



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Ernesto Casartelli, Hochschule Luzern - Technik und Architektur

Technikumstr. 21, 6048 Horw

ernesto.casartelli@hslu.ch, www.hslu.ch/technik-architektur

Roger Waser, Hochschule Luzern - Technik und Architektur

Technikumstr. 21, 6048 Horw

roger.waser@hslu.ch, www.hslu.ch/technik-architektur

Hans Fankhauser, Fankhauser Maschinenfabrik

Luzernstrasse 36, 6102 Malters

fankhauser@fankhauser-malters.ch, www.fankhauser-malters.ch

Impressum

Datum: 13. März 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101847

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Biomasse-Rührwerke werden in Biogas-Fermenter eingesetzt, um dort eine möglichst homogene Zusammensetzung des Fluids zu gewährleisten. Dadurch wird eine gute Gasproduktion erreicht. Um einen hohen Anlagenwirkungsgrad zu erzielen, sollte die Antriebsleitung möglichst gering sein. Zudem werden hohe Anforderungen an die Festigkeit und den Korrosionsschutz einer Anlage gestellt.

In dieser Arbeit werden die strömungstechnischen Aspekte eines Biomasse-Rührwerks optimiert. Einerseits wird eine Wirkungsgradsteigerung angestrebt, andererseits nach einer möglichst stabilen aber auch einfachen und kostengünstigen Konstruktion gesucht.

Der grösste Teil der Untersuchungen wird mit numerischen Strömungssimulation (CFD) gemacht. Der Lösungsansatz mit CFD eignet sich sehr gut für solche Untersuchungen. Er ermöglicht eine Analyse der Verhältnisse in einer sonst unzugänglichen Strömung. Daraus kann die Optimierung am virtuellen Produkt gezielt durchgeführt und überprüft werden. Verschiedene Varianten können modelliert, bei gleichen Randbedingungen simuliert und miteinander verglichen werden.

Zusätzlich sind an einem Modell experimentelle Versuche durchgeführt worden, die als Abstützung bzw. Bestätigung der Erkenntnisse aus den Simulationen dienen.

In einem Feldversuch werden seit Ende September 2007 die optimierten Propeller eingesetzt und getestet.

Die wichtigsten Resultate können folgendermassen zusammengefasst werden:

Die Viskosität der Gülle ist so gross, dass die Strömung im Becken und am Rührwerk laminar ist. Als erstes ist ein 2D Profil definiert worden, das unter diesen Bedingungen gut funktioniert und den Anforderungen der Fertigung gerecht wird. Dabei konnte eine deutliche Verbesserung der fluidodynamischen Eigenschaften (Widerstand und Auftrieb) erreicht werden.

Mit den gewonnenen Informationen aus den 2D Simulationen ist ein 3D Flügel entwickelt worden. Dieser weist im Vergleich zum Originalflügel eine homogenere Abströmung auf. Durch die optimierte Umströmung der Propeller ist das Verhältnis von Schub- zu Antriebsleistung stark gestiegen.

Die Simulationen des ganzen Beckens zeigen, dass der Wirkungsgrad des Rührwerks mehr als verdoppelt wird. Das bedeutet, dass die gleiche Mischwirkung mit der Hälfte des Aufwandes erzielt wird. Die Struktur der Propeller ist mit FEM Berechnungen qualitativ überprüft worden. Erste Feldversuche bestätigen den Erfolg dieser Untersuchung.

Abstract

Biomass Mixers are used in Biogas-Fermenters in order to achieve a homogeneous consistence of the biomass fluid itself, thus allowing for a good gas production. The efficiency of the plant is affected by the energy consumption of the mixer, so that a goal is to reduce it improving the fluid dynamics characteristics of the mixer. Moreover the mechanical stability, including corrosion protection has to match the original mixer.

Aim of this work is to improve the fluid dynamic qualities of the mixer, in order to increase the efficiency, still keeping in mind a robust but low price manufacturing.

Most of the investigations were performed with CFD (Computational Fluid Dynamics). CFD is very effective in this kind of optimization problems, since it provides the possibility to analyze a flow which is otherwise not really accessible. The improvements on the virtual model can be performed for all the suggested variations at the same conditions, thus allowing a systematic study.

Experiments were performed on a fermenter- and mixer-model, in order to harden the computational findings.

A field test was started in September 2007 with the optimized geometry.

The major results can be summarized as follow:

Viscosity of liquid manure is so high, that the flow character is laminar.

The new development started with the definition of a 2D Profile for the blade which satisfies the mechanical and manufacturing requirements while improving the fluid dynamics characteristics (lift and drag).

From the 2D Profile a simple stacking was proposed to achieve the 3D blade, keeping in mind the manufacturing costs. The new 3D blade shows a large improvement of the specific thrust compared to the original geometry.

Simulations of the complete fermenter show that the efficiency could be more than doubled. This means, that for the same mixing level half of the power is needed from the motor.

Mechanical integrity was investigated with FEM and show similar values as the original.

The results of the first field tests show the improvement very clearly.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis	6
1 Ziel der Arbeit	7
2 Lösungsweg	9
2.1 Ausgangslage	9
2.2 Methodik und Vorgehen.....	9
2.3 Numerisches Modell.....	9
2.4 Rührwerke.....	11
2.5 Wassерmodell	15
3 Ergebnisse.....	17
3.1 Berechnungen 2D-Profil.....	17
3.2 3D Rohrsimulationen.....	20
3.3 3D Beckensimulationen	22
3.4 Experimentelle Untersuchungen am Modell	38
3.5 Konstruktion	41
3.6 Festigkeitsberechnung	41
3.7 Beobachtungen in realen Anlagen.....	43
4 Schlussfolgerungen.....	45
5 Ausblick	46
6 Literaturverzeichnis	47

1 Ziel der Arbeit

Rührwerke werden unterschiedlich betrieben. Die einen Landwirte mischen die Biomasse in kurzen Intervallen mit hoher Drehzahl, während die Anderen das Rührwerk ununterbrochen mit kleineren Drehzahlen laufen lassen. Fest steht aber, dass diese Rührwerke, wegen ihrer hohen Laufzeit sehr viel Energie verbrauchen.

Eine Voruntersuchung hat ergeben, dass die Propellergeometrie strömungstechnisch ein sehr grosses Verbesserungspotential aufweist. Ziel dieser Arbeit ist, ein Propellerdesign zu finden, das einen höheren Wirkungsgrad erreicht, gleichzeitig aber auch den hohen Ansprüchen an Festigkeit und Korrosionsschutz gerecht wird. Der neue Propeller soll weiterhin, in dem Betrieb des Projektpartners, wirtschaftlich herzustellen sein.

Weiter soll auch Klarheit über die Strömungsverhältnisse im Becken geschaffen werden.

2 Lösungsweg

2.1 Ausgangslage

Für die Optimierung des Rührwerks sind detaillierte Informationen über den Strömungszustand notwendig.

Eine experimentelle Betrachtung des Problems in der Produktionsanlage wäre, wenn überhaupt möglich, extrem aufwendig. In Produktionsanlagen wird in der Regel nur die vom Rührwerk aufgenommene Leistung gemessen. Hinweise über die Strömungsverhältnisse im Becken bleiben aber aus. Einzig eine Visualisierung der Oberflächenströmung ist möglich, wenn ein entsprechendes Fenster vorhanden ist.

2.2 Methodik und Vorgehen

Die Analyse und die anschliessende Optimierung wurden mit numerischer Strömungsberechnung (auch CFD = Computational Fluid Dynamics genannt) durchgeführt. Dabei können verschiedene Varianten unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen und die entsprechende Grundlage für die Optimierung geschaffen werden.

Für die Überprüfung der numerischen Resultate wurde ein Modellbecken im Massstab 1:10 hergestellt. Die Profile wurden mit einem Rapid Prototyping Verfahren gefertigt (3D Printer, ABS Kunststoff).

Folgendes Vorgehen wurde für die Optimierung gewählt:

- 2D Profilanalyse: In diesem Schritt werden mögliche Profile definiert, berechnet, evaluiert und untereinander verglichen.
- 3D Rohrsimulationen: Aus den Erkenntnissen der 2D Simulationen wird mit ausgewählten Profilen ein Propeller modelliert und in einem Rohr als Umgebung simuliert. Damit sind klar definierte Randbedingungen für die Strömung gegeben, was den Vergleich von verschiedenen Varianten ermöglicht und erleichtert. In diesem Schritt werden Anstellwinkel, Grundfläche und Dickenverhältnisse des Profils bestimmt.
- 3D Beckensimulationen: die besten Propeller wurden zu einem Rührwerk (4 Propeller an der gleichen Welle) zusammengefügt und im Becken simuliert.
- Modellversuche: Die besten Propeller wurden mit einem 3D Printer gefertigt und im Modellbecken getestet
- Feldversuch: Der entwickelte Propeller wurde gefertigt und in einer realen Anlage eingesetzt.

2.3 Numerisches Modell

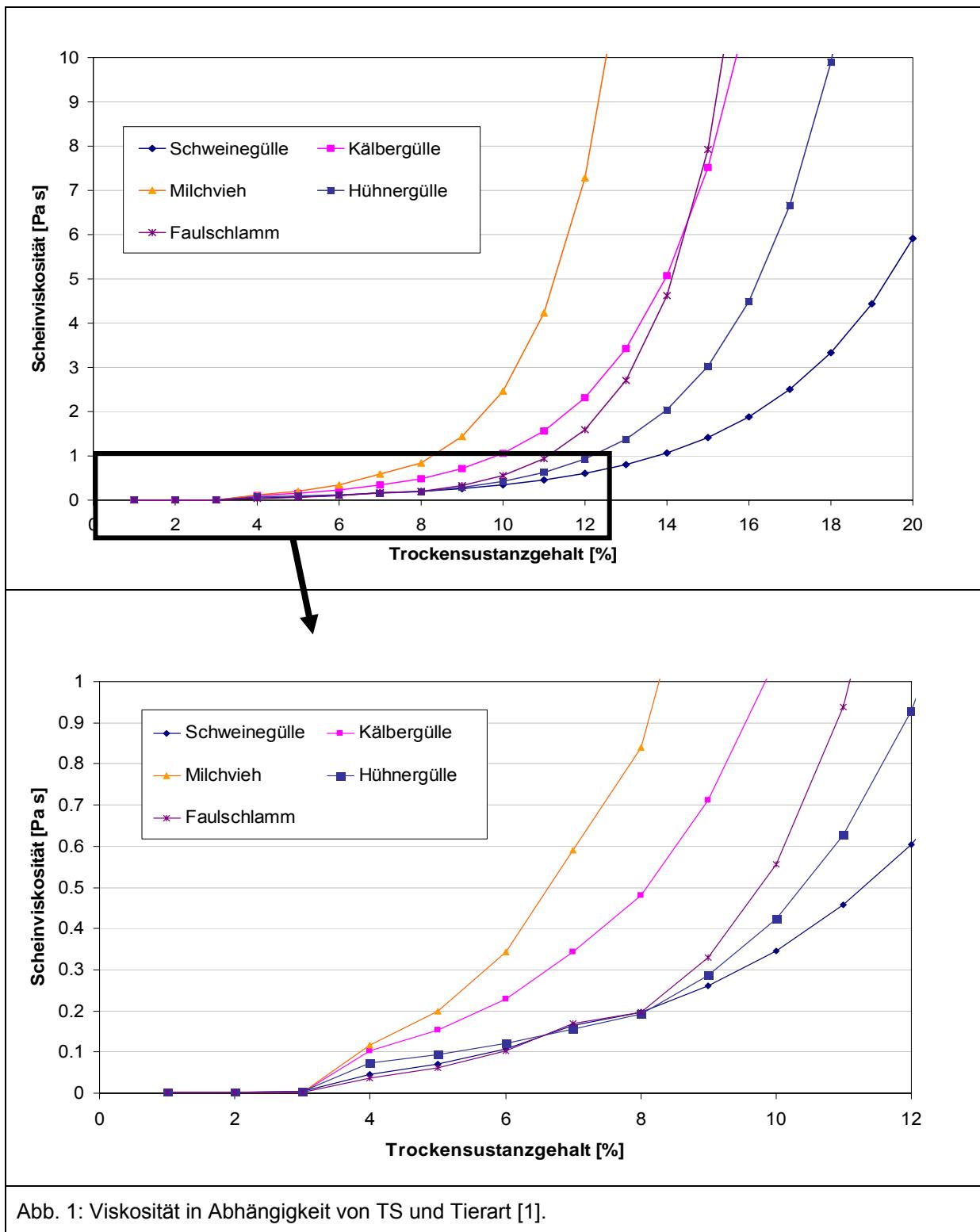
Grundlagen für ein CFD Modell sind die Geometrie, das Fluid (bzw. seine Eigenschaften) sowie die Rand- und Betriebsbedingungen. Über die Fluideigenschaften gibt es vom Rührwerkhersteller keine Angaben. Vor allem die Viskosität ist sehr schwierig abzuschätzen. Da es sich um stark reibungsbehaftete Strömungsvorgänge handelt, hat die Grösse der Viskosität einen wesentlichen Einfluss.

2.3.1 Viskosität

Angaben über die Viskosität von Gülle sind sehr schwierig zu finden. In [1] und [2] sind Daten und rheologische Modelle zu finden, die für die Berechnung der Viskosität (bzw. eines Bereiches für die Viskosität) verwendet werden können. Die Viskosität ist vor allem vom Trockensubstanzgehalt (TS)

und der Tierart abhängig. Dazu kommt, dass je nach TS das Fliessverhalten newtonsch oder nicht-newtonsch sein kann, d.h. von der lokalen Schergeschwindigkeit abhängig sein kann.

Abb. 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Viskosität und TS für verschiedene Tierarten nach [1].



Biogas-Fermeter werden in der Regel nicht mit Gülle aus nur einer Tierart und nicht bei konstantem TS betrieben. Daher ist die Grafik eher für die Bestimmung der Größenordnung zu interpretieren, als

für eine genaue Ermittlung der Viskosität. Die Berechnungen wurden mit einem repräsentativen Wert von 0.75 Pa.s durchgeführt. Da keine genauen Angaben für die Güllviskosität vorhanden sind, wurde mit einer newtonischen Flüssigkeit gerechnet, d.h. mit konstanter Viskosität. Für geringere TS (< 3%) ist das zulässig. Für höhere TS-Werte sind die Modelle komplexer und die entsprechenden Parameter variieren je nach Tierart, Fütterung und TS, was der Aufwand für eine ausführliche Untersuchung explodieren liesse. Wie sich aufgrund der Validierung zeigen wird, ist die Annahme einer konstanten Viskosität vernünftig.

2.3.2 *Simulationssoftware*

Die Simulationen wurden mit ANSYS CFX durchgeführt. Es handelt sich um ein kommerzielles, *general purpose CFD* Programm, das in der Industrie weit verbreitet ist.

2.3.3 *Hardware und Rechenzeiten*

Die Berechnungen wurden auf einem Linux-Cluster basierend auf AMD-Opteron 64-bit Prozessoren durchgeführt.

Die folgende Tabelle fasst die Anzahl Elemente im Netz und die Rechenzeiten der verschiedenen Simulationen zusammen.

Berechnung	Anzahl Elemente (in Tausend)	Anzahl Prozessoren	Dauer
2D Profile	34	2	10 min
3D Rohr	860	4	30 min
3D Becken	2'000	10	5 Tage
3D Becken (2 Phasen)	800	10	10 Tage

2.3.4 *Preprocessing*

Die Netze sind mit ICEMCFD erstellt worden. Bei den 2D Simulationen sind strukturierte (Hexa) Netze verwendet worden. Die 3D Simulationen enthalten strukturierte Netzteile (Hexa), wie auch unstrukturierte Netzteile mit Prismaschichten (Tetra, Prism).

Bei den Rohrsimulationen wurde mit „Stage“ Interfaces und bei den Beckensimulationen mit „Transient Rotor Stator“ Interfaces, zwischen den rotierenden und stehenden Flächen, gerechnet.

Die Simulationen wurden laminar und mit den Stoffwerten von Güll gerechnet.

2.4 Rührwerke

Rührwerke werden in der Technik für verschiedenen Aufgaben eingesetzt, von homogenisieren über aufwirbeln von Feststoffen bis zum dispergieren [3].

Die Funktion des in dieser Studie betrachteten Rührwerks ist eine Art homogenisieren. Dabei ist die Verhinderung der Bildung einer Schwimmschicht von Feststoffen an der Oberfläche, die wichtigste Aufgabe.

Von den verschiedenen Rührertypen wurde von der Firma Fankhauser die Variante „Langachs-Schrägrührwerk“ (auch Rührpropeller genannt) gewählt (siehe Abb. 2). Dabei spielen Festigkeit und Herstellungskosten neben einer guten Mischwirkung die entscheidende Rolle.

Ziel der Arbeit ist, zu diesem Rührretyp optimierte Propellerflügel zu entwerfen.

Charakteristisch für diese Lösung ist, dass die Welle seitlich an der Behälterwand montiert und am Boden gelagert wird. Der Motor und das Getriebe sind an der Aussenseite angebracht und kommen mit der Gülle nicht in Berührung, was ihre Konstruktion deutlich vereinfacht und die Herstellungskosten tief hält. Ausserdem ist die Wartung einfach und jederzeit Möglich.

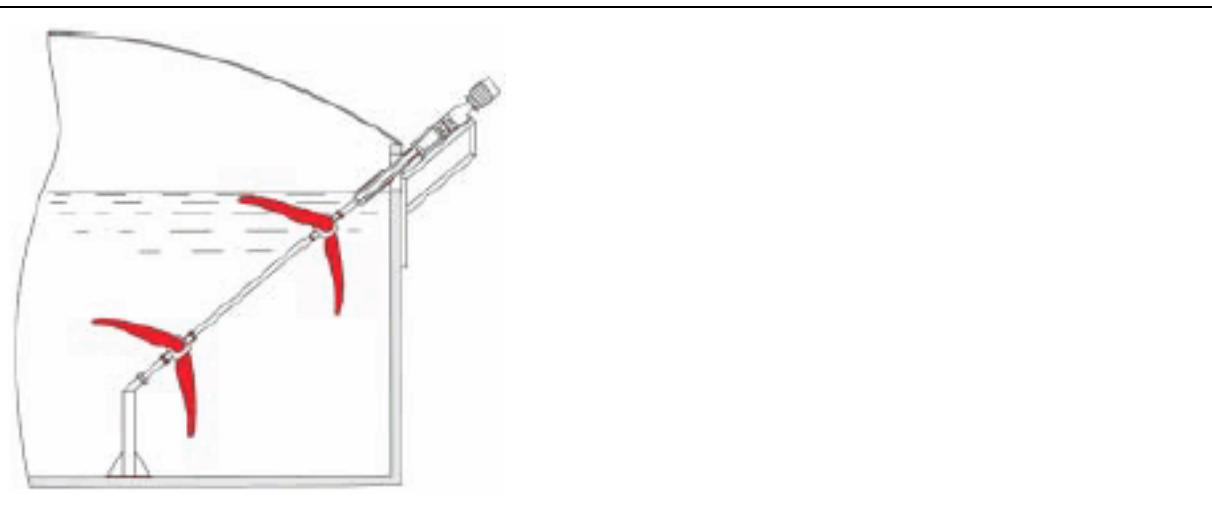


Abb. 2: Langachs-Schrägrührwerk [ENVICOM streisal BIOBULL mit Bodenlager, www.streisal.de]

Die bestehende Lösung hat vier Propeller (Abb. 3). Oft wird der zweitoberste Flügel grösser gewählt als die anderen drei (entspricht nicht der Abbildung). Damit kann gewährleistet werden, dass an der Oberfläche eine starke Sogwirkung entsteht, welche die Schwimmschicht abbaut. Aus fertigungstechnischen Gründen wäre es einfacher und günstiger vier gleiche Propeller zu verwenden. In den Simulationen werden die verschiedenen Varianten berechnet und verglichen.

Das Flügelprofil besteht aus gebogenem Blech und ist mit einer Verstärkung verschweisst. Die Konstruktion ist somit robust, günstig in der Herstellung und erzielt auch in schwierigen Substraten eine befriedigende Rührwirkung. Diese Lösung benötigt im Betrieb eine grosse Leistung, da bis jetzt nur nach fertigungstechnischen Kriterien entworfen wurde, ohne die Strömungstechnik besonders zu berücksichtigen.

Es wird nach einer Lösung gesucht, die bei gleichbleibender Durchmischung eine kleinere Antriebsleistung erfordert. Dabei soll die Geometrie möglichst einfach sein. Um den Transport einfach zu halten, sollen die Flügel auf der Baustelle montiert werden können.



Abb. 3: Rührwerk Fankhauser (herkömmliche Propeller)

2.4.1 Dimensionslose Charakterisierung

Die Charakterisierung von Rührwerken erfolgt oft anhand zweier dimensionsloser Zahlen, die Reynolds- und die Newton-Zahl. Dadurch können Rührwerke untereinander verglichen werden.

Mit der Re-Zahl wird das Verhältnis zwischen Druckkräften und Reibungskräften dargestellt. Hochviskose Flüssigkeiten wie Gülle liefern eher kleine Re-Zahlen. Der Strömungszustand liegt im laminaren Bereich.

Die Ne-Zahl ist die dimensionslose Darstellung der Leistung, welche vom Propeller in das System eingebracht wird.

Diese Kennzahlen sind für Rührwerke folgendermassen definiert:

$$Re_{Rührer} = \frac{n \cdot d^2}{\nu}$$

$$Ne_{Rührer} = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}$$

Wobei d der Durchmesser des Propellers und n die Drehzahl sind.

Abb. 4 zeigt der Zusammenhang zwischen Re und Ne für verschiedene Rührer.

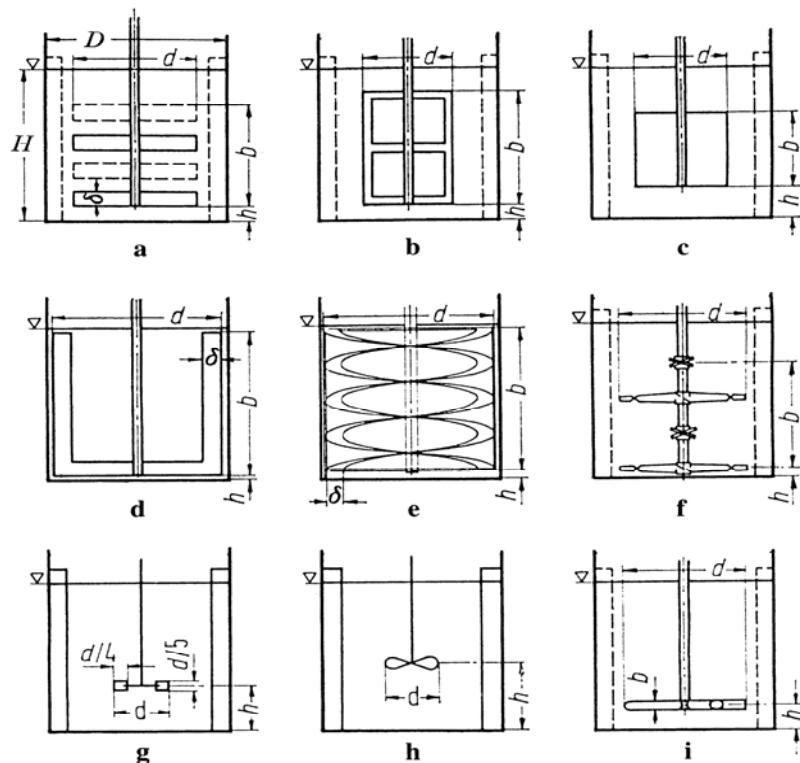
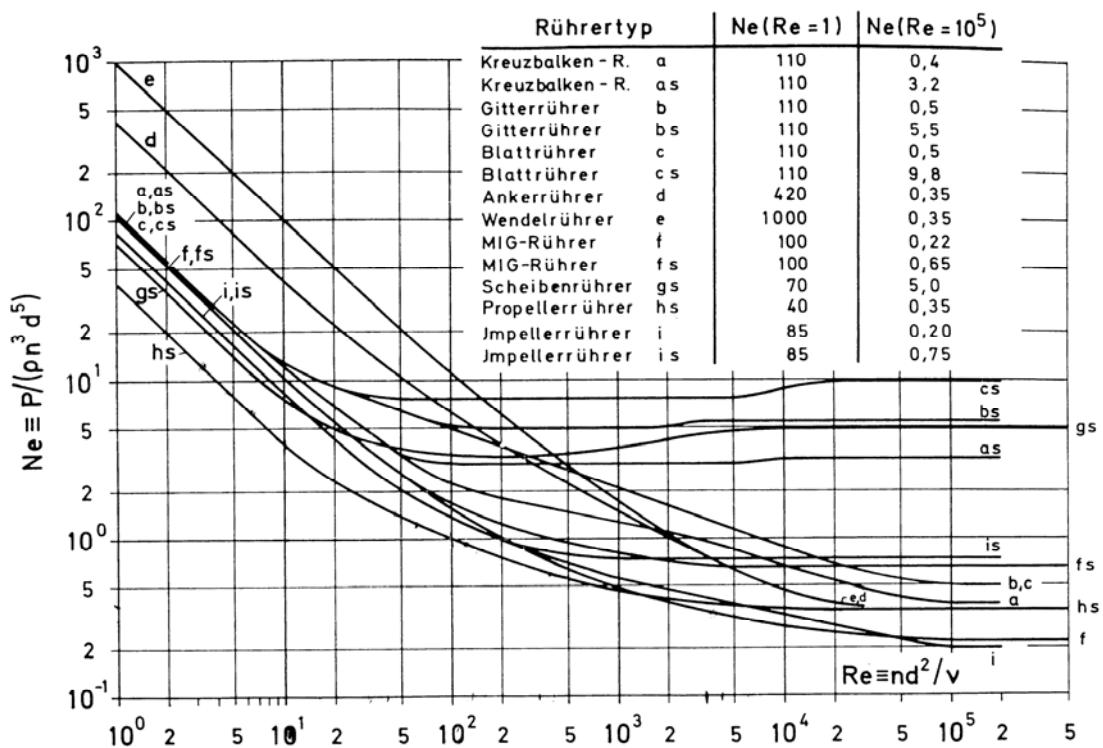


Abb. 4: $Ne=f(Re)$ für verschiedene Propellertypen ([3])

Die Optimierung wird ausgehend von der Profilumströmung durchgeführt. Auch in diesem Fall ist die Re-Zahl wichtig für die Charakterisierung des Strömungszustandes. Sie ist leicht anders als die des Rührwerks definiert:

$$Re_{\text{Profil}} = \frac{n \cdot d \cdot L}{\nu}$$

Wobei L die Flügeltiefe ist.

Somit ist Re_{Profil} kleiner als $Re_{\text{Rührer}}$. Die Umströmung des Profils liegt dementsprechend auch im laminaren Bereich.

Die Resultate im Wassermodell werden in einem $Ne=f(Re)$ Diagramm dargestellt und untereinander verglichen.

2.5 Wassermodell

Das Wassermodell (Abb. 5) wurde im Massstab 1:10 konstruiert ([4], [5]). Die Welle hat die gleiche Neigung bezüglich radialer und axialer Richtung wie in den Produktionsanlagen.

Gemessen wurde das Drehmoment (Pendellager) und die Drehzahl der Rührwelle, sowie punktuell die Geschwindigkeit mit einer ADV Sonde (Acoustic-Doppler Velocimetry, Vgl. Abb. 6).

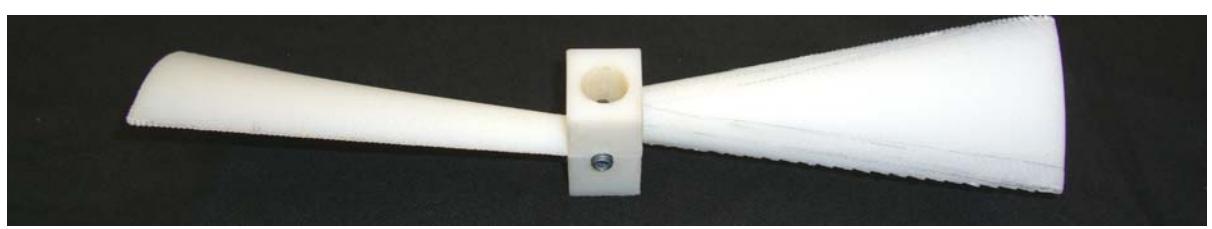


Abb. 5: Modellbecken mit Antrieb und ADV Messaufbau; Kunststoffpropeller im Modellmassstab

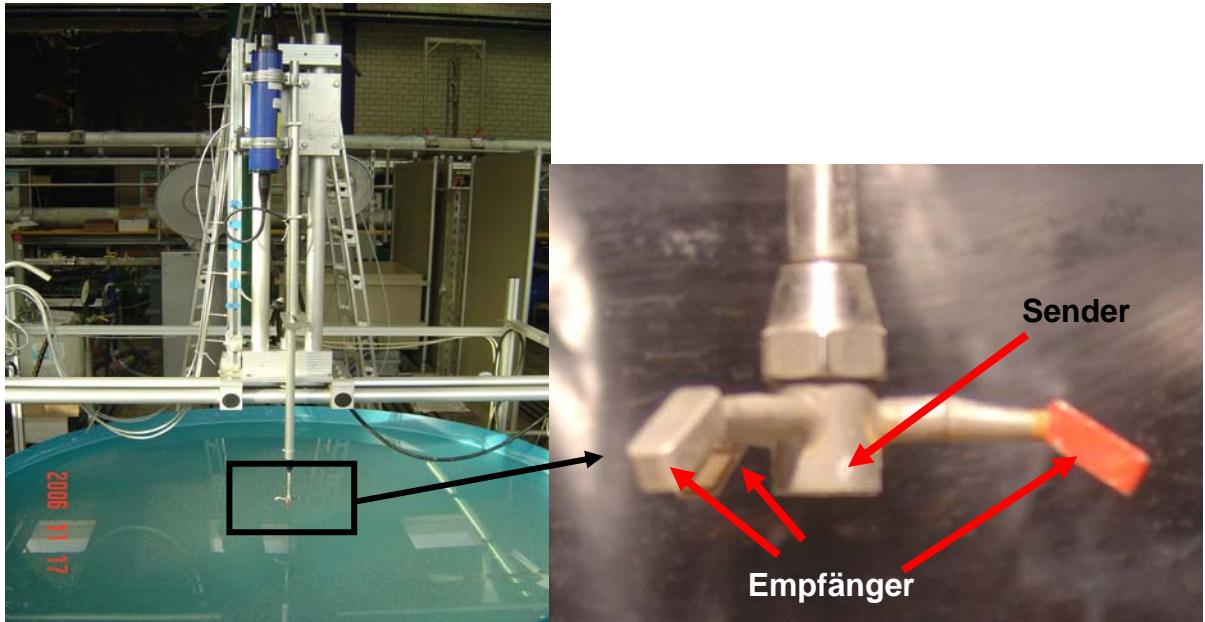


Abb. 6: ADV Sonde

Die Re-Zahl kann im Modell nicht eingehalten werden. Die Drehzahl müsste dann so klein sein, dass die Unsicherheiten in den Geschwindigkeitsmessungen zu gross wären.

Für den Vergleich der verschiedenen Propellerformen lag die Re-Zahl zwischen 10'000 und 100'000. Dadurch sind die Resultate nicht direkt übertragbar, ermöglichen aber eine qualitative Beurteilung.

3 Ergebnisse

Das Vorgehen der Optimierung wurde in Kap. 2.2 beschrieben. Hier werden die Resultaten der einzelnen Schritte dargestellt.

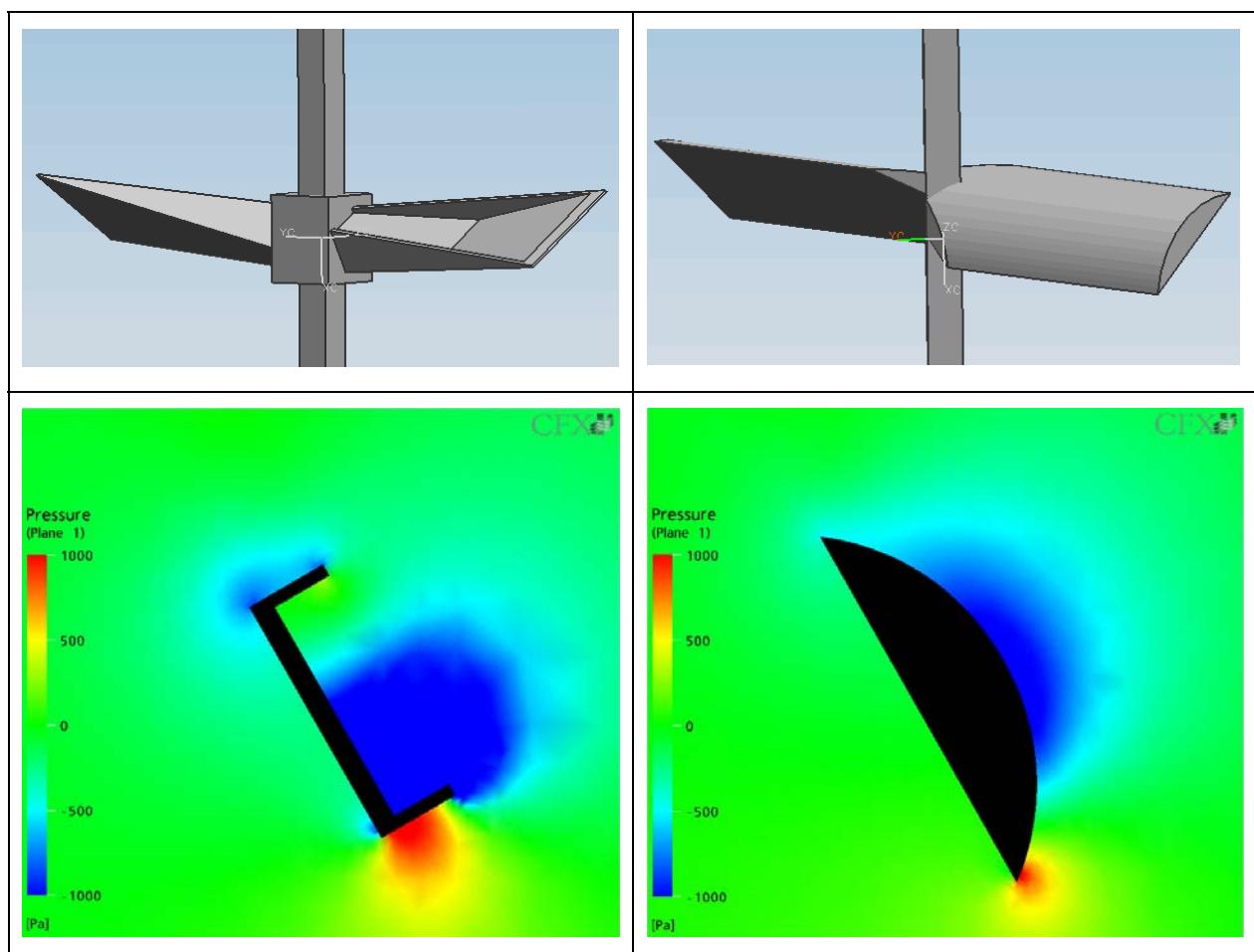
3.1 Berechnungen 2D-Profil

Im ersten Schritt der Optimierung wurden 2D Profile für den Propeller definiert und berechnet. Die Referenz für die Verbesserungsvorschläge sind die Resultate des bestehenden Profils.

Abb. 7 zeigt ein exemplarischer Vergleich zwischen bestehender und optimierter Geometrie.

Aus dem Druckverlauf ist ersichtlich, dass die bestehende Variante erwartungsgemäss ein grosses Störungsfeld erzeugt, vorwiegend an der Ober- aber auch an der Unterseite des Flügels. Die optimierte Variante zeigt hingegen ein nahezu symmetrischer Verlauf des Drucks über die Profilsehne.

Die Betrachtung der Geschwindigkeitsvektoren zeigt, dass beide Profile eine Ablösung an der Saugseite verursachen. Während für die bestehende Geometrie diese Tatsache naheliegend ist, könnte man aus der aerodynamischeren Gestaltung der optimierten Variante erwarten, dass die Strömung über die gesamte Profilsehne anliegt. Der Grund ist, dass übliche Tragflügel in einem Re-Zahl Bereich von 100'000 bis 10'000'000 oder sogar darüber eingesetzt werden, d.h. in einer turbulenten Strömung. In diesem Fall beträgt die Re-Zahl ca. 1000. Die Strömung ist laminar, kann dem Druckanstieg im hinteren Bereich nicht standhalten und löst dementsprechend ab.



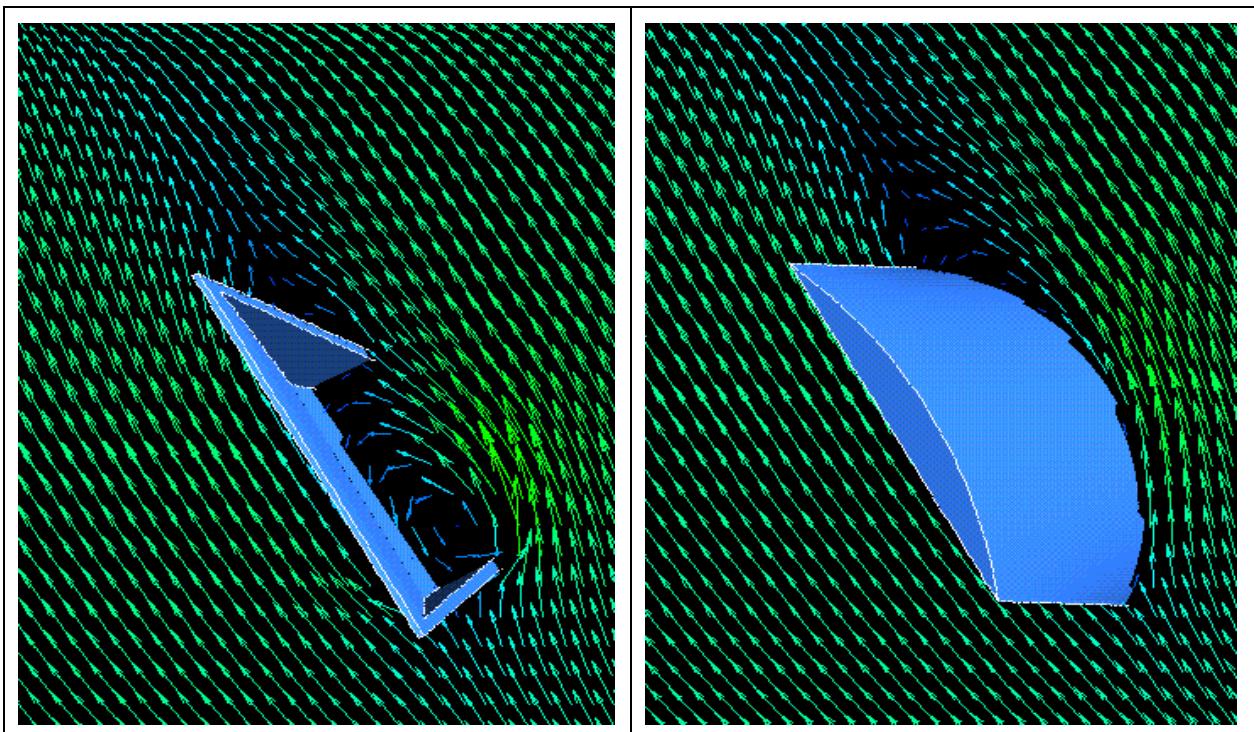


Abb. 7: Exemplarischer Vergleich zwischen bestehender und optimierter Geometrie. Druckverlauf und Geschwindigkeitsvektoren.

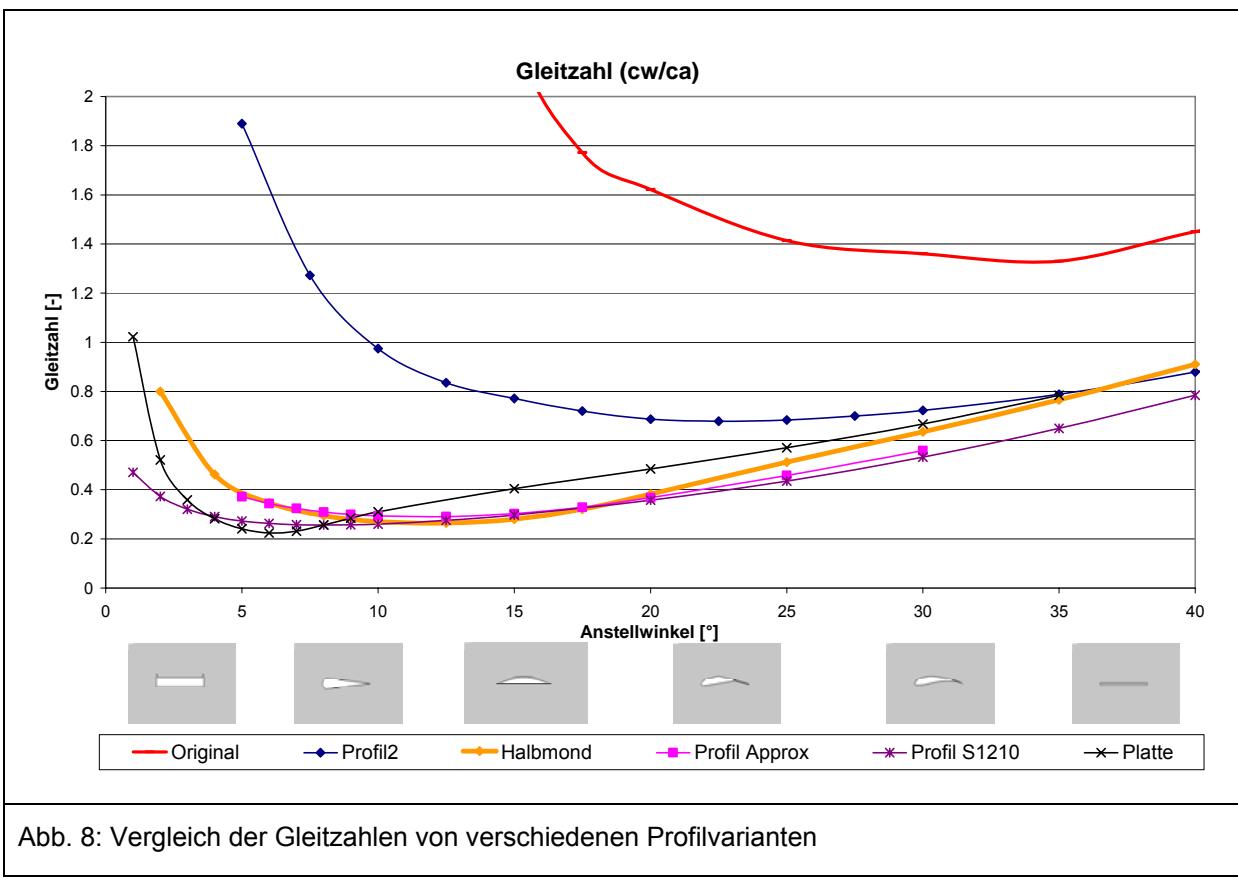


Abb. 8: Vergleich der Gleitzahlen von verschiedenen Profilvarianten

Verschiedenen Profile wurden definiert und anhand der Gleitzahl verglichen. Die Gleitzahl ist das Verhältnis zwischen Widerstands- und Auftriebskraft. Je tiefer die Gleitzahl, desto besser ist das Profil, da bei einem gegebenen Widerstand ein höherer Auftrieb erzeugt wird. Auf den Propeller übertragen heisst das, dass für eine gegebene Antriebsleistung der Schub grösser wird.

Abb. 8 zeigt für verschiedene, ausgewählte Profile den Verlauf der Gleitzahl in Abhängigkeit des Anstellwinkels.

Als Referenz wird das Originalprofil genommen. Es ist klar ersichtlich, dass die Gleitzahl sehr schlecht ist, da sie immer über 1 liegt. Die besten Werte werden bei sehr hohen Anstellwinkeln erreicht, wo die Strömung an der Saugseite sowieso komplett abgelöst ist.

Als erste Variante wurde die in der Grafik als Profil2 bezeichnete Geometrie berechnet. Konstruktiv ist diese Variante sehr einfach, da die Vorderkante durch ein Rohr gebildet ist und Saug- bzw. Druckseite ebene Platten sind, die am Rohr und an der Hinterkante verschweisst werden. Die Gleitzahl ist schon deutlich besser. Die Analyse der Strömung zeigt aber, dass die starke Krümmungsänderung zwischen Vorderkante und Saugseite für die herrschenden laminaren Bedingungen von Nachteil sind, da an diesem Punkt die Ablösung bereits bei kleinen Anstellwinkeln anfängt.

Zahlreiche weitere Varianten wurden berechnet. Der beste Kompromiss zwischen einer günstigen Herstellung und guten hydrodynamischen Eigenschaften ist das Halbmondprofil. Verglichen mit der Originalvariante ist die minimale Gleitzahl um einen Faktor 6 reduziert worden. Der optimale Anstellwinkel ist halb so gross wie beim herkömmlichen Profil.

Drei weitere Varianten sind in Abb.8 dargestellt. „Profil S1210“ ist ein sog. „Low Speed Airfoil“, mit sehr guten Gleiteigenschaften. Es zeigt über den gesamten Bereich die besten Werte. „Profil Approx“ ist eine günstig herstellbare Variante von Profil S1210, die aus Ebenen und gekrümmten Platten zusammengesetzt ist. Die Verschlechterung ist sichtbar, aber gering. Verglichen mit dem Halbmondprofil ist „Profil Approx“ besser, aber bezogen auf die Verbesserung zum Original nur geringfügig besser. Der deutlich grössere Aufwand in der Herstellung war für die Auswahl vom Halbmondprofil ausschlaggebend.

Als letzte Variante wurde eine ebene Platte untersucht. Diese zeigt für einen sehr kleinen Anstellwinkelbereich die besten Gleitwinkel. Wegen der „fehlenden Dicke“ ist aber bei grösseren Anstellwinkeln eine schnelle Verschlechterung im Vergleich zu den anderen Profilen sichtbar. Die besten Werte sind folgendermassen zu erklären: fliddynamisch gesehen ist eine (gekrümmte) unendlich dünne Platte die beste Schaufel, wenn eine vordefinierte Umlenkung der Strömung erreicht werden soll. Die Platte führt nämlich zu keiner unnötigen Beschleunigung bzw. Verzögerung. Leider ist aber eine Platte konstruktiv nicht stabil genug, um die Kräfte aufnehmen zu können, vor allem in Flüssigkeiten. Dazu kommt, dass wegen der sehr dünnen Vorderkante jede Fehlanströmung zu einer Ablösung führt, die üblicherweise von Nachteil ist. Bei sehr kleinen Anstellwinkel, um 5° , ist aber bekannt (siehe z.B. [6] und [7]), dass die Vorderkantenablösung zu einer günstigen Umströmung der Platte führt, was in Abb. 8 bestätigt wird.

Es ist zu erwähnen, dass bei turbulenter Strömung ($Re > 100'000$) die Gleitzahl von Tragflügelprofilen im Bereich von 0.05 liegen.

3.2 3D Rohrsimulationen

Mit den Erkenntnissen aus den 2D Simulationen werden Propellerflügel modelliert. Der Anstellwinkel, die Grundfläche und der Verlauf des Dickenverhältnisses sind die zu optimierenden Parameter. Die Flügel werden dann in einem Rohr simuliert. Damit können die Randbedingungen konstant und der Rechenaufwand für systematische Vergleiche in Grenzen gehalten werden.

Die Erweiterung von 2D auf 3D Profile führt in der Regel zu verwundenen Profilen, da die Umfangsgeschwindigkeit mit dem Radius zunimmt, während die Zuströmgeschwindigkeit (im Absolutsystem) konstant bleibt. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Strömungswinkel über den Radius, was mit einer Verwindung des Flügels berücksichtigt werden kann.

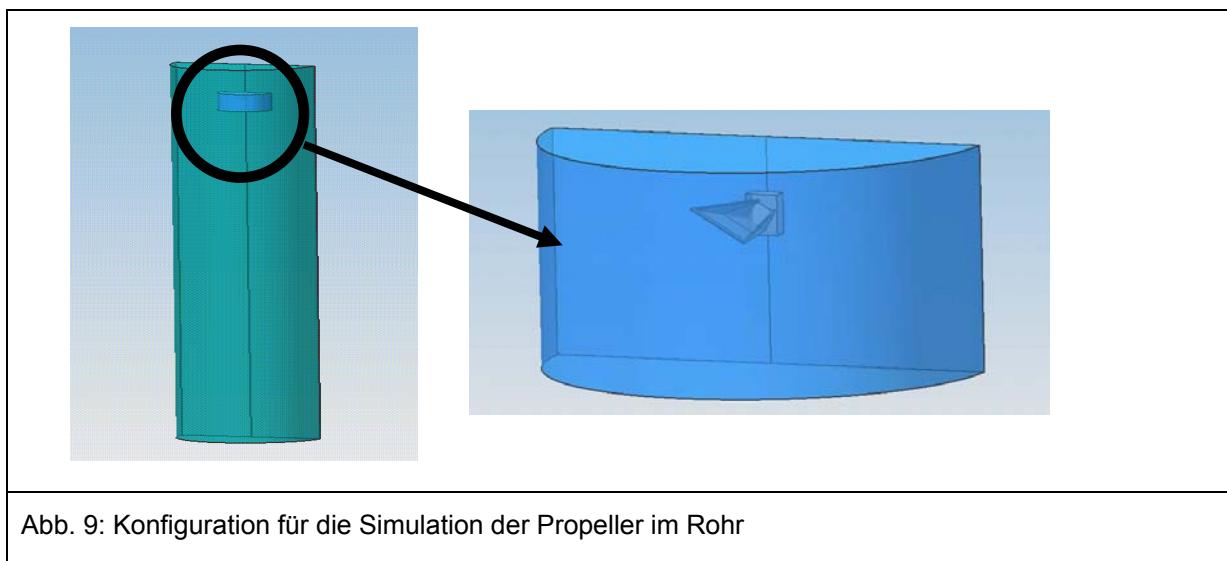
Fluiddynamisch ist eine solche Lösung sehr gut, aber konstruktiv, mit gebogenem Blech, fast nicht umsetzbar. Die Druckseite bleibt deswegen als ebene Platte beibehalten. Die Strömungswinkeländerung über den Radius wird mit einer Anpassung der Dicke berücksichtigt. Die Überlegung dabei ist, dass eine Ablösung, aufgrund der laminaren Bedingungen, Saugseitig praktisch nicht zu vermeiden ist. Mit der Anpassung der Dicke (schmal aussen) und die Verlegung der Stelle mit maximaler Dicke nach hinten, wird die negative Wirkung der Ablösung geschwächt.

Bei der Simulation wird die Rotationssymmetrie genutzt und nur die Hälfte des Rohrs mit einem Propeller berechnet (Abb. 9). Dabei werden bei konstanter Drehzahl verschiedene Zuströmgeschwindigkeiten am Rohreintritt vorgegeben (Die 3D Simulationen des ganzen Beckens haben ergeben, dass die Axialgeschwindigkeit im Bereich von 0.4 bis 0.5 m/s ist). Ausgewertet werden neben den Strömungsbedingungen die Schubleistung und die Antriebsleistung. Das Verhältnis dieser zwei Größen ergibt den Wirkungsgrad, der in Abb. 10 dargestellt ist.

$$\text{Schubleistung: } P_{Hyd} = F_{ax} \cdot c_{ax}$$

$$\text{Antriebsleistung: } P_{Mech} = M \cdot \omega$$

$$\text{Wirkungsgrad: } \eta = \frac{P_{Hyd}}{P_{Mech}}$$

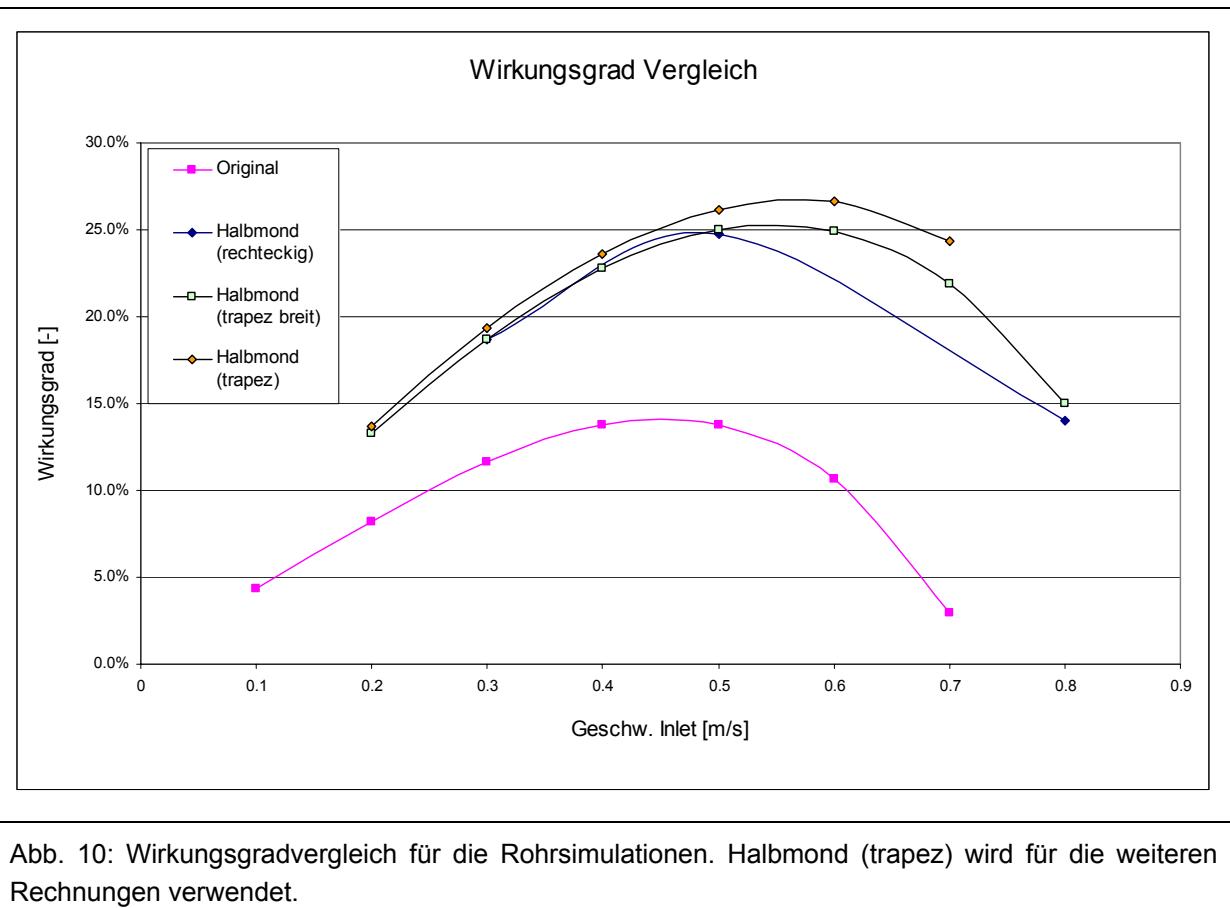


Beim Halbmondprofil werden verschiedene Grundflächen der Druckseite eingesetzt. Als erstes wird eine rechteckige Druckseite verwendet. Dies ergibt gute Resultate über den gesamten Geschwindigkeitsbereich.

Der Energieertrag in der Strömung wird mit zunehmendem Radius grösser, vor allem wenn die Umlenkung praktisch konstant bleibt. Daher wird eine Trapezförmige Druckseite gewählt, ähnlich wie beim herkömmlichen Propeller. Dadurch ist die Fläche Aussen gross und es kann entsprechend mehr Energie dem Fluid zugeführt werden. Außerdem kann der Wirkungsgrad vor allem bei grossen Zuströmgeschwindigkeiten weiter angehoben werden.

Die Variante Halbmond (Trapez), welche die gleiche Druckseite hat wie das Originalprofil, wird für die 3D Beckensimulationen eingesetzt.

Abb. 11 zeigt die axiale Geschwindigkeitskomponente im Rohr. Der Originalpropeller erzeugt lokal grosse Geschwindigkeiten, gleichzeitig aber auch grosse Geschwindigkeitsgradienten, die zu starken Verlusten führen. Es entsteht ein grosses Rückströmgebiet im Zentrum des Propellernachlaufes, was die Wirkung des Strahls schmälert. Die Halbmondgeometrie zeigt hingegen weniger extreme Werte, dafür einen sehr breiten Strahl, was im Becken zu einer globalen Bewegung führt, statt zu lokalen Verwirbelungen.



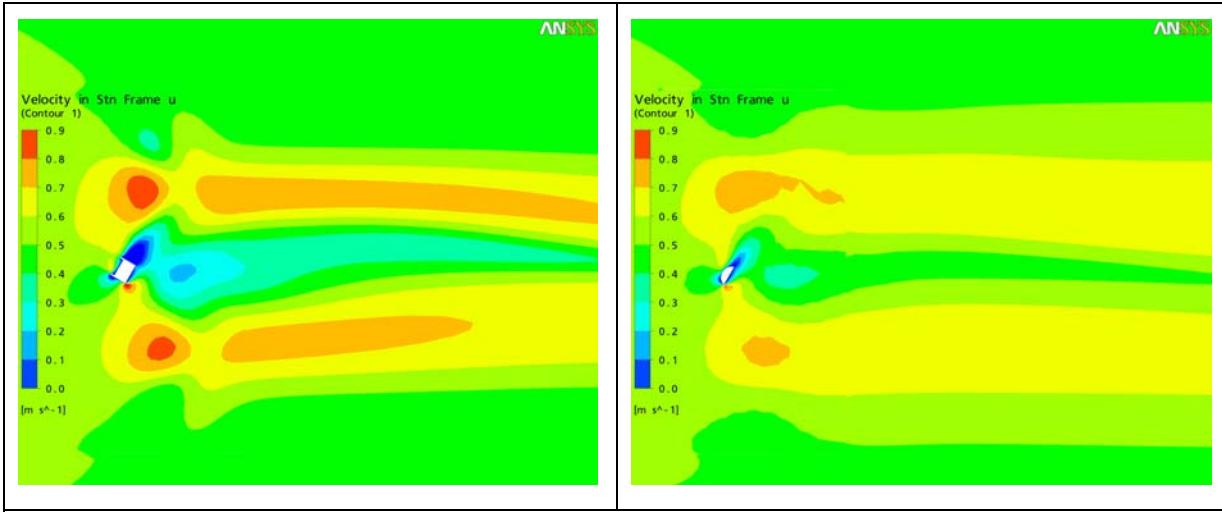


Abb. 11: Vergleich der Strömung in der Rohrsimulation. Original- vs. Halbmondprofil.

3.3 3D Beckensimulationen

Die Wirkung der Propeller wird durch 3D Simulationen des gesamten Beckens untersucht. Dieser hat folgende Dimensionen: 16m Durchmesser und 6m Höhe.

Da die Strömung keinen stationären Zustand erreicht, müssen transiente Berechnungen durchgeführt werden. Wie in Kap. 2 angegeben, dauert eine solche Rechnung auf 10 Prozessoren ca. 5 Tage. Dabei werden 3 Minuten in Echtzeit, vom Ruhezustand aus, simuliert.

Für die Auswertung werden sowohl globale Größen, wie die Leistungsaufnahme oder die kinetische Energie im Becken, wie auch lokale Momentenaufnahmen der Strömung, verwendet.

Vor dieser Untersuchung wurden immer 3 Propeller à 2 m und 1 Propeller à 3 m Durchmesser an der Welle montiert. Damit konnte eine genügend grosse Bewegung im Becken erreicht werden. Aus Fertigungsgründen ist es aber wünschenswert, alle Propeller gleich gross zu machen. Deshalb werden folgende Varianten berechnet und verglichen:

- Originalprofil, 3x 2m + 1x 3m
- Originalprofil, 4x 2m
- Halbmondprofil, 4x 2m
- Halbmondprofil, 4x 2.3m
- Halbmondprofil, 3x 2.3m

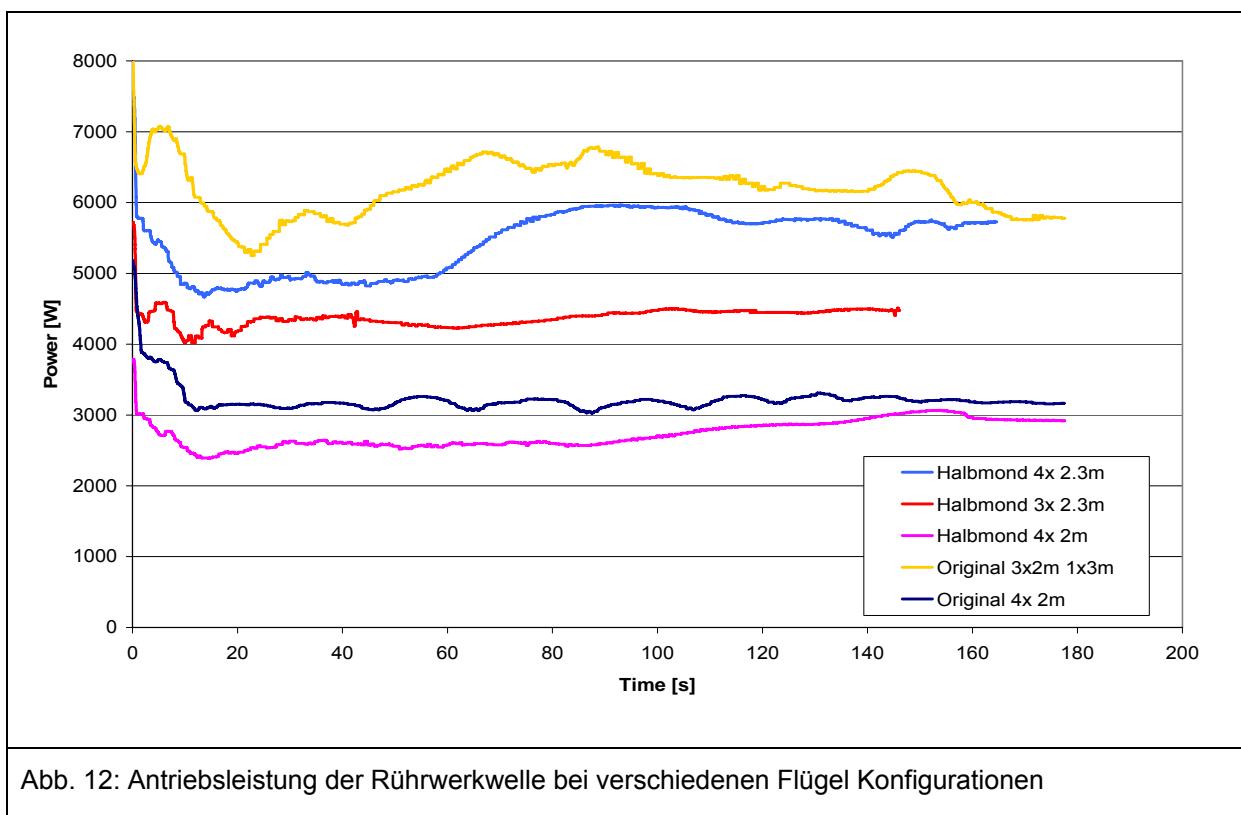
Der direkte Vergleich zwischen Original- und Halbmondprofil erfolgt anhand der 4x 2m Konfigurationen. Zusätzlich werden die neuen Propeller mit 2.3m Durchmesser, in einer 4er und einer 3er Variante berechnet.

3.3.1 Globale Vergleiche

Abb. 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistungsaufnahme von den oben erwähnten Konfigurationen. Der direkte Vergleich zwischen Original- und Halbmondprofil (4x 2m Anordnung) zeigt, dass das Halbmondprofil zirka 10 bis 20% weniger Leistung aufnimmt. Für einen Vergleich muss aber auch die Wirkung auf die Strömung betrachtet werden. Als Mass für die Rührwirkung, wird die kinetische Energie des Fluids genommen. Den zeitlichen Verlauf der kinetischen Energie ist in Abb. 13 dargestellt.

Aus diesen Kennlinien ist klar ersichtlich, dass mit den neuen Propellern trotz kleinerer Leistungsaufnahme eine deutlich grössere Bewegung im Becken erzielt wird. Bei 180s ist die kinetische Energie im Becken 2.5 Mal grösser als mit den herkömmlichen Propellern.

Zudem scheint es so, als würde bei der Originalvariante eine Art Maximum oder Plateau erreicht sein, während die neuen Propeller die Strömung immer noch beschleunigen.



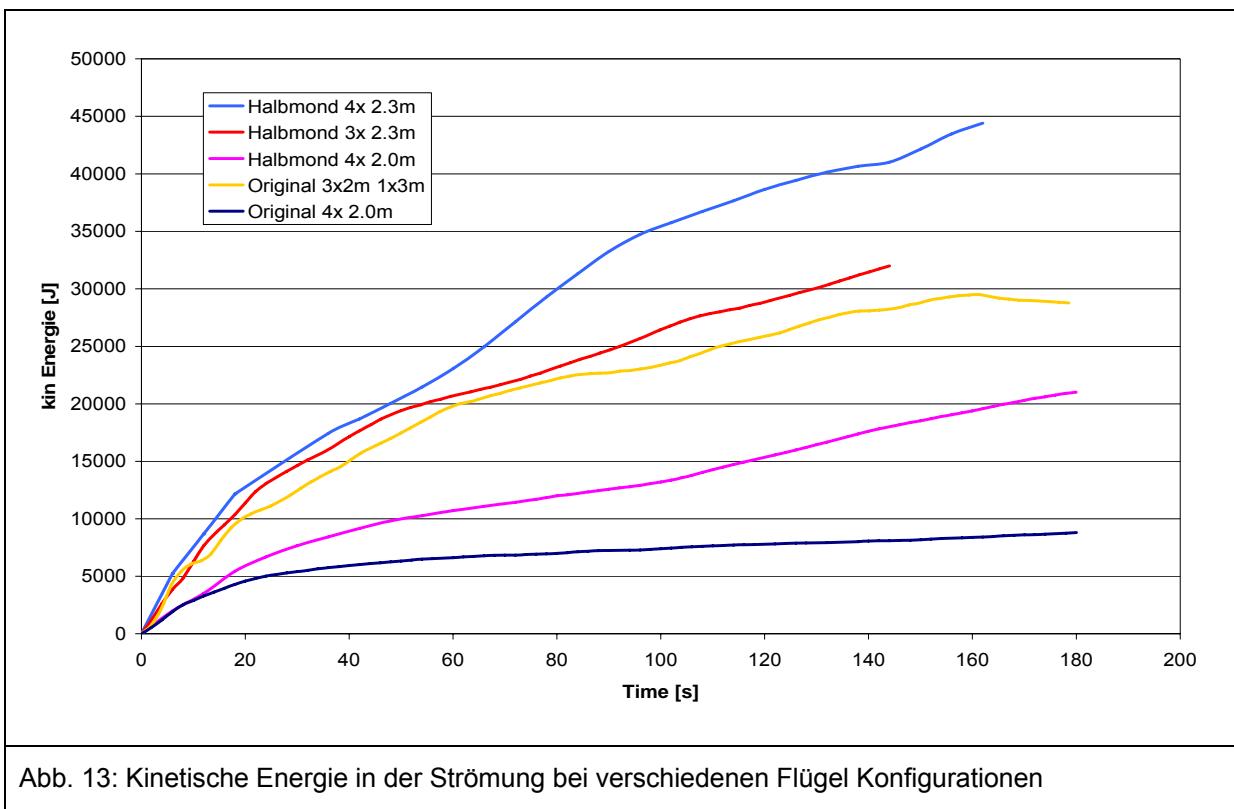


Abb. 13: Kinetische Energie in der Strömung bei verschiedenen Flügel Konfigurationen

Aus diesen globalen Informationen kann eine Art Wirkungsgrad berechnet werden. Der Aufwand ist dabei die vom Propeller aufgenommene Energie, welche durch die Integration der Leistung berechnet werden kann. Der Nutzen ist die in dem Fluid vorhandene kinetische Energie.

$$\text{Wirkungsgrad: } \eta = \frac{E_{kinFluid}}{\int P_{Mech} \cdot dt}$$

Konfiguration	Wirkungsgrad
Original 3x 2m + 1x 3m	2.61 %
Original 4x 2m	1.53 %
Halbmond 4x 2m	4.31 %
Halbmond 4x 2.3 m	4.91 %
Halbmond 3x 2.3 m	5.00 %

Der Vergleich der zwei Originalkonfigurationen zeigt, dass der Einsatz eines Propellers mit grossem Durchmesser den Wirkungsgrad steigert. Nach der Newton Zahl ist die Leistung proportional zur fünften Potenz des Durchmessers. Die kleinen Propeller erzeugen hauptsächlich eine lokale

Vermischung. Grosse Propeller sind deutlich wirksamer, wenn eine globale Strömung erzeugt werden soll.

Der Vergleich zwischen Original und Halbmond mit vier gleichen Flügel à 2m bestätigt die deutlich bessere Energieumwandlung. Der so definierte Wirkungsgrad ist praktisch um den Faktor drei gestiegen.

Wie bereits erwähnt, ist ein einheitlicher Propellerdurchmesser aus wirtschaftlichen Gründen erwünscht. Die neue Propellerkonfiguration soll aber mindestens die gleiche kinetische Energie erzeugen, wie die Originalkonfiguration. Es wird eine Konfiguration mit 4 Halbmondpropellern, je à 2.3 m Durchmesser zusammengestellt und simuliert.

Abb. 13 zeigt, dass die vier Halbmond 2.3m Propeller, bei kleinerer Leistungsaufnahme, im Vergleich zu den Original Propellern 3x2m 1x3m, zirka 50% mehr kinetische Energie erzeugen.

Vergleicht man die beiden Halbmond Propeller mit 4x2m und 4x2.3m so sieht man, dass mit grösserem Durchmesser der Wirkungsgrad steigt, wie bereits oben vermutet.

Es wird noch eine Konfiguration mit 3x 2.3 m Propeller gerechnet, um zu untersuchen, ob auch so genügend Bewegung im Becken erzeugt werden kann. Die Einsparung eines Propellers würde die Investitionskosten des Rührwerks senken. Die Resultate zeigen, dass eine leicht höhere kinetische Energie erreicht wird als im Referenzfall (13% höher), aber mit einem nahezu doppelten Wirkungsgrad.

Ein Vergleich des Wirkungsgrades der Konfigurationen Halbmond 3x 2.3m und 4x 2.3 m zeigt, dass die Werte sehr ähnlich sind. Das erhärtet die Vermutung, dass der Wirkungsgrad mit dem Durchmesser gekoppelt ist. Die leichte Verbesserung in der Konfiguration mit 3 Propellern ist wahrscheinlich auf den grösseren Abstand zwischen den einzelnen Propeller zurückzuführen. Mit grösserem Abstand ist die Wechselwirkung zwischen den Flügelpaaren geringer.

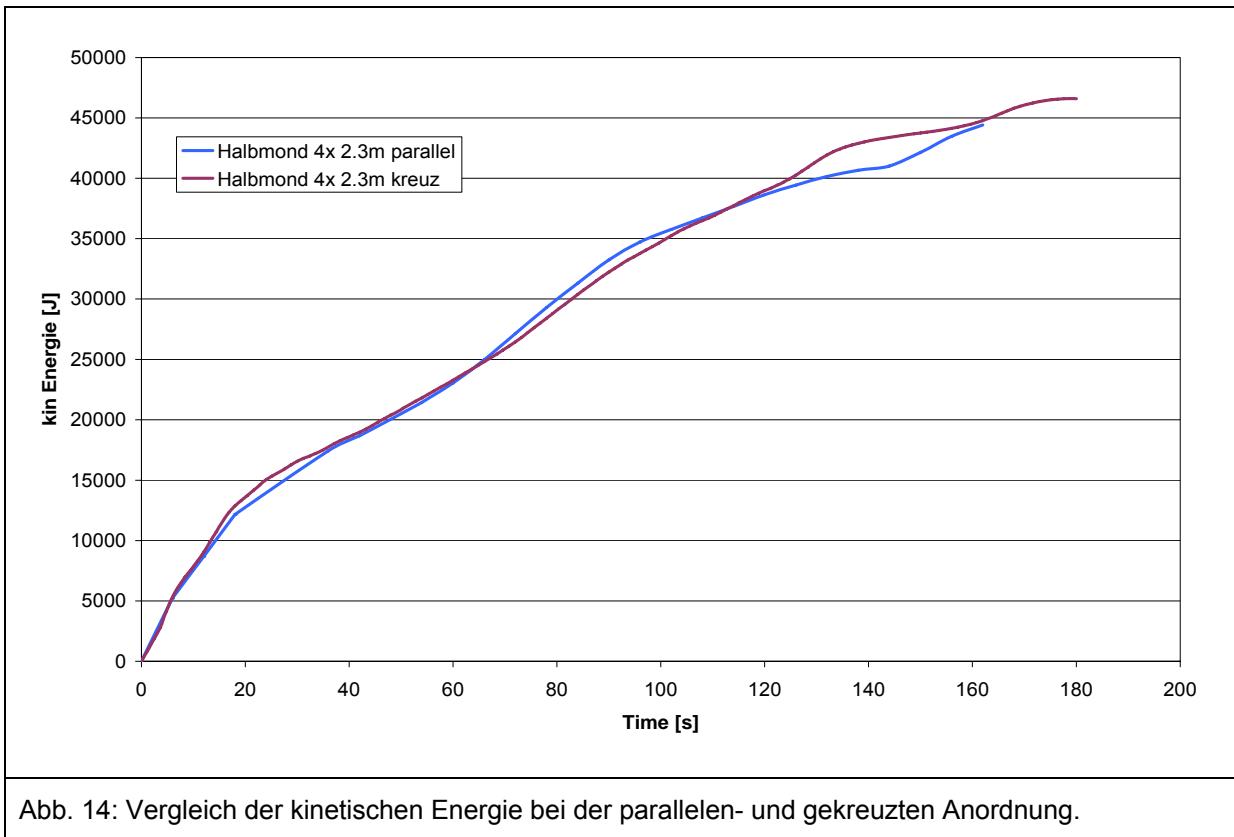
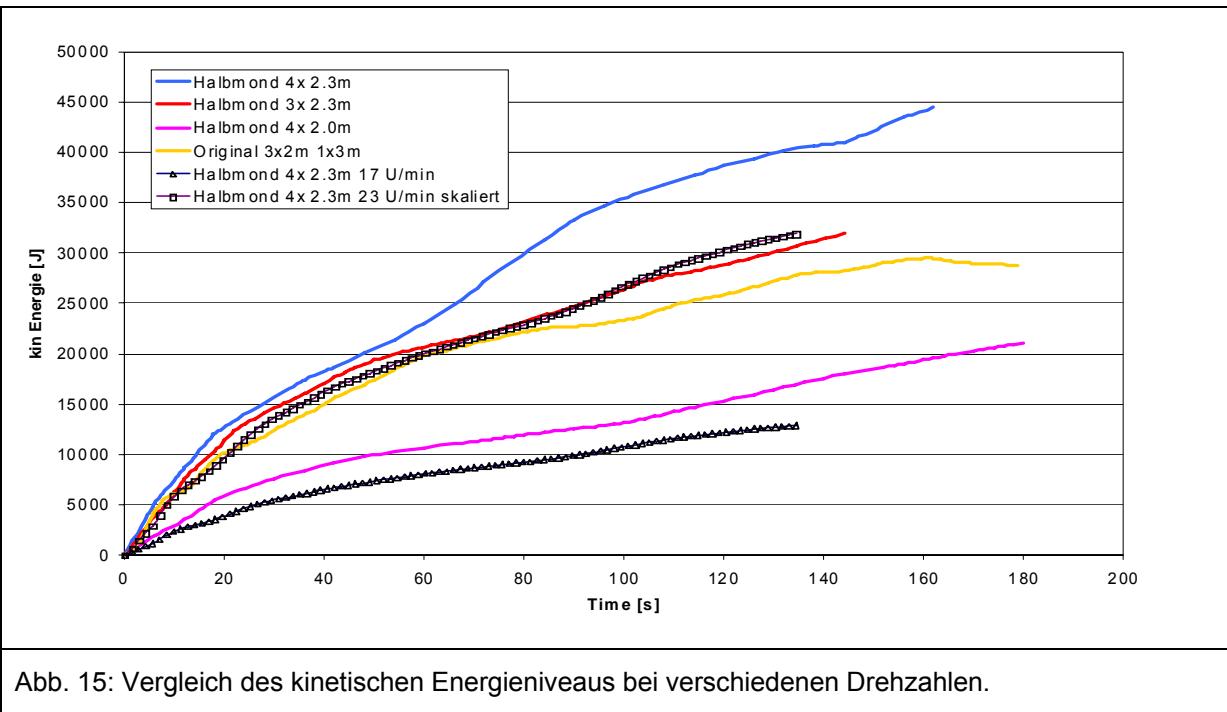


Abb. 14: Vergleich der kinetischen Energie bei der parallelen- und gekreuzten Anordnung.

Abb. 14 zeigt, dass die Anordnung der Flügelpaare, ob parallel oder gekreuzt, keinen wesentlichen Einfluss auf die übertragene kinetische Energie hat. Die Leistungsaufnahme verhält sich ähnlich.

Der Einfluss der Drehzahl wurde ebenfalls untersucht. Wie aus der Dimensionsanalyse zu erwarten, hat die Drehzahl eine sehr grosse Wirkung auf die kinetische Energie. Das zeigt eine Simulation, welche mit 17 U/min durchgeführt wurde (alle anderen Simulationen wurden mit 25 U/min berechnet, vgl. Abb. 15). Das kinetische Energieniveau sinkt drastisch. Zur Überprüfung der Modelltheorie wurde die 17 U/min-Kurve auf 25 U/min skaliert (zur Erinnerung: die Leistung und entsprechend die Energie sind proportional zur dritten Potenz der Drehzahl). Die Übertragung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Mit dieser Information können in Produktionsanlagen gezielte Anpassungen der aufgenommenen Leistung (und entsprechend erreichbare kinetische Energieniveaus) mit der Drehzahl unternommen werden. Man könnte z.B. mit einem 4 Halbmondpropeller Rührer bei 23 U/min fahren und würde ein ähnliches Resultat erreichen wie mit 3 Halbmondpropeller bei 25 U/min.



3.3.2 Lokaler Vergleich

Die CFD bietet die Möglichkeit, die lokalen Verhältnisse auch dann zu analysieren, wenn Messungen und Beobachtungen (praktisch) unmöglich sind.

Die Strömung im Behälter ist stark dreidimensional. Neben Bewegungen in Umfangsrichtung ist auch eine vertikale Komponente vorhanden, die das Schichten verhindern soll.

Beim ersten Vergleich (Abb. 16 bis 19) werden die Umfangsgeschwindigkeiten betrachtet. Diese zeigen wie gut das Fluid im Becken bewegt wird. Bei sechs verschiedenen Höhen (0.1, 1, 2, 3, 4 und 5 m) wird die Auswertung durchgeführt. Betrachtet werden die gleichen Konfigurationen wie für den globalen Vergleich.

Der Vergleich der zwei Originalvarianten, 4x 2m und 3x 2m 1x3m Propeller zeigt eindeutig, dass mit den grösseren Flügelpaaren deutlich höhere Geschwindigkeiten erreicht werden und vor allem eine globale Bewegung erzeugt wird. Während im 4x 2m Fall im gesamten Becken die Geschwindigkeiten unter 0.2 m/s bleiben (abgesehen von lokalen Spitzen um den Propeller), sind im Fall 3x 2m + 1x3m ausgedehnte Bereiche mit grösseren Geschwindigkeiten, teilweise über 0.3 m/s vorhanden, und das über die gesamte Beckenhöhe. Die grösssten Werte sind entlang der Wand zu beobachten, was eine Bewegung im ganzen Becken verursacht.

Mit den kleinen Propellern ist hingegen die Geschwindigkeit an der Wand nur bis zur Beckenmitte hoch. Auf der gegenüberliegenden Seite des Propellers ist das Fluid praktisch ohne Bewegung.

Wenn beide 4x 2m Varianten (mit Original- und Halbmondprofil) verglichen werden, ist die Wirkung der neuen Geometrie eindeutig. Über die ganze Höhe des Beckens sind deutlich grössere Umfangsgeschwindigkeiten zu beobachten, vor allem im oberen Bereich. Der wandnahe Strahl bleibt bis zur gegenüberliegende Seite des Propellers bestehen.

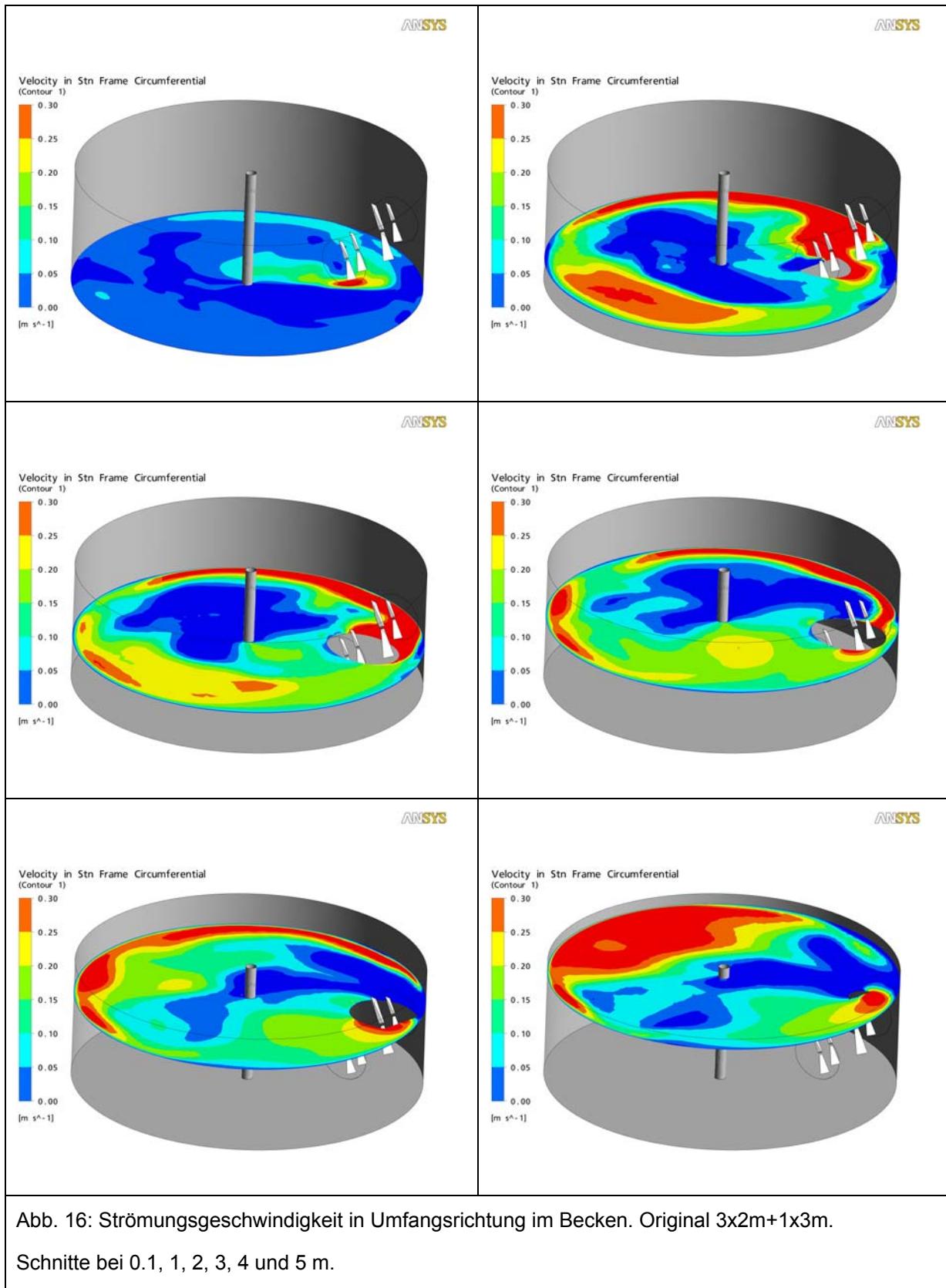


Abb. 16: Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung im Becken. Original 3x2m+1x3m.

Schnitte bei 0.1, 1, 2, 3, 4 und 5 m.

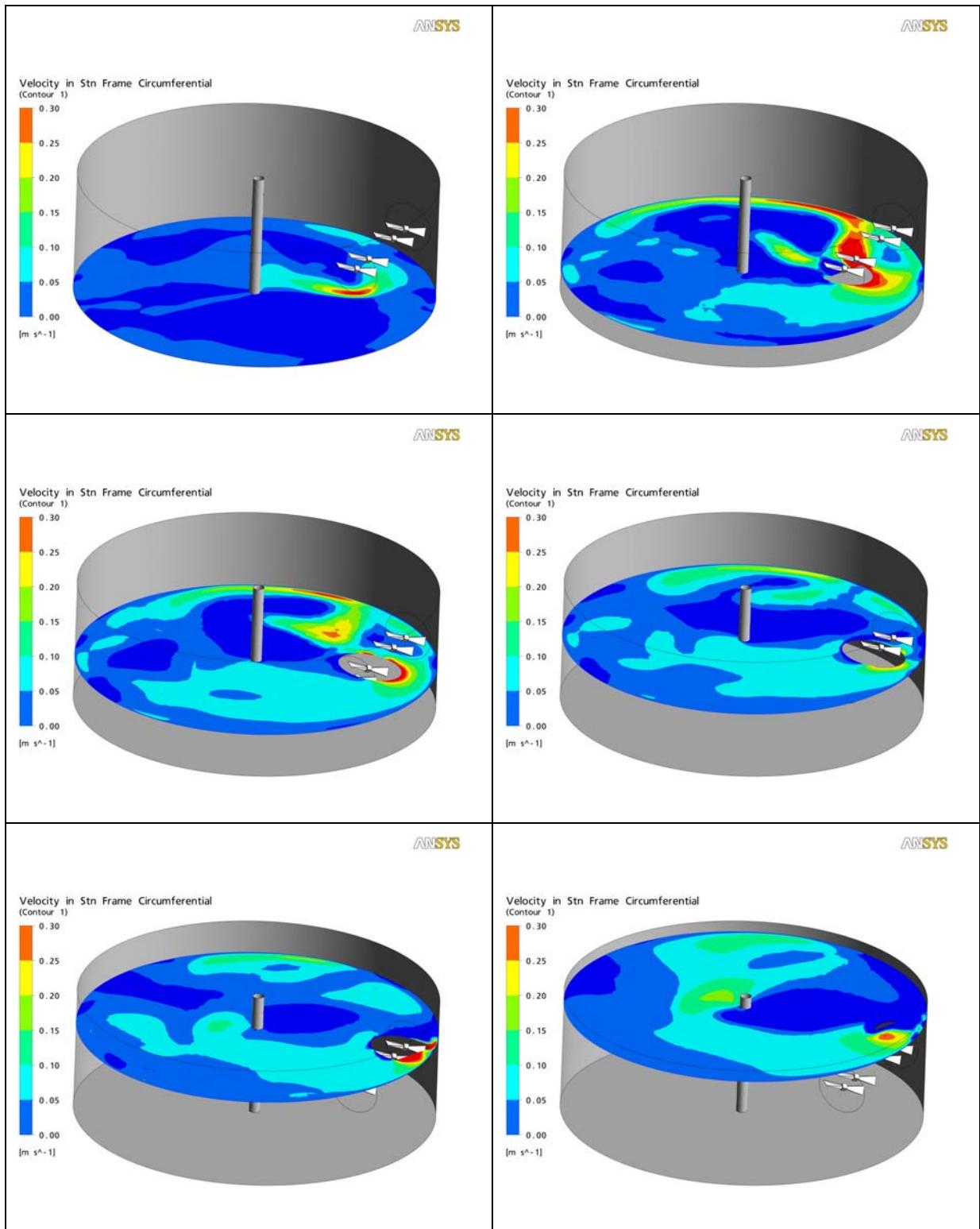


Abb. 17: Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung im Becken. Original 4x2m

Schnitte bei 0.1, 1, 2, 3, 4 und 5 m.

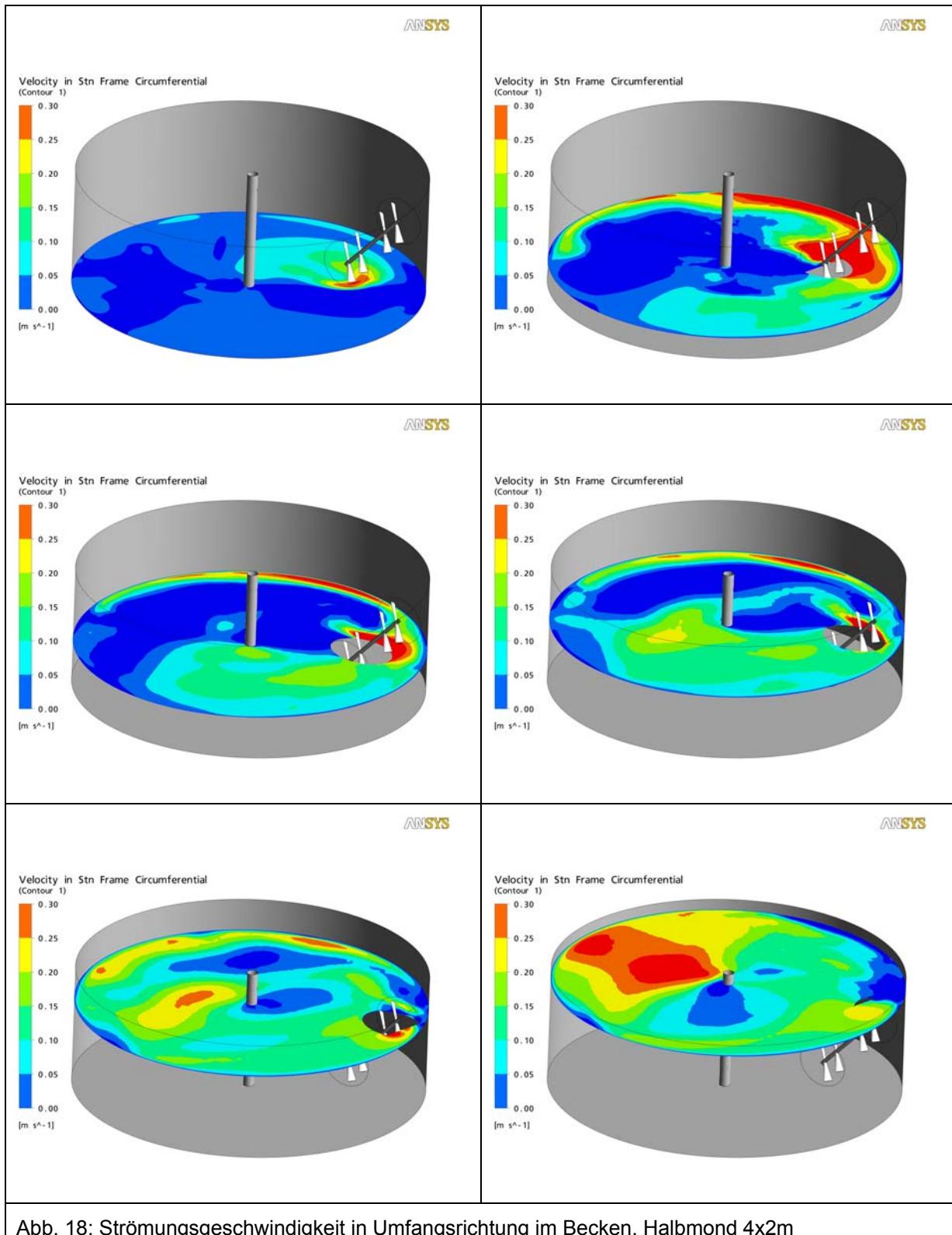
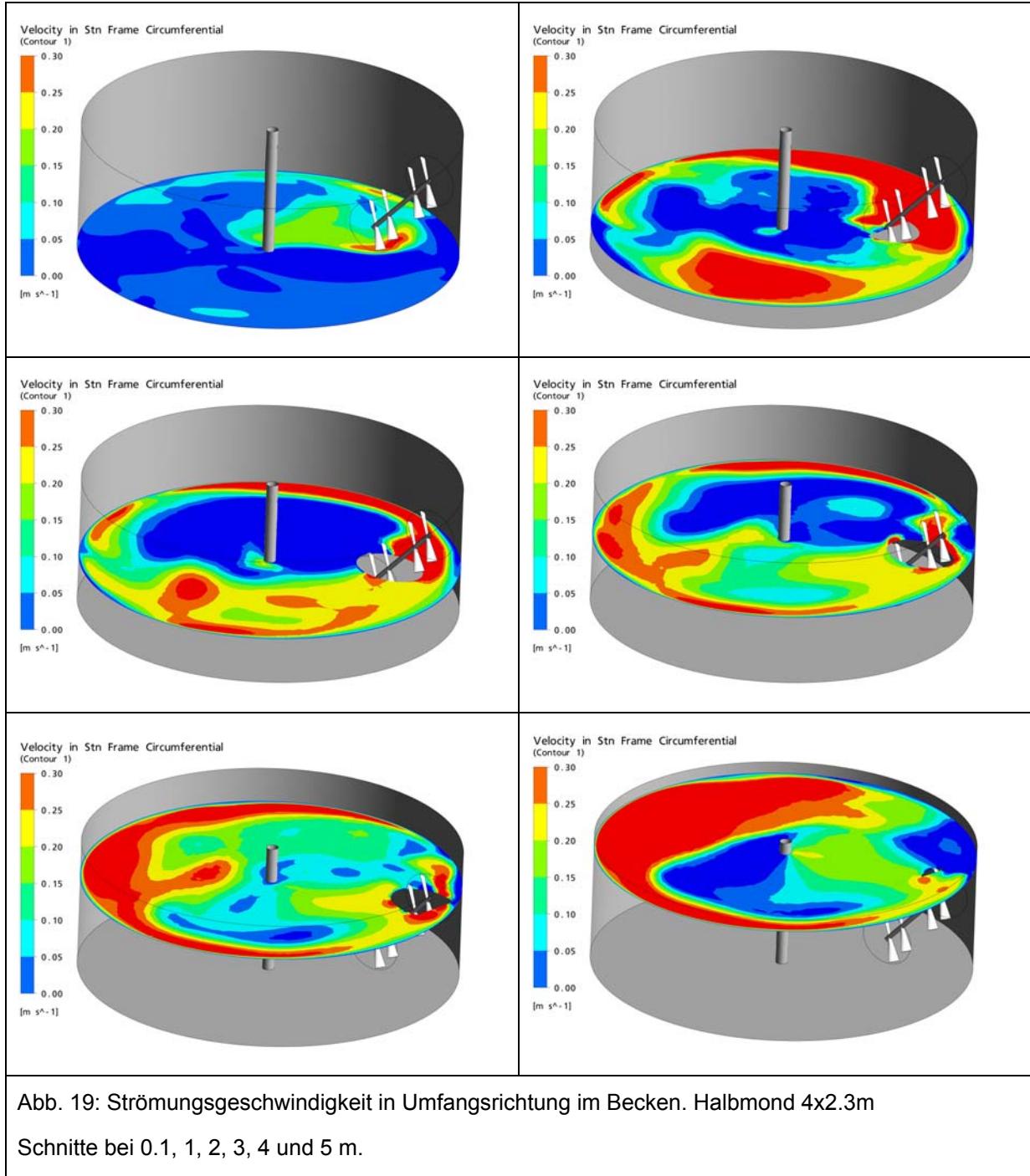


Abb. 18: Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung im Becken. Halbmond 4x2m

Schnitte bei 0.1, 1, 2, 3, 4 und 5 m.

Die Rührwerkanordnung Halbmond 4x 2.3 m zeigt eine ähnliche Strömung, wie die des Original 3x2m + 1x 3m. Im gesamten Becken ist die Strömungsgeschwindigkeit auf einem deutlich höheren Niveau als mit den 2m Propellern. Der Wandnahe Strahl ist in der Nähe der Propeller tief und kommt auf der gegenüberliegenden Seite zur Oberfläche.

Die kritische Tiefe scheint in allen Fällen bei etwa 2 m zu sein. Dort sind am häufigsten Bereiche mit tiefer Umfangsgeschwindigkeit zu finden.

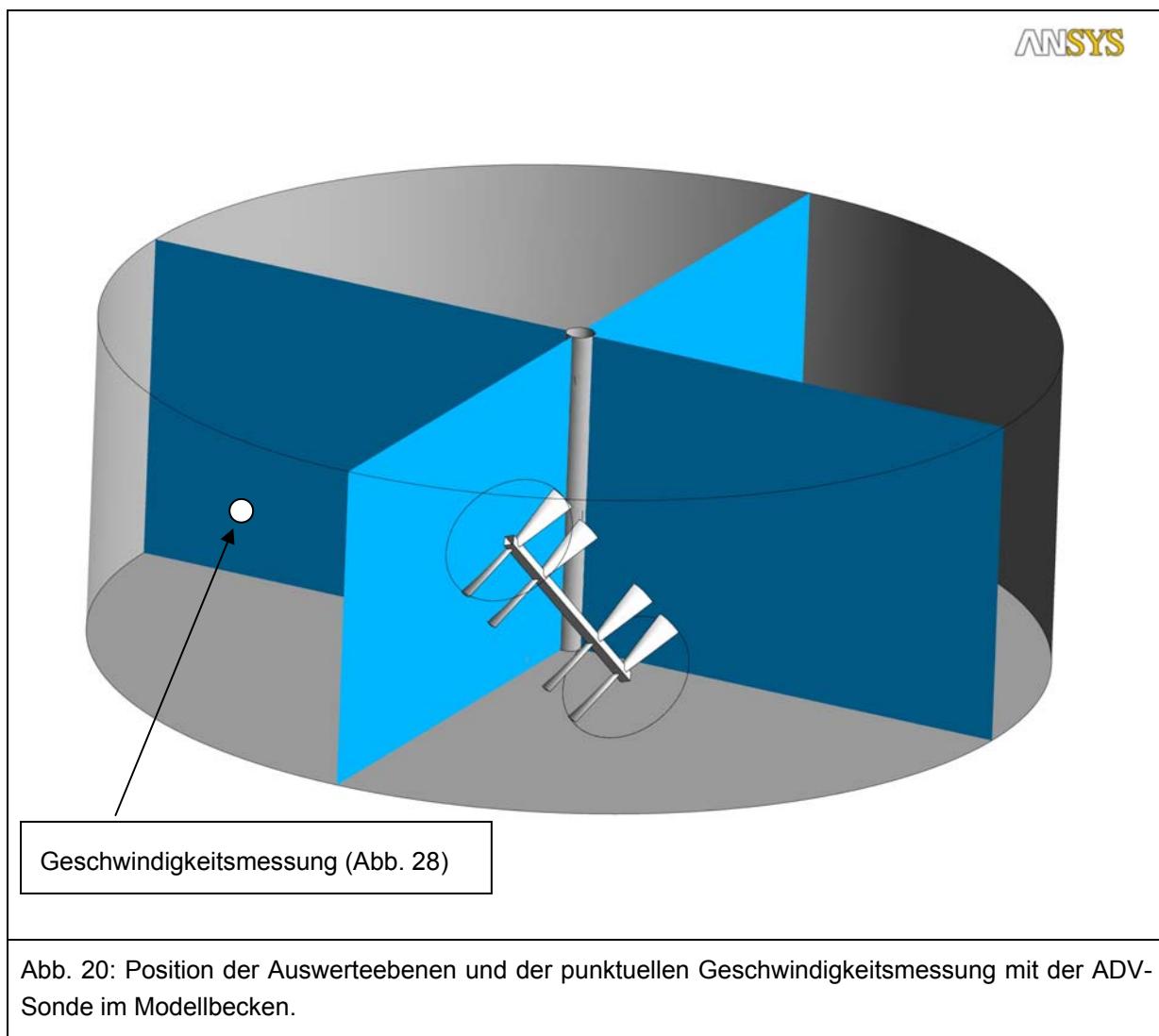


Beim nächsten Vergleich werden die Absolutgeschwindigkeiten an zwei senkrechten Schnitten analysiert (vgl. Abb. 20 für die Schnittposition bzw. Abb. 21 bis 25 für die Resultate). Dazu sind normierte Geschwindigkeitsvektoren eingezeichnet, um die Bewegung in vertikaler Richtung darzustellen.

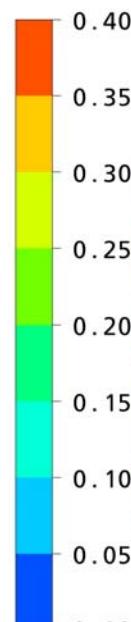
Der Vergleich der beiden Varianten mit Originalprofilen zeigt, dass der 3m Propeller hohe Geschwindigkeiten und eine Globale Durchmischung erzeugt. Sind nur 2m Propeller montiert, ist die Strömung geordneter aber viel weniger intensiv.

Bei der 4x 2m Halbmond-Variante ist die Strömung ähnlich wie beim Originalprofil mit dem 3m Flügel.

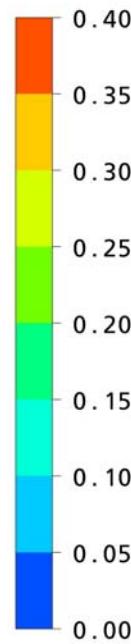
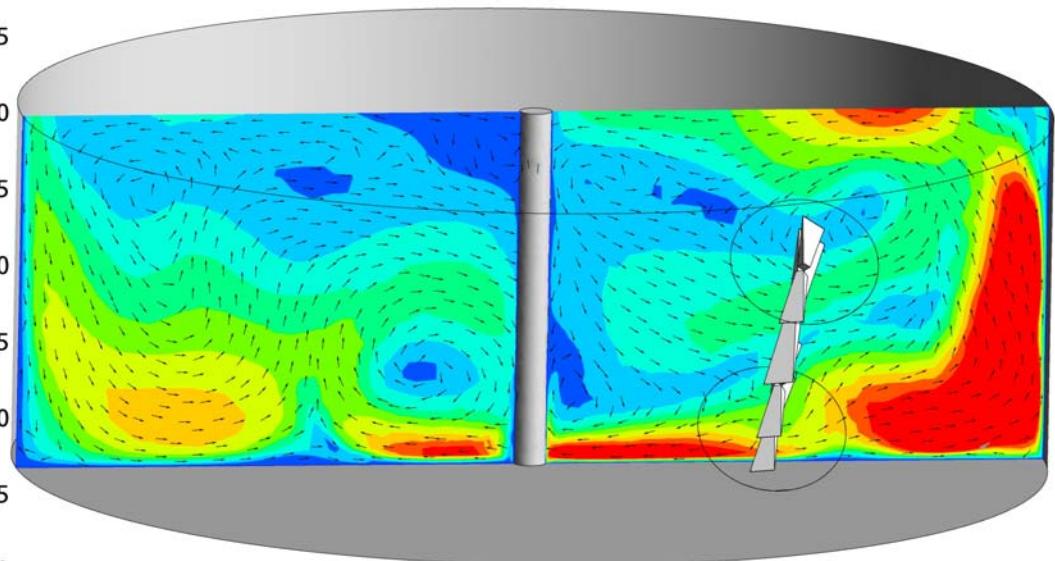
Der Fall mit 4x 2.3m Halbmond Propeller zeigt die grössten Geschwindigkeiten und eine globale Durchmischung. In jeder Tiefe sind Gebiete mit grosser Geschwindigkeit zu sehen. Die Wirbel erreichen die Oberfläche, was die gewünschte Wirkung von vertikaler Mischung begünstigt. Diese Propeller sind auch mit gekreuzter Anordnung untersucht worden (vgl. Abb. 25). Wie aus dem globalen Vergleich zu erwarten ist, sind die Strömungsfelder sehr ähnlich.



Velocity
(Contour 3)



[m s⁻¹]



[m s⁻¹]

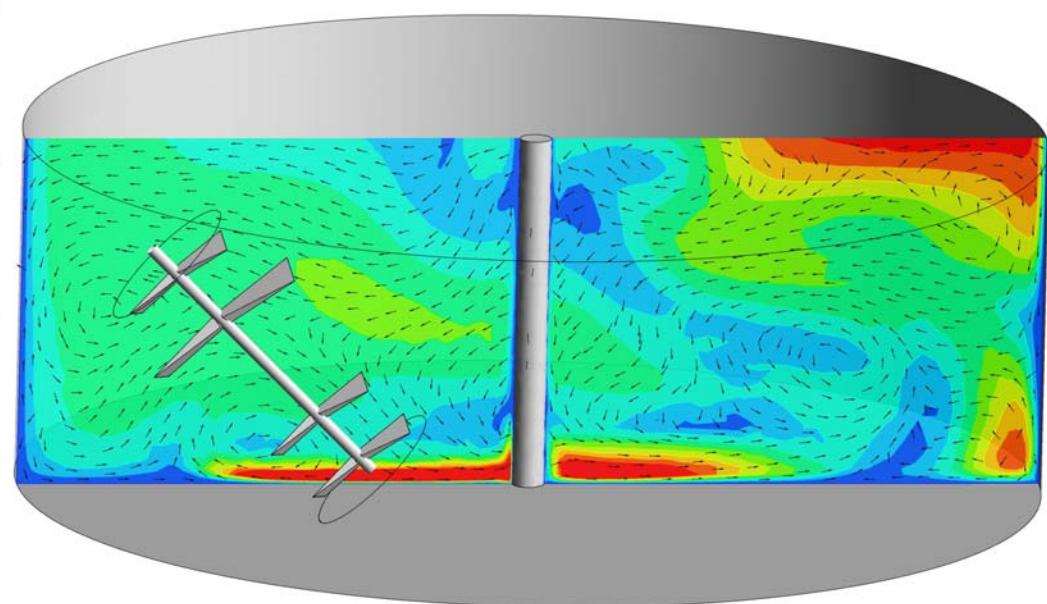
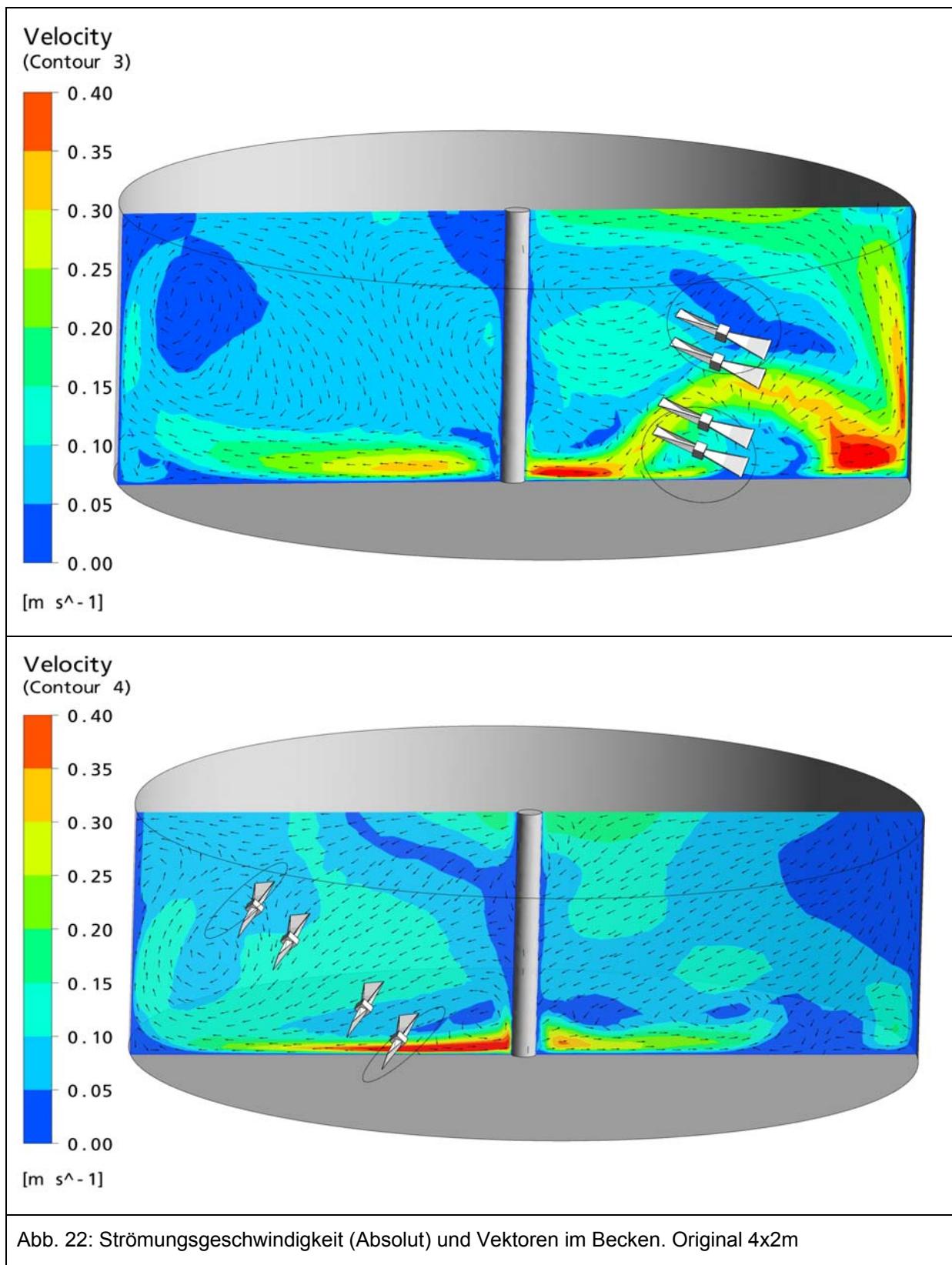
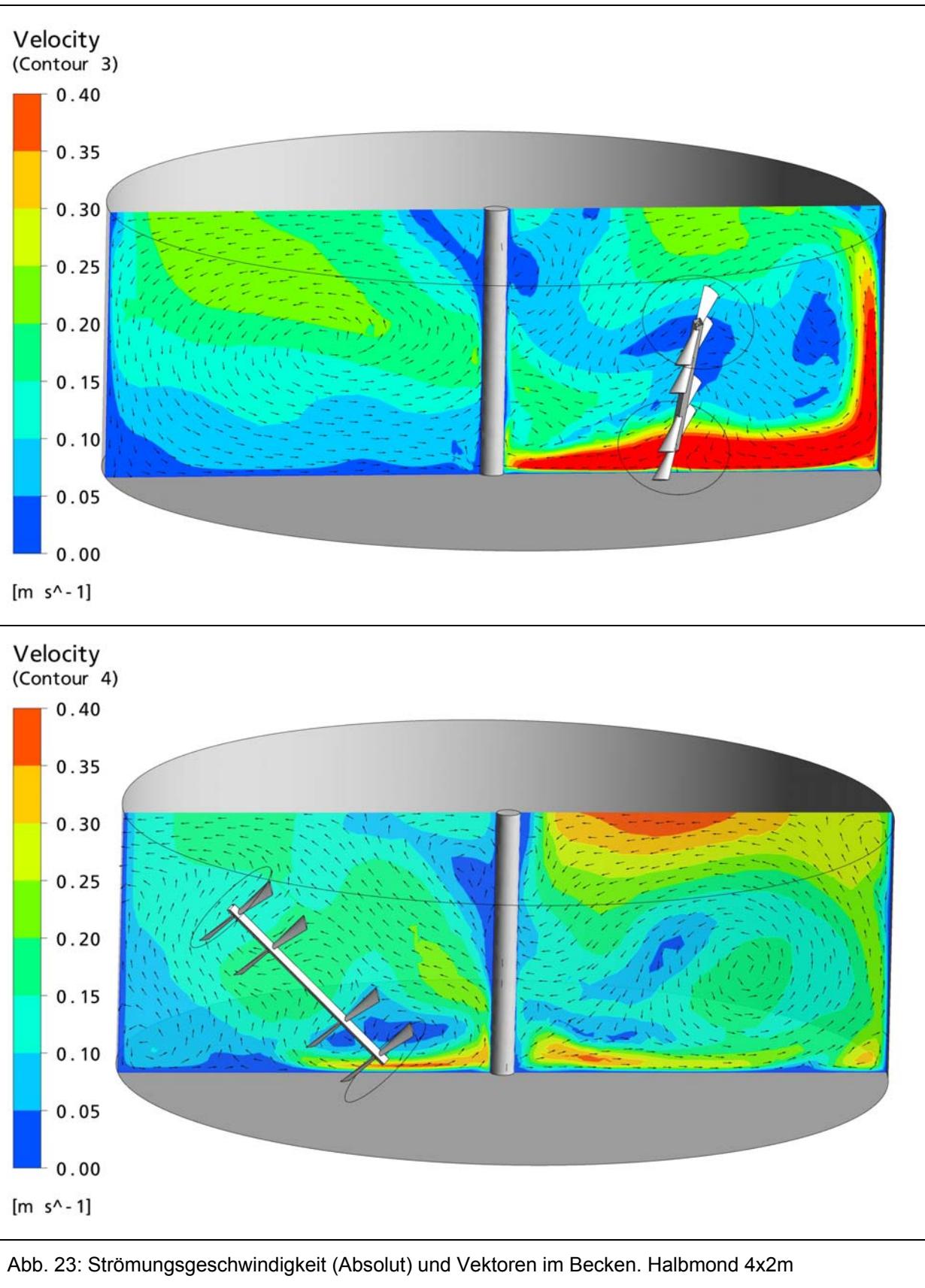
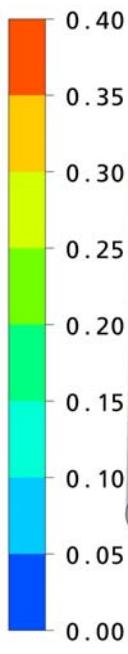


Abb. 21: Strömungsgeschwindigkeit (Absolut) und Vektoren im Becken. Original 3x2m + 1x3m



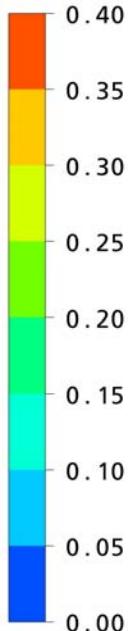


Velocity
(Contour 3)



[m s⁻¹]

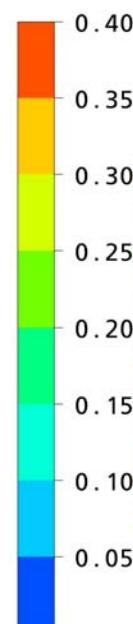
Velocity
(Contour 4)



[m s⁻¹]

Abb. 24: Strömungsgeschwindigkeit (Absolut) und Vektoren im Becken. Halbmond 4x2.3m

Velocity
(Contour 3)



Velocity
(Contour 4)

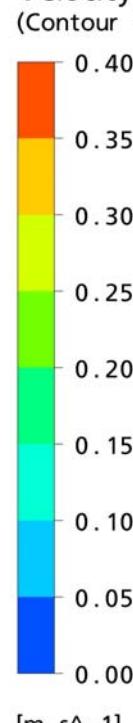


Abb. 25: Strömungsgeschwindigkeit (Absolut) und Vektoren im Becken. Halbmond 4x2.3m, gekreuzt.

3.4 Experimentelle Untersuchungen am Modell

An dem in Kap. 2.5 beschriebenen Modell wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt [4], [5].

Eine direkte Validierung konnte nicht durchgeführt werden. Um im gleichen Re-Bereich zu bleiben, müsste die Drehzahl so klein sein, dass die Messunsicherheit der Geschwindigkeitsmessung zu gross würde. Trotzdem konnten Experimente durchgeführt werden, welche für die Auswertung der CFD Daten hilfreich sind, bzw. diese bestätigen.

Abb. 26 zeigt der Verlauf der Ne-Zahl in Abhängigkeit der Re-Zahl, für gemessene Konfigurationen, im Modellbecken und in einer realen Anlage (BGA Altishofen). Neben der Kurve für die BGA Altishofen ist auch ein Punkt eingetragen, der die CFD Simulationen zeigt. Die Simulationen wurden im gleichen Re-Bereich wie realen Anlagen betrieben werden, durchgeführt.

Die Daten, die im Modellbecken aufgenommen wurden, beginnen im laminaren Bereich und gehen bis in den stark turbulenten Bereich.

Für die reale Anlage wurde eine Viskosität aus [1] von 0.6 Pa.s aufgrund der ungefähren Zusammensetzung in dieser spezifischen Anlage errechnet. Es ist ersichtlich, dass der Re-Bereich der realen Anlage deutlich kleiner ist, als das was im Modell möglich ist.

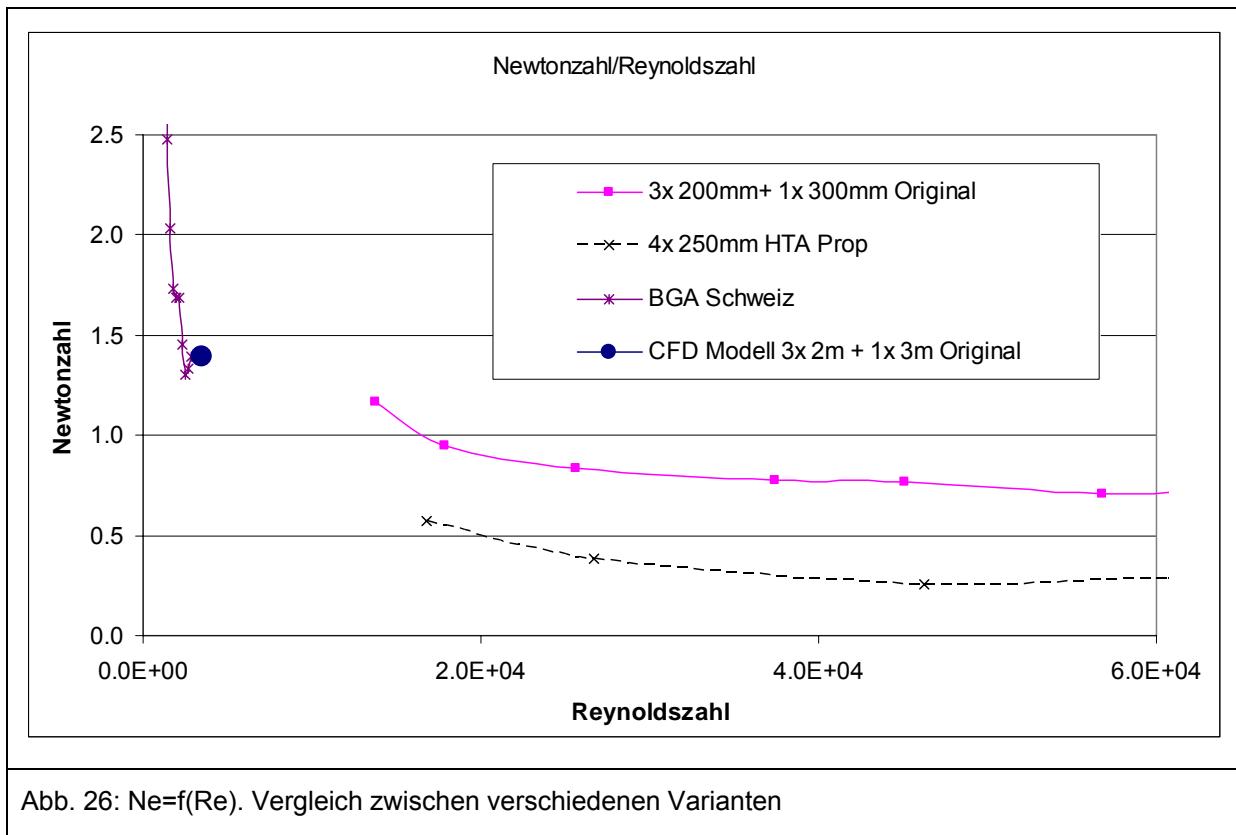
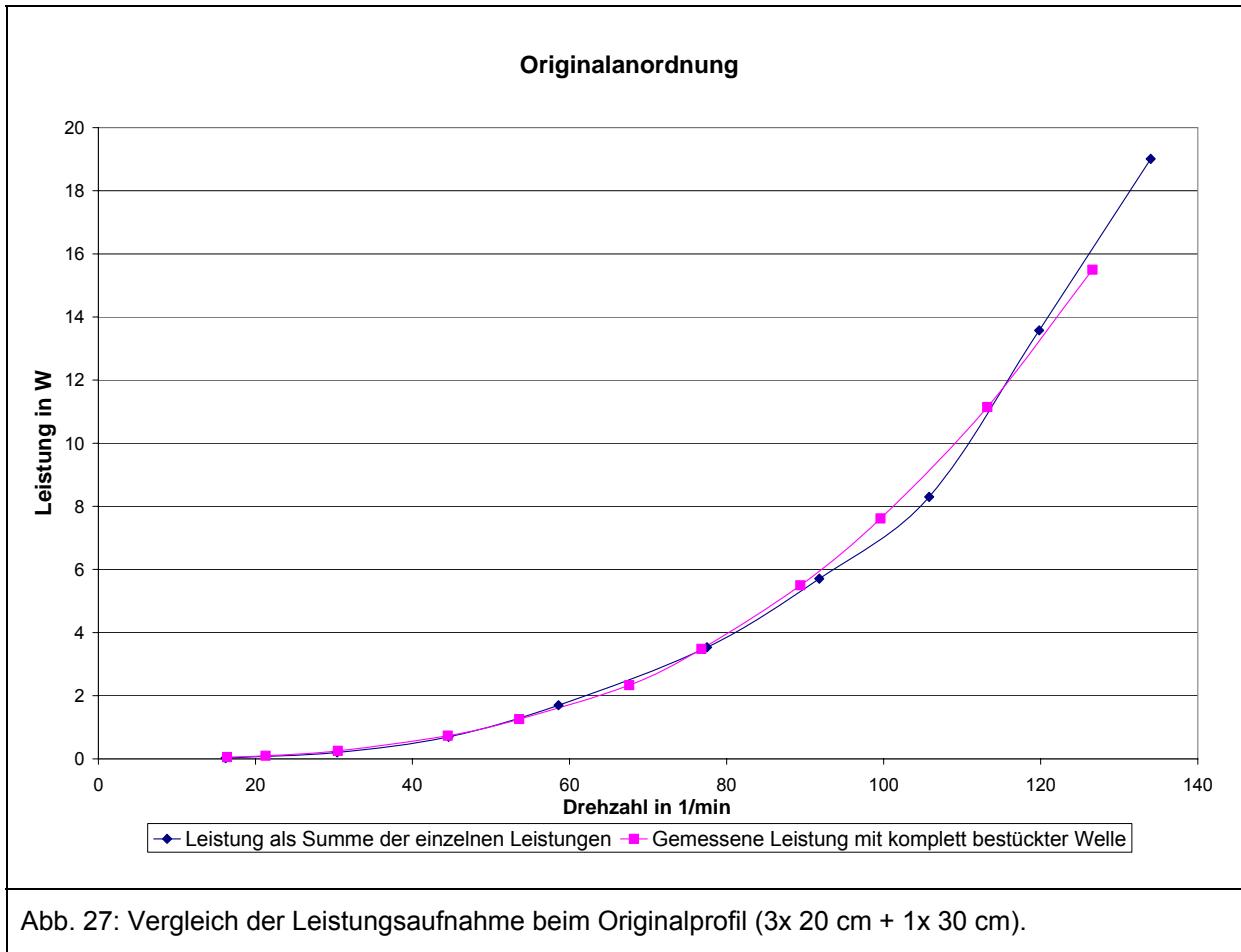
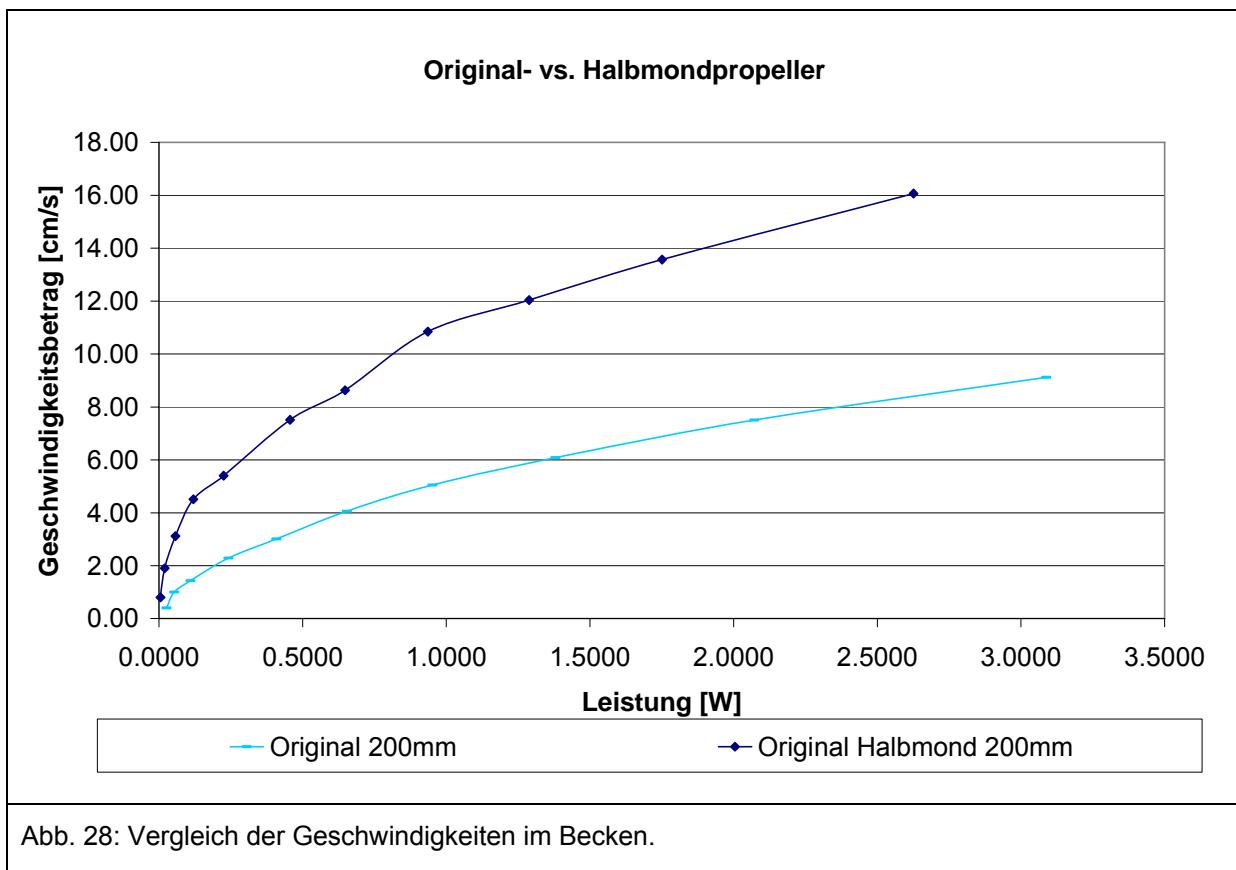


Abb. 27 zeigt die Leistungsaufnahme des Originalpropellers in Abhängigkeit der Drehzahl. Die Leistung wurde auf zwei verschiedene Arten aufgenommen: für einen einzelnen Propeller und dann aufsummiert, sowie für vier Propeller, die gleichzeitig an der Welle waren. Die Übereinstimmung der zwei Kurven ist sehr gut. Die wichtigste Aussage daraus ist, dass die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Flügelpaare eher klein ist. Das bestätigt die Simulationsresultate der Varianten mit parallel- und gekreuzt angeordneten Flügelpaaren (Kap. 3.3), die praktisch keinen Unterschied aufweisen.



Im Becken können lokale Geschwindigkeitswerte gemessen werden (ADV Sonde, siehe ap. 2.5). Abb. 28 zeigt den Vergleich zwischen Original und Halbmondpropeller. Die Geschwindigkeit wird bei allen Messungen am selben Ort ermittelt (Vgl. Abb. 20 für die Position). Es ist ersichtlich, dass mit dem Halbmondprofil deutlich grössere Geschwindigkeiten beim gleichen Aufwand erreicht werden. Ab einer bestimmten Leistung (ca. 1 W) bleibt der Unterschied praktisch konstant. In diesem Bereich ist die Strömung eindeutig turbulent und für diese Untersuchung nicht mehr relevant.



3.5 Konstruktion

Der Rührwerkhersteller möchte bei der neuen Generation von Propellern nur noch einen einheitlichen Durchmesser von 2.3 Meter verwenden. Bisher wurden jeweils drei Stück mit 2 Meter Durchmesser und ein Stück mit 3 Meter Durchmesser verbaut.

Die Fertigung der neuen Propeller soll ähnlich wie bei den herkömmlichen bleiben. Die Chromstahlbleche werden Laser geschnitten, abgekantet und anschliessend verschweisst. Für die Fertigung des Halbmondförmigen Bleches benötigte es teure Pressformen. Deshalb wird für die ersten Prototypen ein mehrfach abgekantetes Blech verwendet. Durch die grossen Toleranzen beim Abkanten ist es schwierig die Propeller passgenau zusammenzuschweißen. Zurzeit sucht man nach einer optimalen Lösung für die Serienfertigung. Die aktuelle Konstruktion ist in Abb. 29 dargestellt, wobei die beiden äusseren Stege nur in Nabennähe vorhanden sind.

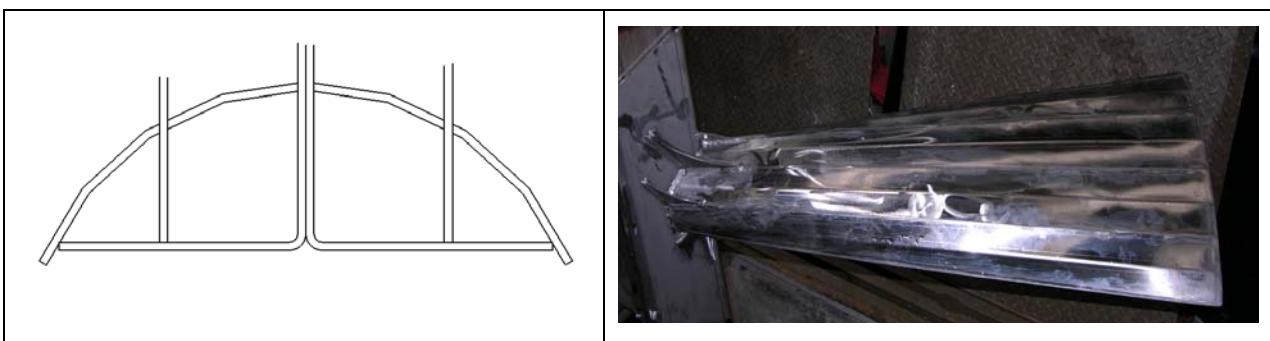
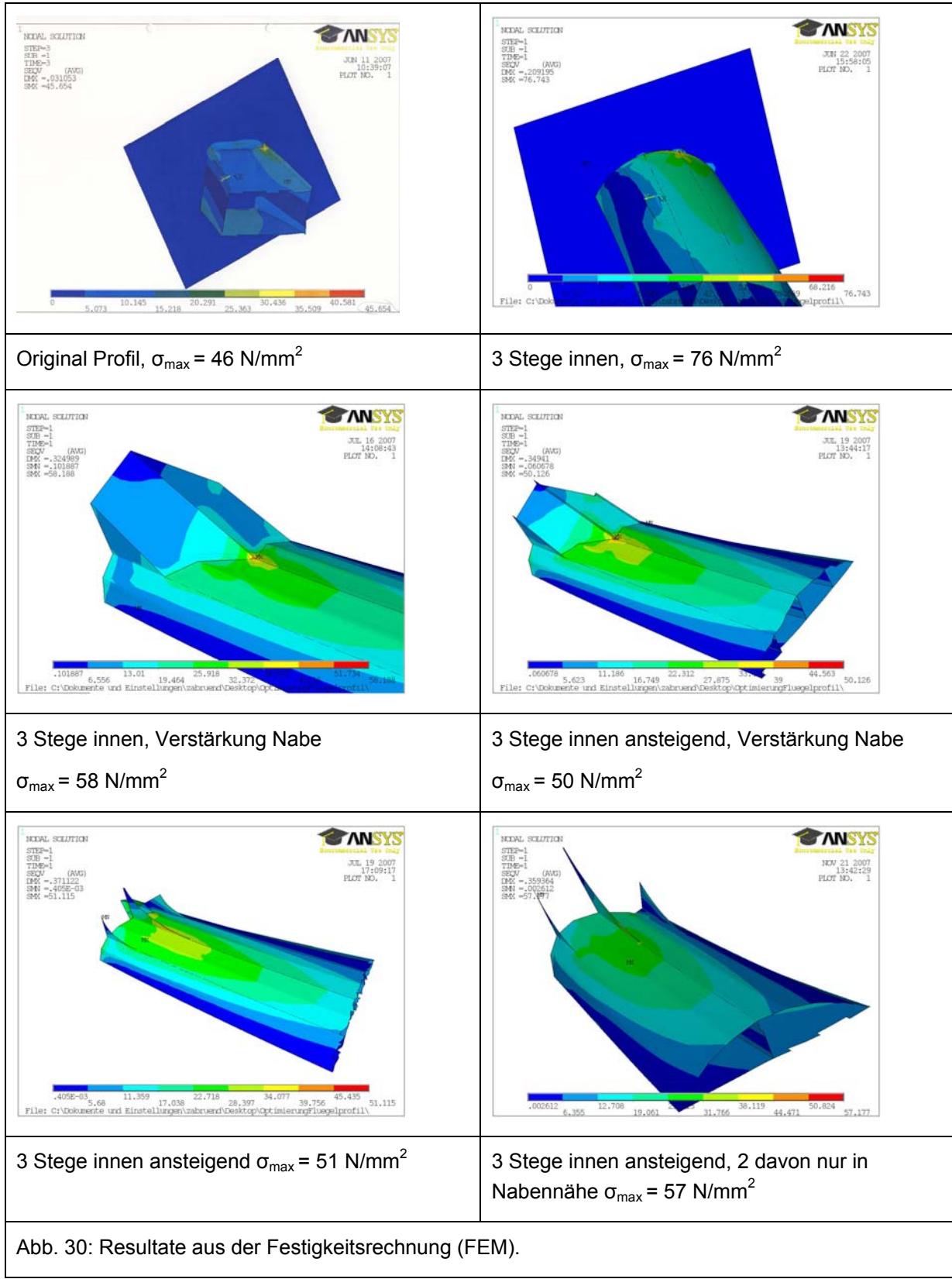


Abb. 29: Prinzipskizze für die Fertigung und Abbildung des neuen Propellers.

3.6 Festigkeitsberechnung

Die am Flügel auftretenden Kräfte können wegen den Feststoffanhäufungen stark variieren. Deshalb soll der neue Propeller ähnlich stabil ausgeführt sein wie das Original. Der Nabenhintergrund ist die kritische Stelle. Dort werden die am Propeller angreifenden Kräfte in die Welle eingeleitet. Für gute Strömungsverhältnisse soll der Nabenhintergrund möglichst schlank sein, für hohe Festigkeit wiederum gross. Mit FEM (Finite Element Methode) werden mehrere Varianten berechnet und versucht die maximalen Spannungen zu reduzieren. Als Randbedingung wird eine einheitliche Axial- und Umfangskraft eingeleitet. Die Größenordnung der eingeleiteten Kräfte entspricht denen aus der 3D Simulation. Diese Berechnungen dienen lediglich dem Vergleich zwischen der neuen Konstruktion und dem bisherigen Propeller.

Die FEM Berechnungen zeigen, dass steife Verstärkungskonstruktionen zu Spannungsspitzen in der Struktur führen. Flexible Verstärkungen verteilen die Spannungen besser und senken die maximalen Spannungen. Die äusseren beiden Stege müssen nicht zwingend bis zum Flügel Ende gezogen werden.



3.7 Beobachtungen in realen Anlagen

Am 4. Oktober 2007 wurden Beobachtungen an einer Biogasanlage mit neuen Propellern gemacht.



Abb. 31: Biogasanlage im Kanton Thurgau. Feldversuch mit neuen Propellern

Behältervolumen:	800 m ³
Füllung:	743 m ³
Behälterdurchmesser:	16 m
Behälterhöhe:	6 m
Füllstand:	5.2 m
Leistung:	100 kW
Beschickung:	Kuh- und Schweinegülle, Gemüse und Weizenabfälle

Rührwerkausstattung:

Neue Propeller
4Stk. Durchmesser 2.3m
Parallele Anordnung

Rührwerkanordnung:

Winkel Tangential zur Behälterwand: 25°
Winkel zum Boden: 45°
Wellenlänge: 6 m
Länge des Bodenlagers: 2.1 m

3.7.1 Rührverhalten

Laut der Aussage von Herrn Fankhauser erreicht die Biomasse jetzt hohe Umfangsgeschwindigkeiten, wo zuvor praktisch keine Bewegung zu erkennen war. Weil bei dieser Anlage die Bohrung für die Rührwelle 12cm zu tief liegt, geht es relativ lang bis sich die Deckschicht abbaut, da der Abstand von der Flügelspitze zur Oberfläche grösser ist als üblich. Wenn die Durchmischung etwas fortgeschritten ist, kann die Umwälzung mit kleinerer Drehzahl aufrecht erhalten werden. Dies spart nicht nur Energie sondern minimiert auch die Lärmemissionen des Antriebs.



Abb. 31: Sicht durch das Bio-Fermenter Schauglas.

Leider kann bei dieser Anlage der Füllstand nicht soweit abgesenkt werden, dass der oberste Propeller die Deckschicht streift. Die Durchmischung wäre dann viel effizienter, weil dann die leichteren Deckschichtteile stärker nach unten gesogen würden.

Ein weiterer Feldversuch ist im Januar 2008 geplant. Dabei wird eine bestehende Anlage nachgerüstet.

Der Produktionsprozess der neuen Flügel wird kontinuierlich verbessert. Die Serienproduktion ist ab Februar 2008 geplant.

4 Schlussfolgerungen

In dieser Untersuchung wurden anhand numerischer Strömungsberechnungen die Propeller eines Bio-Masse Rührwerks optimiert. Es hat sich gezeigt, dass dieses Werkzeug dafür sehr gut geeignet ist, da die verschiedenen Varianten systematisch entworfen und untereinander verglichen werden können.

Die grösste Unbekannte in der Untersuchung ist das Fließverhalten (Viskosität) des Fluids. Nach der Literaturrecherche wurde ein Wert als repräsentativ angenommen und für alle Rechnungen verwendet. Bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Gülle ist sicher mit leicht anderen Werten zu rechnen. Die Tendenzen sollten aber gleich bleiben, was dieser Untersuchung einen allgemeinen Charakter gibt.

Aus den Simulationsresultaten und den Modellversuchen konnten zahlreiche Erkenntnisse über die Strömungsverhältnisse am Propeller und dessen Auswirkung auf die Strömung im Becken gewonnen werden.

Die hohe Viskosität des Fluids ergibt laminare Strömungsbedingungen. Die stark viskosen Verhältnisse schwächen die Wechselwirkung der Einzelflügel stark ab.

Kleine Durchmesser der Flügelpaare haben eine lokale Mischwirkung, während grösseren eine globale Bewegung verursachen.

Die aufgenommene Leistung und die daraus resultierende kinetische Energie im Becken sind skalierbar mit der Drehzahl (dritte Potenz), dem Durchmesser (fünfte Potenz) und mit der Anzahl Flügelpaare. Daher kann z.B. die gleiche Mischwirkung wie im Originalfall (3x 2m + 1x 3m) mit einem 4 Propeller Rührer bei 23 U/min oder mit einem 3 Propeller Rührer bei 25 U/min erreicht werden.

Der Wirkungsgrad konnte in etwa verdoppelt werden.

Durch die geringere Leistungsaufnahme werden die Lärmemissionen des Antriebs verringert.

5 Ausblick

Die Feldmessung hat gezeigt, dass bei zu hohem Füllstand im Fermenter auch mit der optimierten Propellergeometrie die Deckschicht nur langsam abgebaut werden kann. Als Vorschlag gegen diese Problematik und um die Stärke der numerischen Strömungssimulation zu zeigen, wurde eine 2-Phasen Simulation durchgeführt. Dabei wurde eine Schwimmschicht mit geringerer Dichte, zusätzlich zur Biomasse eingeführt.

Abb. 32 zeigt die zeitliche Entwicklung der Trennfläche zwischen Gülle und Schwimmschicht. Links ist die Variante mit einem Halbmond 4-Propeller Rührwerk. Dieser alleine kann die Schwimmschicht nicht durchbrechen bzw. ihre Bestandteile in die Tiefe reißen, da der Abstand zur Oberfläche zu gross ist. Mit dem Einsatz eines schraubenförmigen Oberflächenbrechers (mit wesentlich kleinerem Durchmesser, rechts) wird hingegen die Schwimmschicht gebrochen und so weit nach unten gerissen, dass sie vom Propeller weiter gefördert werden kann.

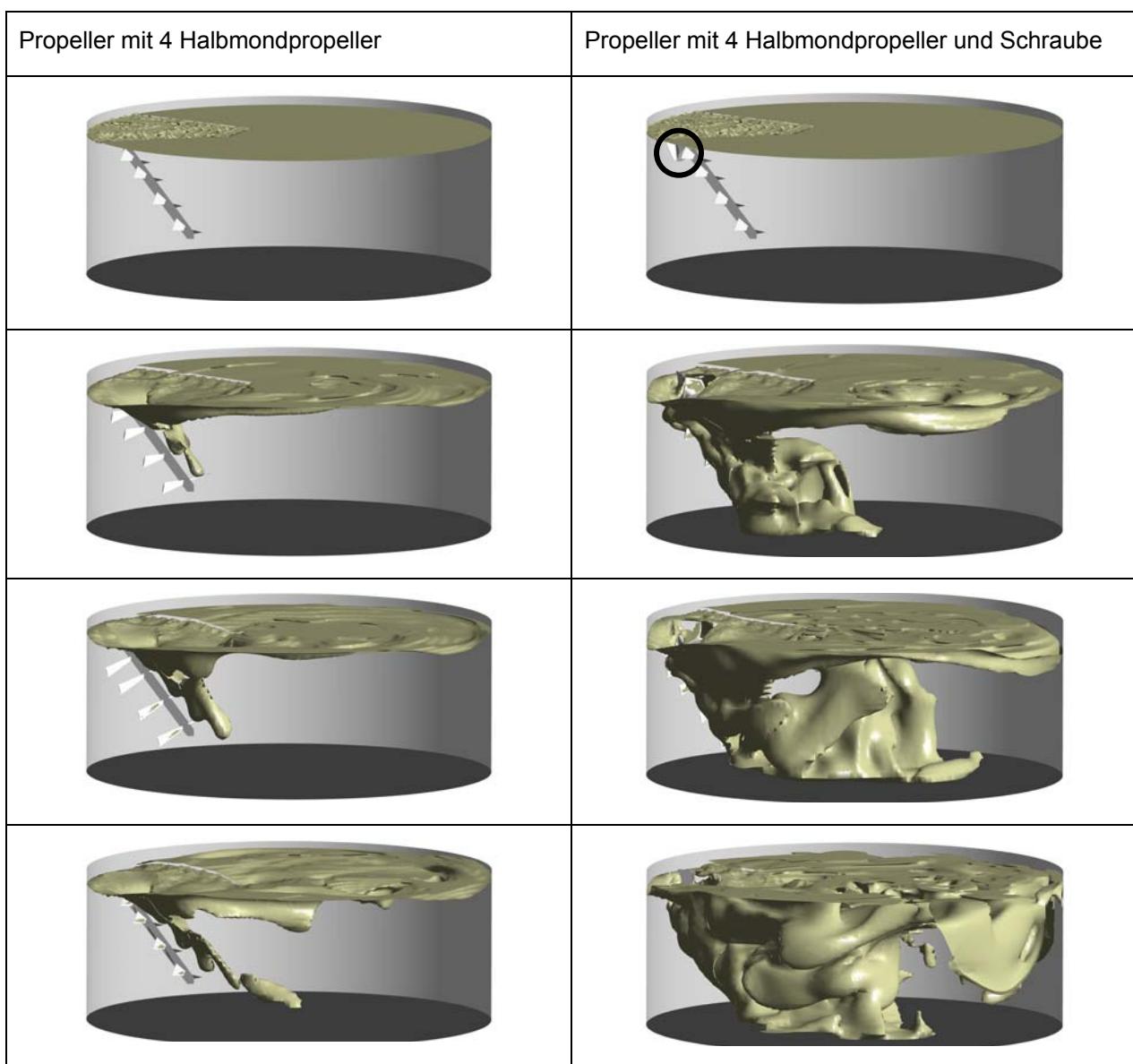


Abb. 32: Resultate der 2-Phasen Simulation mit Schwimmschicht. Zeitliche Entwicklung der Trennfläche.

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Türk, ***Rohrleitungstransport von Flüssigmist***, Forschungsbericht des Instituts für Agrartechnik Bornim e. V. ATB, Potsdam-Bornim, 1994
- [2] H. Engeli, ***Verbesserung der biologischen-mechanischen Verfahrenstechnik der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Abfallstoffen***, 1984
- [3] M. Zlokarnik: ***Rührtechnik***, Springer, 1999
- [4] A. Weissen: ***Experimentelle Untersuchung eines Biofermenter-Rührers***, Diplomarbeit HTA Luzern, 2006
- [5] C. Vogel: ***Experimentelle Untersuchung eines Biofermenter-Rührwerks***, Projektarbeit HTA Luzern, 2007
- [6] H. Sigloch: ***Technische Fluidmechanik***, 5. Auflage, 2005, Springer Verlag
- [7] L. Böswirth: ***Technische Strömungslehre***, Vieweg Verlag, 2005