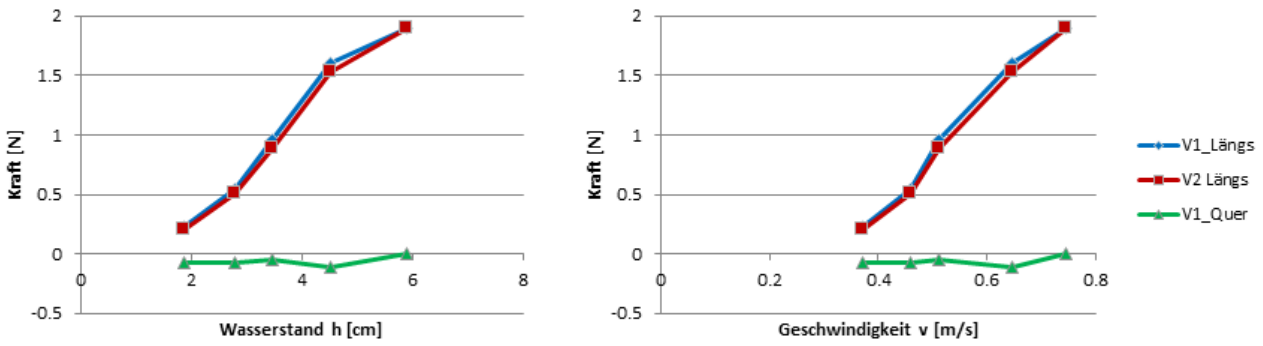

Abbildung 8: Auswertungen der gemittelten Kräfte über den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit für α = 45°

Alle Graphiken zur Darstellung der gemittelten Kräfte in Abhängigkeit des Wasserstandes, der Fließgeschwindigkeit und der quadratischen Fließgeschwindigkeit für die einzelnen Störkörperdrehungen sind in Anhang 3 dargestellt. Die Auswertungen über den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeiten stellen keine Auffälligkeiten dar. Insgesamt ist festzustellen, dass die gemessenen Kräfte beim zweiten Durchlauf der Längsrichtung unwesentlich kleiner ausfallen. Bei einer Drehung des Körpers um α = 45° und einem Durchfluss von Q = 40 l/s wirken nach den Messungen ca. 1,9 N auf den Störkörper.

In Querrichtung fällt auf, dass die Kraft bei Drehungen des Störkörpers um 0° und 45° einen annähernd konstanten Verlauf hat. Bei den Störkörperpositionen mit 25° und 30° sind mit zunehmendem Durchfluss geringere Kräfte zu verzeichnen, sodass ein linearer Verlauf entsteht.

Bei der Position 45° fällt auf, dass der konstante Verlauf bei einem Durchfluss von 25 l/s einen Knick nach unten aufweist. Zum einen könnte es sich hierbei um einen Messfehler handeln, der ohne weitere Messungen nicht weiter analysiert werden kann, zum anderen könnte dies mit dem Strömungsverhalten des Wassers zusammen hängen. Bei Q=25 l/s wird der Körper erstmals vom Wasser überströmt (siehe Abbildung 9), was die Strömungsverhältnisse dahinter und seitlich beeinflusst. Für weitere Aussagen werden die Rechenergebnisse abgewartet.

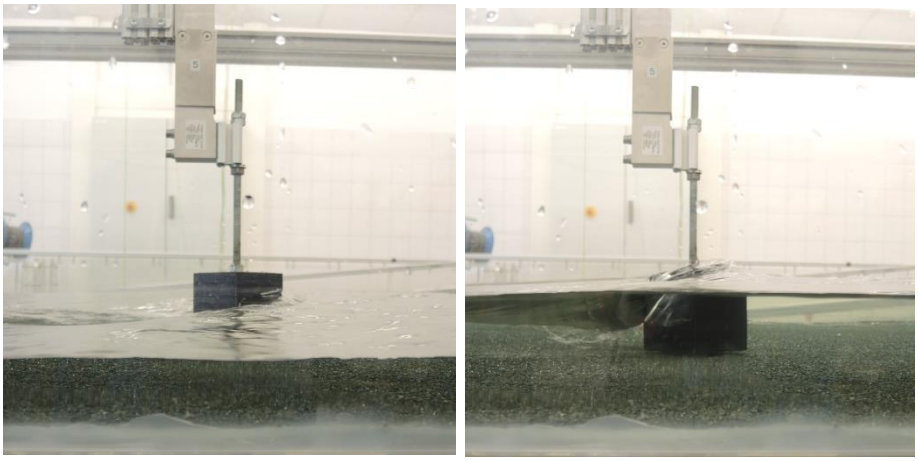

Abbildung 9: Strömungsverhältnisse am Störkörper bei α = 45°
(links: Q = 10 l/s, rechts: Q = 25 l/s)

Alle Ergebnisse der Geschwindigkeits- und Wasserstandsmessungen sind in einer Tabelle in Anhang 2 zu finden. Hierbei wurden die Ergebnisse zusätzlich auf mögliche Fehler untersucht. Mit den gemessenen Geschwindigkeiten und Wasserhöhen wird mittels Kontinuitätsgleichung der Durchfluss errechnet. Dabei ergeben sich Abweichungen zum eingestellten Durchfluss zwischen 3 und 12 %. Ungenauigkeiten bzw. Abweichungen sind bei allen drei Größen möglich (eingestellter Durchfluss, gemessene Wasserhöhen und Geschwindigkeiten). Trotz leichten Schwankungen in den MID-Messungen ist der eingestellte Durchfluss als stabilste Größe anzusehen. Bei Wasserstand und Geschwindigkeit ist es möglich, dass diese nicht immer an derselben Stelle gemessen wurden, einen durch den Störkörper verursachte stehende Welle übersehen wurde oder die Rinnensymmetrie im Labor nicht exakt gegeben ist.

3. Numerisches Modell

3.1 Modellerstellung

Das numerische Modell wird mit dem Simulationsprogram FLOW-3D erstellt. Für die möglichst genaue Darstellung des Laborversuches, wurde die Rinne vermessen. Die Innenmaße werden exakt auf das Modell übertragen. Um Fehler und Ungenauigkeiten zu vermeiden, wurden die Wände dicker eingegeben, sodass das Mesh für die Rechnung ausreichend in die Bauteile hineinragen kann. Alle Bauteile werden als undurchlässig definiert.

Als weitere Komponente wird der Störkörper in der Rinnenmitte eingefügt und um den entsprechenden Winkel gedreht. Um eine möglichst genaue Abbildung des gedrehten Körpers zu erreichen, muss das Mesh im Bereich des Störkörpers feiner gewählt werden. Hierzu wird ein weiterer Mesh Plane eingefügt. Die Zellgrößen des Meshs sind in der Abbildung 10 aufgetragen.

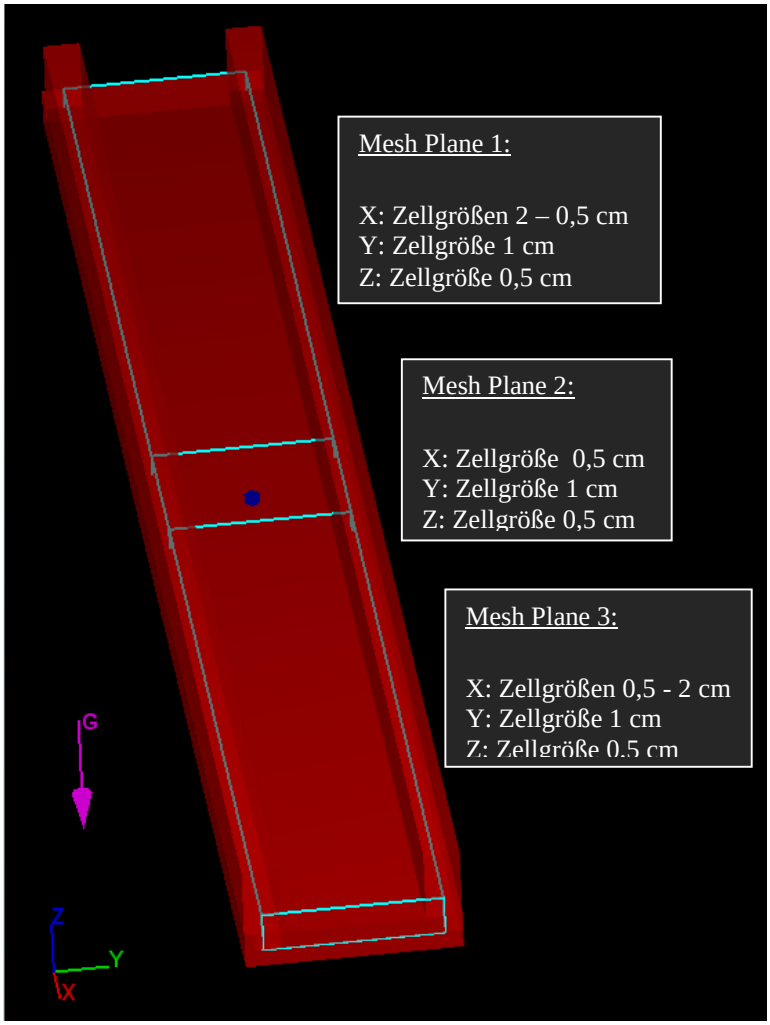

Abbildung 10: Grundmodell mit Angabe der Zellgrößen im Mesh

Als Randbedingungen werden Ein- und Auslauf der Rinne definiert. Für den Einlauf in die Rinne (X Min) werden der Durchfluss, der zugehörige Wasserstand und die Fließrichtung in X-Richtung angegeben. Für den Wasserstand wird auf die Messwerte aus dem Labor zurückgegriffen. Das Rinnenende wird als offener Auslauf festgelegt. Um die Neigung der Rinne abzubilden, wird der Gravitationsvektor entsprechend einer Längsneigung von 1% umgerechnet.

3.2 Kalibrierung

Das numerische Modell wird anhand der Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen aus dem Labor kalibriert. Als verstellbare Größe im numerischen Modell wird die Rauheit der Rinne genutzt. Die Rinne des physikalischen Modells ist auf dem Boden mit Dachpappe ausgekleidet. Zur Vereinfachung des numerischen Modells wurden alle Bauteile der Rinne (Boden und Wände) als gleich angesehen. Somit haben diese für die Rechnungen auch die gleiche Rauheit. Für eine erste Einschätzung (V1) wurde die Rauheit der Dachpappe auf 2 mm vorgeschätzt. Für die genaue Anpassung an die Laborwerte wird diese für die weiteren Durchläufe um je einen Millimeter erhöht.

Ausgewertet werden Wasserstand und Fließgeschwindigkeit ungefähr an der Stelle, an der auch im Labor die Messungen vorgenommen wurden (ca. 1,5 m vor dem Störkörper und 20 cm vom Rinnenrand entfernt (siehe Abbildung 11). Hierfür wird eine Matrix von 6 Zellen gewählt. Zusätzlich werden die Werte für die jeweils drei letzten Sekunden der Rechnung herausgeschrieben, in denen der stationäre Zustand herrscht. Alle Werte werden über die Fläche und die Zeit zu einem Wert gemittelt.

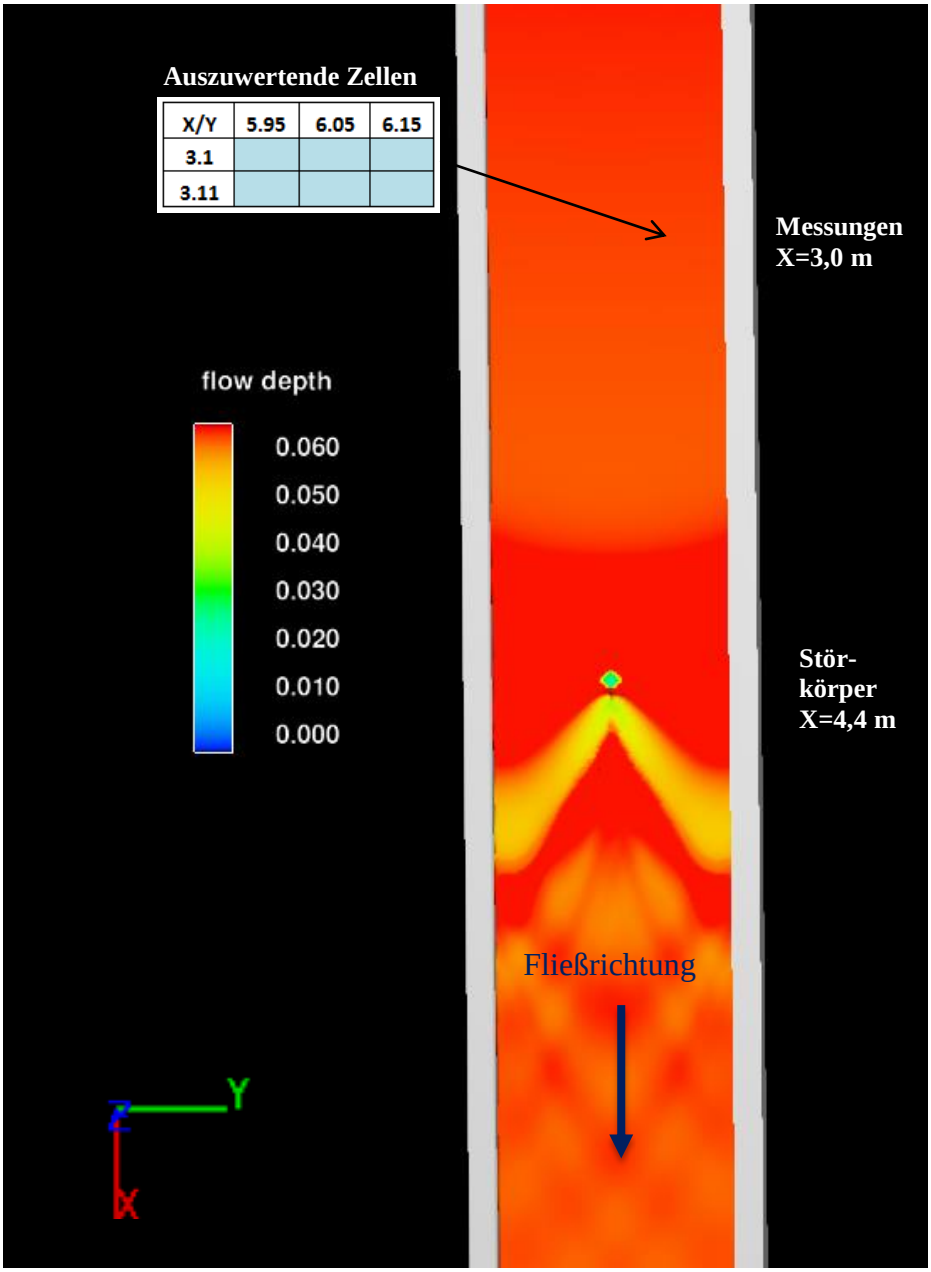

Abbildung 11: Punkt der Auswertung für die Kalibrierung des Modells (Hintergrund: Beispielhaft Wasserhöhen bei Q=40 l/s)

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Rechenergebnisse aus dem numerischen Modell für die Körperdrehung um 45° im Vergleich zu den Laborwerten. Zusätzlich ist im Folgenden die Kalibrierung dieser Modellläufe exemplarisch dargestellt. Für die anderen drei Störkörperpositionen wurde die Kalibrierung von den Studenten analog durchgeführt. Abbildungen liegen jedoch nicht vor.

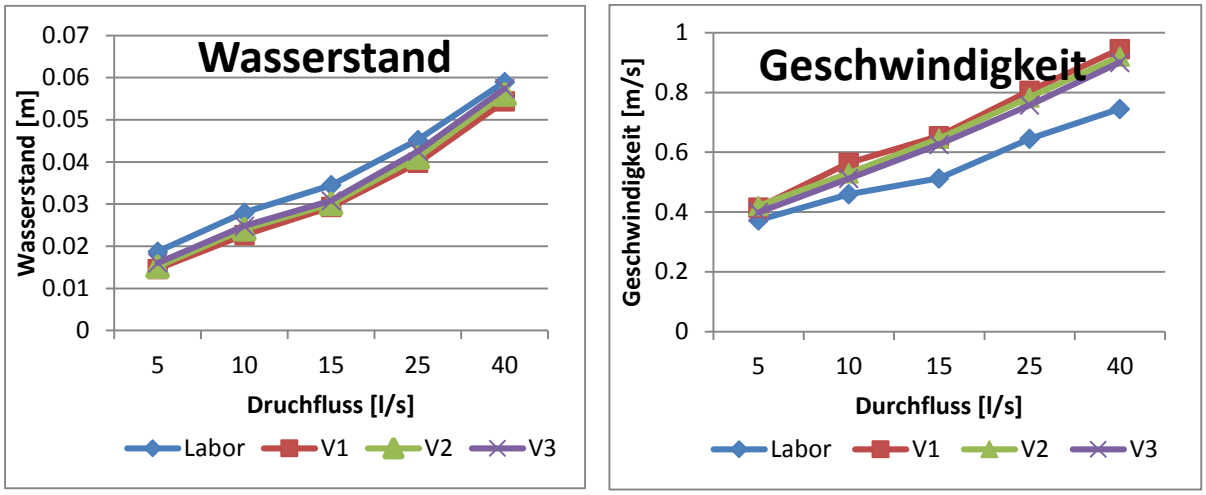

Abbildung 12: Ergebnisse der Kalibrierung anhand von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit für α = 45°

Der Ergebnisvergleich zeigt, dass die errechneten Wasserstände etwas zu gering sind. Die errechnete Fließgeschwindigkeit ist entsprechend der Kontinuität zu hoch. Für die Kalibrierung werden Rauheiten von 2 mm bis 4 mm eingegeben (V1: 2mm, V2: 3mm, V3: 4mm).

Aufgrund der guten Annäherung der Rechenwerte aus dem dritten Durchlauf (V3), wird mit diesem Modell weiter gerechnet. Die verwendete Rauheit von 4 mm ist zwar verhältnismäßig hoch im Vergleich zur realen Rauheit, da die Werte aber eine nur sehr geringe Abweichung aufweisen, kann dieses Modell zur weiteren Analyse genutzt werden. Die prozentualen Abweichungen der Rechenwerte liegen zwischen 2% und 17%, was für diese Arbeit als ausreichend angesehen werden kann. Um Besserungen zu erreichen, könnte die Mesh-Unabhängigkeit überprüft werden und dieses gegebenenfalls angepasst werden.

Möglich ist auch ein Einfluss der in 2.4 erläuterten Fehlerquellen und Messungenauigkeiten. Eine Einrechnung der prozentualen Abweichung durch die Fehler könnte die Annäherung der Laborwerte an die Rechenwerte zumindest teilweise verbessern.

Da die Rauheit offensichtlich einen geringen Einfluss auf Wasserstand und Fließgeschwindigkeit hat, könnte auch über die Wahl eines anderen Rechensystems nachgedacht werden. Hierfür würde sich statt dem gewählten „Renormalized group (RNG) model“ auch das „Two-equation (k-ε) model“ anbieten, in dem die Turbulenzen anders berücksichtigt werden.

3.3 Ergebnisse

Um Druckkräfte auf den Körper ausgeben zu lassen, sind zusätzliche Einstellungen nötig. Da der Störkörper als einzelne Komponente eingefügt wird, können die Kräfte auf diesen direkt berechnet werden. Dieses kann vor der Rechnung in den Ausgabe-Tools festgelegt werden. Als

Ergebnis werden die Druckkräfte in alle Richtungen (X, Y, Z), sowie die Resultierende genutzt. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse zunächst wie in Abbildung 13 beispielhaft gezeigt graphisch analysiert, um die nötigen Auswertungszeiträume festzulegen. Die weiteren Ergebnisse der Studenten sind im Anhang 3 zusammengestellt.

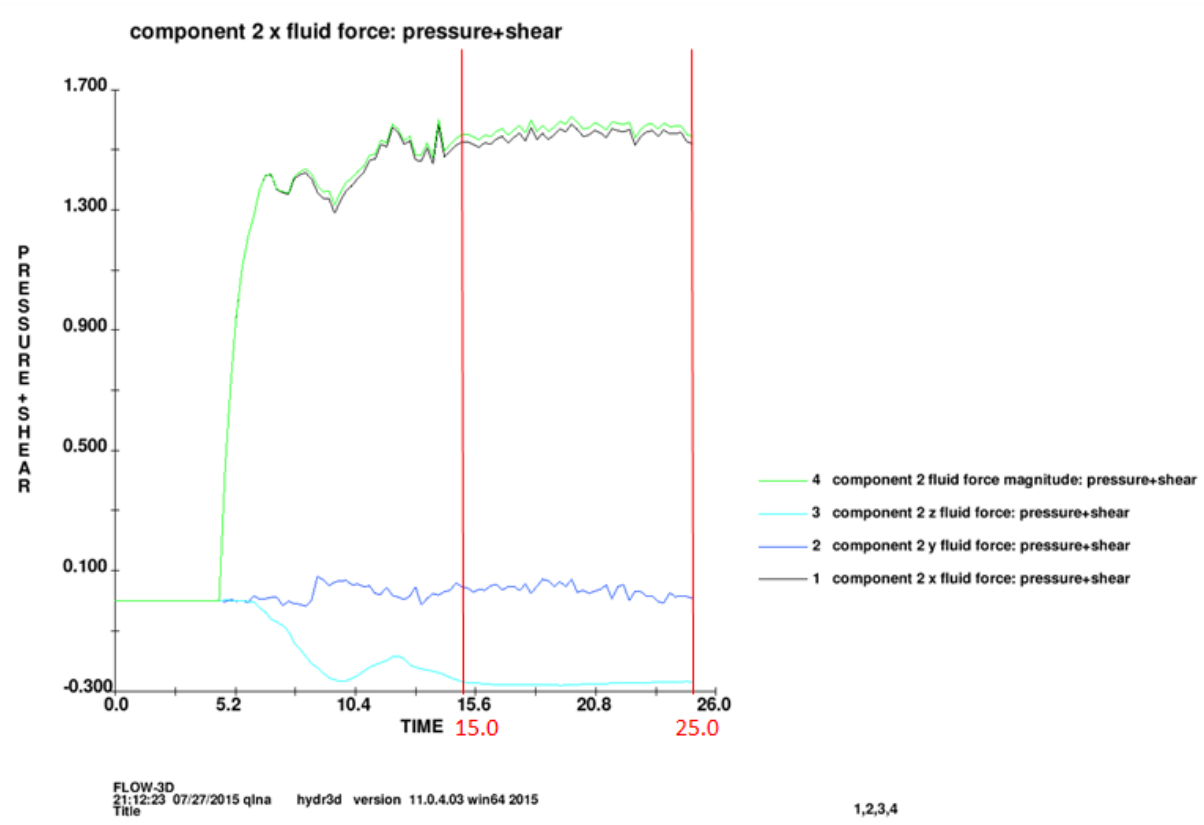

Abbildung 13: Analyse der Auswertungszeiträume beispielhaft für α = 45° und Q=25 l/s

Für alle Durchflüsse werden jeweils die letzten 10 Sekunden der Rechnung genutzt. Die Werte werden, wie auch die Laborwerte arithmetisch gemittelt. Abbildung 14 zeigt exemplarisch für den um α = 45° gedrehten Störkörper die Rechenergebnisse im Vergleich zu den gemessenen Laborwerten.

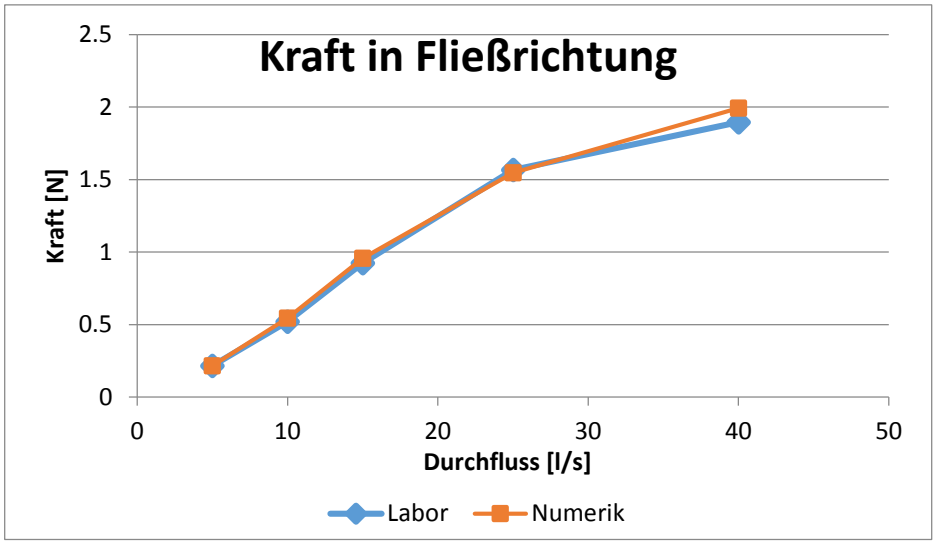

Abbildung 14: Druck auf den Störkörper in Fließrichtung beispielhaft für α = 45°

Für die Auswertung der quer zur Fließrichtung wirkenden Kräfte, muss die Messrichtung im Labor berücksichtigt werden. Diese entspricht der negativen Y-Richtung des numerischen Modells. Für einen Vergleich, werden die Laborwerte mit umgekehrten Vorzeichen versehen.

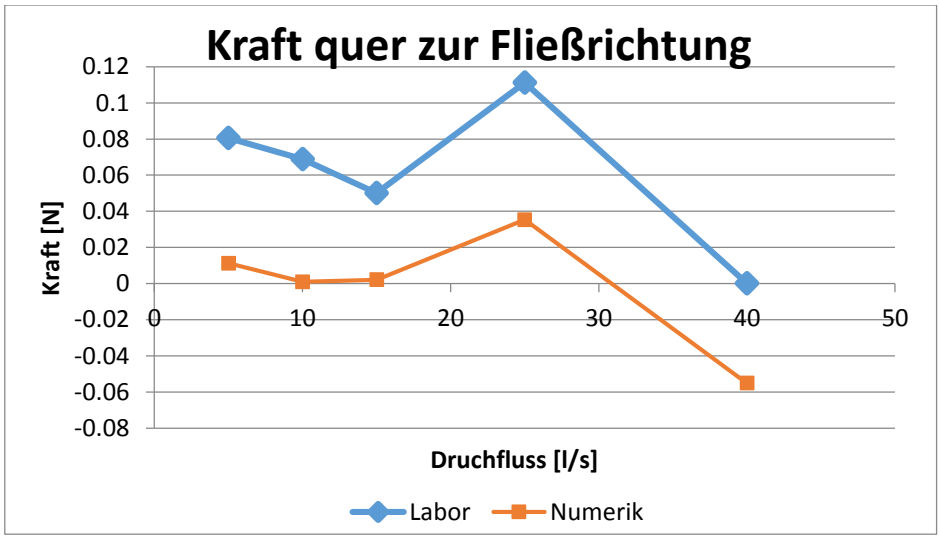

Abbildung 15: Druckkraft auf den Störkörper quer zur Fließrichtung beispielhaft für α = 45°

Beim Vergleich der Laborwerte mit den Rechenergebnissen fällt auf, dass diese sehr gut zusammen passen. Bei den Kräften längs der Fließrichtung ergeben sich lediglich maximale Abweichungen von 5,1 % (vgl. Abbildung 14). Allgemein können Werte bis zu einer Abweichung von 10 % als gut angesehen werden.

Bei den Kräften quer zur Fließrichtung, sind die Laborwerte deutlich größer als die der Numerik. Aufgrund der symmetrischen Anordnung des Körpers in der Rinnenmitte scheint es logisch, dass die Querkräfte beider Seiten sich gegenseitig aufheben und daher gegen Null

streben. Differenzen von max. 0,07 N scheinen auf den ersten Blick eher marginal, prozentual ergeben sich jedoch Abweichungen von bis zu 98 % (vgl. Abbildung 15). Die erhöhten Werte im Labor könnten an einer nicht ganz exakten Ausrichtung des Störkörpers (vgl. Abbildung 16) und nicht ganz symmetrisch ausgerichteten Rinne liegen, die sich in solch kleinen Werten deutlicher bemerkbar machen. Das Kraftmaximum bei 25 l/s lässt sich, wie schon vermutet am plausibelsten mit der beginnenden Überströmung des Körpers erklären.

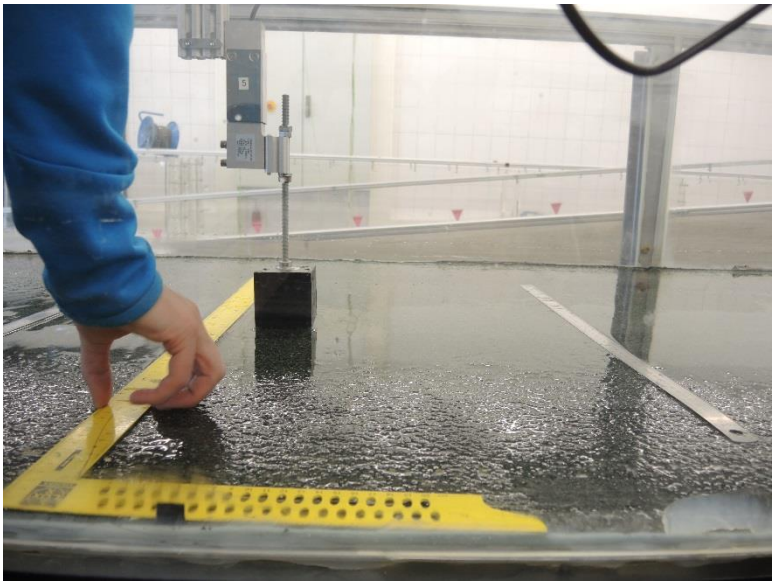

Abbildung 16: Ausrichtung des Störkörpers in der Versuchsrinne

4. Plausibilitätskontrolle

Um festzustellen wie das verwendete Tool die resultierenden Kräfte auf den Störkörper bestimmt, wird im Folgenden eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Hierfür werden die herausgegebenen Werte mit denen einer „Handrechnung“ verglichen. Für diese werden die wirkenden Kräfte auf den Körper für jede betroffene Zelle herausgeschrieben, aufaddiert und über die Zellgrößen integriert. Um die Kontrolle zu vereinfachen wird der Störkörper dafür gerade gestellt, sodass dieser genau im Rechenmesh liegt und die Kräfte gerade in X-Richtung auf diesen wirken. Verwendet werden folglich die Druckwerte der Zelle direkt vor dem würfelförmigen Körper, die unmittelbar auf diesen wirken (siehe Abbildung 17, grau hinterlegt). Es handelt sich dabei um 6 x 12 Zellen mit einer Zellgröße von 0,5 x 1 cm. Die Kontrolle wird beispielhaft für einen Durchfluss von 25 l/s durchgeführt. Auch hier werden die Werte der letzten 3 Rechensekunden über die Zeit gemittelt.

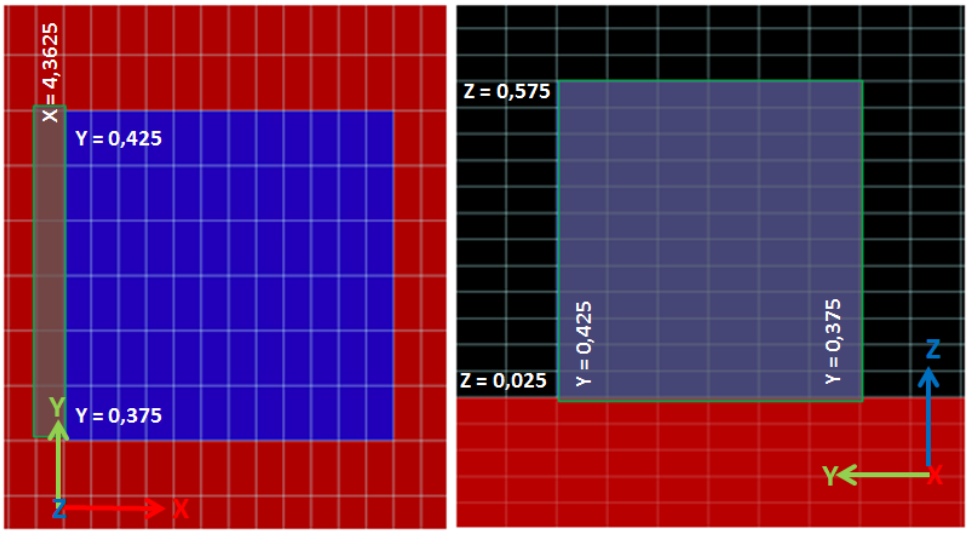

Abbildung 17: Auszuwertende Zellen für die Druckbestimmung

Als resultierende Kraft in X-Richtung ergibt sich so ein Wert von **1,58 N**. Dieser ist dem Wert aus der für den geraden Störkörper erneut durchgeführten Berechnung der resultierenden Kräfte mit **1,63 N** sehr ähnlich. Allerdings wird in der durchgeführten Handrechnung bisher nur die wirkende Kraft vor dem Würfel berücksichtigt. Alleine vor dem Gedanken der Hydrostatik, müssten auch die Drücke auf der Rückseite des Störkörpers berücksichtigt werden.

Diese werden mit der gleichen Methode bestimmt. Hierbei ergeben sich starke Schwankungen der Drücke über die drei ausgewerteten Sekunden. Das lässt keine Mittelung auf einen Wert zu, da die Turbulenzen hinter dem Körper nicht stationär sind, bzw. dies auch nicht werden. Trotzdem ist zu erkennen, dass unter Berücksichtigung dieser Werte, die Ergebnisse aus Handrechnung und Bestimmung der Resultierenden in FLOW-3D nicht überein stimmen. Das

lässt die Vermutung zu, dass das Programm die Drücke hinter der für die Berechnung angegebenen Komponenten nicht berücksichtigt [Anmerkung des Lehrstuhls: Diese Aussage müsste erst noch verifiziert werden!].

Um die Grundrechnung des Programmes zu verstehen, wird in einem nächsten Schritt nur der hydrostatische Druck auf den würfelförmigen Körper betrachtet. Auch dieser wird einmal von Hand und einmal durch FLOW-3D bestimmt. Hierfür sollte zunächst der Wasserstand vor und hinter dem Körper für den entsprechenden Durchfluss bestimmt werden. Vor dem Würfel mittelt sich dieser auf 7,46 cm. Hinter ihm schwanken die Wasserstände äquivalent zu den Druckhöhen so stark, dass eine Mittelung nicht zielführend wäre.

Deshalb wird nun mit einem willkürlichen Wasserstand von 4 cm vor und hinter dem Störkörper gerechnet. Dafür wird der Wasserstand im Programm festgesetzt und die Werte zum Zeitpunkt T = 0 sek ausgewertet. Zu diesem Zeitpunkt ist noch kein weiteres Wasser in die Rinne geflossen und es kann rein der hydrostatische Druck betrachtet werden. Um Unsicherheiten durch Vorbeifließen vorzubeugen, wird der Körper hierfür auf die komplette Rinnenbreite gestreckt.

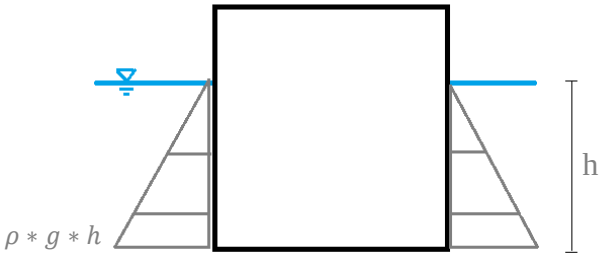

Abbildung 18: Skizze zur Berechnung des Hydrostatischen Druckes

Aus der Rechnung per Hand ergibt sich eine resultierende Kraft von $7{,}85*10^{-2}$ N/m. Bei den Ergebnissen der FLOW-3D-Rechnung ist zu erkennen, dass bereits zum Zeitpunkt T=0 die Längsneigung einen Einfluss hat, obwohl zu dieser Zeit noch nichts fließen sollte. Die Drücke vor dem Körper sind dementsprechend etwas höher als die dahinter (Vor: $7{,}91*10^{-2}$ N/m; Hinter: $7{,}79*10^{-2}$ N/m). Der Wert der Handrechnung bildet einen guten Mittelwert.

Die Kontrolle lässt die Vermutung zurück, dass die ausgegebenen Ergebnisse aus Kapitel 3.3 nur den Druck der auf der Vorderseite des Körpers wirkt berücksichtigt und alles hinter dem Körper vernachlässigt. [Anmerkung des Lehrstuhls: Diese Aussage müsste erst noch verifiziert werden!].

5. Ausblick

Zwischen den Labor- und Rechenwerten sind bei den Kräften quer zur Fließrichtung Unterschiede aufgetreten, deren Gründe nicht eindeutig geklärt werden konnten. Für ausführliche und aussagekräftige Ergebnisse müssten weitere Wege eingeschlagen werden:

Labor

Ein Grund für die Ergebnisabweichung könnten bereits fehlerhafte Messungen im Labor sein. Um diese Möglichkeit auszuschließen wären weitere Messungen nötig. Hierbei sollten mindestens 3 Durchläufe je Kraftmessrichtungen durchgeführt werden, um Unsicherheiten besser erkennen zu können. Gerade in Querrichtung, in der auch im Programm starke Turbulenzen errechnet wurden, wurde nur einmal gemessen. Für eine eindeutige Aussage über die herrschenden Kräfte ist das nicht ausreichend.

Weiter sind die Rahmenbedingungen im Labor als gegeben hingenommen worden. In neuen Messungen, sollte auch die Querneigung überprüft werden und die Geschwindigkeits- und Wasserstandsmessungen über die gesamte Rinnenbreite durchgeführt werden. So kann verhindert werden, dass mit den durchgeführten Messungen nur Momentaufnahmen getroffen werden und das Wasser gleichmäßig durch die Rinne fließt. Eine leichte Querneigung der Rinne kann ein Grund sein, dass sich die Kräfte bei der Störkörperdrehung um $\alpha = 45°$ von beiden Seiten nicht zu Null aufheben, da auf einer Seite ein etwas höherer Wasserstand herrschte.

Numerik

Weiter könnten die Differenzen auch fehlerhaften Rechnungen oder falsch angewendeten Tools geschuldet sein. Für eine bessere Anpassung, könnte zu Vergleichszwecken einmal mit einem anderen Rechentool, wie das „Two-equation (k-ε) model“, gerechnet werden, welches Turbulenzen besser darstellen kann.

Der einzig bewusste Fehler im Modell (Wände haben die gleiche Rauheit wie der Boden) scheint bei dem generell geringen Einfluss der Rauheit auf die Fließhöhen und Geschwindigkeiten als Grund für die zu niedrigen Kräfte irrelevant zu sein.

Eine weitere Möglichkeit für die Berechnung der herrschenden Kräfte, wäre die komplette Aufsummierung und Integration von Hand, auf die gleiche Weise wie in der Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Dieses wäre jedoch für den um 45° gedrehten Körper ungleich komplizierter und aufgrund der starken Turbulenzen hinter dem Störkörper nur mit neuen/längeren Rechnungen und längeren Auswertungszeiträumen zielführend.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Veranstaltung erfolgreich abgeschlossen wurde, es aber auch verbesserungsfähige Punkte gibt. Um eine bessere Auswertung des physikalischen Modells zu gewährleisten, sollte die Einheit im Labor verlängert werden bzw. weitere Einheiten durchgeführt werden. So können mehrere Versuchsläufe durchgeführt werden, die zu belastbaren Ergebnissen führen. Gegebenenfalls lassen sich auch einführende Vorversuche durchführen, um die Einflüsse der einzelnen Messgrößen abschätzen zu können. Auf den physikalischen Ergebnissen aufbauend ist dann eine detailliertere Anpassung und Auswertung des numerischen Modells möglich.

Um im nächsten Semester eine höhere Teilnehmerzahl zu erreichen, soll das Modul in den vorhergehenden Master-Veranstaltungen angekündigt und beworben werden. Weiterhin sollte die Ankündigung der Veranstaltung auch auf der Homepage des Bauingenieurstudienganges veröffentlich werden.

Literaturverzeichnis

Hett, Ulrika. 2012. *Physikalische und numerische Modellversuche zu Straßeneinläufen.* Wuppertal : Diplomarbeit im Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau der Bergischen Universität Wuppertal, 2012.

wwwb. 2015. Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau. *"Hybride Simulationen im Wasserbau" Vortragsfolien zu Messtechniken.* Wuppertal : Bergische Universität Wuppertal, 2015.

Hellmig, Maren. 2015. *Hybride Simulation – Übertragung eines physikalischen Modells in die Numerik.* Wuppertal: Hausarbeit zum Modul „Sonderkapitel Verkehrs- und Infrastruktursysteme“ am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal, 2015 (Unveröffentlicht).

Herbst, Sinja. 2015. *Hybride Simulation – Übertragung eines physikalischen Modells in die Numerik.* Wuppertal: Hausarbeit zum Modul „Sonderkapitel Konstruktiver Ingenieurbau“ am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal, 2015 (Unveröffentlicht).

Steinbach, Nora. 2015. *Hybride Simulation – Übertragung eines physikalischen Modells in die Numerik.* Wuppertal: Hausarbeit zum Modul „Sonderkapitel Konstruktiver Ingenieurbau“ am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal, 2015 (Unveröffentlicht).

Scharfenort, Sandra. 2015. *Hybride Simulation – Übertragung eines physikalischen Modells in die Numerik.* Wuppertal: Hausarbeit zum Modul „Sonderkapitel Verkehrs- und Infrastruktursysteme“ am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal, 2015 (Unveröffentlicht).

Anlagen

A1 Fotos während den Messungen

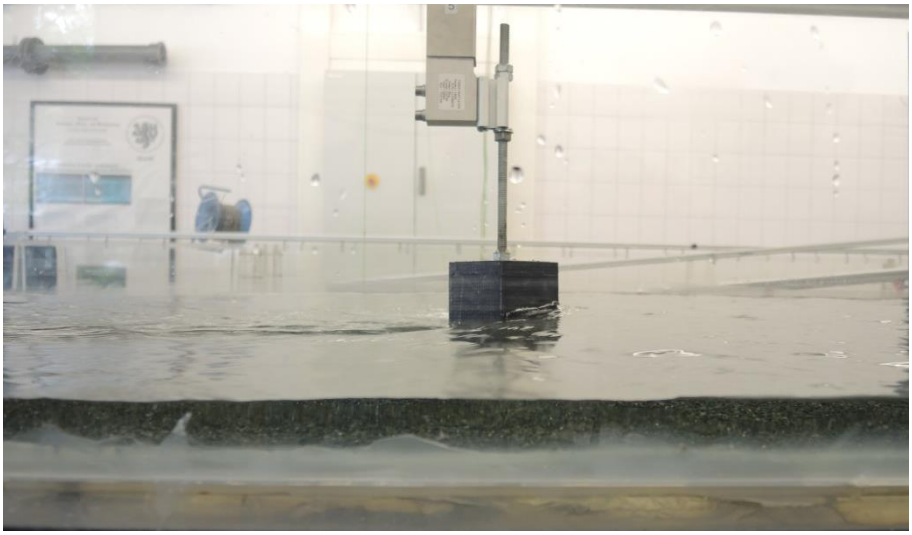

Abbildung 19 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 5 l/s

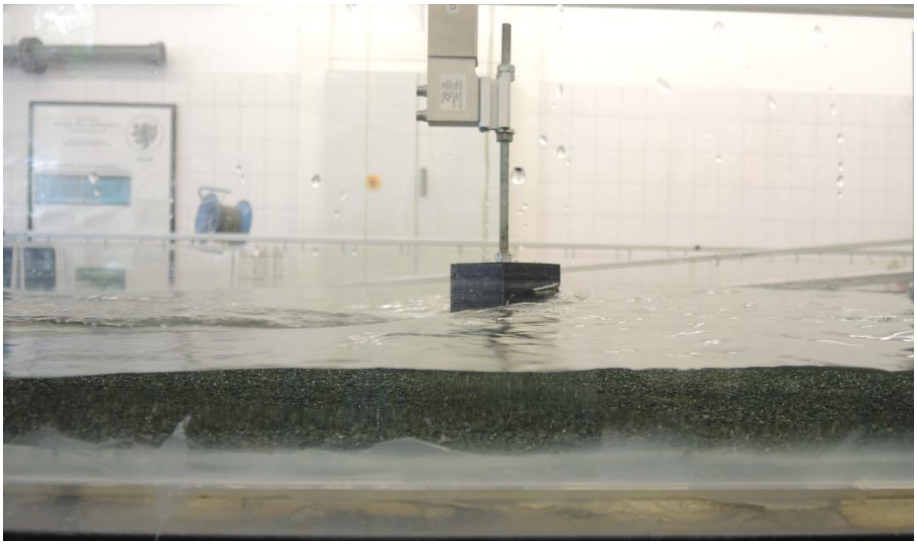

Abbildung 20 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 10 l/s

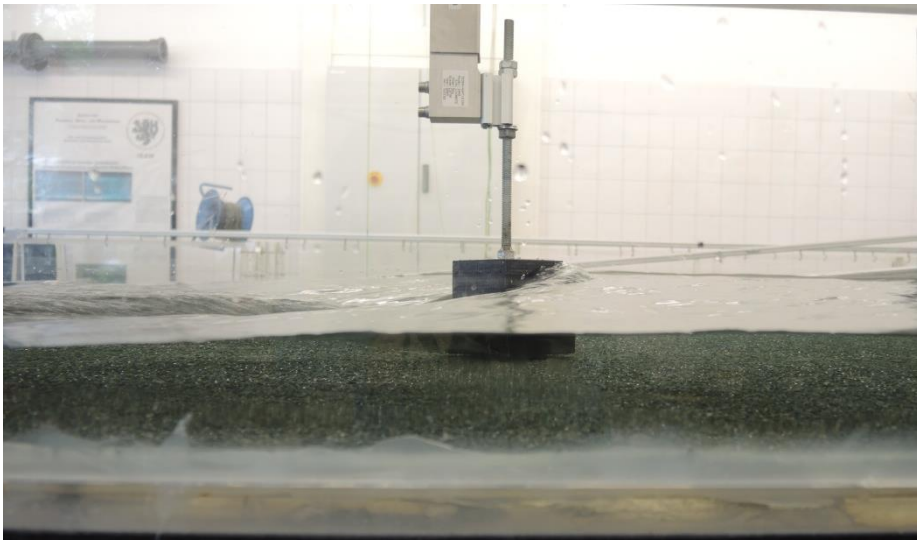

Abbildung 21 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 15 l/s

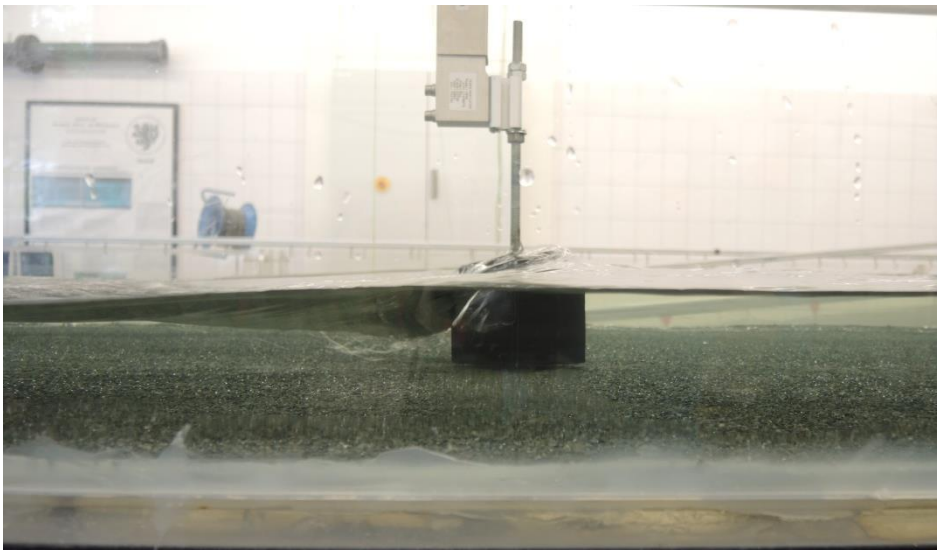

Abbildung 22 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 25 l/s

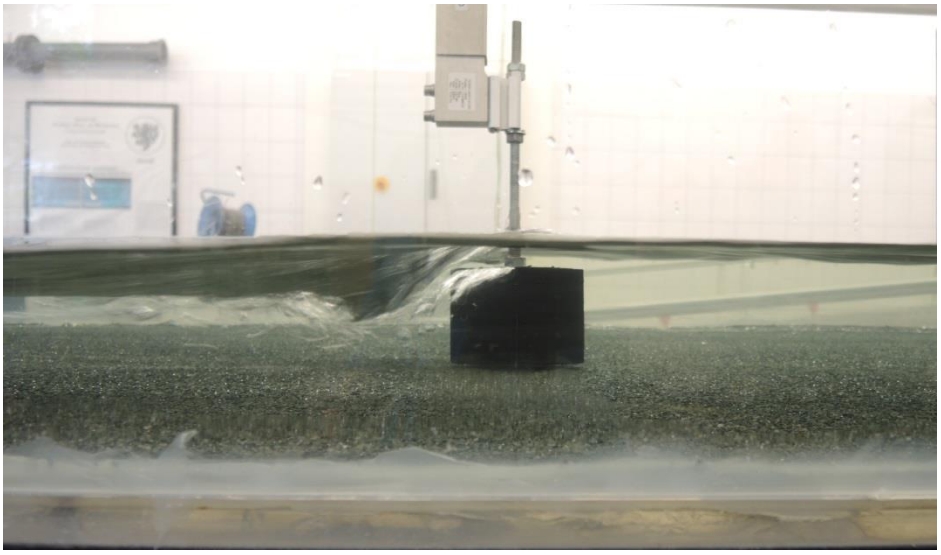

Abbildung 23 Physikalischer Modellversuch für α = 45° und Q = 40 l/s

A2 Ergebnisse der Labormessungen

Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen:

Durchfluss [l/s]	Winkel [°]	Wasserstand [cm]	Geschwindigkeit [m/s]	Durchfluss f(h,v) [l/s]	Abweichung [%]
5	0	2	0.36		
	25	1.8	0.38		
	30	1.8	0.37		
	45	1.9	0.38		
	Mittelwert	**1.875**	**0.3725**	**5.5875**	**11.75**
10	0	2.8	0.45		
	25	2.8	0.49		
	30	2.8	0.45		
	45	2.8	0.45		
	Mittelwert	**2.8**	**0.46**	**10.304**	**3.04**
15	0	3.4	0.52		
	25	3.2	0.52		
	30	3.6	0.5		
	45	3.6	0.51		
	Mittelwert	**3.45**	**0.5125**	**14.145**	**-5.7**
25	0	4.4	0.65		
	25	4.4	0.66		
	30	4.9	0.64		
	45	4.4	0.63		
	Mittelwert	**4.525**	**0.645**	**23.349**	**-6.604**
40	0	5.8	0.72		
	25	6	0.8		
	30	6	0.74		
	45	5.8	0.72		
	Mittelwert	**5.9**	**0.745**	**35.164**	**-12.09**

Messschriebe der Wägezellenmessungen

Drehung des Störkörpers um α = 0°

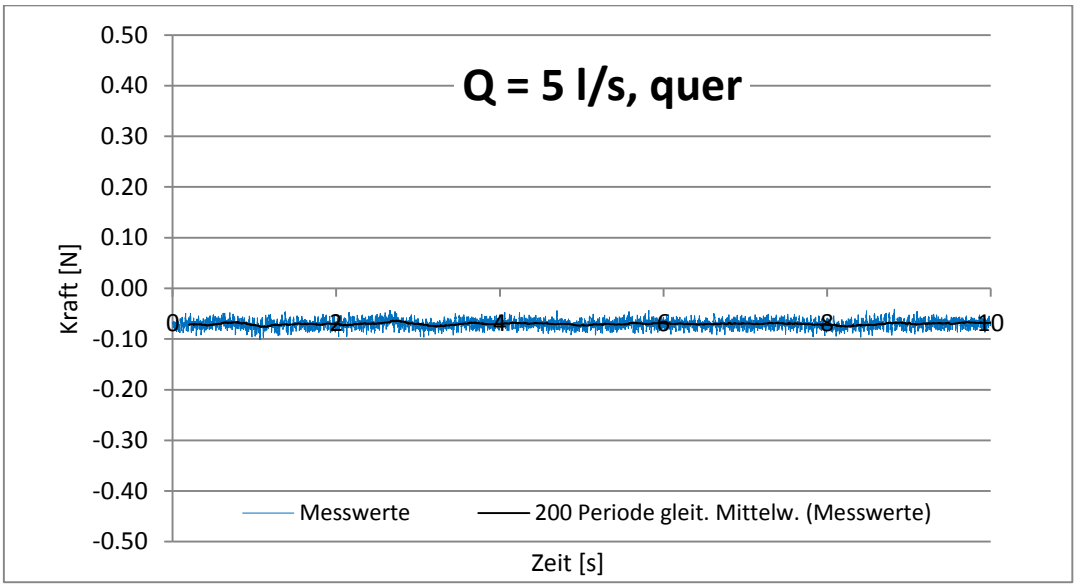

Abbildung 24 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 5 l/s

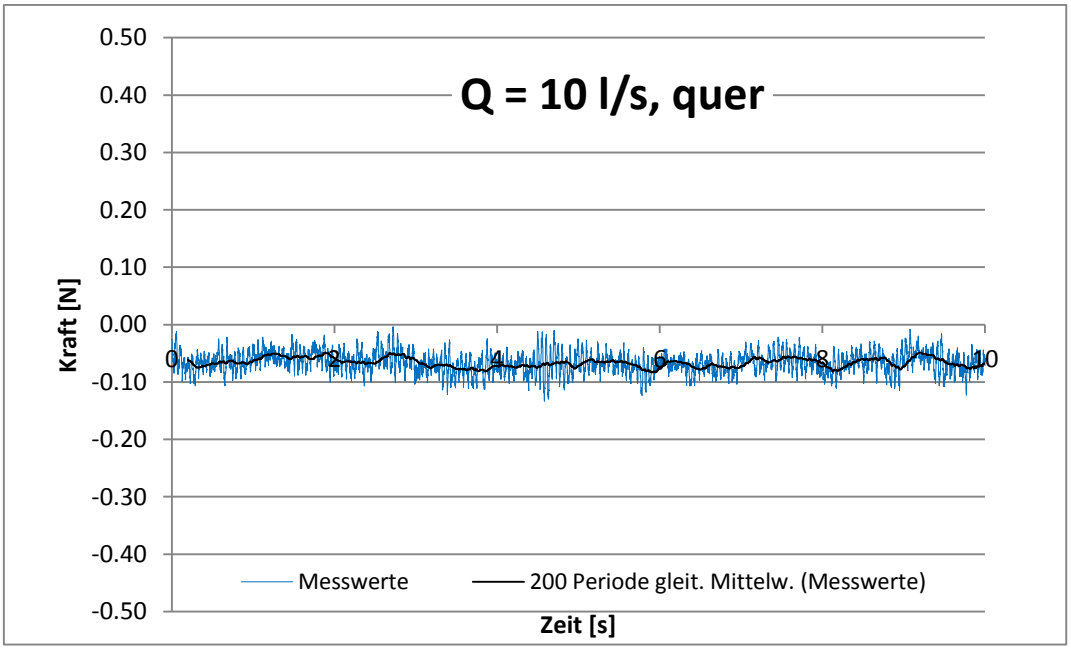

Abbildung 25 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 10 l/s

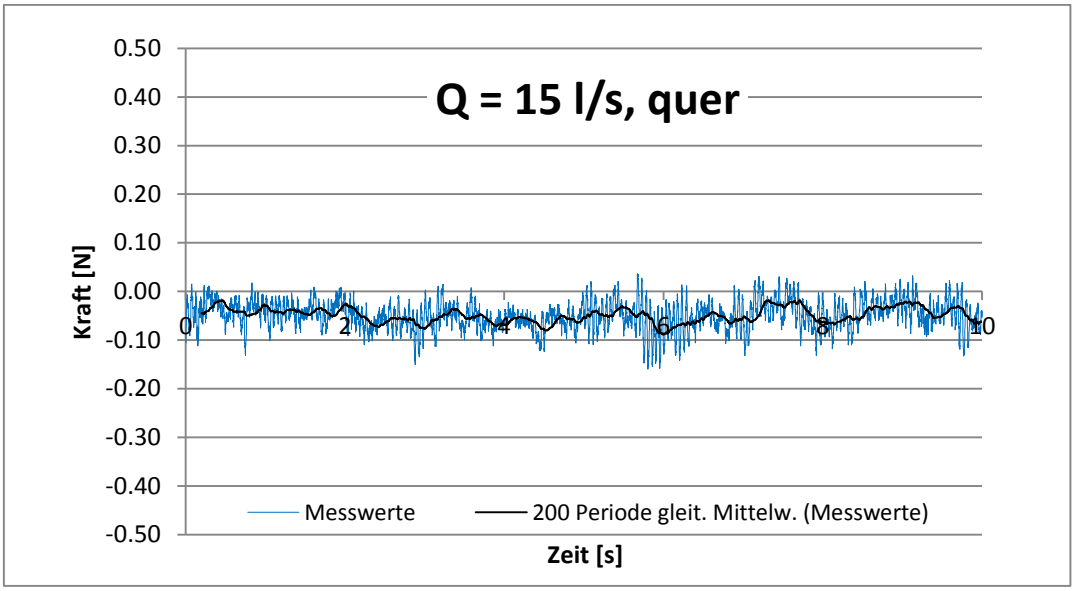

Abbildung 26 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 15 l/s

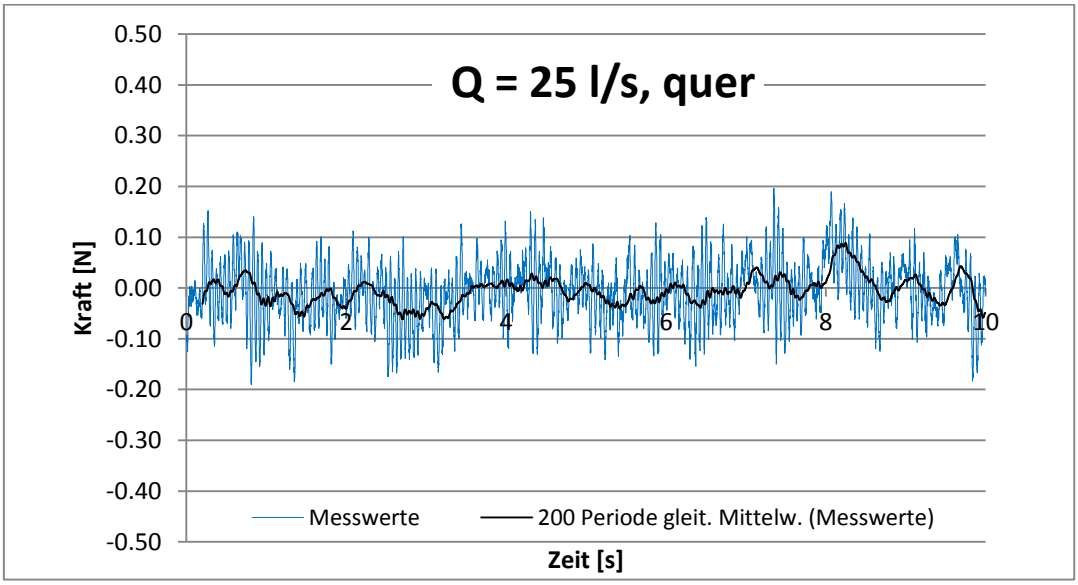

Abbildung 27 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 25 l/s

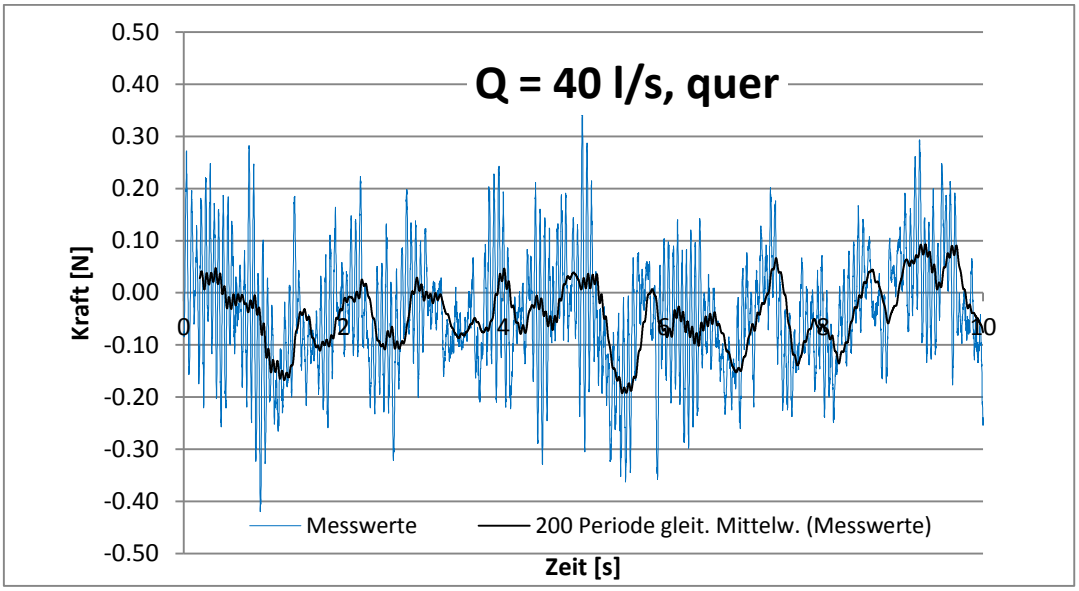

Abbildung 28 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 40 l/s

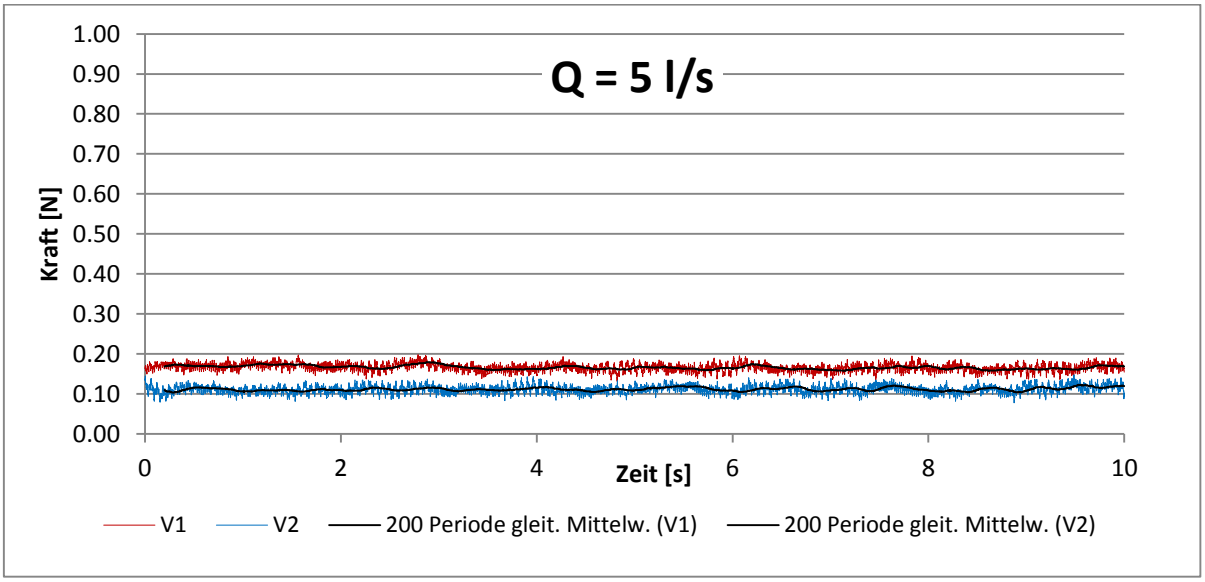

Abbildung 29 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 5 l/s

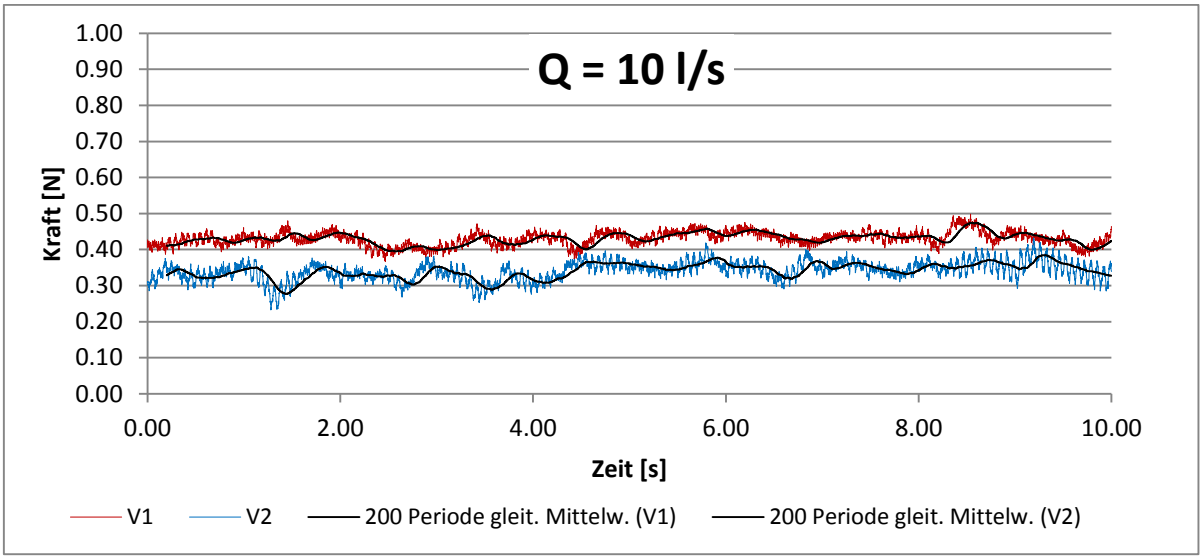

Abbildung 30 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 10 l/s

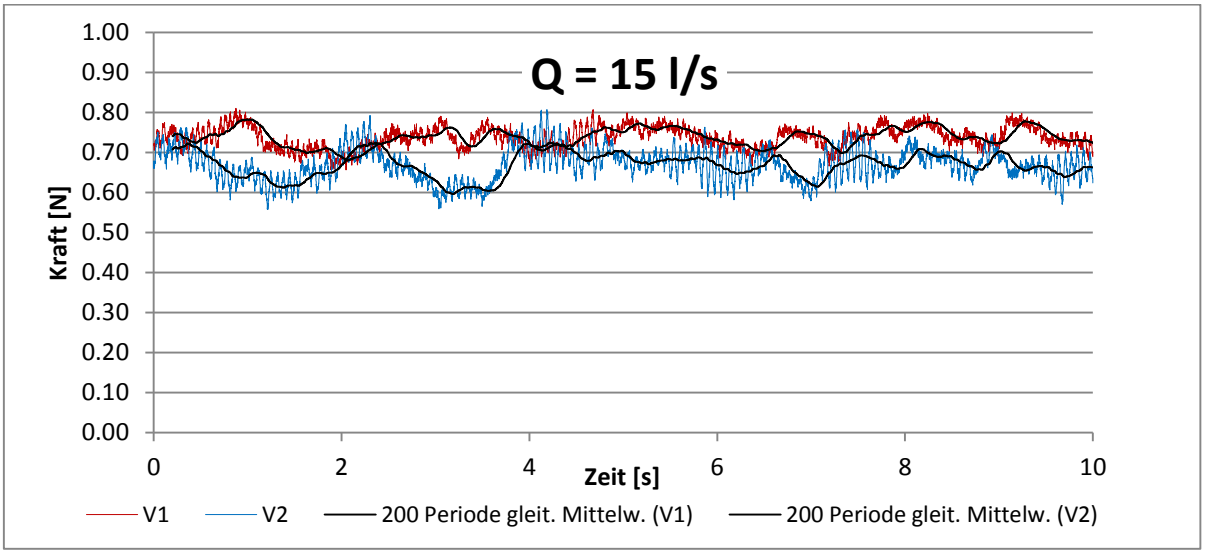

Abbildung 31 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 15 l/s

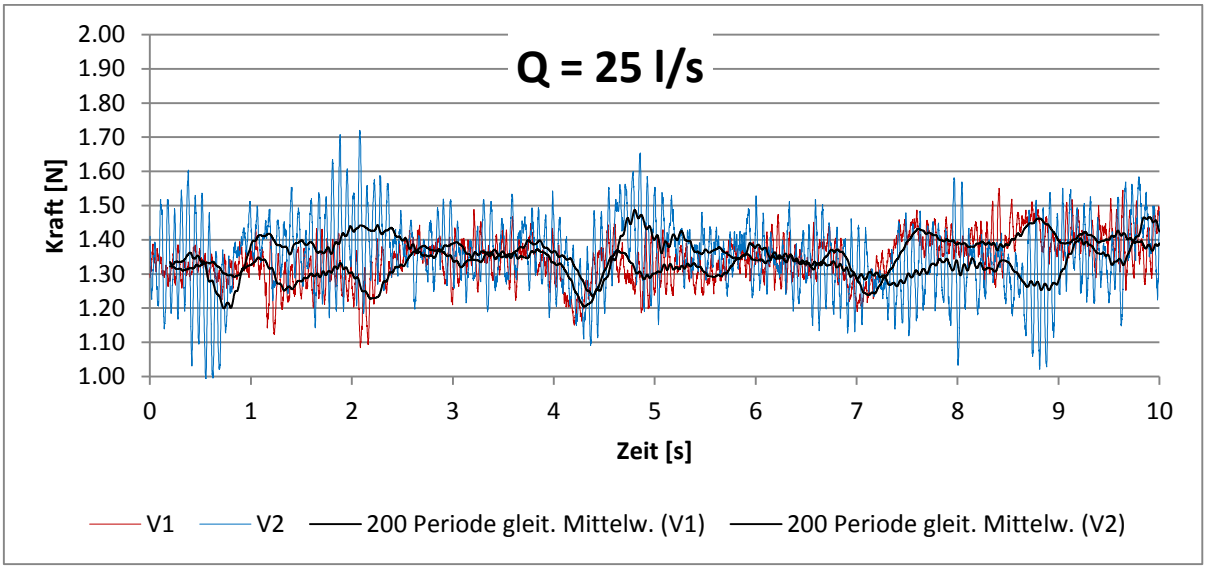

Abbildung 32 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 25 l/s

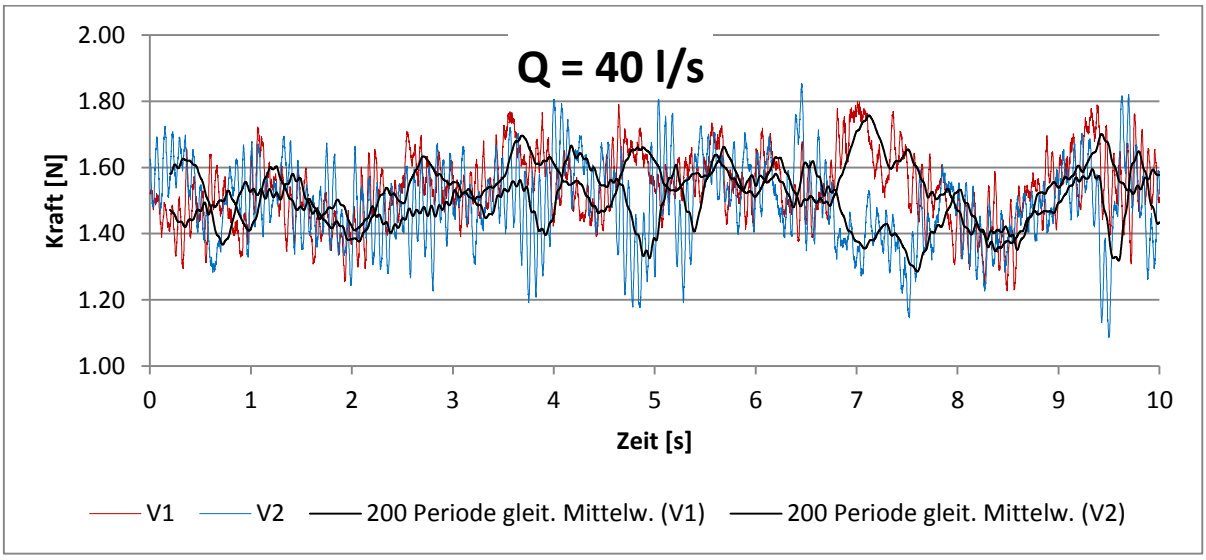

Abbildung 33 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 0°, Q = 40 l/s

Drehung des Störkörpers um α = 25°

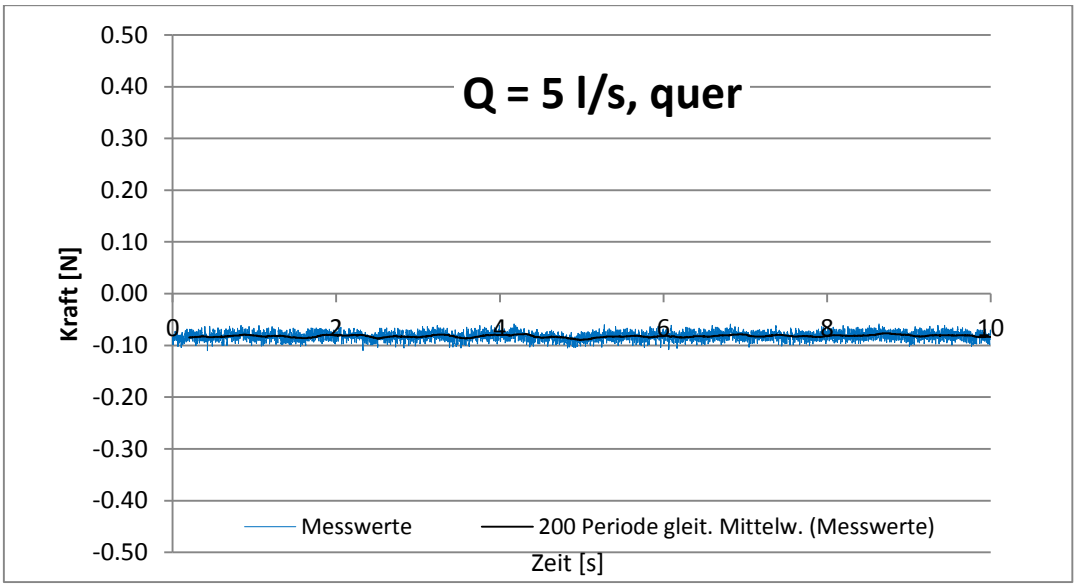

Abbildung 34 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 5 l/s

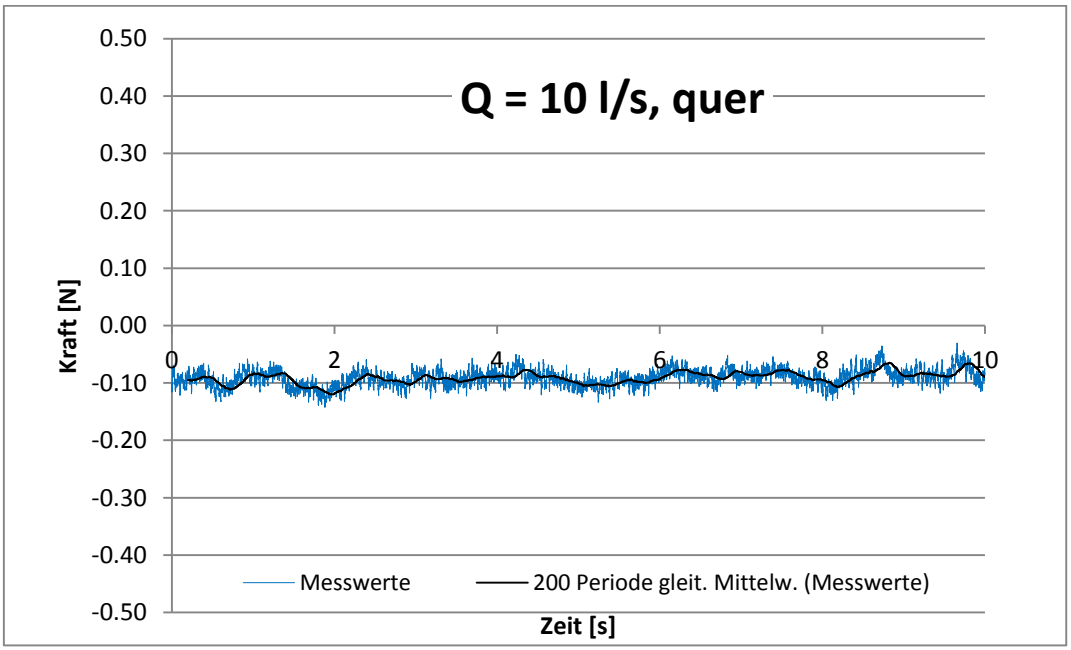

Abbildung 35 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 10 l/s

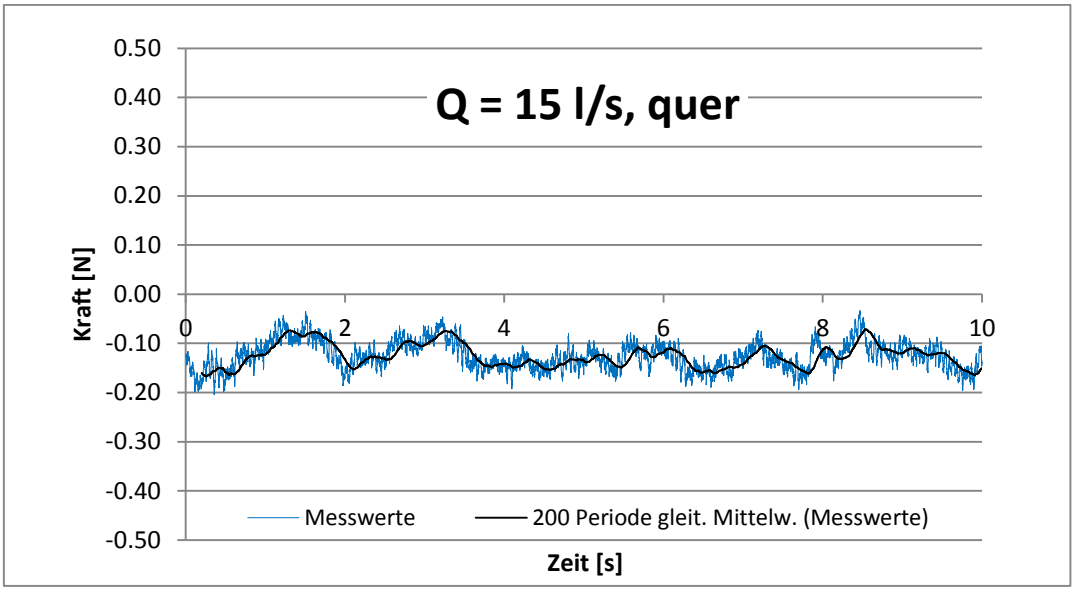

Abbildung 36 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 15 l/s

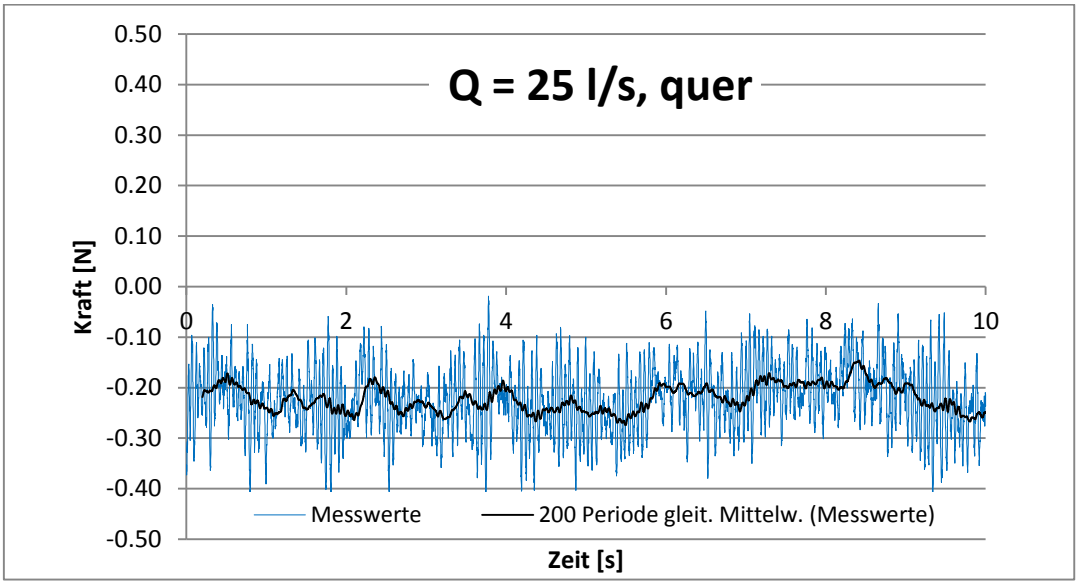

Abbildung 37 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 25 l/s

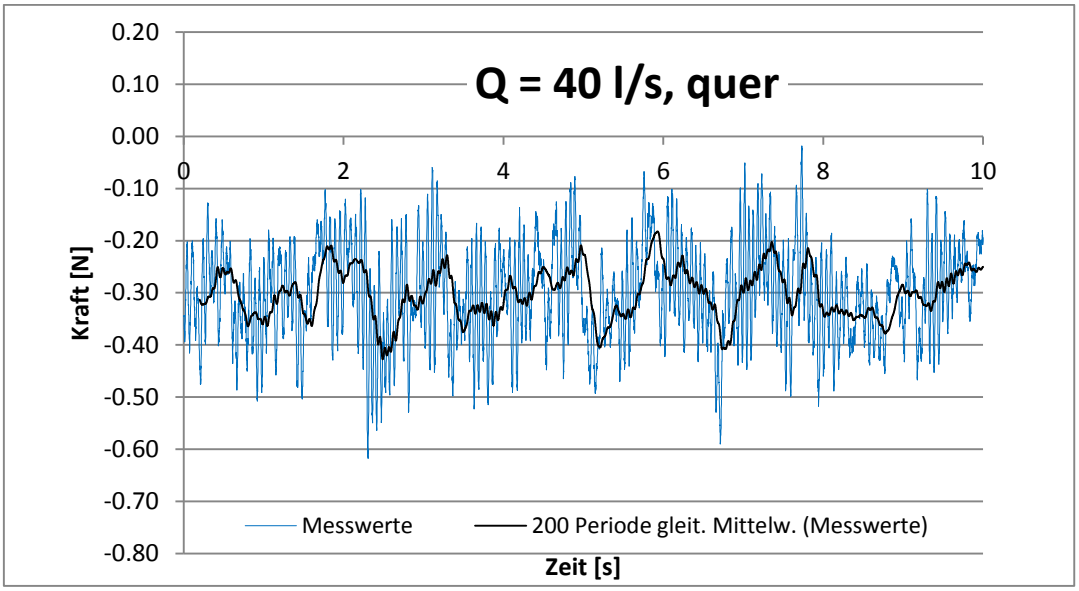

Abbildung 38 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 40 l/s

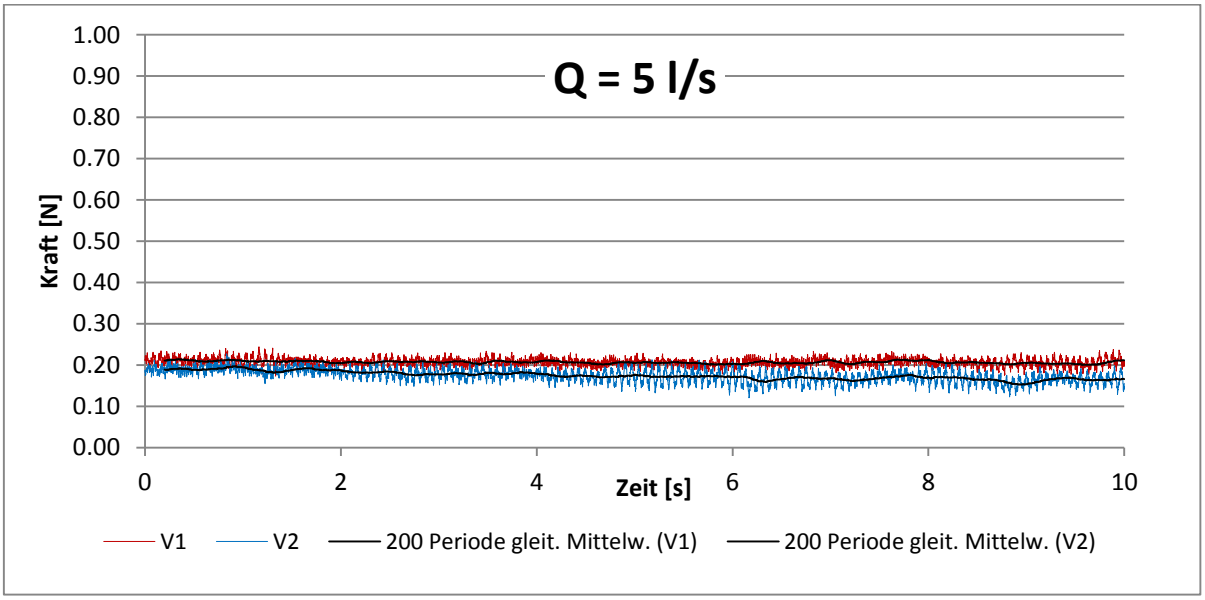

Abbildung 39 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 5 l/s

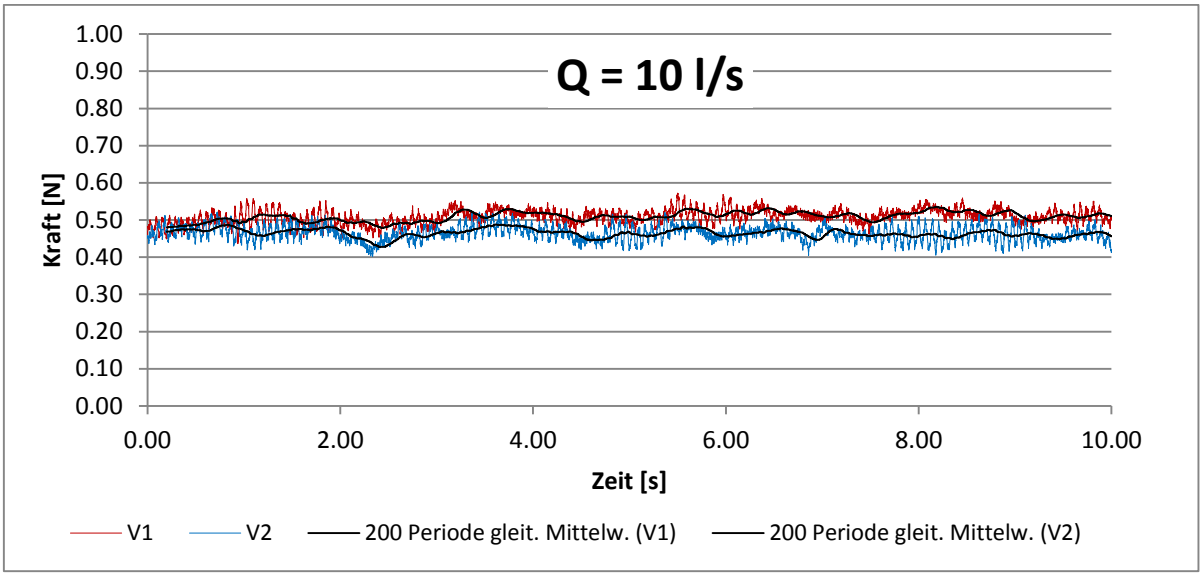

Abbildung 40 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 10 l/s

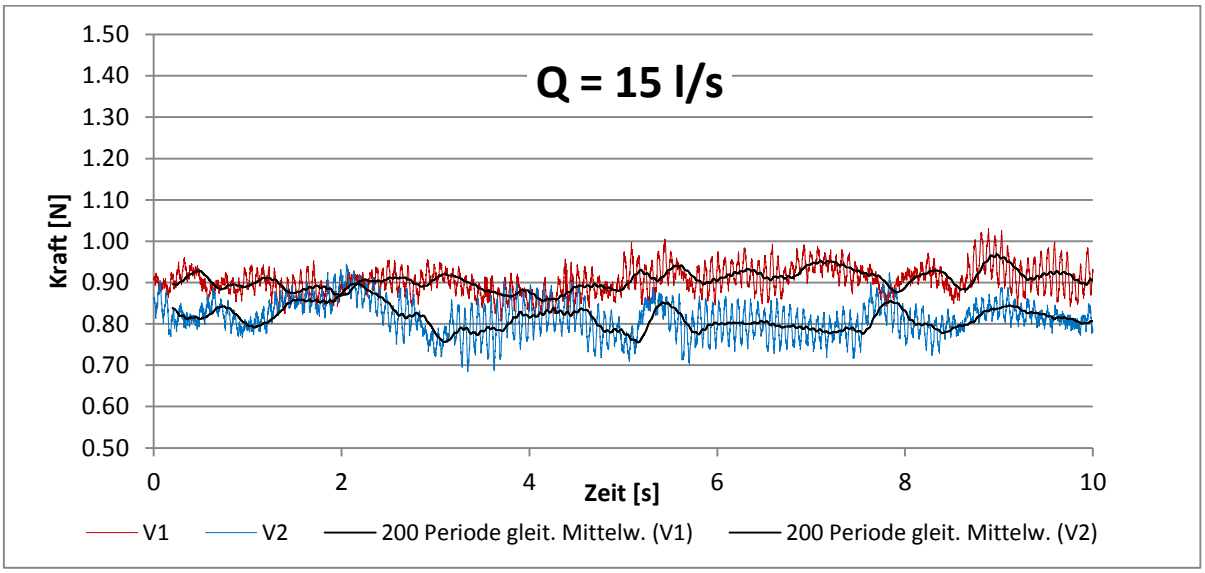

Abbildung 41 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 15 l/s

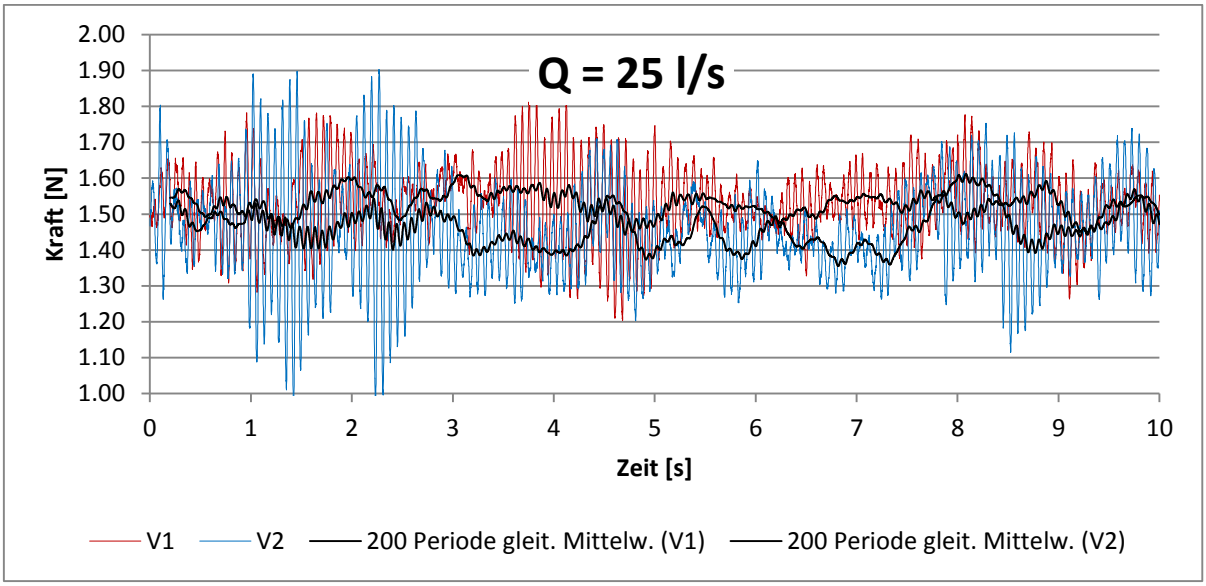

Abbildung 42 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 25 l/s

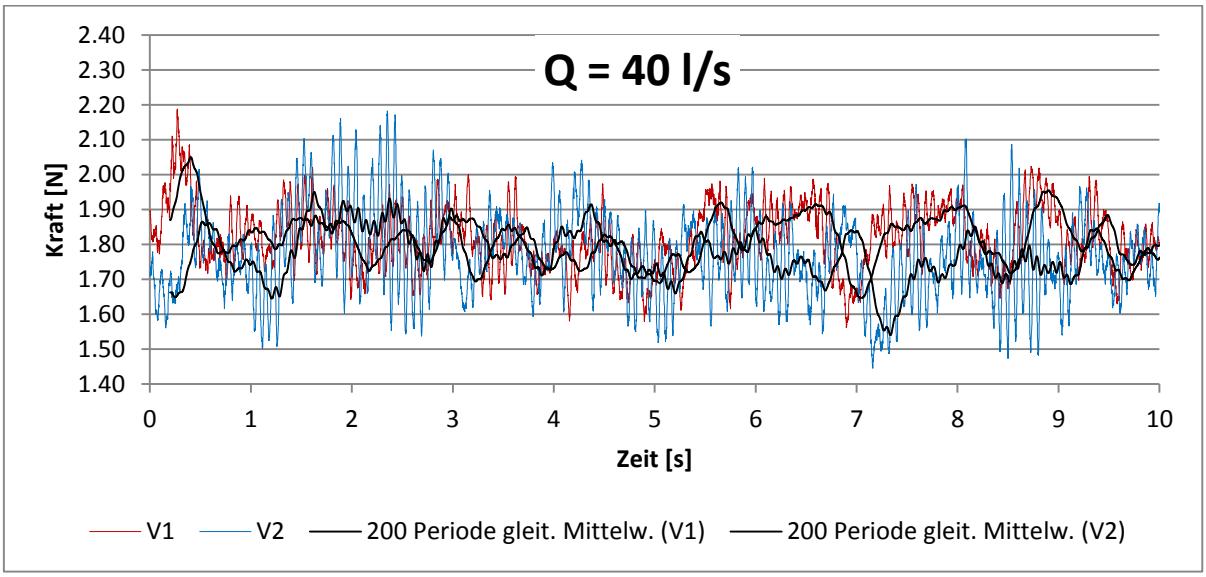

Abbildung 43 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 25°, Q = 40 l/s

Drehung des Störkörpers um α = 30°

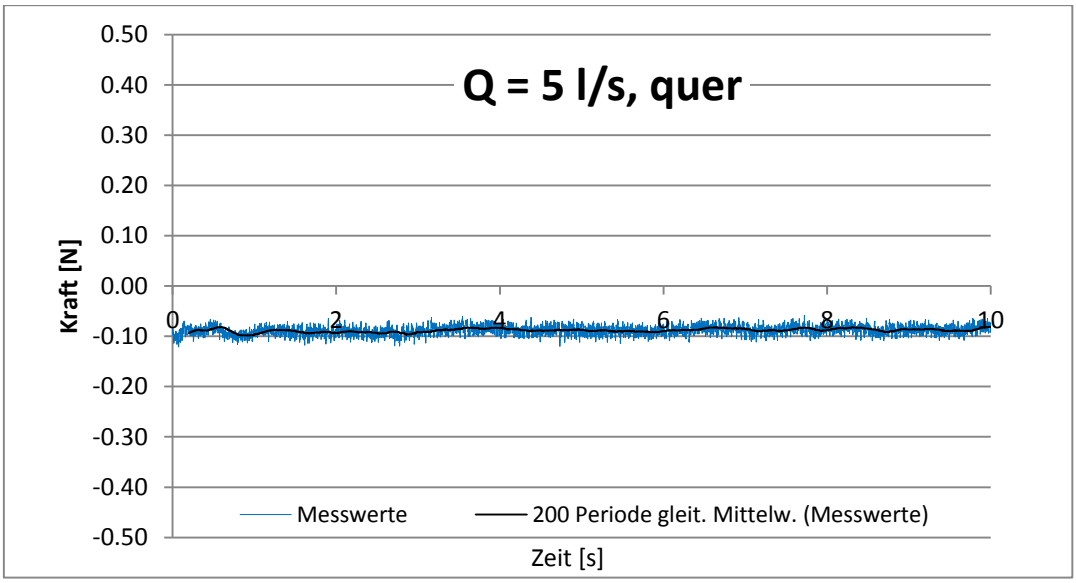

Abbildung 44 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 5 l/s

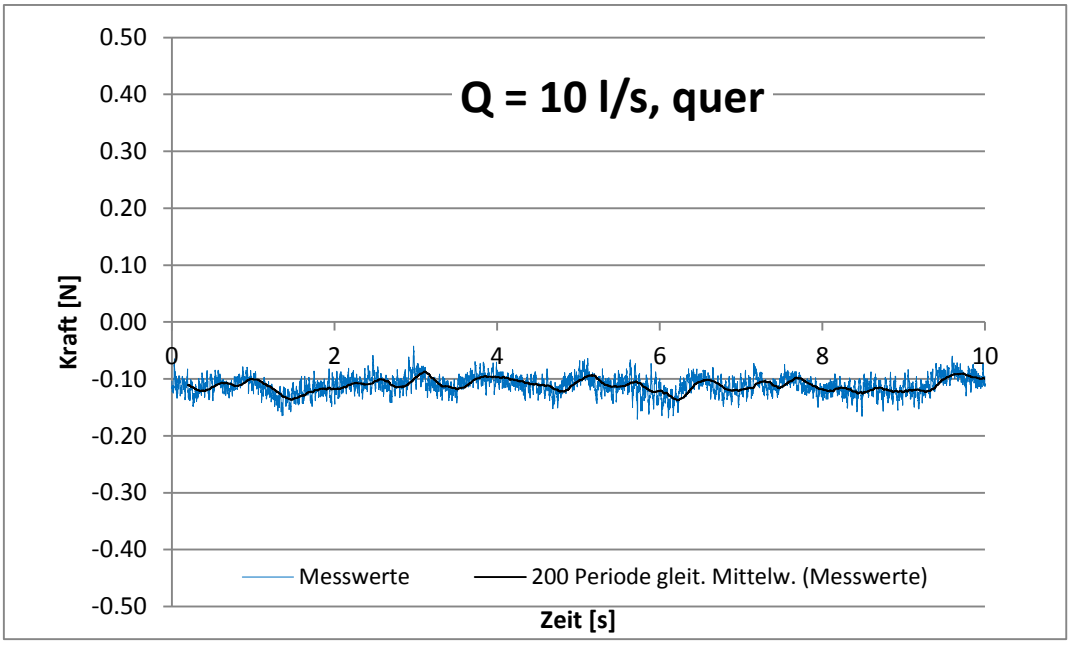

Abbildung 45 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 10 l/s

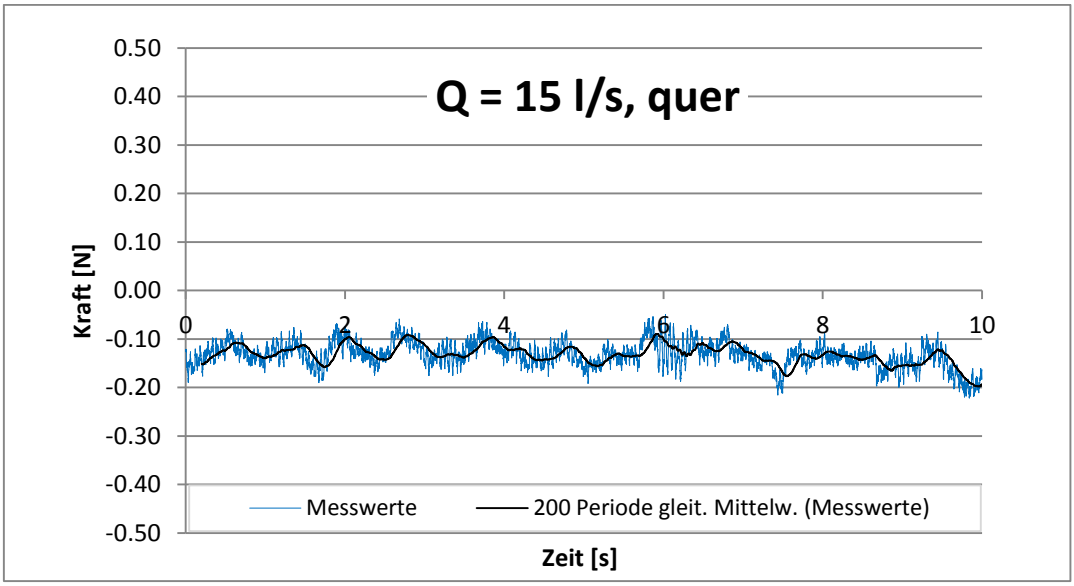

Abbildung 46 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 15 l/s

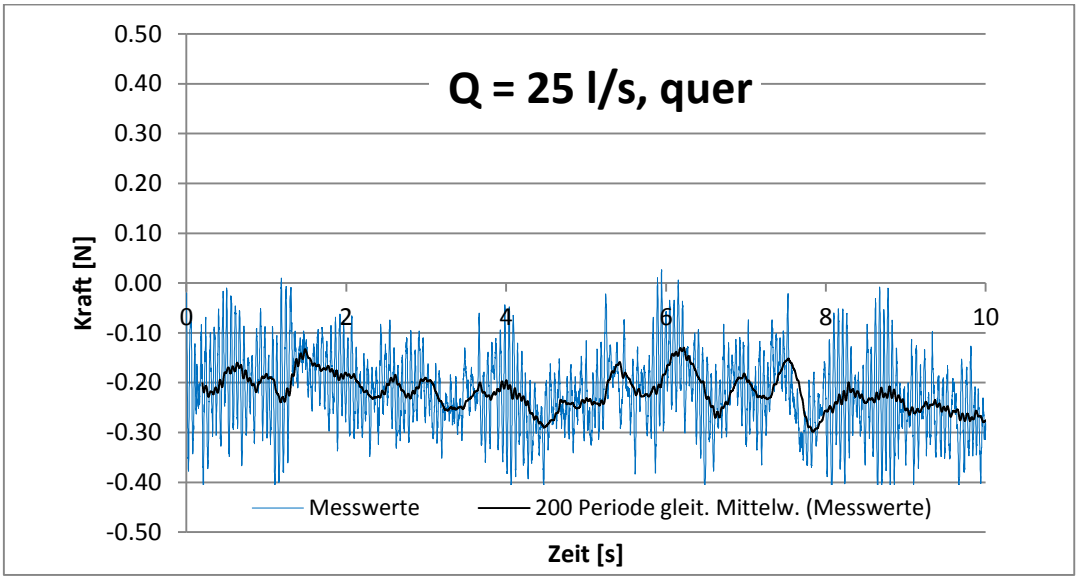

Abbildung 47 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 25 l/s

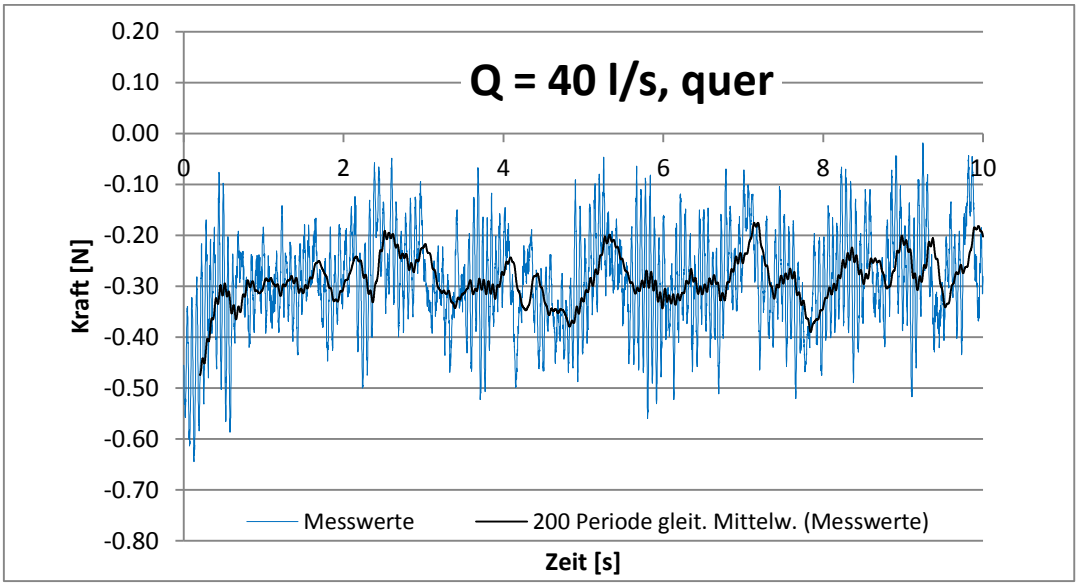

Abbildung 48 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 40 l/s

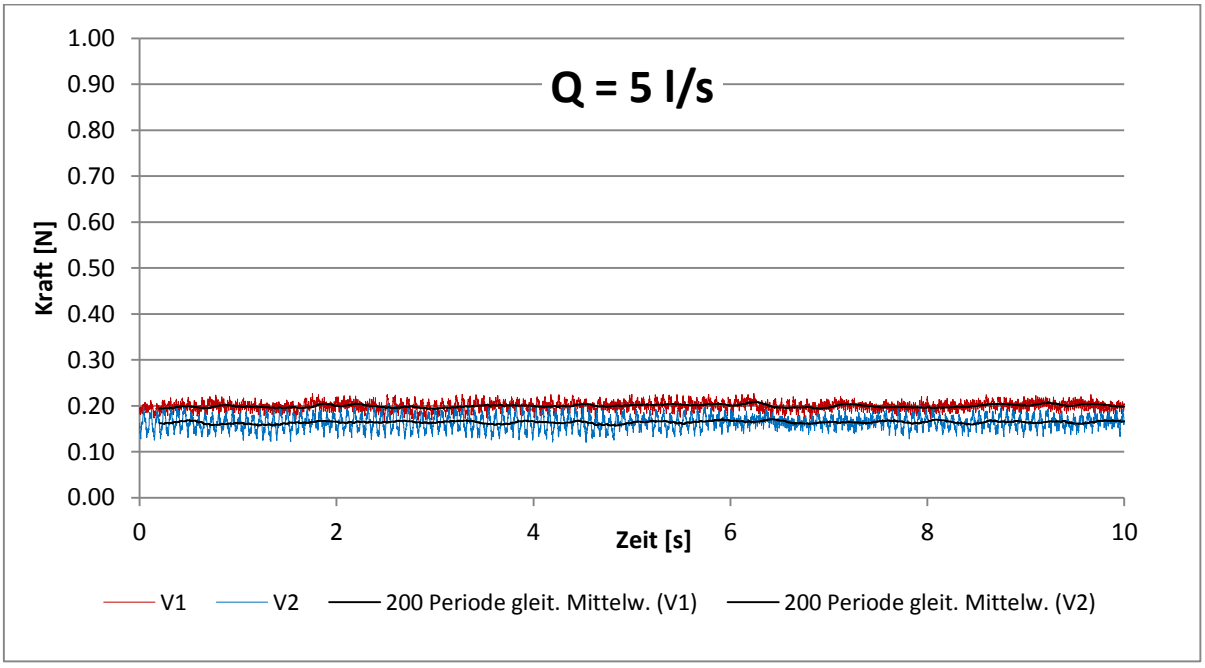

Abbildung 49 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 5 l/s

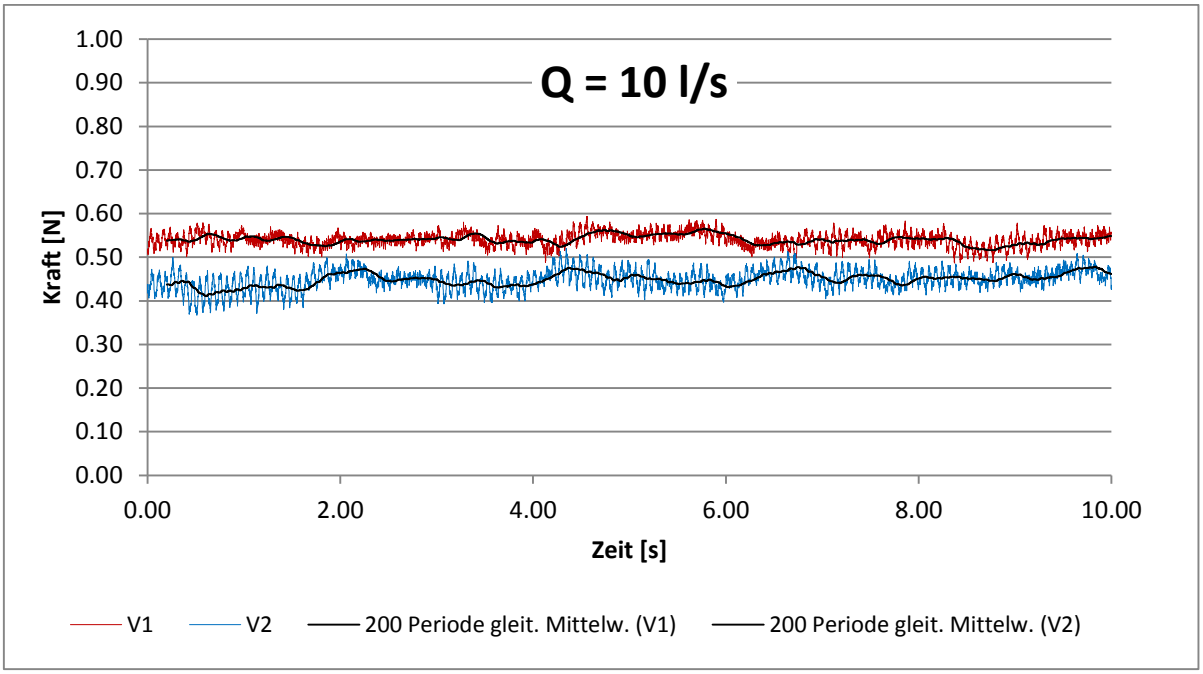

Abbildung 50 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 10 l/s

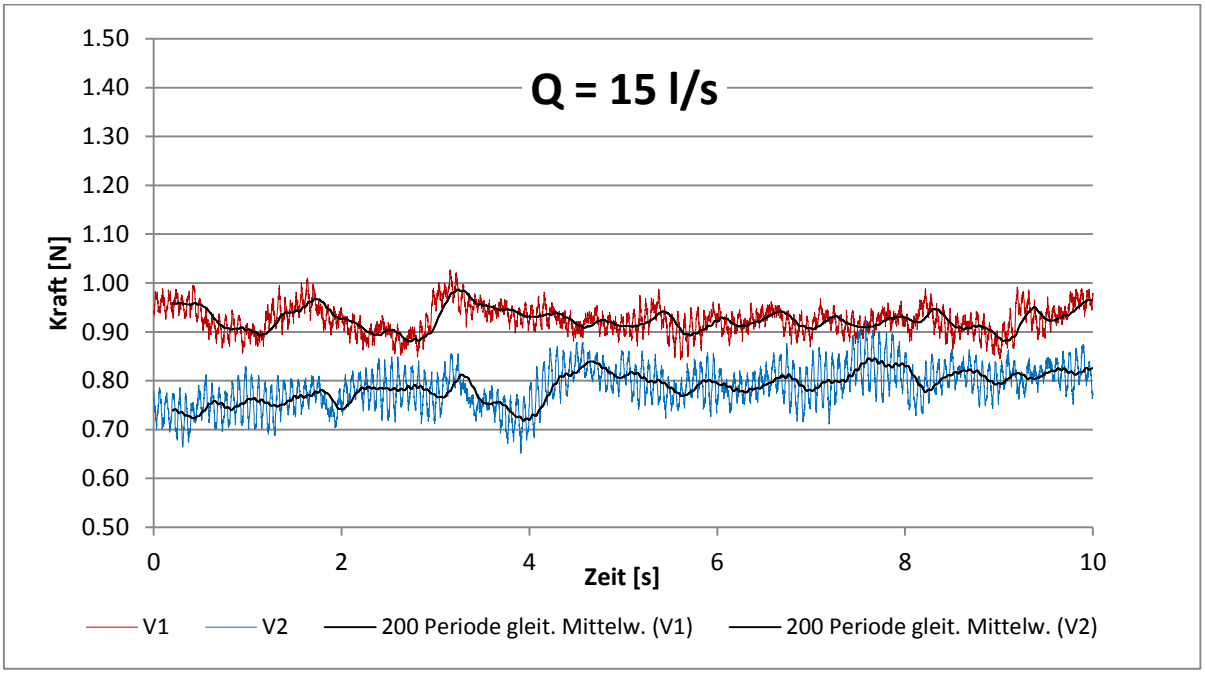

Abbildung 51 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 15 l/s

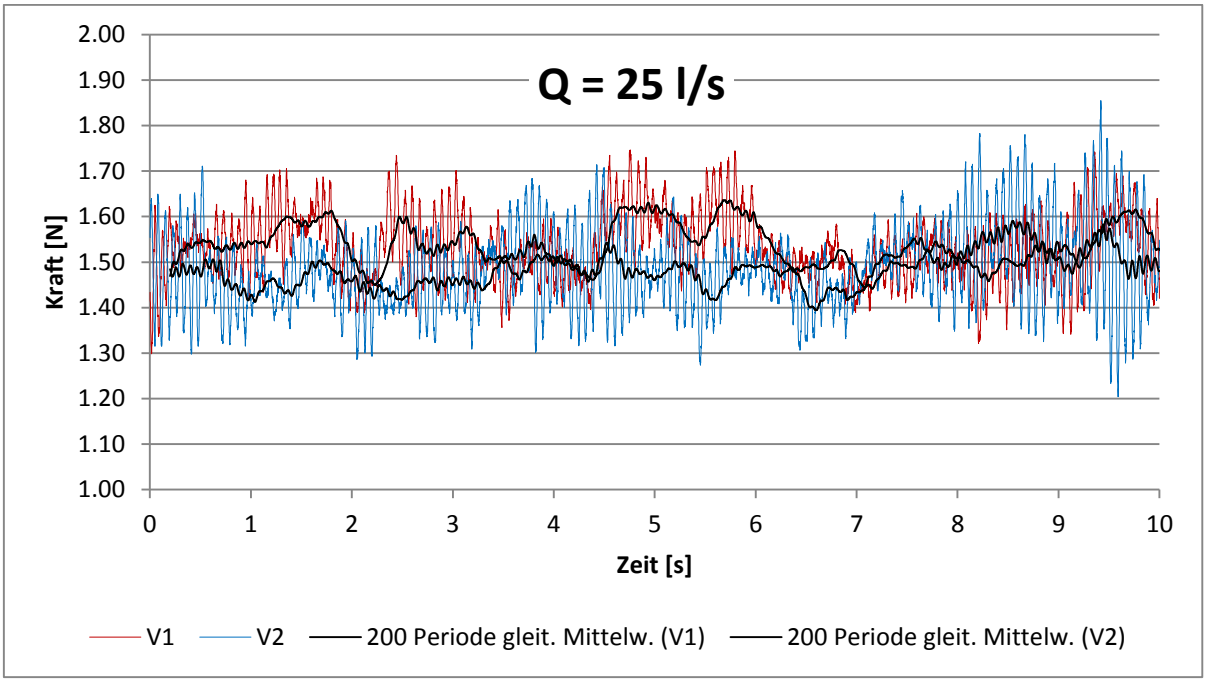

Abbildung 52 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 25 l/s

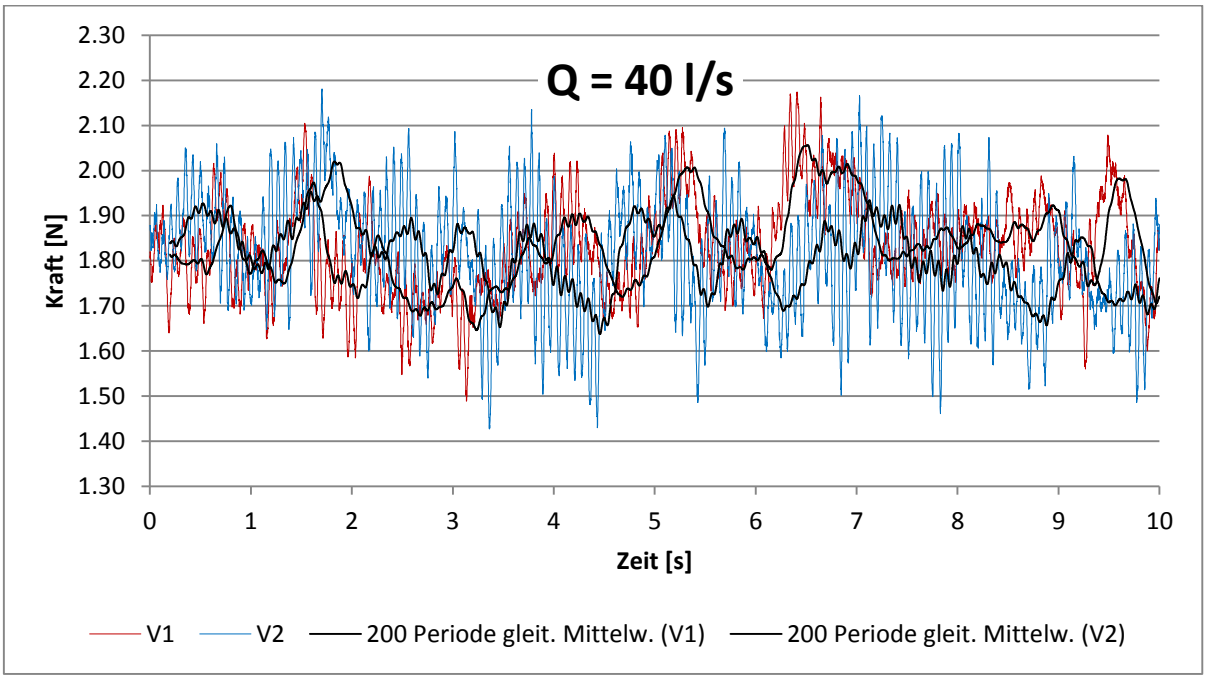

Abbildung 53 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 30°, Q = 40 l/s

Drehung des Störkörpers um α = 45°

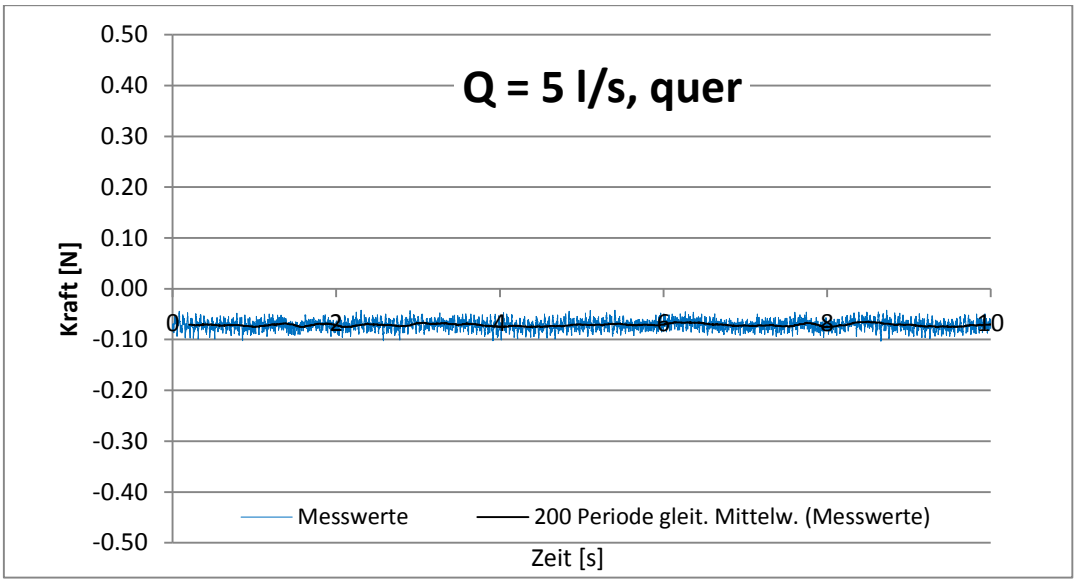

Abbildung 54 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 5 l/s

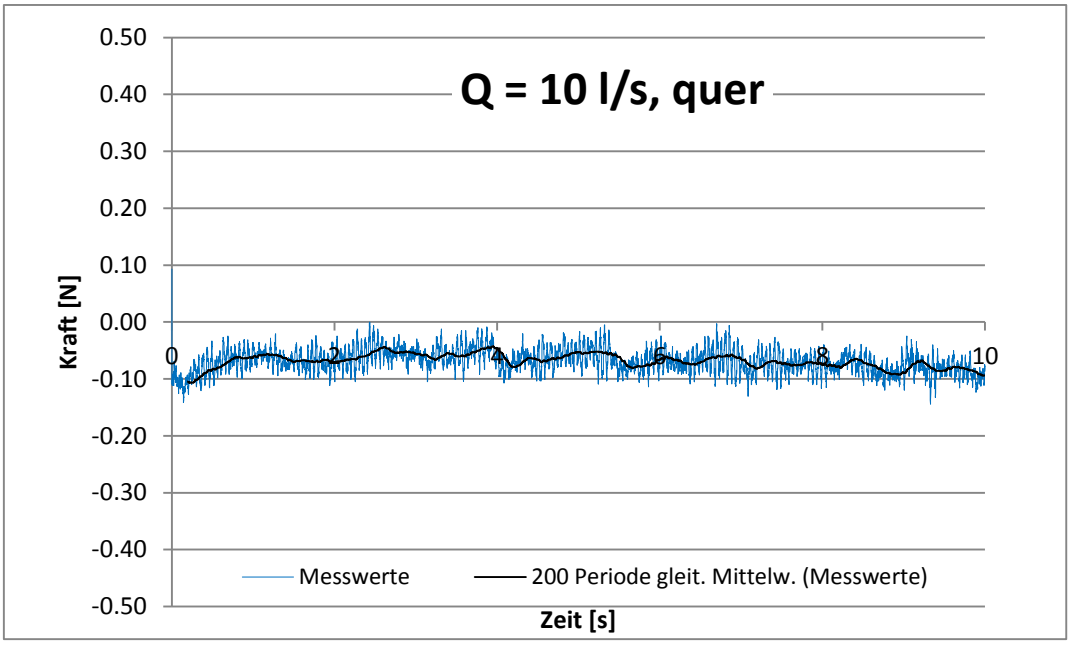

Abbildung 55 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 10 l/s

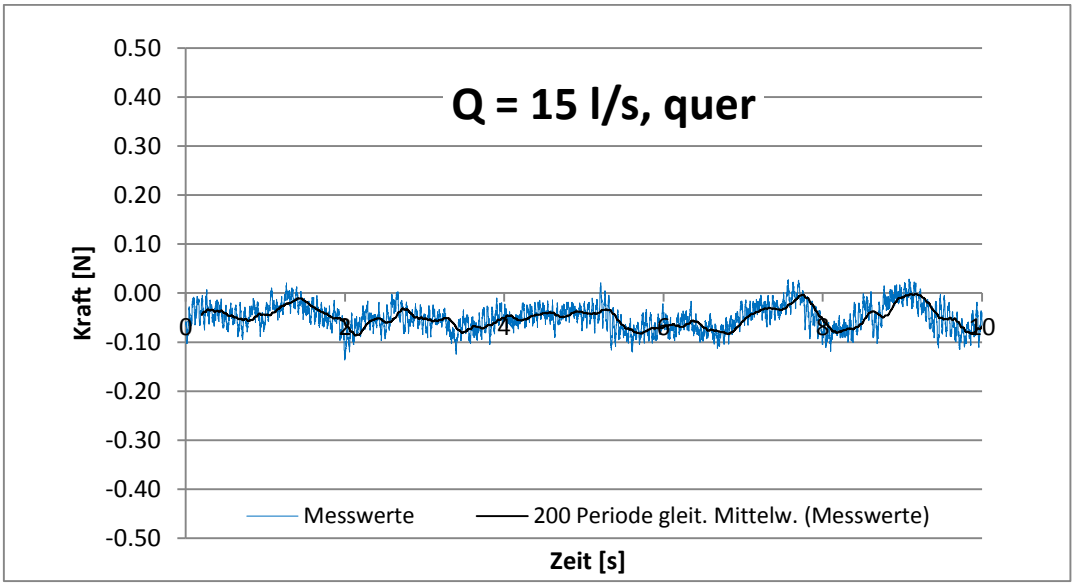

Abbildung 56 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 15 l/s

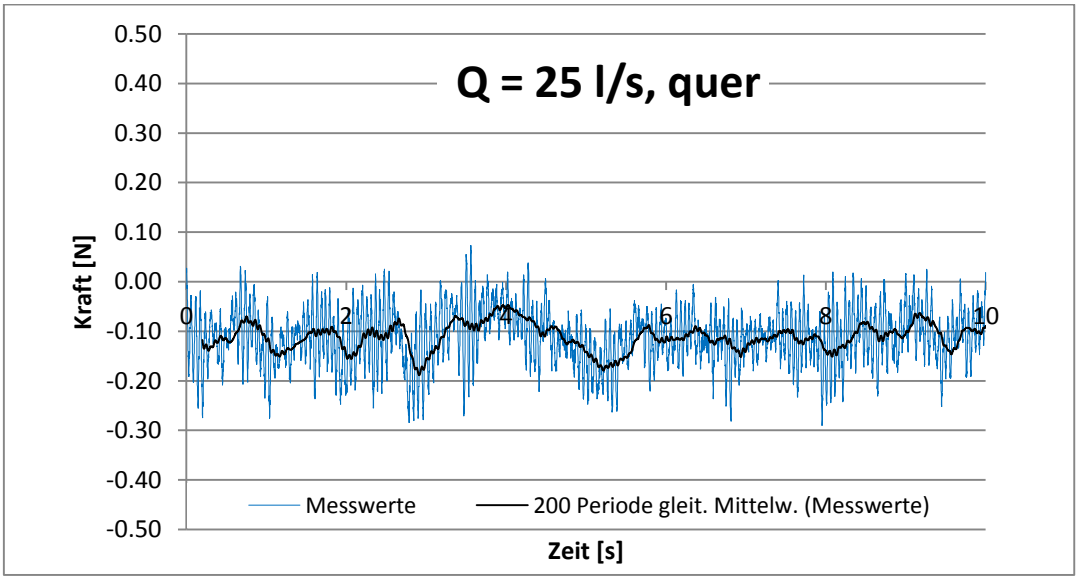

Abbildung 57 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 25 l/s

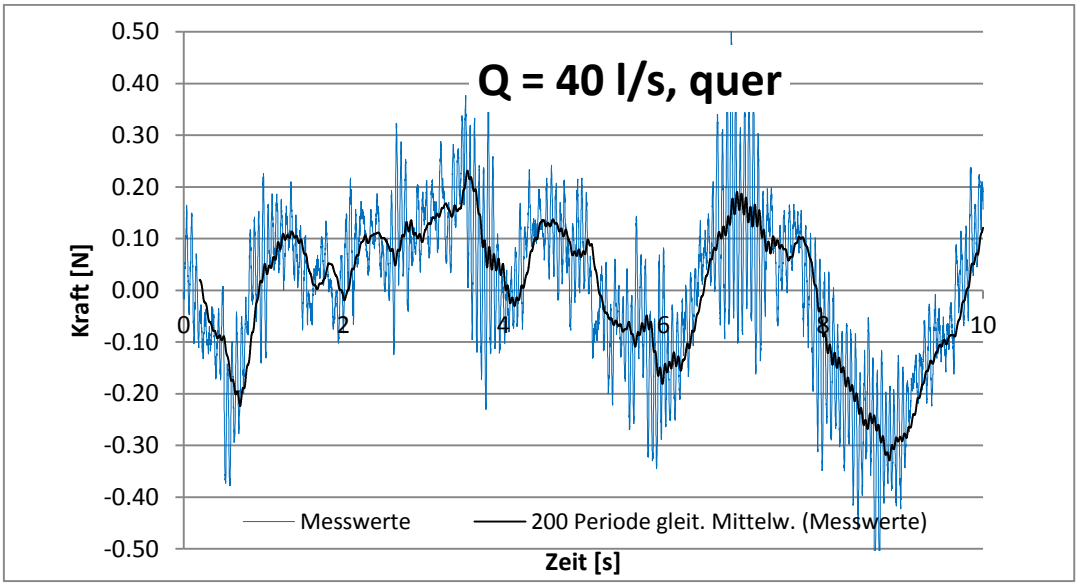

Abbildung 58 Kraftmessung quer zur Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 40 l/s

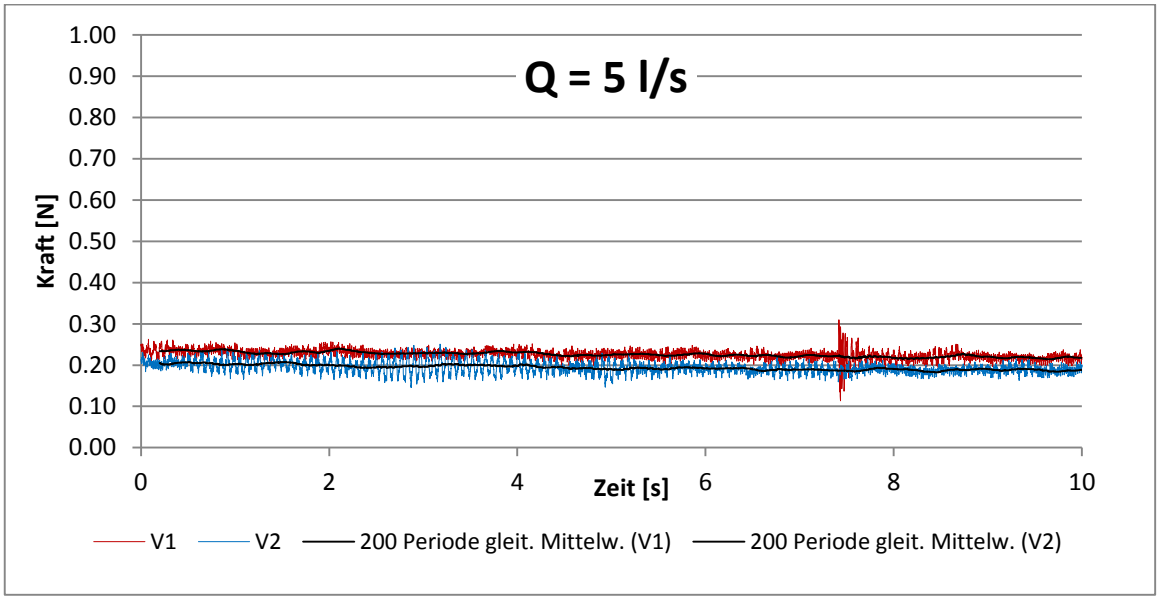

Abbildung 59 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 5 l/s

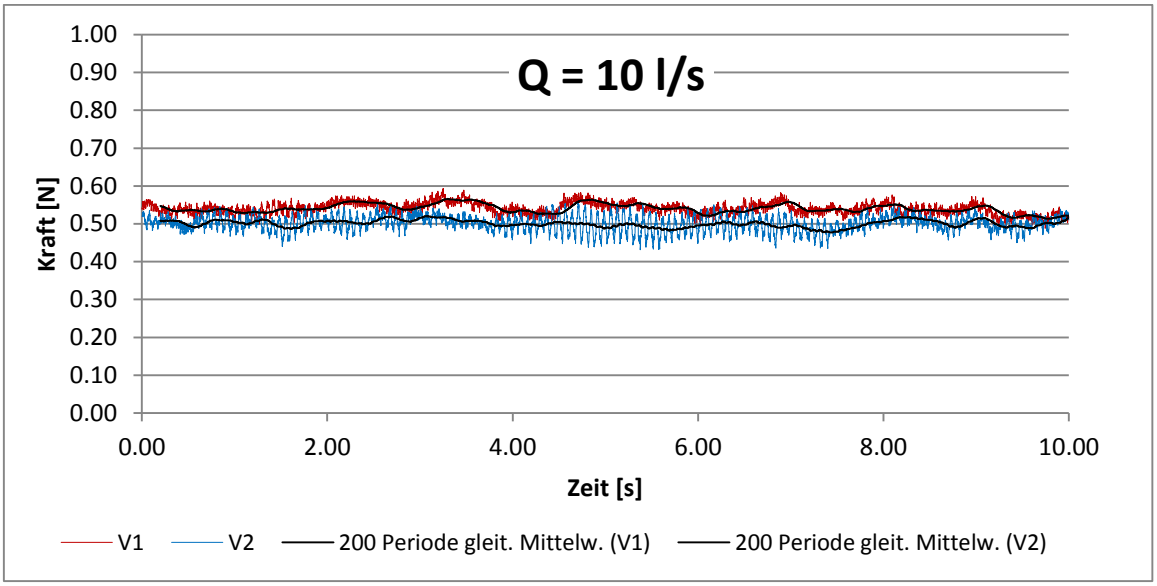

Abbildung 60 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 10 l/s

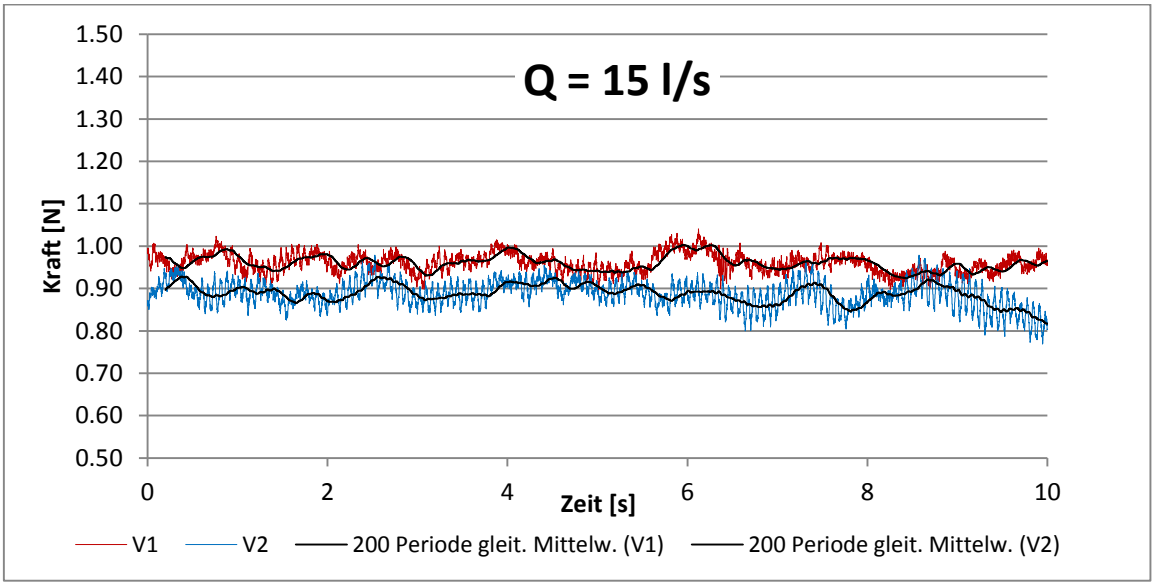

Abbildung 61 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 15 l/s

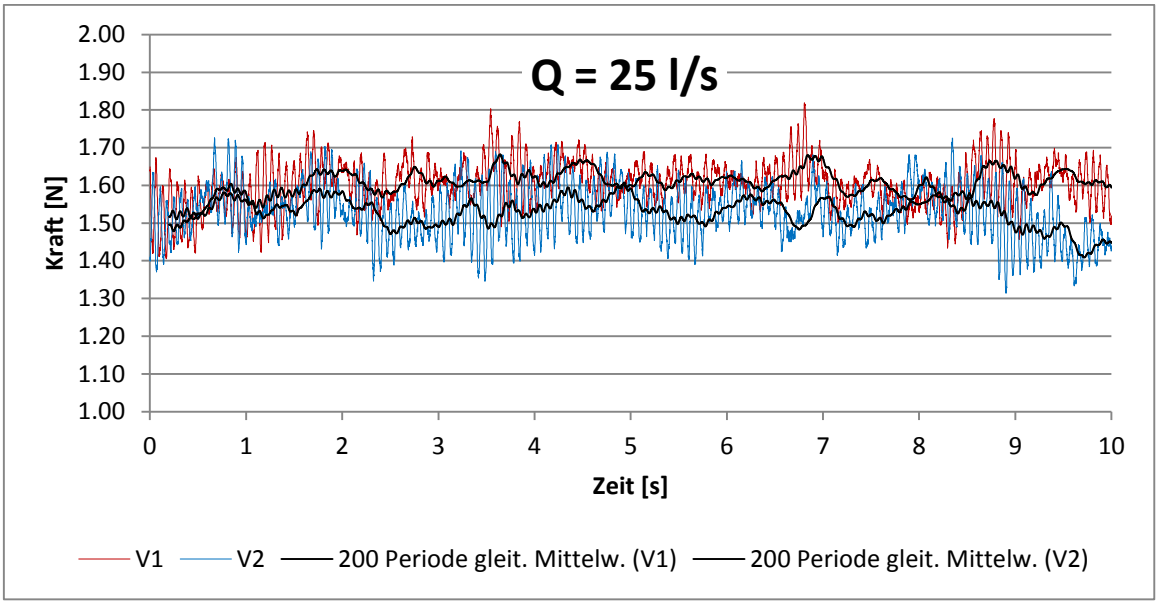

Abbildung 62 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 25 l/s

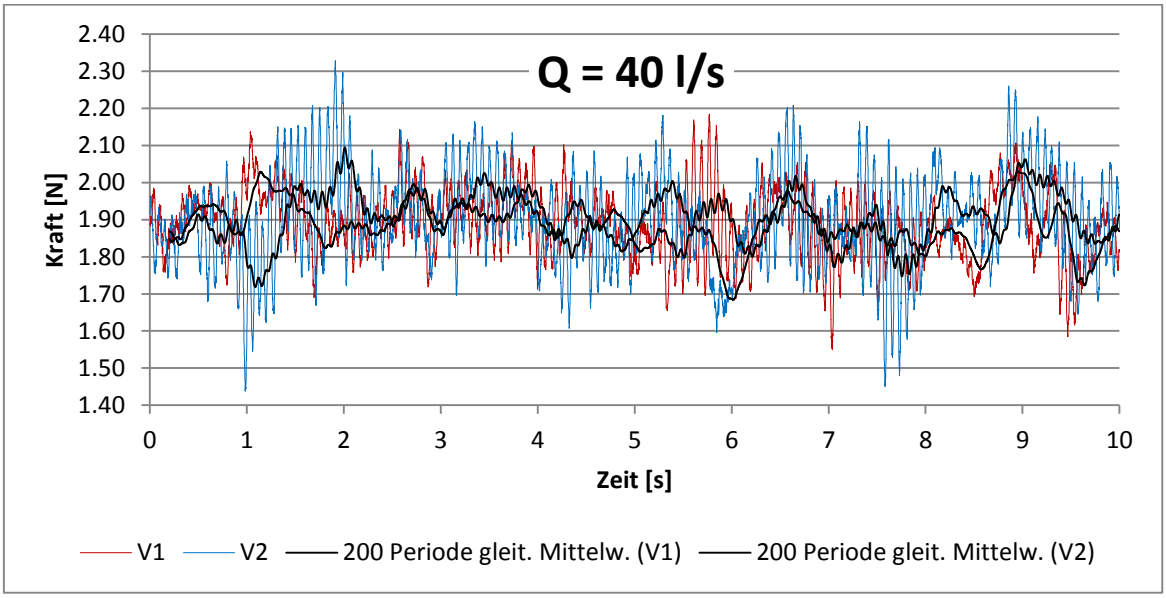

Abbildung 63 Kraftmessung in Fließrichtung für Drehung 45°, Q = 40 l/s

A3 Darstellung der gemittelten Kräfte über den Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit

Drehung des Störkörpers um α = 0°

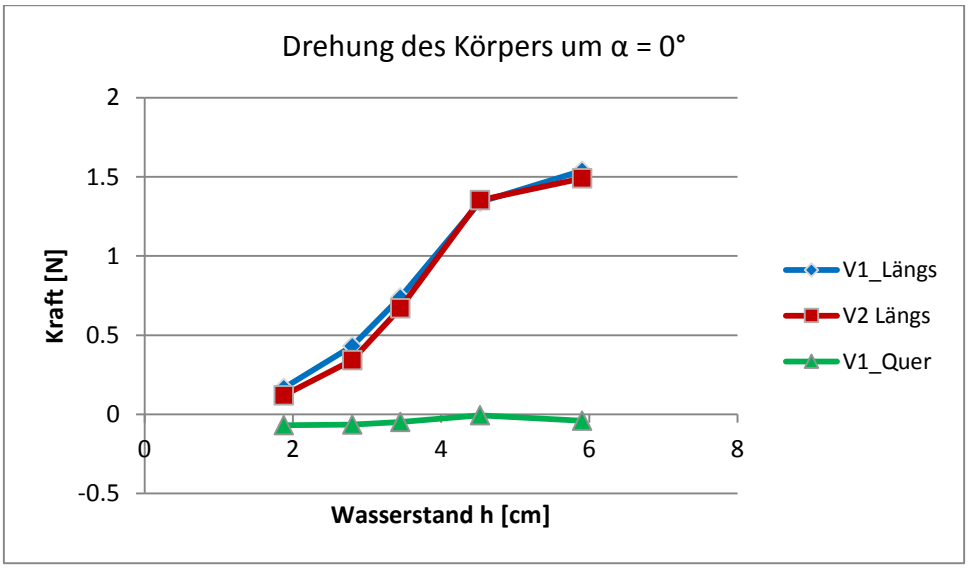

Abbildung 64 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 0°

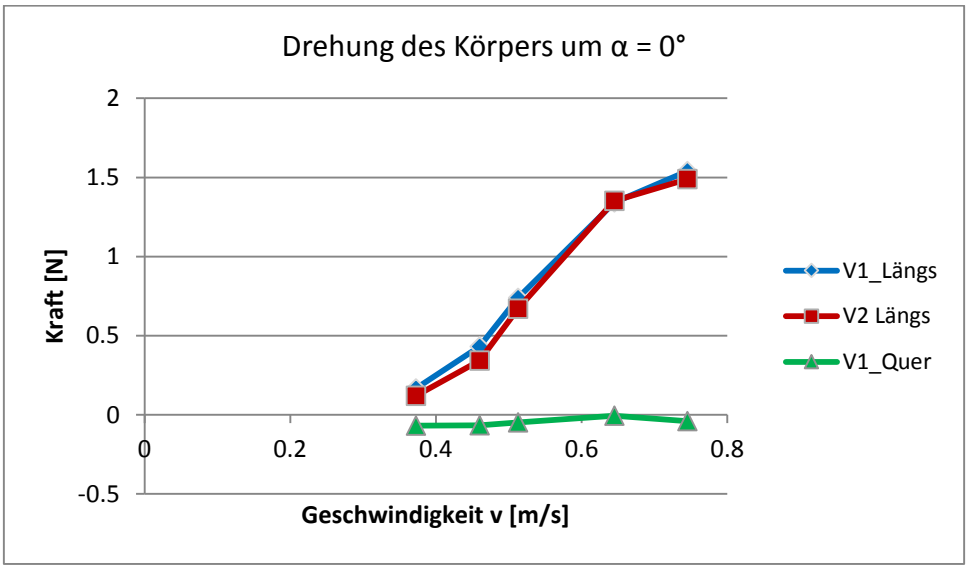

Abbildung 65 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 0°

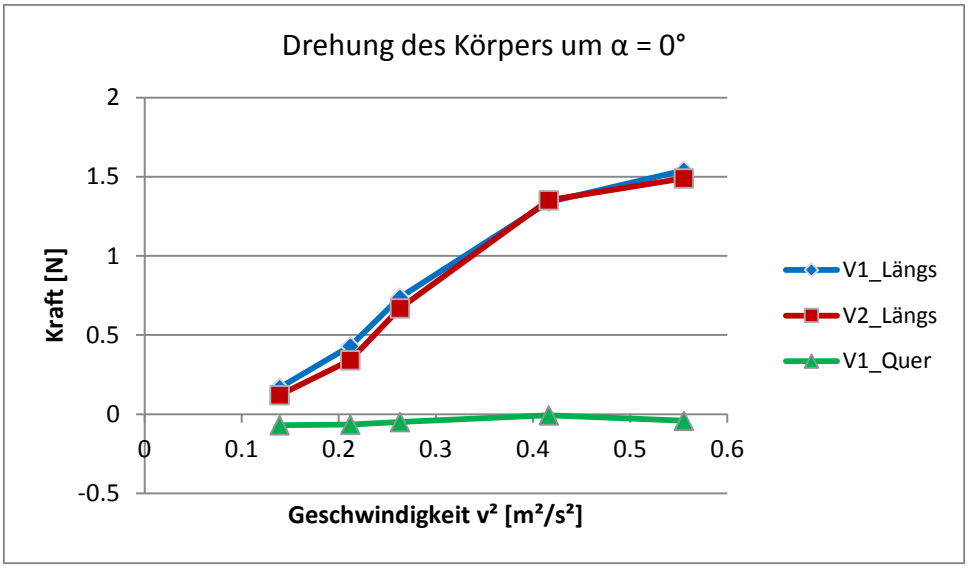

Abbildung 66 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 0°

Drehung des Störkörpers um α = 25°

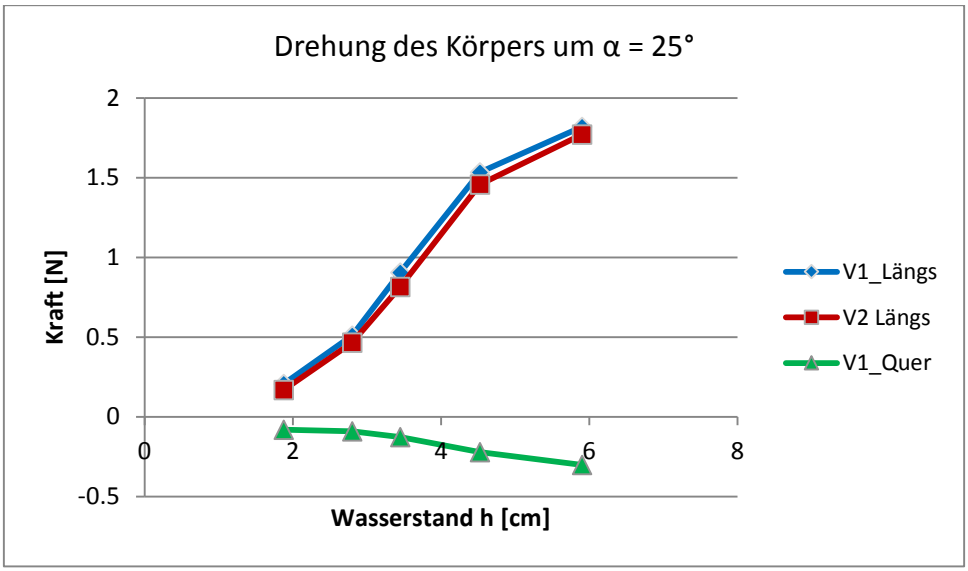

Abbildung 67 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 25°

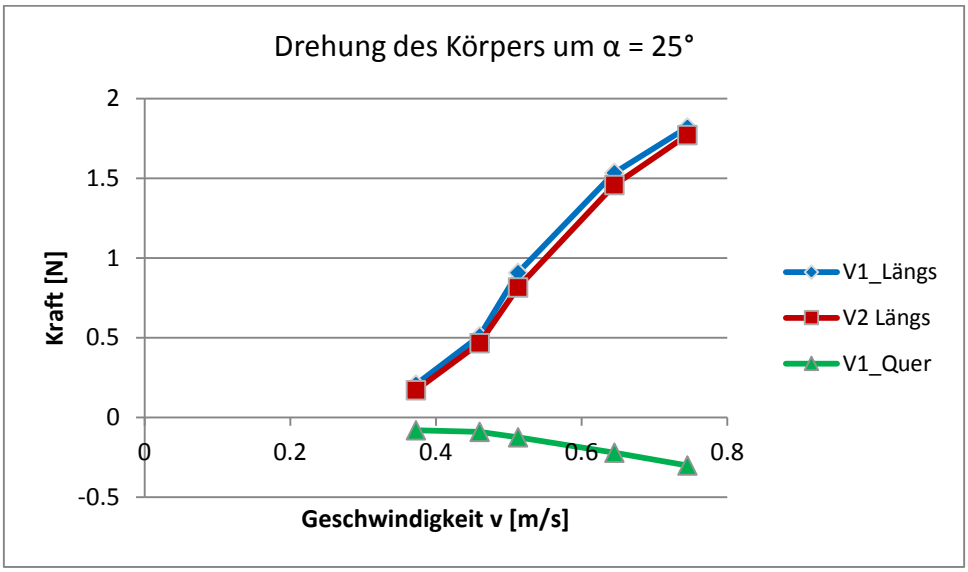

Abbildung 68 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 25°

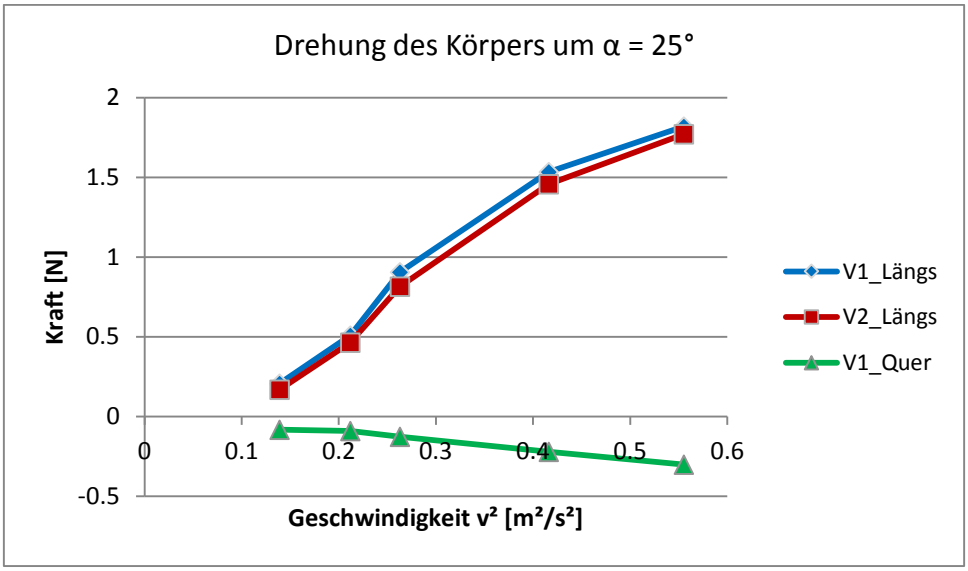

Abbildung 69 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 25°

Drehung des Störkörpers um α = 30°

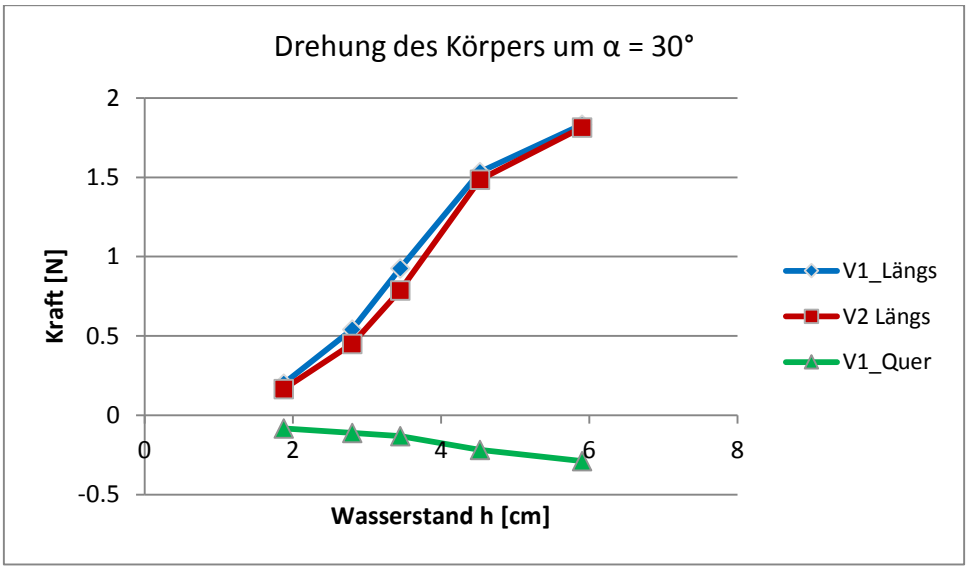

Abbildung 70 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 30°

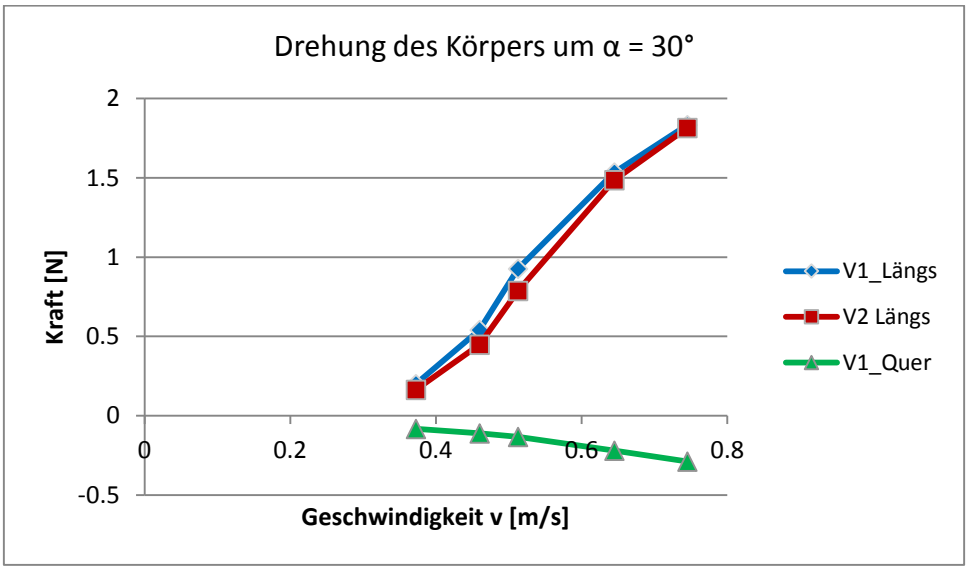

Abbildung 71 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 30°

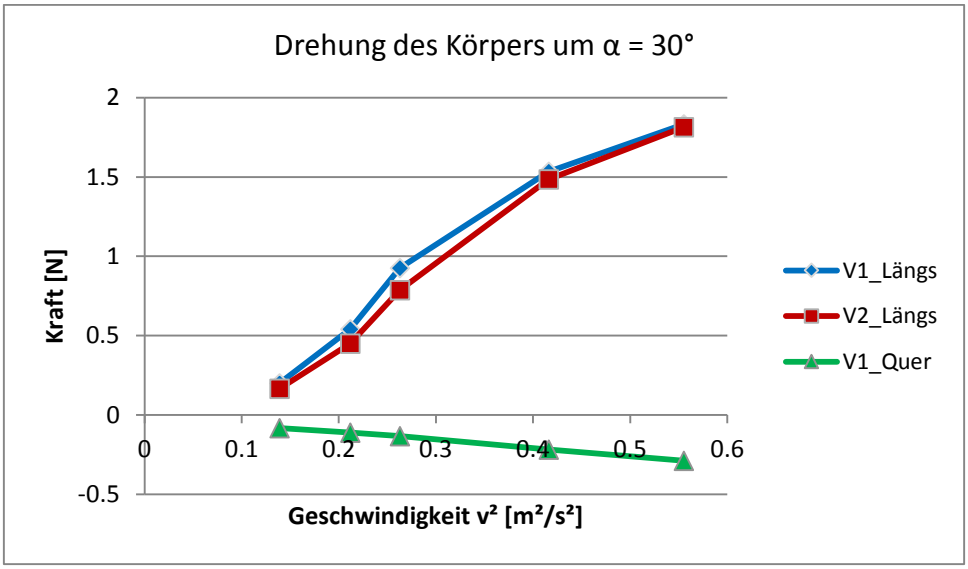

Abbildung 72 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 30°

Drehung des Störkörpers um α = 45°

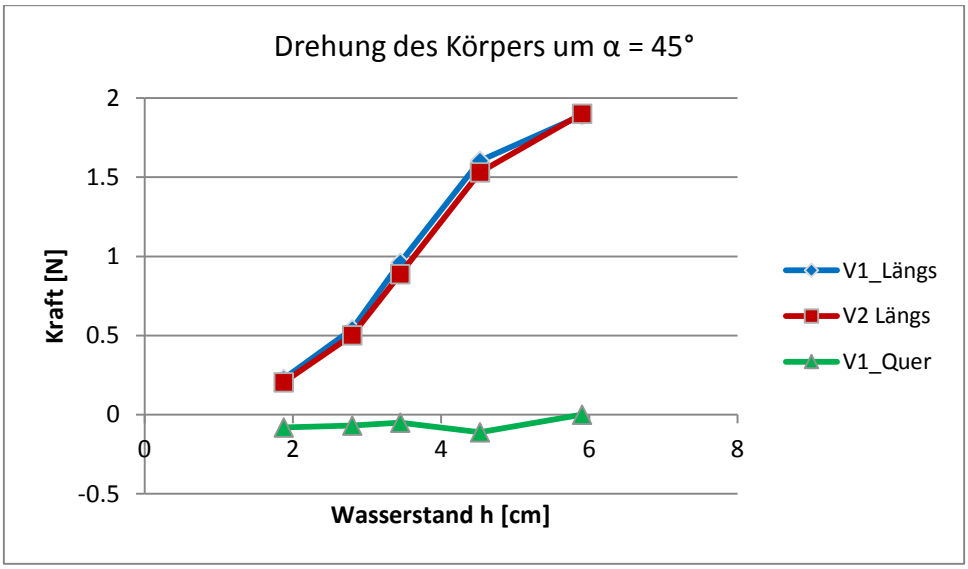

Abbildung 73 Gemittelte Kräfte über den Wasserstand bei Drehung des Körpers um 45°

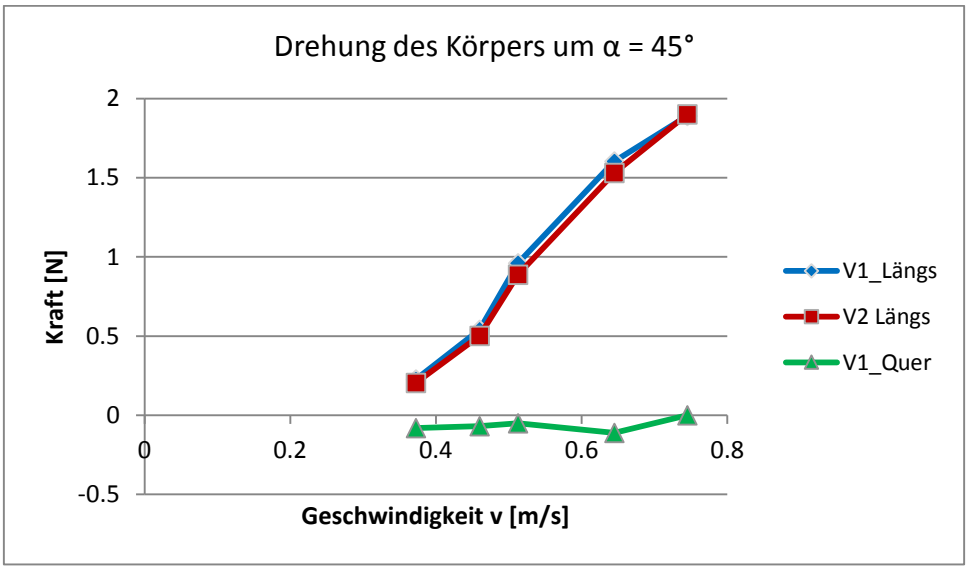

Abbildung 74 Gemittelte Kräfte über die Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 45°

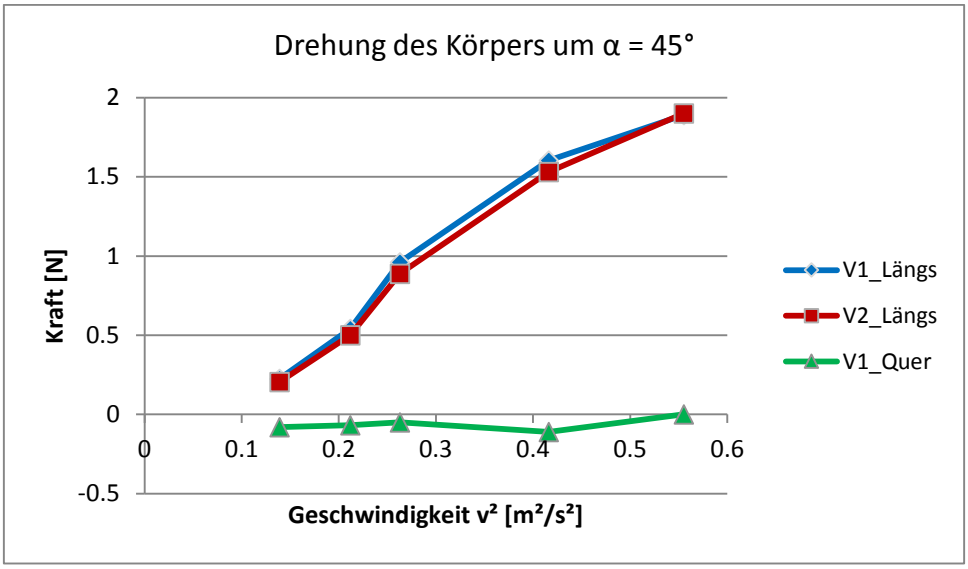

Abbildung 75 Gemittelte Kräfte über die quadratische Geschwindigkeit bei Drehung des Körpers um 45°

A4 Ergebnisse der numerischen Rechnung

Errechnete Kräfte aus FLOW-3D für Drehung des Störkörpers um α = 25°

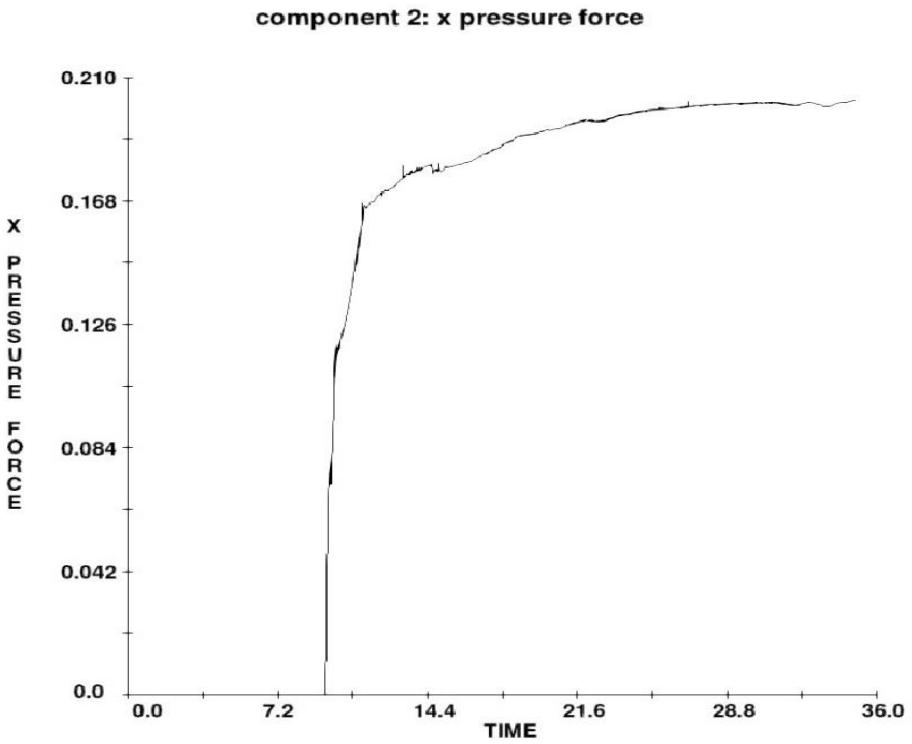

Abbildung 76 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 5 l/s

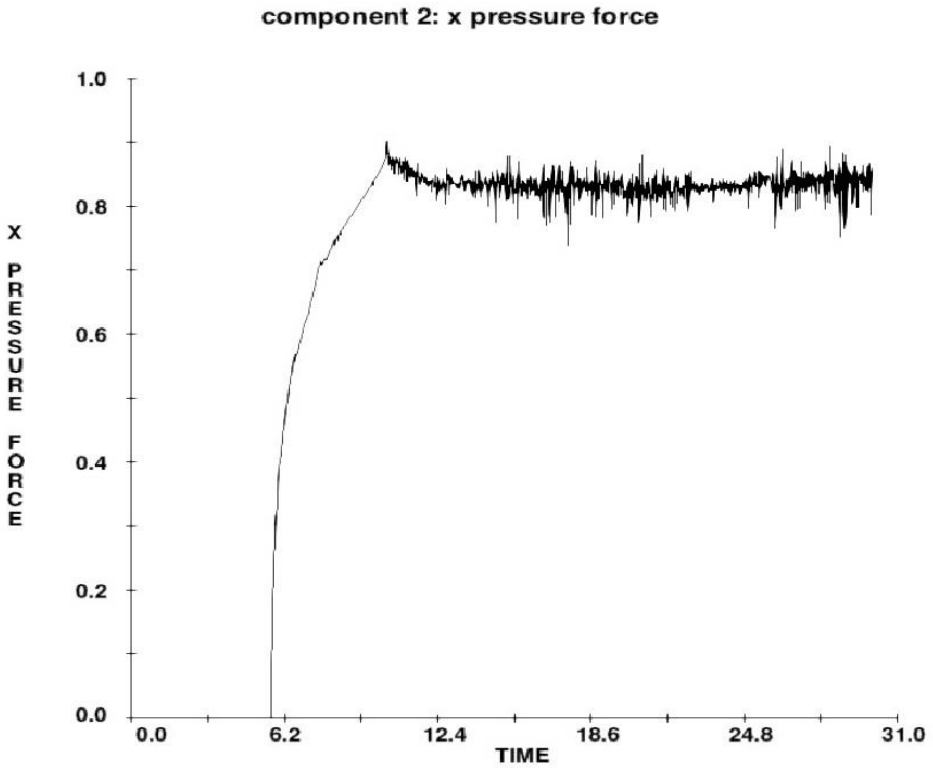

Abbildung 77 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 15 l/s

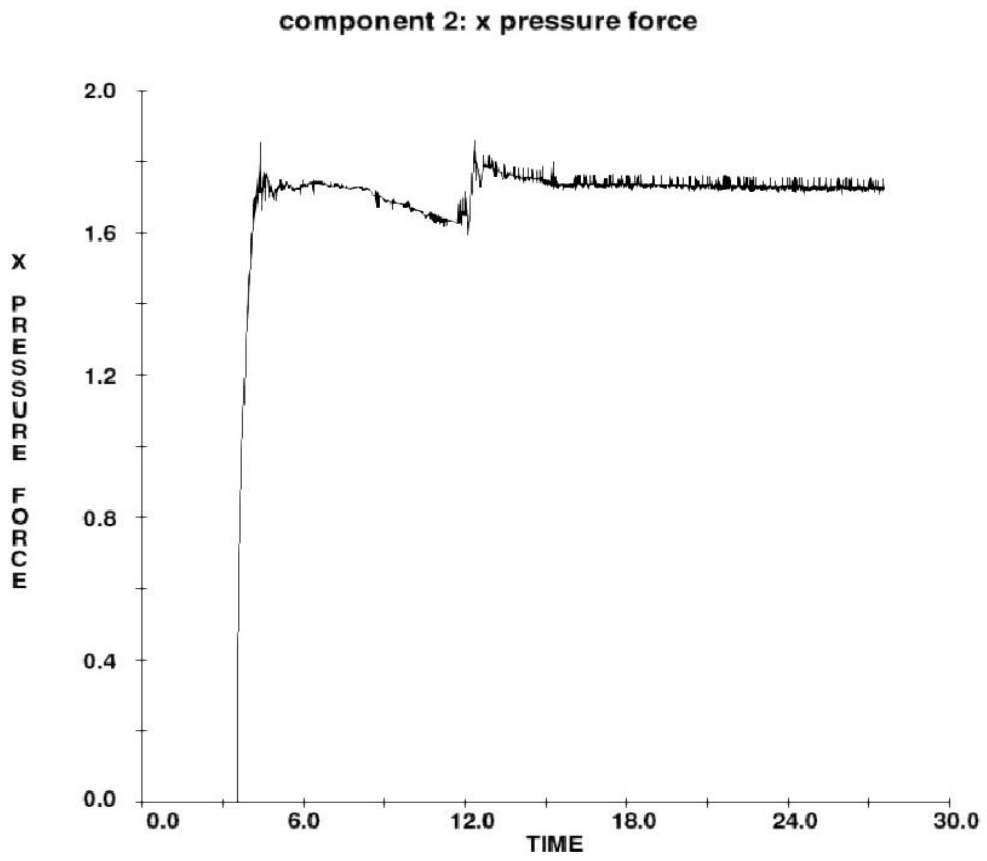

Abbildung 78 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 40 l/s

Errechnete Kräfte aus FLOW-3D für Drehung des Störkörpers um α = 30°

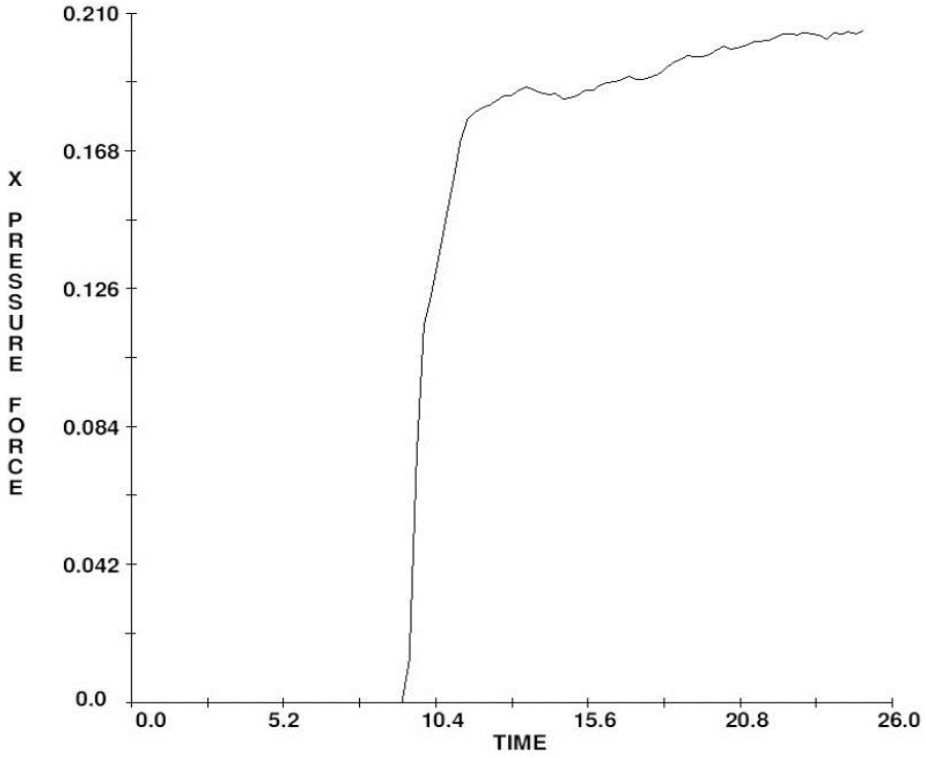

Abbildung 79 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 5 l/s

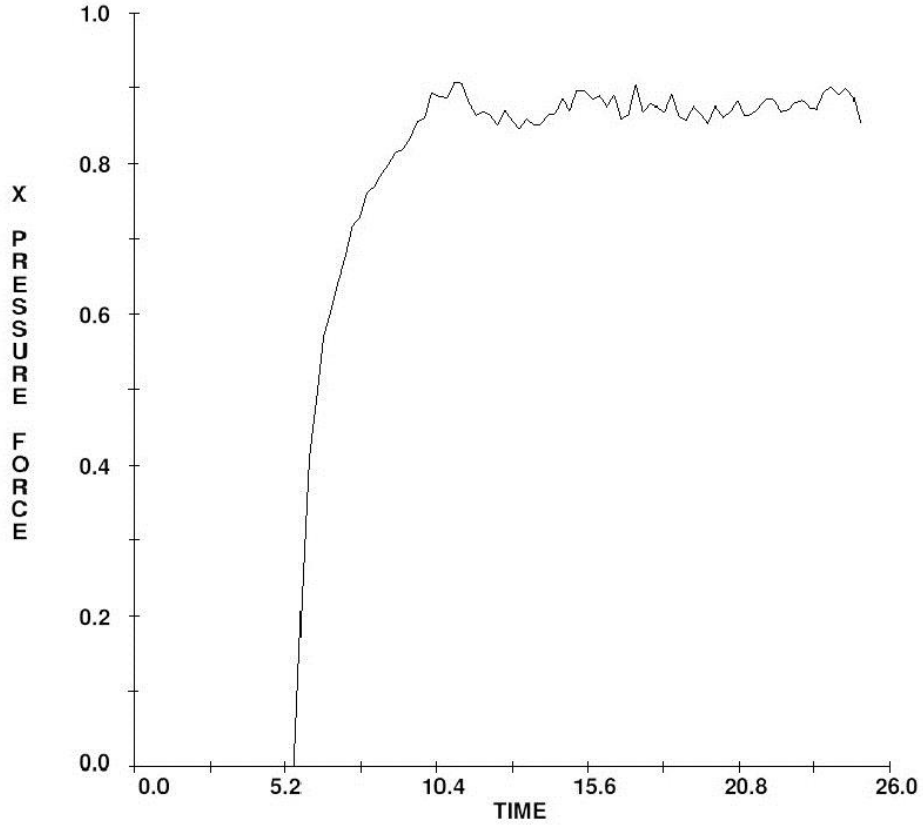

Abbildung 80 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 15 l/s

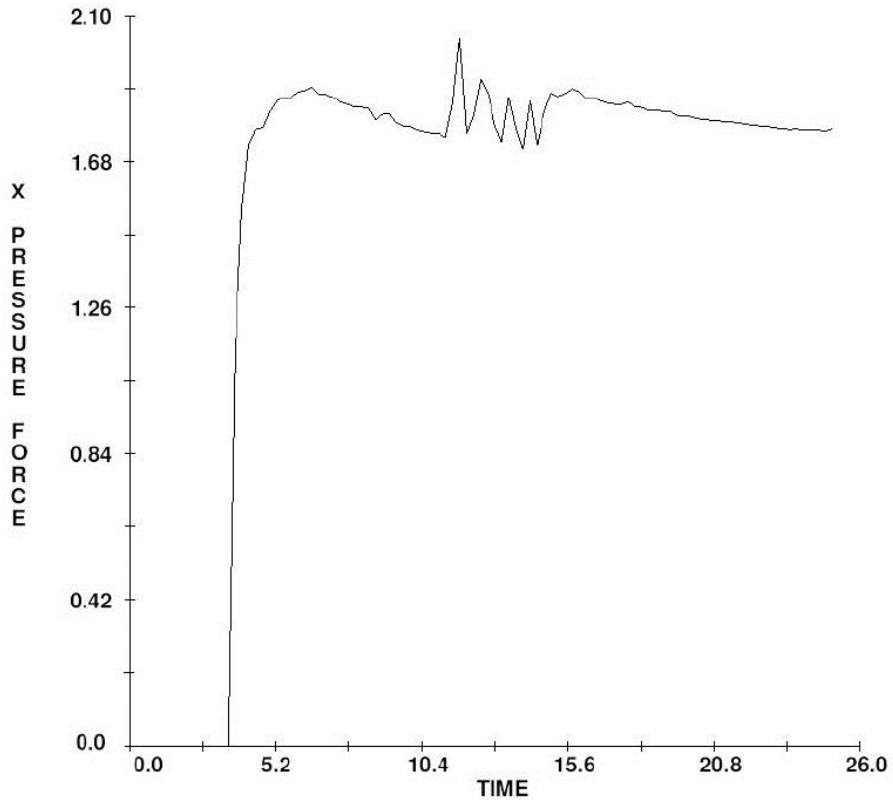

Abbildung 81 Rechenergebnisse der Kräfte in Fließrichtung für Q = 40 l/s

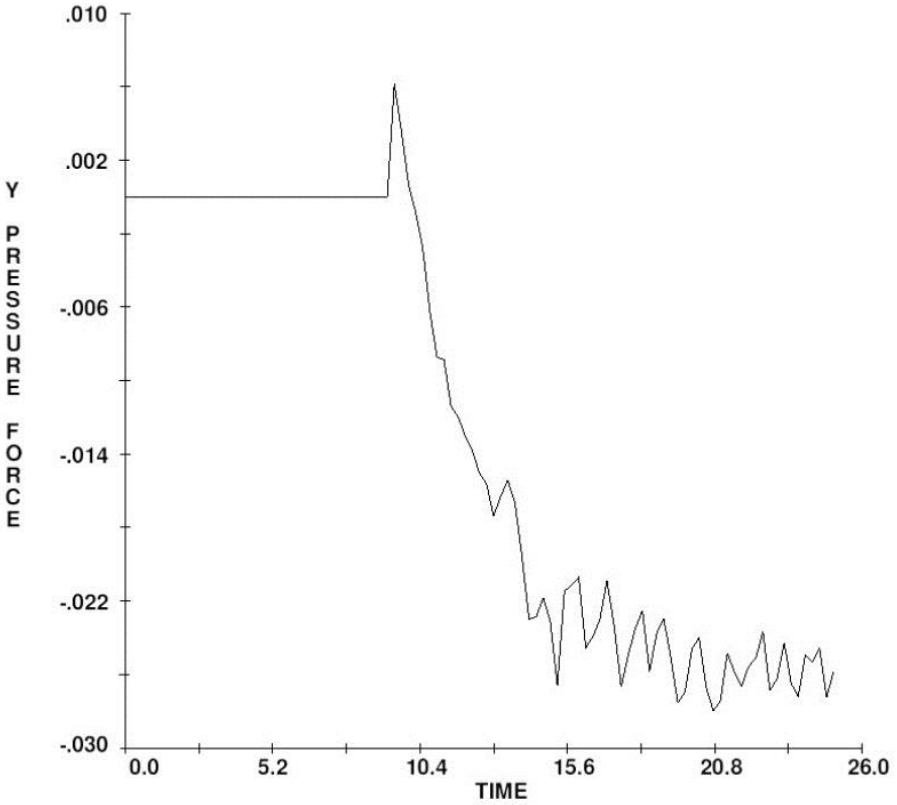

Abbildung 82 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 5 l/s

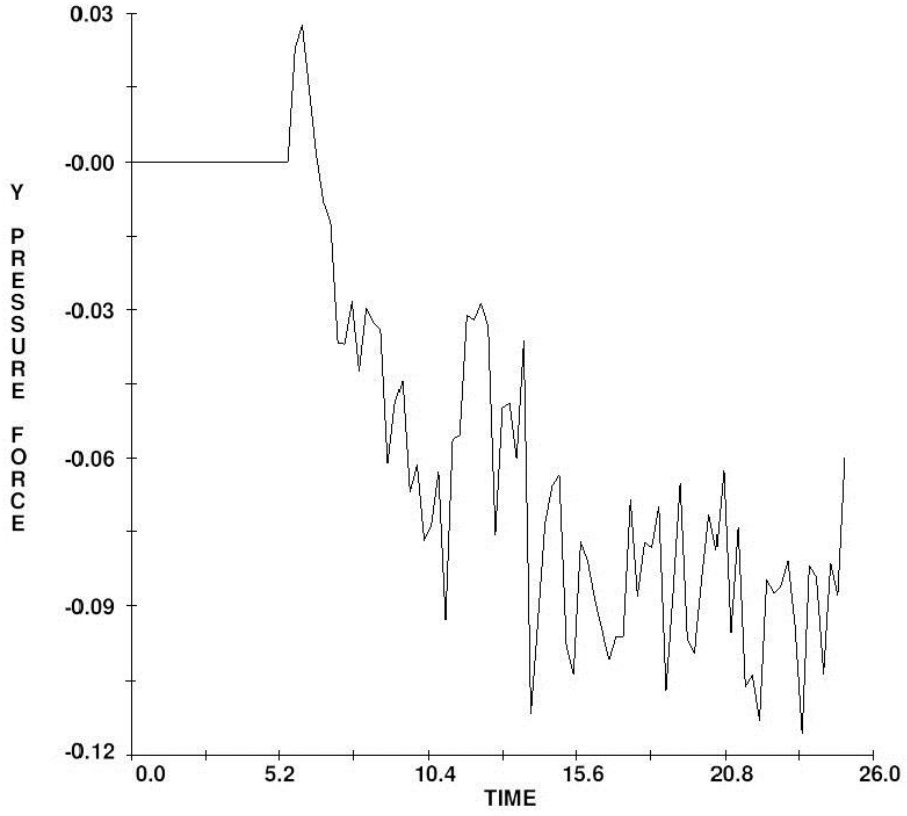

Abbildung 83 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 15 l/s

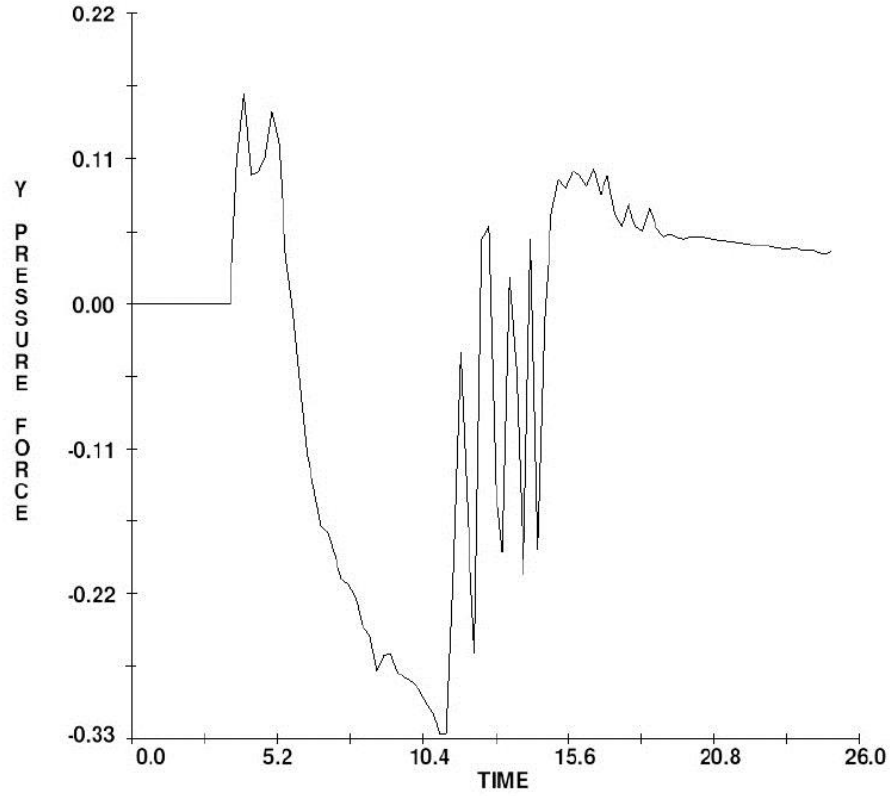

Abbildung 84 Rechenergebnisse der Kräfte quer zur Fließrichtung für Q = 40 l/s

Errechnete Kräfte aus FLOW-3D für Drehung des Störkörpers um α = 45°

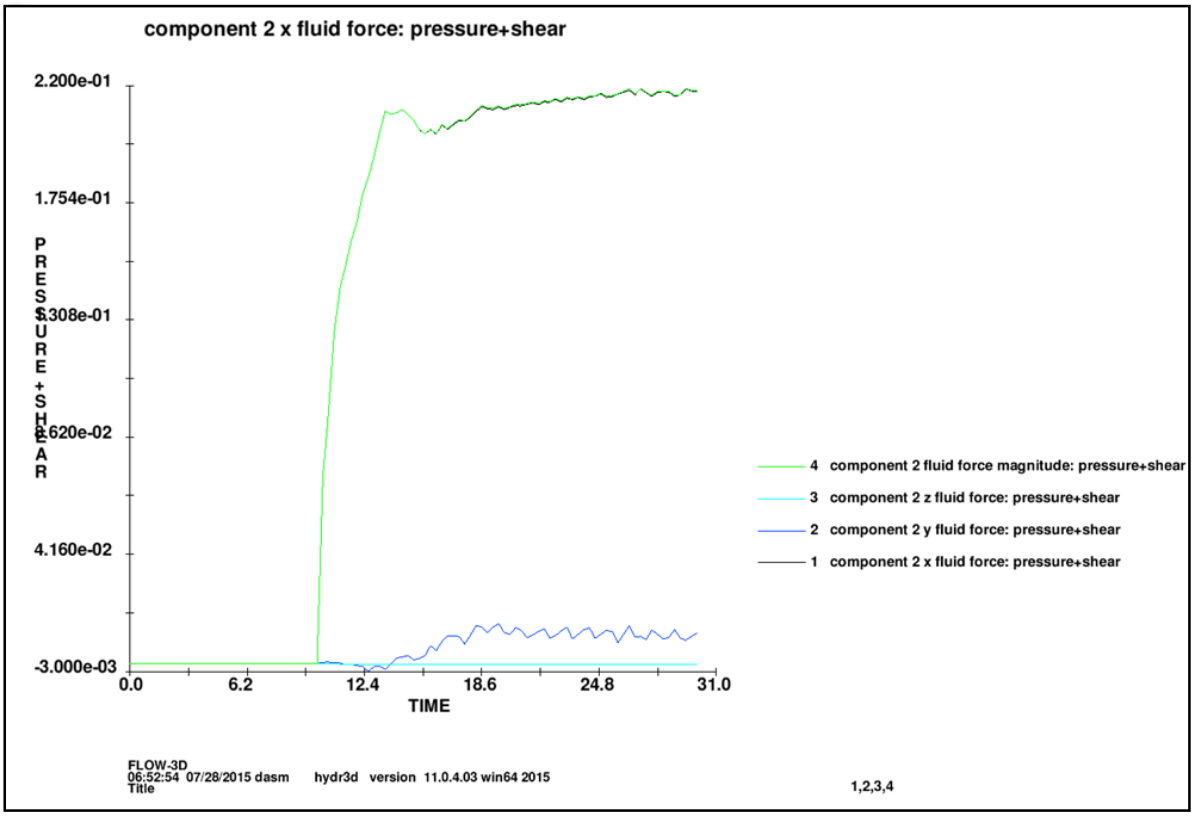

Abbildung 85 Rechenergebnisse für Q = 5 l/s

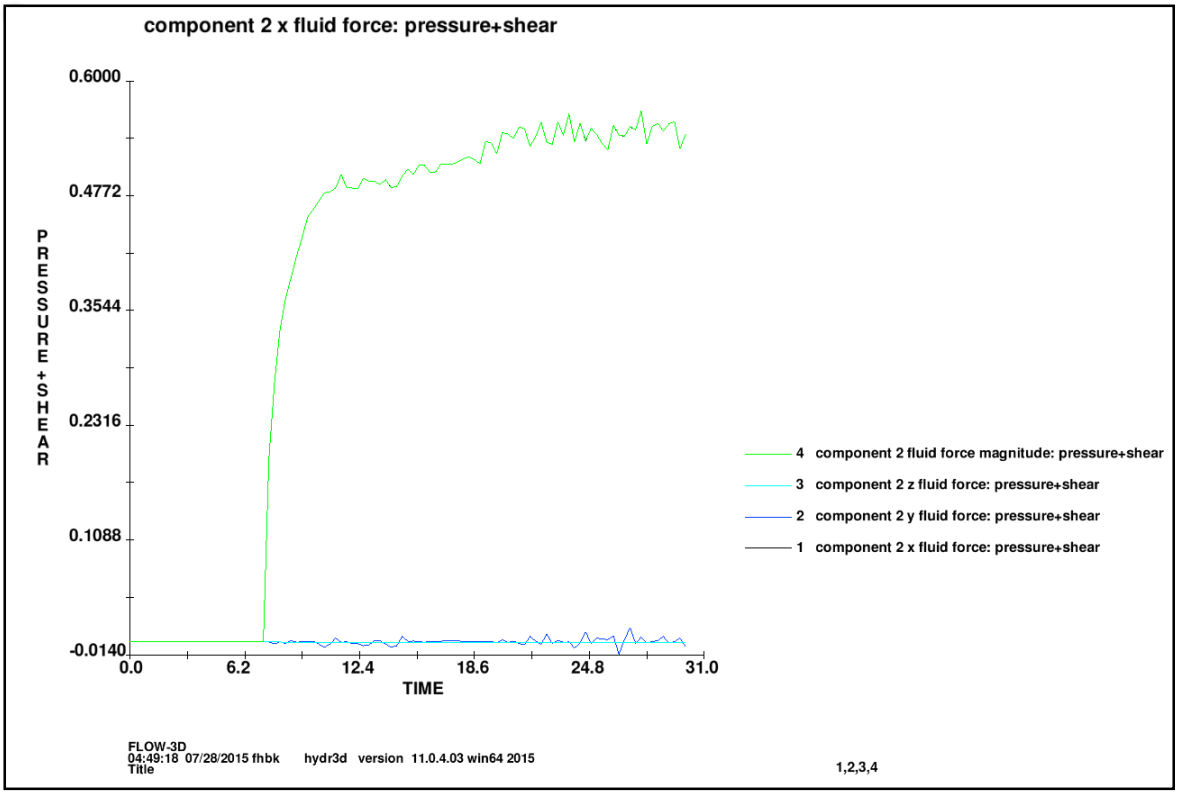

Abbildung 86 Rechenergebnisse für Q = 10 l/s

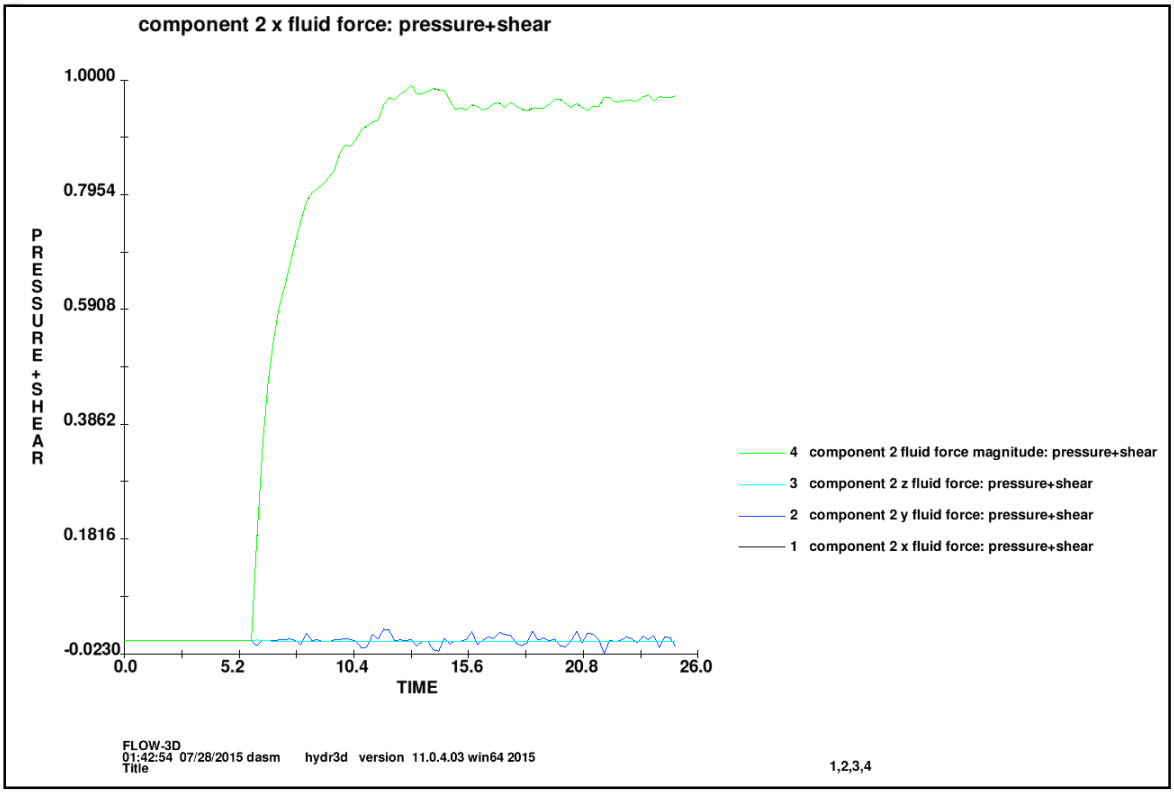

Abbildung 87 Rechenergebnisse für Q = 15 l/s

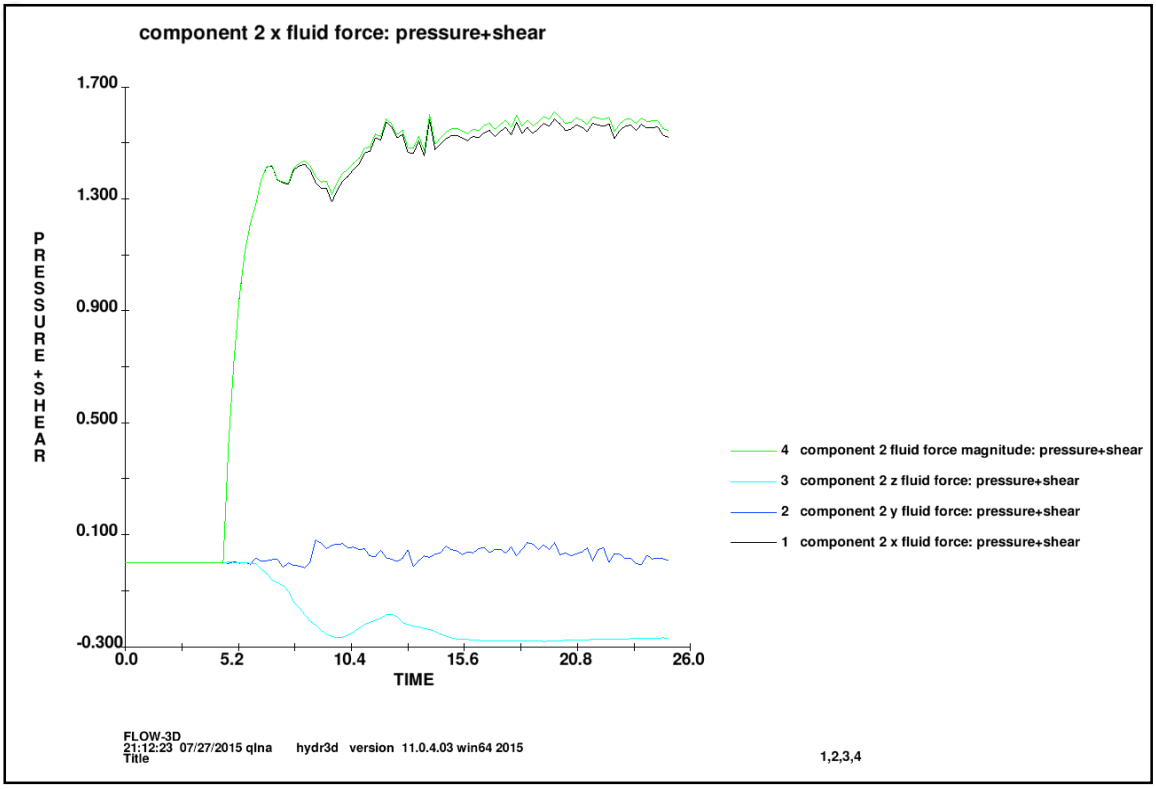

Abbildung 88 Rechenergebnisse für Q = 25 l/s

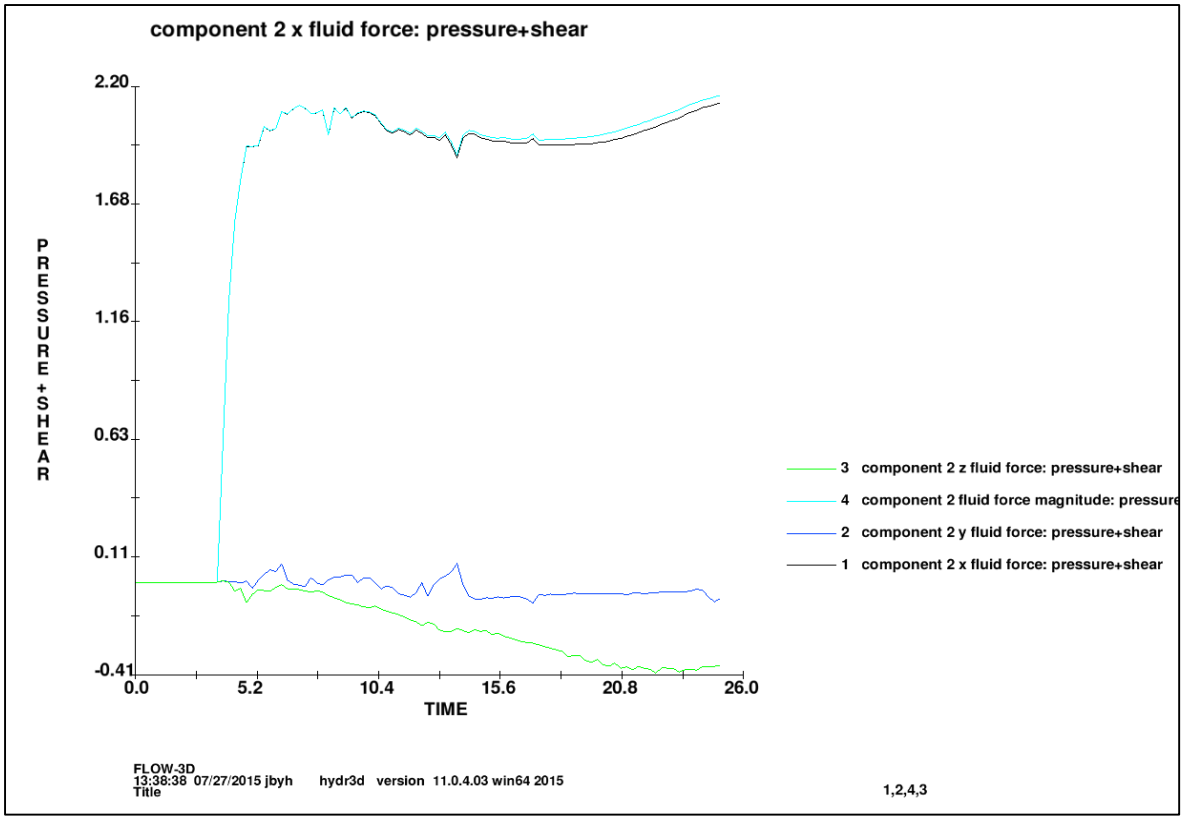

Abbildung 89 Rechenergebnisse für Q = 40 l/s