

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

Fachbereich
Angewandte Biowissenschaften
und Prozesstechnik

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom Ingenieur (FH) (Dipl.-Ing (FH))

Tobias Hönig

Vorname Nachname

Verfahrenstechnik (FS), 2008, 4049238

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

Hydroabrasion beim Rühren
Überprüfung des bestehenden Modells und
Erarbeitung einer eventuell notwendigen
Korrektur

Prof. Dr. W. Gorzitzke

Vorsitzende/r der Diplomprüfungskommission

Prof. Dr. S. Wollny

1. Prüfer/in

Prof. Dr. R. Sperling

2. Prüfer/in

29. Oktober 2013

Abgabe am

Kurzfassung

Die Diplomarbeit untersucht verschiedene Einflussfaktoren auf das Hydroabrasivverhalten von Rührern. Neben den allgemeinen theoretischen Grundlagen der Rührtechnik, werden die grundlegenden Theorien der Tribologie und des Plackett-Burman-Versuchsplans erläutert.

Motivation der Arbeit ist es, ein bestehendes mathematisches Modell der HS-Anhalt zur Beschreibung des Einflusses verschiedener Faktoren aufzugreifen und mögliche Korrekturmaßnahmen zu ermitteln. Dazu wurden Versuche mit wachsbeschichteten Blatt- und Schrägblattrührern in verschiedenen Suspensionen und Prozessparametern in einem DN300-Glasbehälter durchgeführt.

Die Ermittlung der Abrasion erfolgte zum einen durch die Bestimmung des Volumenabtrages mittels einer 3D-Laserscantechnik und des Massenabtrages durch eine Analysenwaage.

Neben der Beurteilung der Signifikanz verschiedener Einflussfaktoren liegt zusätzlich ein Schwerpunkt in der Untersuchung des Scansystems auf mögliche Fehlerquellen.

This thesis analyzes different factors influencing the erosion wear process of stirrers. The general theoretical principles of stirring, as well as the basic theories of tribology and the Plackett-Burman experimental design are explained.

The intention of the thesis is to identify possible corrective actions of the existing mathematical model created by the HS-Anhalt to describe the influence of various factors. In order to do this, experiments were conducted with wax-coated flat and pitched blade turbines in a range of different suspensions under various process conditions in a DN300 glass vessel.

The determination of the erosion was based on the volume loss using 3D laser scanning technology, as well as the mass loss recorded on an analytical balance.

In addition to the assessment of the influencing factors, the scanning system was investigated for possible sources of errors.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig unter Zuhilfenahme der angegebenen Hilfsmittel verfasst habe. Das bearbeitete Thema wurde von mir nicht schon früher im Rahmen einer anderen Arbeit behandelt oder anderswo als Prüfungsarbeit abgegeben.

Halle (Saale), 29. Oktober 2013

Ort, Datum

Unterschrift/en der/des Studierenden

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Kurzfassung | II |
| Eidesstattliche Erklärung | III |
| Inhaltsverzeichnis | IV |
| Symbol- und Abkürzungsverzeichnis | VI |
| Abbildungs- und Tabellenverzeichnis | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1 Allgemeine rührtechnische Grundlagen | 3 |
| 2.2 Grundlagen des Suspendierens | 8 |
| 2.3 Verschleiß | 10 |
| 2.3.1 Tribologie..... | 10 |
| 2.3.2 Erosion und Hydroabrasion | 13 |
| 2.4 Statische Versuchsplanung | 14 |
| 2.4.1 Aufgabe und Ziel..... | 14 |
| 2.4.2 Plackett-Burman-Versuchsplan | 15 |
| 3 Stand der Wissenschaft und Technik | 18 |
| 3.1 Hydroabrasionsmodelle..... | 18 |
| 3.1.1 Eindimensionale Abhängigkeiten | 18 |
| 3.1.2 Modellversuch der HS-Anhalt..... | 21 |
| 3.2 Verschiedene Untersuchungsmethoden | 24 |
| 3.3 Hydroabrasion in der Industrie..... | 25 |
| 4 Der Versuchsstand | 28 |
| 4.1 Aufbau des Versuchsstandes | 28 |
| 4.2 Verwendete Versuchsparameter..... | 29 |
| 4.3 Beschichten der Rührer mit Wachs | 30 |
| 5 Bestimmung der Abrasion über den Volumenabtrag | 32 |
| 5.1 Allgemeines..... | 32 |
| 5.2 Versuchsdurchführung | 32 |
| 5.3 Die Scantechnik und deren Auswertung..... | 32 |
| 5.3.1 Vorbereiten der Rührer | 32 |
| 5.3.2 Das Scansystem | 33 |
| 5.3.3 Kalibrieren des Messsystems..... | 34 |
| 5.3.4 Scannen eines Objektes..... | 34 |
| 5.3.5 Zusammensetzen der einzelnen Scans..... | 35 |

| | | |
|---------------|---|-----------|
| 5.3.6 | Auswertung der Scans | 37 |
| 5.4 | Auswertung der Versuche | 38 |
| 5.5 | Untersuchung des Scansystems | 41 |
| 5.6 | Mögliche Fehlerursachen | 44 |
| 5.7 | Schlussbetrachtung und Ansätze zur Verbesserung..... | 45 |
| 6 | Bestimmung der Abrasion über den Massenabtrag..... | 47 |
| 6.1 | Allgemeines..... | 47 |
| 6.2 | Versuchsdurchführung | 47 |
| 6.3 | Auswertung der Versuche | 48 |
| 6.3.1 | Bestimmung der Abrasionskonstante | 48 |
| 6.3.2 | Vergleich der Rührer bzw. der Rührerteile..... | 49 |
| 6.3.3 | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans..... | 50 |
| 6.4 | Fehlerbetrachtung und Ansätze zur Verbesserung | 52 |
| 6.5 | Schlussbetrachtung..... | 53 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 54 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 56 |
| Anhang | | i |
| Anhang A: | t-Werte..... | ii |
| Anhang B: | Verwendete Rührer von [3] | iii |
| Anhang C: | Viskositäten..... | iv |
| Anhang D: | Rohdaten der Volumenabtragsversuche des Schrägblattrührers..... | v |
| Anhang E: | Rohdaten der Volumenabtragsversuche des Blattrührers | vii |
| Anhang F: | Rohdaten der Untersuchung des Scansystems..... | ix |
| Anhang G: | Gescannte Perspektiven..... | xi |
| Anhang H: | Rohdaten der Masseversuche des Schrägblattrührers..... | xii |
| Anhang I: | Rohdaten der Masseversuche des Blattrührers..... | xiv |
| Anhang J: | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans für die Masseversuche..... | xvi |
| Anhang K: | Mikroskopaufnahmen der Partikel | xx |

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

| <i>Formelzeichen</i> | <i>Bezeichnung</i> | <i>Einheit</i> |
|----------------------|--|--|
| α | Anstellwinkel | [°] |
| ε | Spezifischer Leistungseintrag | [W·m ⁻³] |
| η | Dynamische Viskosität | [Pa·s] |
| λ | Wellenlänge | [m] |
| ν | Kinematische Viskosität | [m ² ·s ⁻¹] |
| ρ | Dichte | [kg·m ⁻³] |
| σ | Variationskoeffizient | [-] |
| σ^2 | Varianz | [-] |
| φ_V | Volumenanteil/ -konzentration | [-, Vol%] |
| A | Fläche | [m ²] |
| C | Konstante | [-, kg·s ⁻¹ , m ³ ·s ⁻¹] |
| d | Rührerdurchmesser | [m] |
| d _p | Partikeldurchmesser | [m] |
| D | Behälterdurchmesser | [m] |
| d/D | Durchmesser Verhältnis | [-] |
| E | Effekt | [kg·s ⁻¹] |
| f | Anzahl Freiheitsgrade/ zufälliger Effekte | [-] |
| F _N | Normalkraft | [N] |
| h | Vertikale Ausdehnung eines Rührblattes | [m] |
| h _R | Mittlere Rührereinbauhöhe | [m] |
| h _S | Schichthöhe | [m] |
| H | Füllhöhe | [m] |
| H | Relative Höhe eines Rührblattes | [-] |
| H | Härte | [Pa] |
| H _B | Härte nach Brinell | [BH] |
| H _M | Härte nach Mohs | [-] |
| H/D | Relative Füllhöhe eines Behälters | [-] |
| h _R /D | Dimensionslose Einbauhöhe eines Rührers | [-] |
| k | Anzahl Faktoren | [-] |
| k | Verschleißfaktor | [-] |
| K | Konstante | [-] |
| m | Anzahl Faktorstufen- kombinationen | [-] |
| m | Exponent | [-] |

| Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|-----------------------------|--|-----------------------|
| m | Masse | [kg] |
| M | Drehmoment | [N·m] |
| n | Stichprobenumfang | [-] |
| N | Drehzahl | [s ⁻¹] |
| N | Gesamtzahl der Einzelversuche/ Versuchsumfang | [-] |
| P | (Rührer-)Leistung | [W] |
| P _A | Anfahrleistung | [W] |
| P _M | Kupplungsleistung | [W] |
| P _V | Leistungsverlust | [W] |
| r | Horizontale Ausdehnung eines Rührblattes | [m] |
| R | Relativer Radius eines Rührers | [-] |
| s | Gleitweg | [m] |
| s _i ² | Stichprobenvarianz | [-] |
| s _d | Standartabweichung der Effekte | [-] |
| Sig. | Signifikanz | [-] |
| t | t-Verteilungswert | [-] |
| t | Zeit | [s] |
| V | Volumen | [m ³] |
| w _m | Massenabtrag | [kg] |
| w _{tip} | Umfangsgeschwindigkeit | [m·s ⁻¹] |
| w _v | Volumenabtrag | [m ³] |
| y | Zielgröße | [kg·s ⁻¹] |

Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|------------------------------------|
| ABS | Acrylnitril-Butadien-Styrol |
| CAD | engl. Computer Aided Design |
| CFD | engl. Computational Fluid Dynamics |
| FBT | engl. Flat Blade Turbine |
| n. b. | nicht bestimmt |
| PBT | engl. Pitched Blade Turbine |

Indizes

| Indizes | Bedeutung |
|---------|--------------------|
| f | Flüssigkeit |
| g | engl. graphical |
| m | engl. mass |
| v | engl. volume |
| 0 | zum Zeitpunkt null |

Kennzahlen

| <i>Indizes</i> | <i>Bedeutung</i> |
|----------------|---|
| Π | Dimensionslose Kennzahl nach dem Π -Theorem |
| Fr | Froudezahl |
| Ne | Newtonzahl |
| N_{s1} | Kritische Drehzahl des 1s-Kriteriums |
| N_{s90} | Kritische Drehzahl des 90%-Schichthöhenkriteriums |
| Re | Reynoldszahl |
| Re_l | Grenzreynoldszahl des laminaren Bereichs |
| Re_t | Grenzreynoldszahl des turbulenten Bereichs |

Konstanten

| <i>Formelzeichen</i> | <i>Bedeutung</i> | <i>Wert</i> |
|----------------------|-----------------------|--|
| π | Kreiszahl | $\approx 3,14$ |
| g | Gravitationskonstante | $\approx 9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ |

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Schäden durch Hydroabrasion an einem Pumpenlaufrad [1] und einem Rührer [2]..... | 1 |
| Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines industriellen Rührapparates [4 S. 219]..... | 3 |
| Abbildung 2-2: Bodenformen eines Rührbehälters [4 S. 220]..... | 4 |
| Abbildung 2-3: Typische Strömungsformen in einem Rührbehälter [4 S. 220]..... | 5 |
| Abbildung 2-4: Auswahl an Grundtypen von Rührergeometrien [6]..... | 5 |
| Abbildung 2-5: Leistungscharakteristik häufig verwendeter Rührer [6 S. 5]..... | 6 |
| Abbildung 2-6: Suspendierzustände nach [7 S. 222]..... | 9 |
| Abbildung 2-7: Abhängigkeit der Aufwirbelhöhe von der Drehfrequenz [7 S. 224]..... | 9 |
| Abbildung 2-8: Tribologisches System in einem Rührbehälter..... | 11 |
| Abbildung 2-9: Wirkmechanismen der Hydroabrasion..... | 13 |
| Abbildung 2-10: Einflussfaktoren auf die Hydroabrasion [12 S. 6]..... | 14 |
| Abbildung 3-1: Reduzierung der Blatthöhe über den Radius eines verschlissenen Rührerblattes zum Zeitpunkt t bzw. Grundlage der grafischen Methode [14]..... | 18 |
| Abbildung 3-2: Einfluss der Drehzahl auf den Formfaktor C_g nach [14]..... | 19 |
| Abbildung 3-3: Einfluss der Drehzahl auf die relative Massenabnahme nach [14]..... | 20 |
| Abbildung 3-4: Darstellung von Π_4 über Π_1/Π_3 des Rührers ART3 [3 S. 32]..... | 23 |
| Abbildung 3-5: Darstellung von Π_4 über Π_1/Π_3 aller untersuchten Rührer [3 S. 33]..... | 23 |
| Abbildung 3-6: Farbschichtmethode (links) und Analyse durch eine CFD-Software [2]..... | 24 |
| Abbildung 3-7: Schadensbild eines emaillierten Rührerblattes infolge von Abrasion [17]..... | 25 |
| Abbildung 3-8: Durch Hydroabrasion gefährdete Stellen in einem Rührapparat [12]..... | 26 |
| Abbildung 4-1: Der Versuchsstand..... | 28 |
| Abbildung 4-2: Mit Wachs beschichteter und unbeschichteter Rührer..... | 30 |
| Abbildung 5-1: Low-Cost-Scannersystem mit Kalibrierfläche, Lasermodul mit Antrieb, Kamera und mattiertem Rührer..... | 33 |
| Abbildung 5-2: Aufnahmen während eines Scans..... | 35 |
| Abbildung 5-3: Scan-Qualitäts-Bewertungen..... | 35 |
| Abbildung 5-4: Zusammensetzen der einzelnen Scans zu einem kompletten 3D-Modell..... | 36 |
| Abbildung 5-5: Aneinander ausgerichtete Scans und abgetragenes Volumen..... | 37 |
| Abbildung 5-6: Darstellung der mittels Bool'scher Operation erzeugten Versuchsergebnisse für die Versuchspunkte 1, 5, 6 und 8 des Schrägblattrührers..... | 38 |

| | |
|---|------|
| Abbildung 5-7: Darstellung der mittels Bool'scher Operation erzeugten Versuchsergebnisse für die Versuchspunkte 1, 5, 6 und 8 des Blattrührers..... | 38 |
| Abbildung 5-8: Volumen der einzelnen Scans für den Schrägblattrührer am Versuchspunkt 6..... | 39 |
| Abbildung 5-9: Aus Dreiecken zusammengesetzte Oberfläche eines Scans (Blickrichtung Flügelspitze)..... | 43 |
| Abbildung 6-1: Bestimmung der Abrasionskonstante des Blattrührers (FBT) am Versuchspunkt 1 | 49 |
| Abbildung 6-2: Aufsummierte Zielgrößen γ_3 und γ_6 der beiden Rührertypen..... | 50 |
| Abbildung 6-3: Bestimmte Effekte des Plackett-Burman-Versuchsplans | 50 |
| Abbildung D-1: Bemaßung des Schrägblattrührers | vi |
| Abbildung E-1: Bemaßung des Blattrührers..... | viii |
| Abbildung G-1: Gescannte Perspektiven | xi |
| Abbildung K-1: Form der Partikel „Glas fein“ (40fache Vergrößerung) | xx |
| Abbildung K-2: Form der Partikel „Glas grob“ (40fache Vergrößerung)..... | xx |
| Abbildung K-3: Form der Partikel „Harz fein“ (40fache Vergrößerung)..... | xxi |
| Abbildung K-4: Form der Partikel „Harz grob“ (40fache Vergrößerung) | xxi |
| Abbildung K-5: Form der Partikel „Siliziumcarbid“ (40fache Vergrößerung)..... | xxii |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2-1: Normierter Plackett-Burman-Versuchsplan mit 8 Versuchspunkten und einer Zielgröße | 16 |
| Tabelle 2-2: Beurteilung der Signifikanz der Effekte | 17 |
| Tabelle 4-1: Parameter der verwendeten Rührer | 29 |
| Tabelle 4-2: Verwendete Versuchsparameter | 29 |
| Tabelle 4-3: Stoffdaten der Feststoffe | 30 |
| Tabelle 5-1: Mittels Bool'scher Operation bestimmte Volumenabträge, links normaler zeitlicher Verlauf, rechts umgekehrter zeitlicher Verlauf | 41 |
| Tabelle 5-2: Ergebnisse der Betrachtung der Volumen | 42 |
| Tabelle 5-3: Ergebnisse der Betrachtung der geometrischen Größen | 43 |
| Tabelle 6-1: Betrachtung der Signifikanz unter Annahme von drei fiktiven Faktoren (Auszug Tabelle J-5) | 52 |
| Tabelle A-1: t-Werte zur Berechnung des zweiseitigen Vertrauensbereiches..... | ii |
| Tabelle B-1: In [3] auf Abrasion untersuchte Rührer..... | iii |
| Tabelle C-1: Ermittelte Viskositäten vor und nach den entsprechenden Versuchspunkten mit Glycerin für die Volumenversuche..... | iv |
| Tabelle C-2: Ermittelte Viskositäten vor und nach den entsprechenden Versuchspunkten mit Glycerin für die Masseversuche | iv |

| | |
|--------------|---|
| Tabelle D-1: | Mittels Bool'scher Operation bestimmter Volumenabtrag [cm ³] des Schrägblattrührers.....v |
| Tabelle D-2: | Volumen [cm ³] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers.....v |
| Tabelle D-3: | Höhen [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers.....v |
| Tabelle D-4: | Breiten [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers.....v |
| Tabelle D-5: | Längen [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers.....vi |
| Tabelle D-6: | Oberflächen [cm ²] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers.....vi |
| Tabelle E-1: | Mittels Bool'scher Operation bestimmter Volumenabtrag [cm ³] des Blattrührers vii |
| Tabelle E-2: | Volumen [cm ³] der gescannten Modelle des Blattrührers..... vii |
| Tabelle E-3: | Höhen [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers vii |
| Tabelle E-4: | Breiten [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers vii |
| Tabelle E-5: | Längen [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers viii |
| Tabelle E-6: | Oberflächen [cm ²] der gescannten Modelle des Blattrührers viii |
| Tabelle F-1: | Differenzvolumen für fünfmaliges Scannen bzw. Zusammensetzen ix |
| Tabelle F-2: | Geometrische Größen für fünfmaliges Scannen x |
| Tabelle F-3: | Geometrische Größen für fünfmaliges Zusammensetzen der Scans x |
| Tabelle H-1: | Rohdaten der Masseversuche des Schrägblattrührers xii |
| Tabelle I-1: | Rohdaten der Masseversuche des Blattrührers xiv |
| Tabelle J-1: | Zielgrößen und Varianzen der Versuchsergebnisse des Schrägblattrührers..... xvi |
| Tabelle J-2: | Zielgrößen und Varianzen der Versuchsergebnisse des Blattrührers xvi |
| Tabelle J-3: | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n > 1$ xvii |
| Tabelle J-4: | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n = 1$ xviii |
| Tabelle J-5: | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n = 1$ und Viskosität als fiktiven Faktor..... xix |

1 Einleitung

In der Industrie sind viele Bereiche anzutreffen in denen partikelbeladene Strömungen eine Rolle spielen. In den meisten Fällen ergeben sich daraus positive Aspekte, wie zum Beispiel die Herstellung von Kunststoffen in Wirbelbettreaktoren oder die Aufbereitung von Erzen durch das Suspensieren in Flüssigkeiten. Neben positiven Punkten können sich aber auch negative Folgen ergeben. Bei Wechselwirkungen von Partikeln mit Oberflächen besteht immer die Gefahr von Verschleißerscheinungen. Ein Beispiel dieses Verschleißes ist die Hydroabrasion durch partikelbeladene Flüssigkeiten. So können Pumpenlaufräder abgeschliffen oder spezielle Schutzschichten von Rührern durch Partikel abgetragen werden. Extreme Schäden durch Hydroabrasion sind in der Abbildung 1-1 dargestellt.



Abbildung 1-1: Schäden durch Hydroabrasion an einem Pumpenlaufrad [1] und einem Rührer [2]

Ein solcher Verschleiß ist immer abhängig von Prozessparametern wie der Geschwindigkeit oder der Konzentration, von Stoffeigenschaften wie der Härte und von konstruktiven Merkmalen wie dem Anstellwinkel eines Flügels.

Dabei ist die Kenntnis der Wirkung dieser Einflussfaktoren ein essentieller Baustein zur Verringerung des Verschleißprozesses. Die Untersuchung dieser Faktoren auf die Hydroabrasion bei gerührten Systemen, aufbauend auf ein Forschungsprojekt der Hochschule Anhalt, ist Bestandteil der im Folgenden behandelten Thematik.

Das Forschungsprojekt „Modellierung und Optimierung des Hydroabrasivverschleißes in emaillierten Rührbehältern“ [3] (Fördernummer: KF2080906WZ9) entwickelte dazu eine objektive Methode zur Untersuchung des Abrasivverschleißes an Rührern mithilfe eines 3D-Laserscansystems. Mithilfe dieses Systems wurden an verschiedenen Rührergeometrien Untersuchungen durchgeführt und es wurde versucht ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Abrasion zu erstellen. Das Hauptaugenmerk dieser Diplomarbeit liegt darin dieses Modell zu validieren und mögliche Korrekturmaßnahmen zu erarbeiten. Den Mittelpunkt bildet dabei ein Screening-Versuchsplan nach Plackett und Burman.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass jede Änderung eines Parameters einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Inwieweit diese Einflüsse jedoch einen messbaren Effekt am Ergebnis hervorrufen oder dieses davon mehr oder weniger unberührt bleibt, soll an einem Blatt- sowie Schrägblattrührer überprüft werden. Die Schwierigkeit besteht darin genau festgelegte Aussagen über einen Faktor zu treffen, da eine Änderung eines Parameters oft eine ungewollte Beeinflussung eines anderen Parameters nach sich zieht.

Des Weiteren ist es Ziel dieser Arbeit die Ergebnisse der 3D-Laserscantechnik zu beurteilen und mögliche Unterschiede zur Bestimmung der Abrasion mithilfe des Massenabtrages aufzuzeigen. In beiden Methoden wurde dazu der gleiche Versuchsstand verwendet. Der wichtigste Bestandteil des Versuchsaufbaus sind die mit Wachs beschichteten Kunststofführer. Diese ermöglichen einen messbaren Abtrag bei gleichzeitig relativ geringer Versuchszeit.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeine rührtechnische Grundlagen

Rühren ist eine der wichtigsten Anwendungen der stoffverarbeitenden Industrie. In einem rührtechnischen Apparat werden durch den Eintrag von Energie in Form von Rotation eines Rührers verschiedene Stoffe miteinander in Verbindung gebracht. Dadurch reagieren diese miteinander, werden einzelne Stoffe aus anderen ausgewaschen oder es findet ein Wärmeübergang mit der Behälterwand statt.

Die schematische Darstellung in der Abbildung 2-1 zeigt die Bestandteile eines Rührapparates. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Behälter, einem über eine Welle mit dem Motor verbundenen Rührer (Rührwerk) und einer gewissen Anzahl an Einbauten. Dazu zählen u. a. Sonden, Rohrschlangen und Stromstörer.

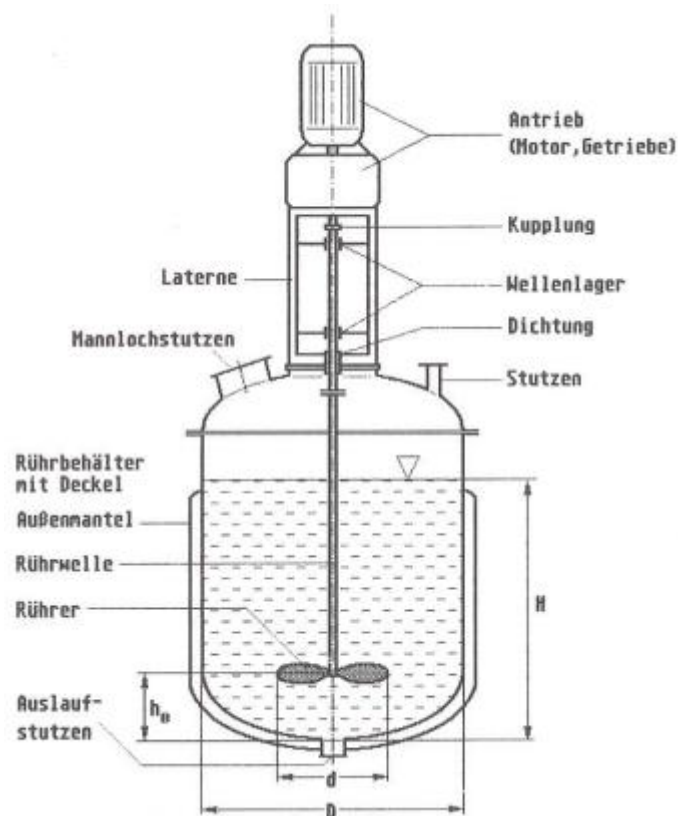


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines industriellen Rührapparates [4 S. 219]

Letztere sind essentiell für die Durchmischung des Fluids, da sie die vordergründig tangential erzeugte Strömung des Rührers in eine hauptsächlich axial oder radial ausgerichtete Bewegung umwandeln. Dies sind die wesentlichen Triebkräfte für das Durchmischen der einzelnen Komponenten. Ohne den Einsatz von Stromstörern würde der Behälterinhalt bei zentrisch eingebauten Rührern im Kreis rotieren und sich somit eine Trombe ausbilden. Erreicht die Trombe das Rührorgan, wird Gas in die Flüssigkeit eingetragen und es könnte durch die Herabsetzung des Leistungseintrages zum Bruch der fliegend gelagerten Welle kommen [5 S. 21]. Durch eine exzentrische oder schräge Einbauweise kann unter Umständen auf Stromstörer verzichtet werden, da das Aufbrechen der Kreisbewegung durch die Behälterwand erfolgt. Eine nicht zentrische Einbauweise hat jedoch hohe Querkräfte an der Rührerwelle zur Folge. In der Industrie kommen verschiedene Typen von Stromstörern zum Einsatz, z. B. Paddelstromstörer.

Die Bodenform des Behälters kann unterschiedliche Formen aufweisen. Aufgrund des guten Verhältnisses zwischen Festigkeit und Fertigungsaufwand ist der Klöpperboden sehr häufig anzutreffen (siehe Abbildung 2-2).

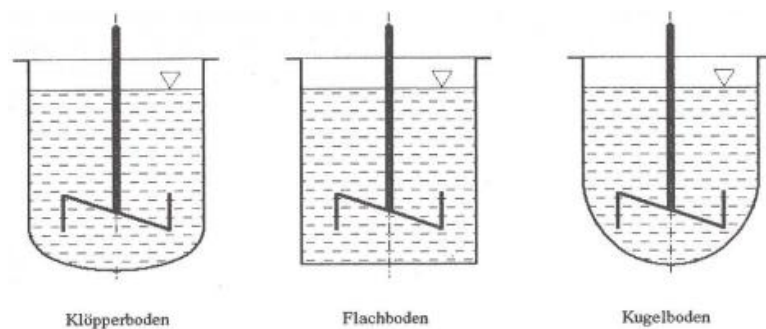


Abbildung 2-2: Bodenformen eines Rührbehälters [4 S. 220]

Die Rührtechnik als Teildisziplin der mechanischen Verfahrenstechnik kann nach verschiedenen Gesichtspunkten charakterisiert werden. Eine Einteilung ergibt sich zum Beispiel nach ihrem Einsatzgebiet, so wird vom

- Homogenisieren,
- Emulgieren,
- Begasen,
- Wärmeaustausch und dem
- Suspendieren

als Grundoperation gesprochen. Letzteres wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

Eine Klassifizierungsmöglichkeit von Rührern ergibt sich durch das erzeugte Strömungsbild. Dementsprechend kann von axial-, radial- und tangentialfördernden Rührorganen gesprochen werden. In der Abbildung 2-3 sind die zwei typischsten Profile dargestellt. Charakteristisches Merkmal des axial fördernden Rührers (links in der Abbildung) sind die zwei großflächigen Wirbel. Diese wirken über das gesamte Behältervolumen. Der Radialrührer erzeugt hingegen vier kleine Wirbel.

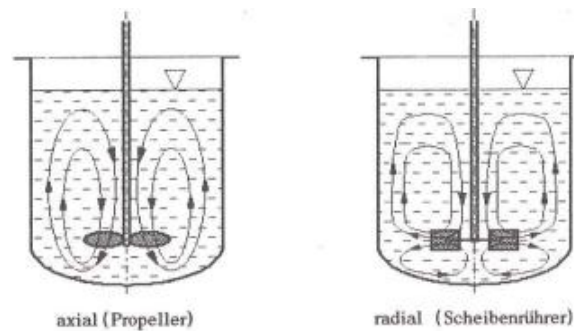


Abbildung 2-3: Typische Strömungsformen in einem Rührbehälter [4 S. 220]

Je nach Anwendungsgebiet kommen verschiedene Typen zum Einsatz (siehe Abbildung 2-4). Langsam laufende Rührer werden meist in hochviskosen Flüssigkeiten verwendet. In dünnflüssigen Medien kommen in der Regel Rührer mit hochturbulenten Strömungsfeldern zum Einsatz ($Re > 10^4$). Wandgängige Rührer eignen sich vor allem für den Wärmeaustausch mit der Kesselwand.

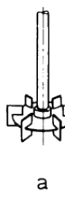
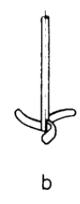

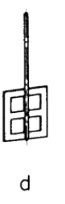


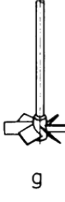
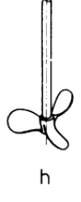
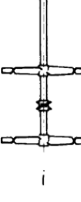

| | Viskosität (Pa s) | | | |
|---|---|---|---|--|
| | <0,5 | 0,5 - 5 | 5-50 | |
| hauptsächlich bewirkte Strömungsrichtung tangential bis radial |  |  |  | a) Scheibenrührer |
| |  |  |  | b) Impellerrührer (Pfaudler) |
| |  |  |  | c) Kreuzbalkenrührer |
| |  | | | d) Gitterrührer |
| | | | | e) Blattrührer |
| | | | | f) Ankerrührer |
| hauptsächlich bewirkte Strömungsrichtung axial | | | | g) Schaufelrührer mit angeordneten Schaufeln |
| | | | | h) Propellerrührer |
| | | | | i) MIG-Rührer (Ekato) |
| | | | | j) Wendelrührer |

Abbildung 2-4: Auswahl an Grundtypen von Rührergeometrien [6]

Neben den Standardrührern bieten die Hersteller auch spezialisierte Rührergeometrien für gewisse Anwendungsgebiete mit optimierten Leistungs- und Mischeigenschaften an.

Eine Möglichkeit Rührer mathematisch zu beschreiben bzw. deren Eignung für einen Prozess zu vergleichen, bieten verschiedene dimensionslose Kennzahlen.

Die *Reynoldszahl* charakterisiert die Art der Strömung und wird in der Rührtechnik folgendermaßen beschrieben:

$$Re = \frac{N \cdot d^2}{\nu} = \frac{N \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta} \quad (2-1)$$

Neben der erzeugten Strömung spielt in der Rührtechnik die eingetragene Leistung eine bedeutende Rolle. Die entsprechende dimensionslose Kennzahl ist die *Newtonzahl*. Der mathematische Ausdruck lautet wie folgt:

$$Ne = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot d^5} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{\rho \cdot N^2 \cdot d^5} \quad (2-2)$$

Das Verhältnis zwischen Zentrifugal- und Schwerkraft wird durch die *Froudezahl* beschrieben [7]:

$$Fr = \frac{N^2 \cdot d}{g} \quad (2-3)$$

Zwischen den Kennzahlen besteht folgender Zusammenhang:

$$Ne = f(Re, Fr) \quad (2-4)$$

Wird der Einfluss der *Froudezahl* auf die *Newtonzahl* vernachlässigt, z. B. wenn keine Trombe oder kein Gaseintrag auftritt, besteht zwischen der *Newton-* und *Reynoldszahl* der in der Abbildung 2-5 dargestellte Zusammenhang.

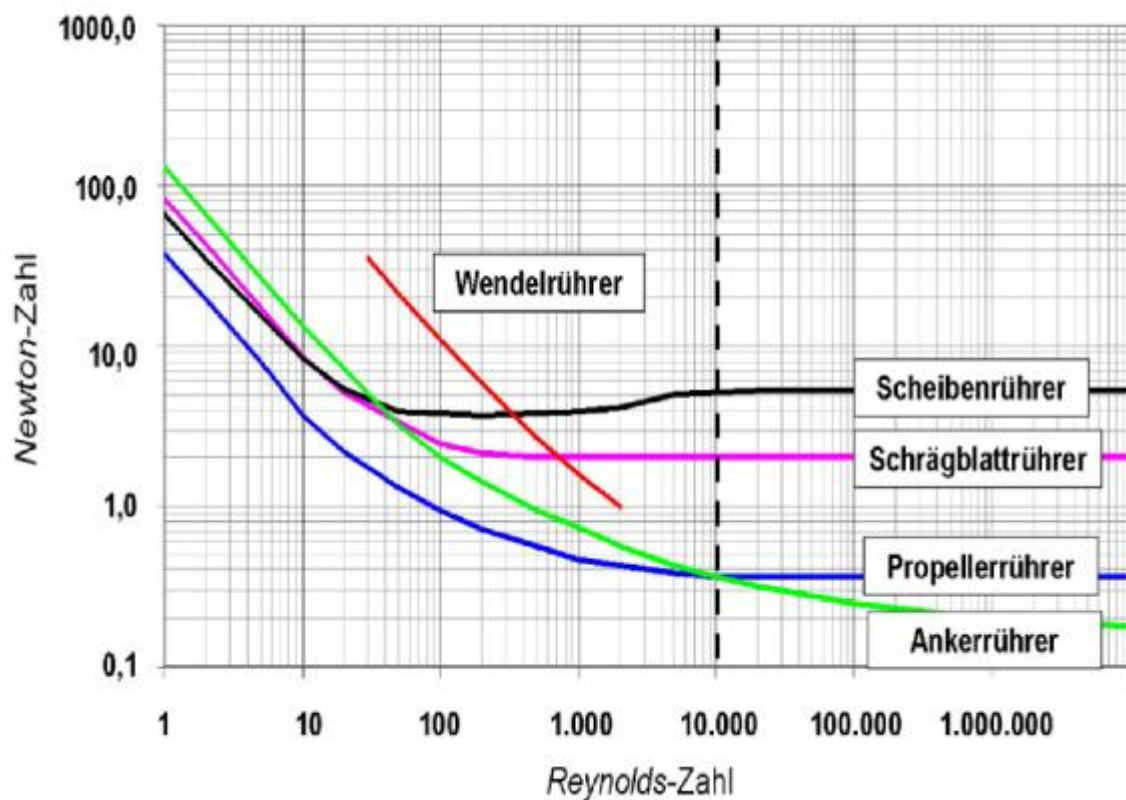


Abbildung 2-5: Leistungscharakteristik häufig verwendeter Rührer [8 S. 5]

Aus diesem Diagramm lassen sich drei charakteristische Bereiche ableiten [4 S. 230]:

$Re < Re_l \approx 10$ bis 100 (laminarer Bereich)

Im Behälter herrscht eine laminare Strömung und die *Newtonzahl* ist logarithmisch indirekt proportional zur *Reynoldszahl*. Die Mischwirkung ist in diesem Bereich vernachlässigbar gering, da der vorherrschende Mechanismus eines Teilens bzw. Verschiebens gleicht. Der Leistungsbedarf wird maßgeblich durch die Zähigkeit der Flüssigkeit bestimmt.

$$Ne = \frac{K_I}{Re} \quad (2-5)$$

$$K_I = \frac{P}{\eta \cdot N^2 \cdot d^3} \quad (2-6)$$

$Re_l < Re < Re_t$ (Übergangsbereich)

Neben den Zähigkeitseinfluss fällt durch auftretende Turbulenzen zunehmend die Dichte ins Gewicht. Mathematisch wird trotz unterschiedlich verlaufender Kurven für verschiedene Rührer gelegentlich eine approximierte Gerade verwendet [4 S. 230]:

$$Ne = \frac{K_{II}}{Re^m} \quad \text{mit } 0 < m < 1 \quad (2-7)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\rho^{1-m} \cdot \eta^m \cdot N^{3-m} \cdot d^{5-2m}} \quad (2-8)$$

$Re > Re_t \approx 10^4$ (quadratischer, turbulenter oder Newton-Bereich)

Die Strömung im Behälter ist vollturbulent und die *Reynoldszahl* ist unabhängig von der *Newtonzahl*. Folgender mathematischer Zusammenhang kann angewendet werden:

$$Ne = K_{III} \approx \text{const.} \quad (2-9)$$

$$K_{III} = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot d^5} \quad (2-10)$$

Für die meisten Rührer in diesem Bereich gilt:

$$Ne = K_{III} \approx 0,1 \dots 5 \quad (2-11)$$

Neben den zuvor erläuterten charakteristischen Kennzahlen wird zur Bewertung eines rührtechnischen Systems oder zum Scale-up vom Labor- auf einen Technikums- oder Betriebsmaßstabes oft der spezifische Leistungseintrag ε in Betracht gezogen.

$$\varepsilon = \frac{P}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot M}{V} = \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (2-12)$$

Die in eine Suspension eingetragene Leistung P (Rührerleistung) kann durch Messen des Drehmoments M an der Rührerwelle und der Drehzahl N aus folgender Gleichung bestimmt werden:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot M \quad (2-13)$$

Allgemein gilt, die vom Motor aufzuwendende Kupplungsleistung P_M setzt sich aus der Rührerleistung P , den Leistungsverlusten P_V (enthält u. a. die entstandenen Verluste durch das Getriebe, den Wellendichtungen sowie den Wellenlagern) und der Anfahrleistung P_A (rührer- bzw. antriebsspezifisch) zusammen:

$$P_M = P + P_V + P_A \quad (2-14)$$

2.2 Grundlagen des Suspendierens

Suspendieren ist das Aufwirbeln und Inschwebelhalten von Feststoffpartikeln in einer flüssigen Phase. Zur Klassifizierung dieser beiden Teilaufgaben haben sich zwei Kriterien etabliert.

In der Abbildung 2-6 sind verschiedene Suspendierzustände dargestellt. Bei einer unzureichenden Drehzahl des Rührers verbleibt der Feststoff am Behälterboden (a), mit steigender Drehfrequenz wird dieser jedoch durch die Strömung erfasst und in gewissem Maße aufgewirbelt (b). Der Großteil des Feststoffs verbleibt allerdings am Behälterboden und führt eine Roll- bzw. Dünenbewegung aus. Die Suspension ist unvollständig.

Ab der charakteristischen Grenzdrehzahl N_{S1} werden alle Partikel aufgewirbelt und die Verweilzeit der Feststoffpartikel am Behälterboden beträgt weniger als eine Sekunde (c). In diesem Betriebspunkt kann laut Zwietering von einer vollständigen Suspension ausgegangen werden. Relevant ist dieses Kriterium vor allem für Löseprozesse. Diese fordern eine freie Umströmung der Phasengrenzfläche zwischen Feststoff und Flüssigkeit [5 S. 221ff.].

Ab der charakteristischen Drehzahl N_{S90} beträgt die Höhe der Trennschicht zwischen Suspensionsphase und klarer Flüssigkeit mindestens die 0,9fache Füllhöhe der Flüssigkeit (d). Nach Einzelkann bei der Erfüllung des 90%-Kriteriums bzw. des Schichthöhenkriteriums von einer homogenen Suspension gesprochen werden. Wichtig ist dieses Kriterium u. a. bei Feststoff-katalysierten Reaktionen oder Kristallisationsprozessen [9 S. 195ff.].

Der Grenzfall einer ideal gleichmäßig verteilten Suspension (e) wird erst erreicht, wenn die Partikelsinkgeschwindigkeit gegen Null geht. Dies ist praktisch kaum zu realisieren.

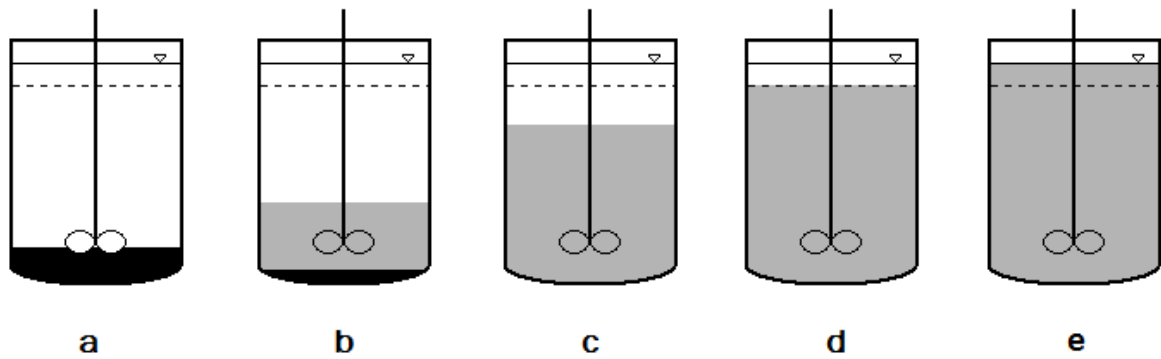


Abbildung 2-6: Suspendierzustände nach [5 S. 222]

Eine explizite Bestimmung der charakteristischen Betriebspunkte (N_{S1} und N_{S90}) ist in der Praxis kaum möglich, da sie subjektiver Natur sind. So kann für einen Betrachter ein Kriterium bereits erfüllt sein, für einen anderen wiederum nicht.

Die Abhängigkeit dieser beiden Kriterien ist in der Abbildung 2-7 dargestellt. In dieser fällt auf, dass in der Regel das 1s-Kriterium vor dem Schichthöhenkriterium erfüllt ist. Experimentelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass unter gewissen Bedingungen die Sedimentationsgrenze oberhalb der erforderlichen Höhe ist, jedoch am Behälterboden noch Partikel liegen bleiben. In diesem Fall ist aber von einer unvollständigen Suspension auszugehen, da nicht der gesamte Feststoff am Suspensionsprozess teilnimmt. Die zweite Kernaussage dieser Abbildung ist, dass mit steigender Feststoffkonzentration die erforderlichen Mindestdrehzahlen ansteigen [5 S. 223f.].

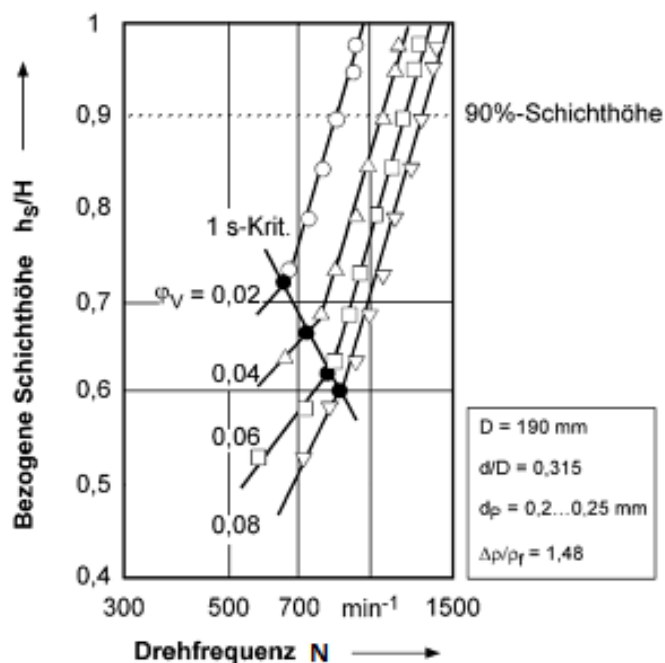


Abbildung 2-7: Abhängigkeit der Aufwirbelhöhe von der Drehfrequenz [5 S. 224]

Eine weitere Charakterisierungsmöglichkeit stellt die Homogenität einer Suspension dar. Sie wird durch die Varianz σ^2 ausgedrückt und beschreibt die Abweichung der lokalen Feststoffkonzentration vom rechnerischen Mittelwert [5 S. 222f.].

$$\sigma^2 = \frac{1}{k} \sum_j^k \left(\frac{\varphi_{vj}}{\varphi_v} - 1 \right)^2 \quad (2-15)$$

Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Suspendierkriterien lassen sich prinzipiell in drei Gruppen einteilen:

- Betriebsparameter (z. B. Drehzahl)
- Geometrische Parameter (z. B. Rührertyp, Durchmesser Verhältnis d/D)
- Suspensionseigenschaften (z. B. Dichte der Flüssigkeit und des Feststoffes, Viskosität)

Hinsichtlich des Suspendierens sind in der Wissenschaft unterschiedliche theoretische Ansätze zur Erklärung der Mechanismen des Aufwirbelns und des Inschwebehaltens der Partikel vertreten.

So wird für das Aufwirbeln der Teilchen z. B. von der Turbulenztheorie gesprochen. Diese besagt, dass die Partikel durch einen Energieaustausch mit wandnahen Wirbeln vom Boden aufgewirbelt und durch die Umlaufströmung mitgerissen werden. Dadurch wird ein Teil der kinetischen Energie der Wirbel in potentielle Energie der Partikel umgesetzt.

Die mathematische Erklärung des Inschwebehaltens der Partikel beruht unter anderem auf der Annahme, dass die abwärtsgerichtete Partikelsinkgeschwindigkeit gleich der mittleren Auftriebsgeschwindigkeit der Wirbel an einem spezifischen Punkt im Behälter ist (z. B. in Höhe des Schichthöhenkriteriums) [5 S. 226f.].

Häufig sind diese Modelle auf experimentelle Ergebnisse gestützt und können sich daher in der Vorhersage des notwendigen Leistungseintrages voneinander unterscheiden.

2.3 Verschleiß

2.3.1 Tribologie

Verschleiß wird gemäß der 1997 zurückgezogenen DIN 50320 als „fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ [10 S. 23] bezeichnet und zählt somit zum Fachgebiet der Tribologie (griech. tribo = reiben, logia = Lehre). Diese ist nach ingenieurwissenschaftlicher Definition „ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste“ [11 S. 4].

Im klassischen Sinne wird ein tribologisches System nach der DIN 50320 mit folgenden vier Elementen beschrieben:

- Grundkörper,
- Gegenkörper,
- Zwischenstoff (Schmiermittel) und
- Umgebungsmedium (Gase, Flüssigkeiten, ...).

Im Hinblick zur Rührtechnik stellt der Rührer bzw. der Behälter mit sämtlichen Einbauten den Grundkörper, die suspendieren Partikel den Gegenkörper und das Fluid den Zwischenstoff bzw. das Umgebungsmedium dar (siehe Abbildung 2-8). Die Rotation des Rührorgans erzeugt die erforderliche Relativbewegung im Behälter mit der Konsequenz eines gewissen Verschleißes.

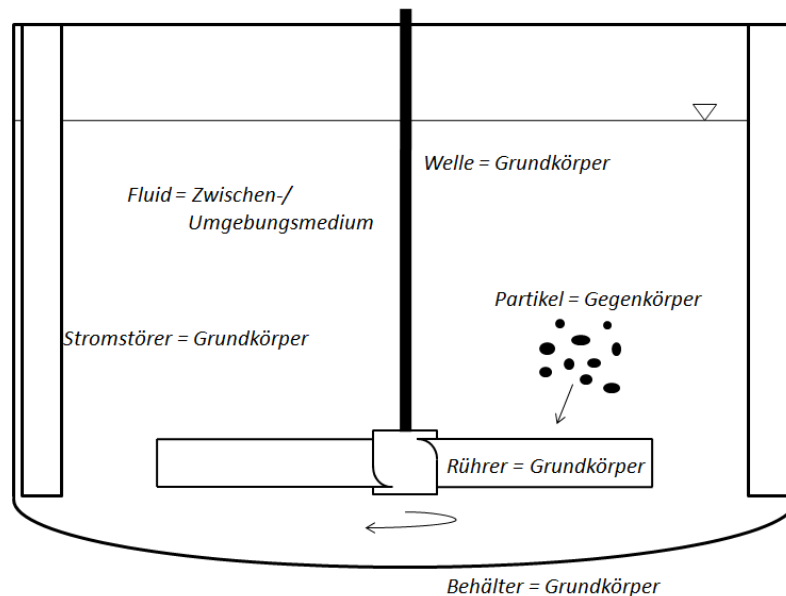


Abbildung 2-8: Tribologisches System in einem Rührbehälter

Zur Betrachtung des Abriebs ist immer das gesamte System erforderlich, da Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Komponenten bzw. deren Eigenschaften auftreten (z. B. Härteunterschiede).

Der Verschleiß kann zum einen nach den Bewegungsformen (Gleiten, Rollen, Stoßen, Strömen), nach der Zusammensetzung des tribologischen Systems (Feststoff – Partikel – Flüssigkeit, Feststoff – Feststoff etc.) [10 S. 8] und nach den folgenden vier Hauptmechanismen eingeteilt werden.

Adhäsion:

Der Verschleiß durch Adhäsion tritt bei Bauteilen mit hohen Flächenpressungen auf. Durch den Reibkontakt von z. B. zwei Metallen werden die Oberflächenschichten (Verunreinigungen oder Oxidschichten) entfernt und es reiben die blanken Metalloberflächen aneinander. Je nach Metallgitter können atomare Bindungskräfte auftreten und es kommt

zu einer sogenannten Kaltverschweißung. Werden die Oberflächen weiter gegeneinander bewegt, so trennen sich die Kaltverschweißungen wieder und es findet ein Materialübergang statt. Die Trennung erfolgt jedoch nicht immer an den verschweißten Stellen, sondern auch an benachbarten Zonen. Lösen sich feine Partikel von den Oberflächen mit ab, hat der adhäsive zusätzlich einen abrasiven Verschleiß zur Folge [10 S. 8].

Abrasion bzw. Erosion:

Abrasionsverschleiß entsteht zum einen durch die Relativbewegung zwischen einem hartem, rauem Gegen- und einem Grundkörper oder durch das Eindringen eines Gegenkörpers in einen weicheren Werkstoff. Durch diesen Kontakt kommt es zum sog. Mikropflügen, welches Furchen, Einkerbungen oder auch Risse auf der weicheren Oberfläche und somit einen Materialabtrag zur Folge hat [11 S. 122].

Eine besondere Form der Abrasion stellt die Erosion bzw. die Hydroabrasion dar. Diese Termini werden speziell für den Verschleiß durch partikelbeladene Flüssigkeiten verwendet. Eine nähere Beschreibung dieser Form wird im Kapitel 2.3.2 „Erosion und Hydroabrasion“ gegeben.

Oberflächenzerrüttung:

Die Oberflächenzerrüttung entsteht durch wiederholte plastische Verformungen des Grundkörpers aufgrund des Kontaktes mit dem Gegenkörper. Dies hat eine Materialermüdung bzw. die Herabsetzung der Duktilität zur Folge, was zu einer Rissbildung führt. Durch eine weitere mechanische Belastung wird das Oberflächenmaterial weiter geschwächt und abgetragen [10 S. 8f.].

Tribochemische Reaktionen:

Tribochemische Reaktionen sind nicht direkt an einem Materialverschleiß beteiligt, sie minimieren oder unterstützen vielmehr einen Oberflächenabtrag. Die Oberflächen der verschiedenen Materialien reagieren mit den Zwischen- oder dem Umgebungsstoff. Durch die Relativbewegung werden immer neue Reaktionsprodukte erzeugt und abgetragen. Die mechanischen oder durch reibungsbedingten thermischen Einflüsse, wie

- Vergrößerung der Oberfläche durch Rissbildung,
- Entfernung von Schutzschichten und
- Veränderung der Gitterstruktur durch Temperaturerhöhungen,

können die tribochemischen Reaktionen begünstigen [11 S. 127].

Ein Ergebnis der chemischen Reaktionen kann die Bildung einer Oxidinsel sein. Zum einen könnte diese als harte Schutzschicht dienen und somit vor weiterem Materialabtrag schützen oder es entsteht ein relativ spröder Belag, der leicht abplatzt. Letzteres resultiert in einen Lochfraß sowie der Bildung einer dritten abrasiven Komponente.

Kavitation:

Die Kavitation zählt nicht zu den Hauptmechanismen der Tribologie, ist aber dennoch ein werkstoffschädigender Mechanismus. Durch lokale Unterschreitungen des Dampfdruckes bei strömenden Medien kommt es zur Bildung von Dampfblasen. Durch eine anschließende Druckerhöhung implodieren diese, was zum einen eine Druckwelle und zum anderen sog. Mikrojets (Flüssigkeitsstrahl mit hoher Geschwindigkeit) zur Folge hat. Beide Mechanismen ermüden die Oberfläche und zerstören diese.

Jede der oben geschilderten tribologischen Beanspruchungen hat unter der Voraussetzung der Gegenwart eines Beanspruchungskollektives, d. h. einer gewissen Belastung und Geschwindigkeit der einwirkenden Komponente, eine Materialdissipation zur Folge. In der Praxis können die Mechanismen einzeln auftreten, sich durch Änderung von äußeren Parametern (pH-Wert der Flüssigkeit, Temperatur usw.) oder internen Prozessen gegenseitig ablösen oder prinzipiell überlagern [11 S. 129].

2.3.2 Erosion und Hydroabrasion

Im vorherigen Kapitel 2.3.1 wurde die Abrasion bzw. Erosion als eine der vier Grundmechanismen des tribologischen Verschleißes beschrieben. Ein Sonderfall dieser Art ist die Erosion bzw. die Hydroabrasion. Beide Begriffe können für den Abtrag von Oberflächenmaterial in Suspensionen, also des Tribosystems mit den Komponenten Feststoff, Partikel und Flüssigkeit, verwendet werden (siehe Abbildung 2-8: „Tribologisches System in einem Rührbehälter“). Im Verlauf dieser Arbeit sollen die Begriffe Abrasion bzw. Hydroabrasion weitere Verwendung finden.

Hydroabrasion ist nicht nur ein Problem der Rührtechnik, sondern vielmehr das Problem von fluiddurchströmten Maschinen und Apparaten wie Pumpen, Wasserturbinen, Ventilen oder Rohrbögen. Selbst der Aufbau eines notwendigen Filterkuchens bei Filtrationsprozessen kann durch Hydroabrasion verhindert werden [12].

Die Abrasion wird im Wesentlichen durch zwei verschiedene Wirkmechanismen verursacht. Einerseits durch den Gleit- und andererseits durch den Prallverschleiß (siehe Abbildung 2-9). Der Unterschied besteht in der relativen Bewegung des Gegenkörpers zum Grundkörper.

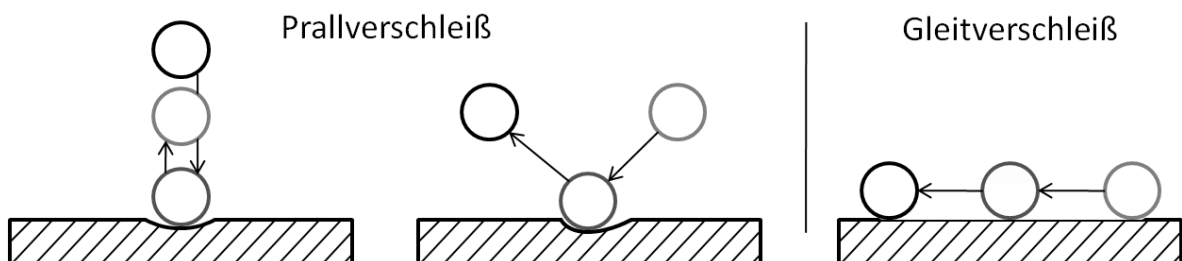


Abbildung 2-9: Wirkmechanismen der Hydroabrasion

Der Gleitverschleiß bzw. gleitender Verschleiß ist gekennzeichnet durch ein paralleles Gleiten der Partikel über der Oberfläche des Grundkörpers. Dieser Mechanismus verursacht eine unregelmäßig eingeschnittene, abgeschliffene Oberfläche und ist daher vergleichbar mit dem Abtrag durch Schleifpapier.

Beim Prallverschleiß hingegen ist die Wirkrichtung der Partikel im Extremfall senkrecht zur abgetragenen Oberfläche. Das Schadensbild ist vergleichbar mit sandgestrahlten Oberflächen, da feinste Oberflächenpartikel quasi herausgeschossen bzw. –geschlagen werden.

Die im Kapitel 2.2 „Grundlagen des Suspendierens“ vorgestellten Einflussfaktoren auf die Suspendierkriterien beeinflussen ebenfalls die Abrasion. Hinzu kommen u. a. die in der Abbildung 2-10 dargestellten Parameter.

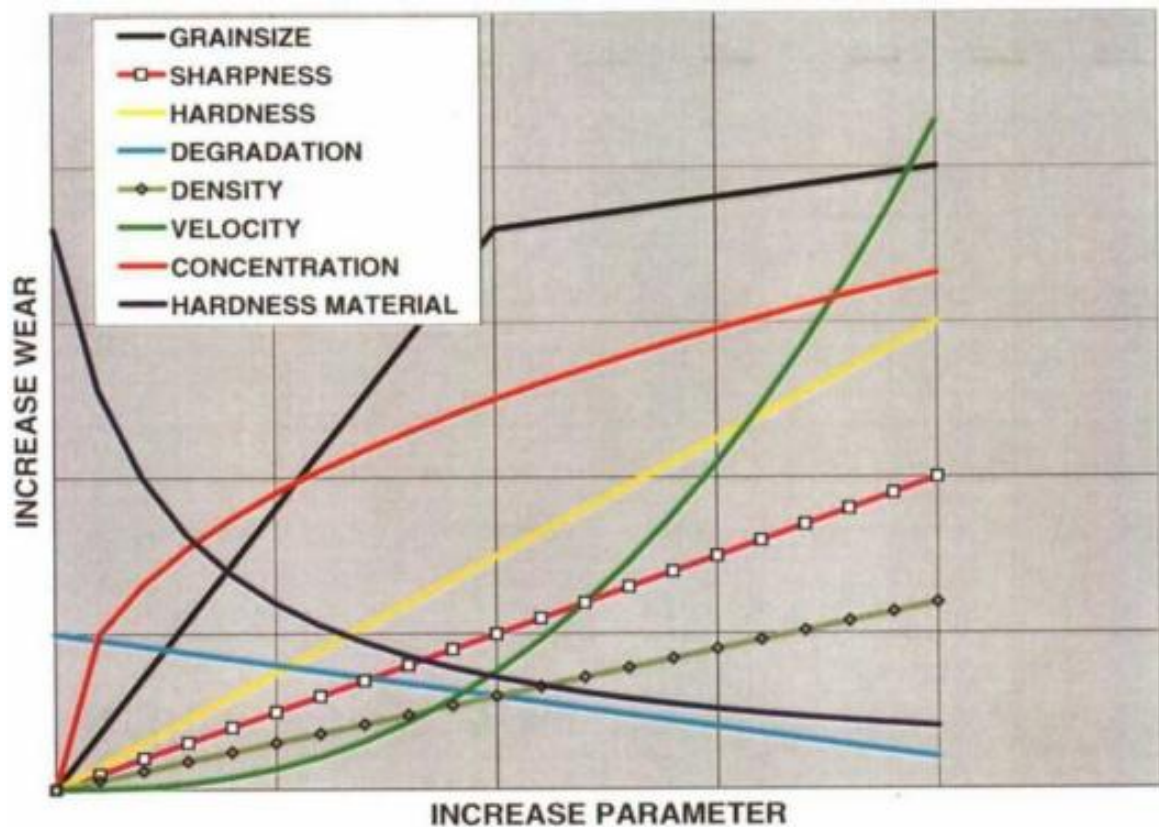


Abbildung 2-10: Einflussfaktoren auf die Hydroabrasion [13 S. 6]

2.4 Statische Versuchsplanung

2.4.1 Aufgabe und Ziel

Statistische Versuchsplanung gibt in erster Linie eine Hilfestellung zur Anwendung eines systematischen Arbeitsablaufes zur Durchführung und Auswertung von Versuchen. Sie ist nicht beschränkt auf reine Laborarbeit, sondern findet vielseitigen Einsatz in der Wissenschaft und Industrie. So

werden in [14] u. a. Verfahren zur Behebung von Qualitätsproblemen, zur Prozessoptimierung oder zur Bestimmung des Einflusses einzelner Parameter beschrieben.

Die Bestimmung des Einflusses einzelner Parameter auf einen Prozess kann auf verschiedene Arten erfolgen. Zum einen können dazu bekannte physikalische Zusammenhänge analysiert und gezielt ausgewertet werden. Dies kann bereits zum gewünschten Ergebnis führen. In der Praxis sind diese Zusammenhänge meist jedoch so komplex, vielseitig und zusätzlich voneinander abhängig, so dass einige Zusammenhänge nicht erkannt werden können oder gar unbekannt sind. Dies kann zum einen nach dem Motto „Einfach mal drauf los experimentieren“ bestimmt oder jedoch durch eine systematische Planung, Durchführung und einer vorab definierten Auswertung realisiert werden. Zu diesem Zweck können sog. Screening-Versuchspläne Anwendung finden.

2.4.2 Plackett-Burman-Versuchsplan

Ein solcher Screening-Versuchsplan wurde z. B. von Plackett und Burman entwickelt. Dieser eignet sich vor allem für Problemstellungen, über die noch wenig bekannt ist [14 S. 149ff.]. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, werden im Plackett-Burman-Versuchsplan innerhalb eines Versuchspunkts mehrere Einflussfaktoren gleichzeitig variiert. Dadurch wird die Anzahl der erforderlichen Versuche minimiert und somit Zeit und Kosten gespart.

Die Anzahl der möglichen Faktorenstufenkombinationen m beträgt bei diesem Plan ein Vielfaches von vier. Dementsprechend ist es möglich Pläne mit $m = 4, 8, 12, 16$ usw. Faktorenstufenkombinationen zu erstellen. Aus

$$k + f = m - 1 \quad (2-16)$$

wobei gilt

$$f \geq 2 \quad (2-17)$$

kann die Anzahl der wählbaren Einflussfaktoren k bestimmt werden. Dabei sollte die Anzahl der fiktiven Faktoren f größer als zwei sein. Diese bilden die Größenordnung der Versuchsstreuung ab und geben Aufschluss über evtl. nicht betrachtete Wechselwirkungen.

Die jeweiligen Faktoren werden auf zwei Niveaus (+ und -) variiert. Diese Faktorstufen können entweder mit quantitativen Werten, z.B. hohe (400min^{-1}) und niedrige (300min^{-1}) Drehzahl oder qualitativen Faktoren, wie z. B. Rührer A und B belegt werden.

Der Plackett-Burman-Versuchsplan mit $m = 8$ Faktorenstufenkombination wird durch zyklisches Vertauschen der Spalten mit den normierten Niveaus + - - + - + + erzeugt. Die letzte Zeile erhält dabei nur negative Stufen (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Normierter Plackett-Burman-Versuchsplan mit 8 Versuchspunkten und einer Zielgröße

| Nr. | A | B | C | D | E | F | G | y_1 | ... | y_n | \bar{y}_i | s_i |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|-------|-----|-------|-------------|-------|
| 1 | + | + | + | - | + | - | - | | | | | |
| 2 | - | + | + | + | - | + | - | | | | | |
| 3 | - | - | + | + | + | - | + | | | | | |
| 4 | + | - | - | + | + | + | - | | | | | |
| 5 | - | + | - | - | + | + | + | | | | | |
| 6 | + | - | + | - | - | + | + | | | | | |
| 7 | + | + | - | + | - | - | + | | | | | |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - | | | | | |
| Σ | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | | | | | | | |
| Sig. | | | | | | | | | | | | |

In einem Versuchsplan können mehrere Zielgrößen \bar{y} untersucht werden. Die Auswertung erfolgt für jede Größe separat.

Je nach Anzahl der Einzelmesswerte n pro Zielgröße und Versuch unterscheidet sich die Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans hinsichtlich der Beurteilung der Signifikanz der Einflussfaktoren.

Werden pro Zielgröße mehrere Messwerte ($n > 1$) aufgenommen, so berechnet sich die Zielgröße aus dem Mittelwert des Stichprobenumfangs:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n y_j \quad (2-18)$$

Die Stärke des Einflusses eines Faktors auf die Zielgröße wird durch den sog. Effekt E wiedergeben. Dieser wird für jede Spalte wie folgt berechnet:

$$E = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \text{Vorzeichen} \cdot \bar{y}_{1,i} \quad (2-19)$$

Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt durch die Bestimmung der Signifikanz Sig. Durch Bildung des Mittelwertes der einzelnen Varianzen s_i^2 der Versuchspunkte kann die Zufallsstreuung s^2 der Einzelwerte abgeschätzt werden.

$$s^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m s_i^2 \quad (2-20)$$

mit

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 \quad (2-21)$$

Anhand diesen Schätzwerts und der Gesamtzahl aller Einzelmesswerte N wird die Standardabweichung der Effekte $s_{\bar{d}}$ berechnet:

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} \quad (2-22)$$

Mithilfe der Vertrauensbereiche können die Ergebnisse beurteilt werden. Diese werden durch die t -Werte aus der Tabelle A-1 und der Standardabweichung der Effekte $s_{\bar{d}}$ ermittelt:

$$t \cdot s_{\bar{d}} \quad (2-23)$$

Die Summe der Anzahl aller Einzelmesswerte N entspricht in diesem Fall der Anzahl der Freiheitsgrade. Durch Vergleich des Produkts aus (2-23) mit dem Effekt des jeweiligen Einflussfaktors wird die Signifikanz bestimmt (siehe Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Beurteilung der Signifikanz der Effekte

| Vertrauensbereich | Wertung | Zeichen |
|--|--|---------|
| $E < t_{95\%} \cdot s_{\bar{d}}$ | kein Einfluss | - |
| $t_{95\%} \cdot s_{\bar{d}} \leq E < t_{99\%} \cdot s_{\bar{d}}$ | indifferent, evtl. zu geringe Datenmenge | * |
| $t_{99\%} \cdot s_{\bar{d}} \leq E < t_{99,9\%} \cdot s_{\bar{d}}$ | signifikanter Einfluss | ** |
| $t_{99,9\%} \cdot s_{\bar{d}} \leq E$ | hochsignifikanter Einfluss | *** |

Analog den Versuchen mit mehreren Einzelmesswerten, werden für Versuche mit nur einem Messwert pro Versuchspunkt ($n = 1$) die Effekte berechnet. Die Bestimmung der Zufallsstreuung der Effekte $s_{\bar{d}}^2$ erfolgt hingegen durch sog. Pooling. Basis bilden in diesem Fall die fiktiven Einflussfaktoren.

$$s_{\bar{d}}^2 = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^f (E_i)^2 \quad (2-24)$$

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{s_{\bar{d}}^2} \quad (2-25)$$

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Hydroabrasionsmodelle

3.1.1 Eindimensionale Abhängigkeiten

Im Kapitel 2.3 wurden bereits theoretische Grundlagen des Verschleißes erläutert. Bezüglich der Hydroabrasion in gerührten Suspensionen gibt es mehrere Untersuchungen auf verschiedene Einflussfaktoren. Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse eindimensionaler Abhängigkeiten, also die Veränderung eines einzelnen Einflussfaktors auf die Hydroabrasion für ausgewählte Quellen, dar. In [15] werden Abhängigkeiten der Drehfrequenz, der Volumenkonzentration und des Partikeldurchmessers auf den Verschleiß für eine Korund-Wasser-Suspension und einem vierblättrigen Schrägblattrührer (Anstellwinkel $\alpha = 30^\circ$) aus normalem Baustahl untersucht.

Bestimmt wurde der Abtrag zum einen mit einer grafischen und zum anderen mit einer massebezogenen Methode.

Bei der grafischen Bestimmung wurden über ein Foto an 15 verschiedenen Stellen entlang der horizontalen Achse r des Rührblattes die zugehörigen vertikalen Maße h ermittelt. Anhand dieser Werte konnte anschließend über die relativen Höhen H und Radien R (siehe Abbildung 3-1) zum Zeitpunkt t ein Formfaktor C_g (g... engl. graphical) bestimmt werden.

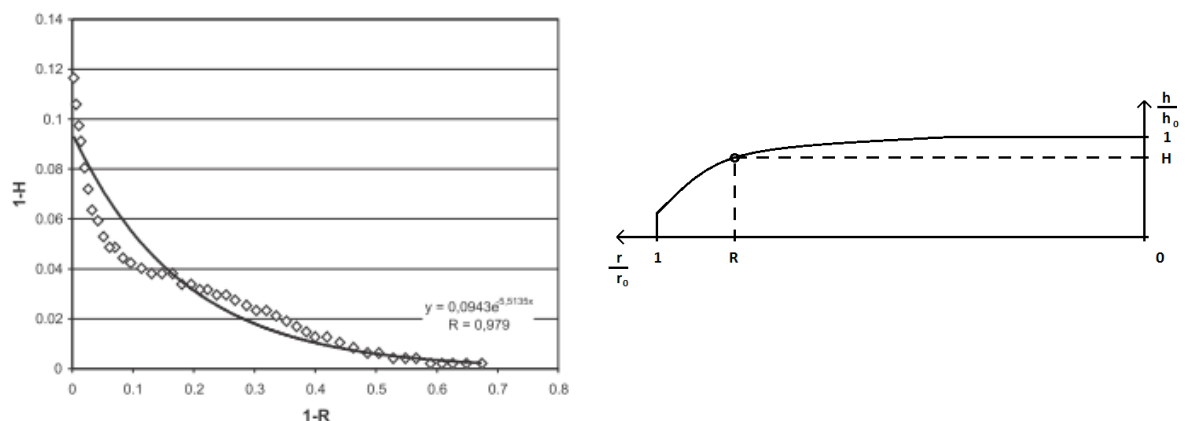


Abbildung 3-1: Reduzierung der Blatthöhe über den Radius eines verschlissenen Rührblattes zum Zeitpunkt t bzw. Grundlage der grafischen Methode [15]

Aufgrund des exponentiellen Verlaufs der Höhenabnahme in Richtung der Blattspitze ergibt sich für den Formfaktor C_g folgender regressiver Zusammenhang:

$$H(R) = 1 - C_g \cdot e^{k \cdot (1-R)} \quad (3-1)$$

mit

$$H = \frac{h(r)}{h_0} \quad (3-2)$$

$$R = \frac{r}{r_0} = \frac{2 \cdot r}{d} \quad (3-3)$$

Der verwendete Verschleißfaktor k ist eine modellabhängige Konstante für die Stärke des Verschleißes und in diesem Fall nicht zu verwechseln mit dem Verschleißfaktor k nach ARCHARD mit w_v als abgetragenes Volumen, H als Oberflächenhärte des verschleißenden Materials, F_N als Normalkraft und s als Gleitweg [11 S. 124ff.]:

$$k = w_v \cdot \frac{H}{F_N \cdot s} \quad (3-4)$$

Bei der grafischen Methode wird ein charakteristisches Bild des Verschleißes an Rührern offensichtlich. Der Verschleiß ist am Punkt mit der größten Umfangsgeschwindigkeit, der Blattspitze, am stärksten.

Die zweite beschriebene Methode zur Bestimmung des Verschleißes erfolgt über die Massenabnahme. Ähnlich der grafischen Methode wird eine relative Masse m/m_0 zum Zeitpunkt t verwendet.

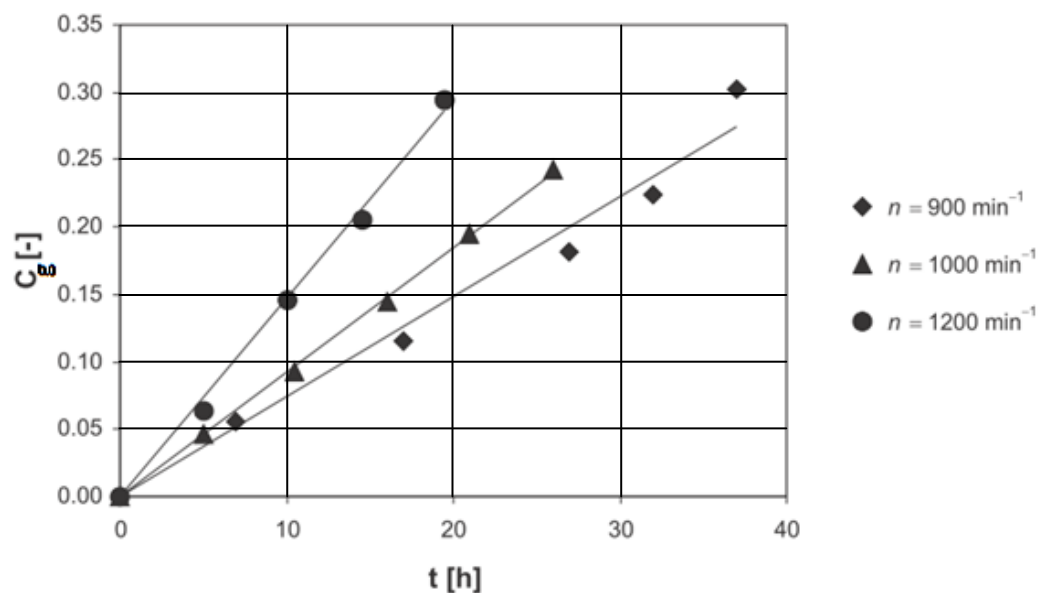


Abbildung 3-2: Einfluss der Drehzahl auf den Formfaktor C_g nach [15]

Beim Auftragen der experimentellen Ergebnisse der beiden Bestimmungsmethoden über der Zeit ist eine lineare Zunahme des Verschleißes bei allen verwendeten Einflussfaktoren erkennbar. Die Abbildungen 3-2 und 3-3 zeigen beispielhaft den Verschleiß für verschiedene Drehzahlen.

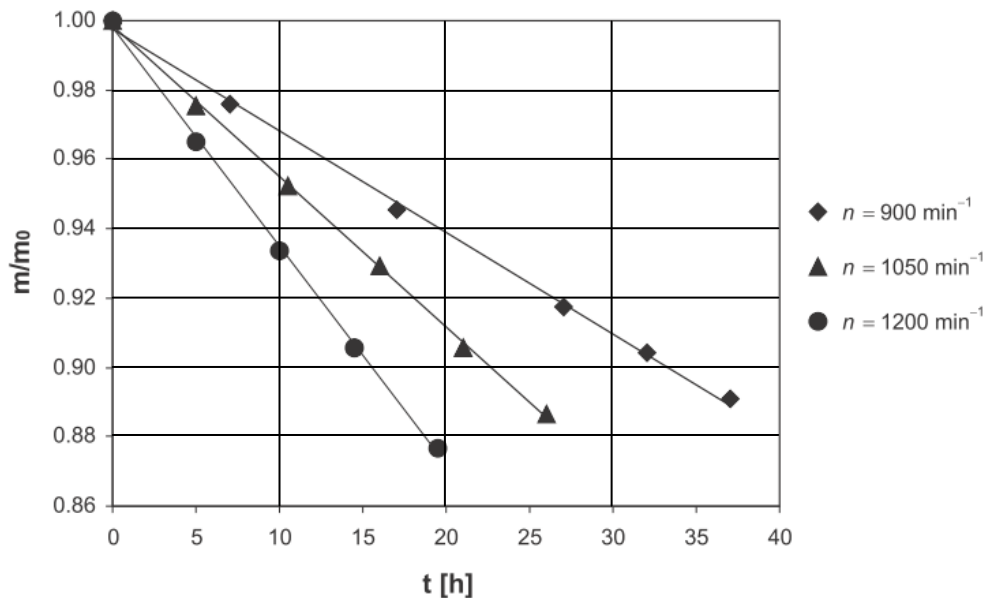


Abbildung 3-3: Einfluss der Drehzahl auf die relative Massenabnahme nach [15]

Aus diesen Abbildungen können folgende mathematische Zusammenhänge mit den Konstanten $C_{g,N}$ und $C_{m,N}$ (m... engl. mass) abgeleitet werden. Für die grafische Methode gilt:

$$C_g = C_{g,N} \cdot t \quad (3-5)$$

$$C_{g,N} \sim N^{2,4} \quad \text{mit } R = 0,939 \quad (3-6)$$

und der massebezogenen Methode:

$$\frac{m}{m_0} = 1 - C_{m,N} \cdot t \quad (3-7)$$

$$C_{m,N} \sim N^{2,7} \quad \text{mit } R = 0,998 \quad (3-8)$$

Der Verschleißfaktor k ist in diesem Fall unabhängig von der Drehzahl und schwankt um $-3,8 \pm 0,15$.

Zusammenfassend können über die weiteren Ergebnisse in [15] folgende Aussagen getroffen werden:

1. Ein größerer Partikeldurchmesser verursacht eine größere Abrasion bei gleicher Volumenkonzentration.

2. Die Abrasionsrate steigt mit der Zunahme der Volumenkonzentration bis zu einem bestimmten Maximum an und nimmt anschließend wieder ab.
3. Der Verschleißkoeffizient k ist unabhängig von der Partikelgröße und der Volumenkonzentration.

In [16] wurde von der gleichen Institution unter demselben Versuchsaufbau der Einfluss des Anstellwinkels α und des Härteunterschiedes zwischen Rührer und Partikel auf die Abrasion untersucht. Dazu wurde ein Schrägblattrührer mit verstellbarem Anstellwinkel aus Messing (40 – 50 BH) bzw. aus Baustahl (100 – 120 BH) in einer Suspension aus Gips- oder Sandpartikel gerührt.

Folgende Aussagen können zusammengefasst werden:

1. Der Verschleiß wirkt nach zwei unterschiedlichen Mechanismen:
 - a. Bei weichen Partikeln tritt eine Art Oberflächenabrasion auf, wobei sich die Form des Rührers kaum ändert, jedoch die Blattdicke abnimmt.
 - b. Partikel mit einer hohen Härte (in diesem Fall Sand) verursachen hauptsächlich einen Verschleiß an der Blattspitze.
2. Die Abrasion an der Blattspitze ist indirekt proportional zum Anstellwinkel α .
3. Die Oberflächenabrasion besitzt zwischen den Anstellwinkeln $\alpha = 20^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ ein Maximum.
4. Der Winkel von $\alpha = 45^\circ$ liefert die geringsten Abrasionsraten für die getesteten Systeme.
5. Je härter der Werkstoff des Rührers ist, desto geringer ist die Abrasion.
6. Der Verschleißkoeffizient k ist abhängig vom Anstellwinkel α .

3.1.2 Modellversuch der HS-Anhalt

3.1.2.1 Allgemeines

Der nachfolgend dargestellte Stand der Wissenschaft beruht auf den Ergebnissen eines Forschungsprojektes (Fördernummer: KF2080906WZ9) der Hochschule Anhalt [3]. Ziel dieser Forschung war es u. a. ein Modell aufzustellen, welches den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Hydroabrasion mathematisch beschreibt. Dazu wurden unterschiedliche Rührer und Einflussfaktoren mithilfe eines 3D-Scanners untersucht. Die vorliegende Arbeit knüpft an diese Ergebnisse an und versucht durch Aufstellen eines Plackett-Burman-Versuchsplans Abhängigkeiten auszuschließen oder zu beweisen.

Gleichzeitig werden in diesem Kapitel die Ergebnisse mit denen nach [15] und [16] verglichen.

3.1.2.2 Eindimensionale Abhängigkeiten

Der Einfluss der folgenden Faktoren auf den Verschleiß wurde für ausgewählte Rührergeometrien (siehe Anhang B) untersucht:

- Versuchszeit t
- Umfangsgeschwindigkeit w_{tip}
- Feststoffkonzentration φ_V
- Partikelgröße d_p
- Partikelhärte H_M

Bezüglich der Versuchszeit und der Abrasion konnte wie im vorherigen Kapitel eine lineare Abhängigkeit nachgewiesen werden. Für die Drehzahl bzw. der in [3] verwendeten Umfangsgeschwindigkeit w_{tip} , wurde bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit eine hohe Abrasion beobachtet, welche mit Anstieg der Drehfrequenz bei Erreichen der Suspendierdrehzahlen N_{S1} und N_{S90} auf ein Minimum absinkt und anschließend wiederum ansteigt. Erklärt wird dieses Minimum durch die These, dass sich bei einer unvollständigen Suspension ein Großteil der Partikel in der Nähe des Rührers befindet und somit diesen stärker belasten. Dies entspricht dem Effekt einer größeren lokalen Volumenkonzentration an Feststoff in Rührernähe. In [15] und [16] wurde von diesem Phänomen nicht berichtet, wobei angenommen werden kann, dass dies höchstwahrscheinlich nicht untersucht wurde. Kernaussage der Untersuchung der Drehzahl ist: „Für einen minimalen Verschleiß müssen die Betriebsbedingungen der Rührer genau auf die Erfüllung der Suspendierkriterien eingestellt werden“ [3 S. 22].

Im Bezug zur Partikelkonzentration und –härte sind ebenfalls die gleichen Abhängigkeiten beschrieben, wobei in [3] wahrscheinlich keine Untersuchungen auf unterschiedliche Abrasionsmechanismen, wie in [16] erläutert ist, durchgeführt wurden.

3.1.2.3 Mathematisches Modell

Das Buckingham'sche Π -Theorem bietet die Möglichkeit für einen Zusammenhang bekannter physikalischer Größen dimensionslose Kennzahlen (Ähnlichkeitstheorie) aufzustellen, ohne dass vorab dazu genaue mathematische Formulierungen bekannt sind [17 S. 79ff.].

Auf Grundlage der untersuchten eindimensionalen Abhängigkeiten und des Π -Theorems wurden folgende dimensionslose Kennzahlen ermittelt:

$$\Pi_1 = \frac{\eta}{\varphi_V \cdot w_{tip} \cdot d_p} \quad (3-9)$$

$$\Pi_2 = H \quad (3-10)$$

$$\Pi_3 = \frac{\epsilon}{w_{tip}^3 \cdot d_p} \quad (3-11)$$

$$\Pi_4 = \frac{w_v}{w_{tip} \cdot d_p^2} \quad (3-12)$$

Durch Auftragen dieser Kennzahlen mit den realen Werten der Versuchsergebnisse eines speziellen Rührers in einem logarithmisch unterteiltem Diagramm (siehe Abbildung 3-4) ergibt sich folgender Zusammenhang für diesen Rührer:

$$\Pi_4 = 8,42 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{\Pi_1}{\Pi_3}\right)^{1,11} \quad (3-13)$$

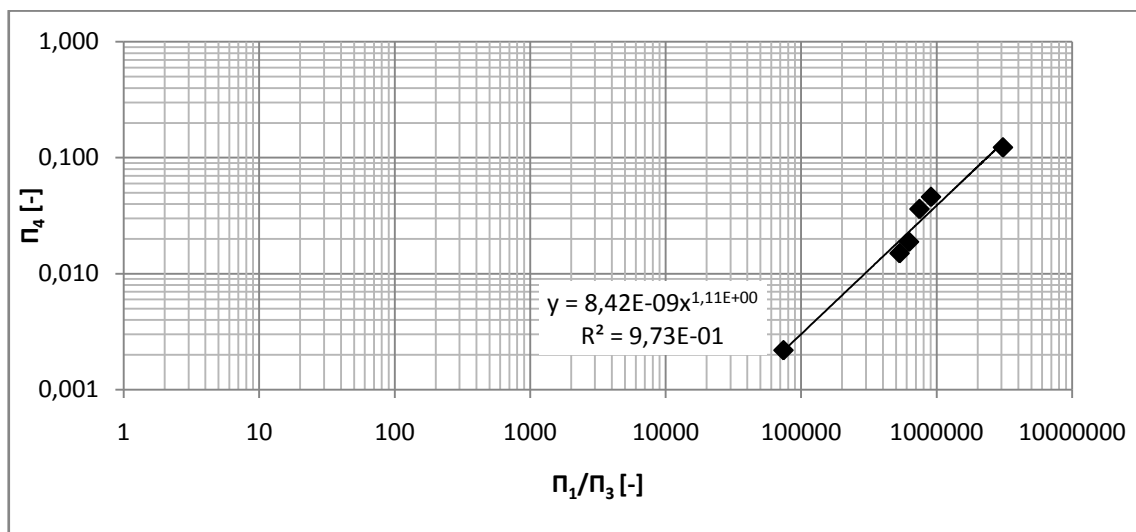


Abbildung 3-4: Darstellung von Π_4 über Π_1/Π_3 des Rührers ART3 [3 S. 32]

Wird dieser Auftrag für alle Rührer durchgeführt, so ist eine Streuung um die eingezeichnete Funktion erkennbar (siehe Abbildung 3-5).

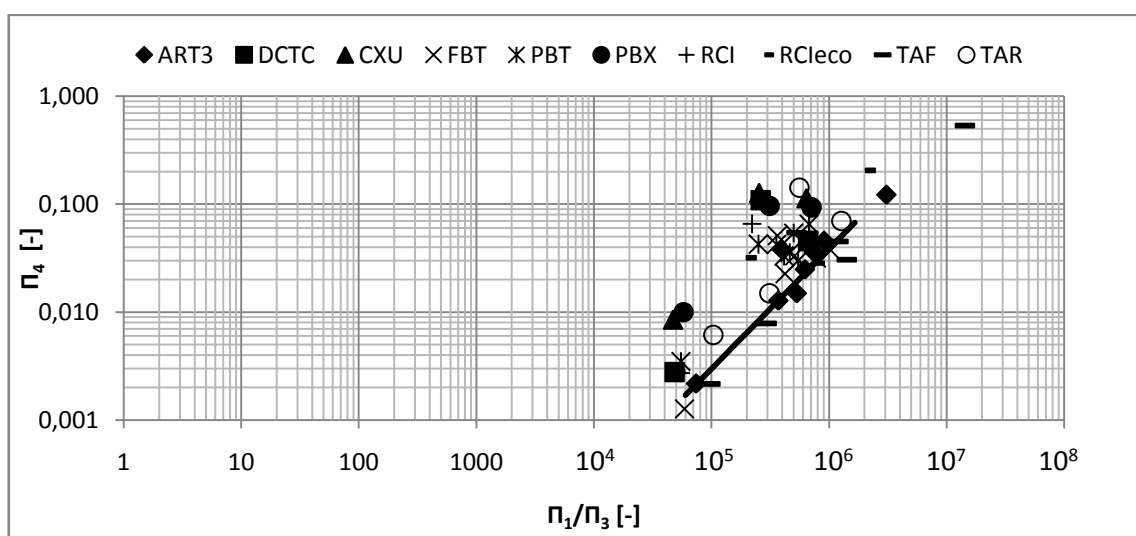


Abbildung 3-5: Darstellung von Π_4 über Π_1/Π_3 aller untersuchten Rührer [3 S. 33]

Nach [3] ist diese Streuung zum einen auf Messfehler zurückzuführen, aber auch darauf, dass in diesem Modell die Härte vernachlässigt wurde. Diese Abhängigkeit zu prüfen ist Teil dieser Arbeit.

3.2 Verschiedene Untersuchungsmethoden

In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Bestimmung des Verschleißes an Rührern zu finden. Zum einen besteht die Möglichkeit, wie u. a. in 3.1 bereits beschrieben wurde, die Abrasion über den Verlust an Masse nachzuweisen. Diese Methode liefert aber lediglich Aussagen über den quantitativen Faktor. Es ist mit dieser Methode nicht möglich zu bestimmen, an welcher Stelle Material abgetragen wurde.

Eine weitere Methode, die ebenfalls in 3.1 ausführlich erläutert ist, nimmt sich das Messen der Ausdehnung an vorab definierten Punkten am Rührer zur Grundlage. Diese Methode liefert sowohl quantitative als auch qualitative Ergebnisse. Nachteil dieser Verfahrensweise ist jedoch, dass die Punkte vorab festgelegt werden müssen, wobei evtl. nicht alle relevanten Stellen erfasst werden. Hinzu kommt der steigende Aufwand mit wachsender Anzahl an Messstellen. Dieser dürfte sich allerdings unter Zuhilfenahme der Computertechnik relativieren.

Bei der Farbschichtmethode werden die Rührer mit unterschiedlichen Farben lackiert. Durch die Abrasion werden diese an den entsprechenden Stellen abgetragen. Ist die Dicke der Farbschichten bekannt, so könnte neben der genauen Stelle der Abrasion, auch eine Geschwindigkeit mit Hilfe der Fläche bestimmt werden. Nachteilig an dieser Methode ist, dass nur Rührergeometrien, jedoch nicht die Eignung eventueller Schutzschichten eines Rührers (z. B. Emaille) untersucht werden können. Ein Beispiel dieser Methode ist in der Abbildung 3-6 (A) dargestellt.

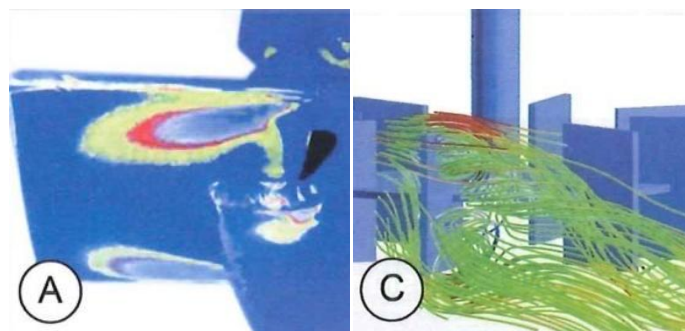


Abbildung 3-6: Farbschichtmethode (links) und Analyse durch eine CFD-Software [2]

Der rechte Teil der Abbildung zeigt die Möglichkeit, einen abrasiven Verschleiß mithilfe von CFD-Programmen an bestimmten Stellen zu erklären. So wird an den Strömungslinien mit hoher Geschwindigkeit (rot) ein höherer Verschleiß auftreten, als an anderen Stellen.

Eine weitere Möglichkeit der Untersuchung der Abrasion bildet die moderne 3D-Laserscantechnik. Diese Methode bietet viele Vorteile, so kann der genaue Ort der Abrasion unabhängig von vorab definierten Punkten bestimmt werden, da die gesamte Oberfläche zur Untersuchung bereit steht.

Es ist aber auch möglich, dass komplette abgetragene Volumen zu bestimmen. Darüber hinaus ist es unabhängig vom Material der Rührer. Nachteilig auf diese Technik wirkt sich vor allem der hohe Anschaffungspreis aus.

3.3 Hydroabrasion in der Industrie

In der industriellen Verfahrenstechnik finden sich alle unter 2.3.1 erläuterten Grundmechanismen des Verschleißes wieder. Intention dieses Kapitels ist es einen Einblick der durch Hydroabrasion verursachten Probleme, deren Konsequenzen und mögliche Schadensstellen zu geben.

Besonders gefährdet sind Prozesse, die neben einer Suspension, eine korrosive Komponente beinhalten. Für solche Anwendungsfälle werden häufig emaillierte Rührapparate eingesetzt. Eine Reihe solcher Prozesse ist nachfolgend dargestellt [13]:

- Herstellung von Polyaluminiumchlorid unter ständigem Rühren von festem Aluminiumhydroxid in heißer Salzsäure
- Nasschemische Abtrennung von Edelmetallen aus edelmetallhaltigen Schlämmen
- Aufbereitung von korrosiven, feststoffbeladenen Prozessabwässern

Problematisch an diesen Prozessen ist der mögliche Totalausfall der gesamten Anlage. Wird die schützende Schicht an einer Stelle zerstört, so werden die darunterliegenden Materialien angegriffen. Diese sind in der Regel nicht beständig gegenüber korrosiven Medien und werden innerhalb kürzester Zeit zerfressen.

Ein mögliches Schadensbild eines emaillierten Rührers ist in der Abbildung 3-7 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Emailleschicht an der Flügelspitze bereits durch Hydroabrasion abgetragen wurde und der darunterliegende Grundwerkstoff zum Vorschein kommt.



Abbildung 3-7: Schadensbild eines emaillierten Rührerblattes infolge von Abrasion [18]

Nicht nur die bewegten Elemente sind im Rührapparat gefährdet, sondern das gesamte System wird hydroabrasiv beansprucht. Die häufigsten Schadensstellen sind in der Abbildung 3-8 dargestellt.

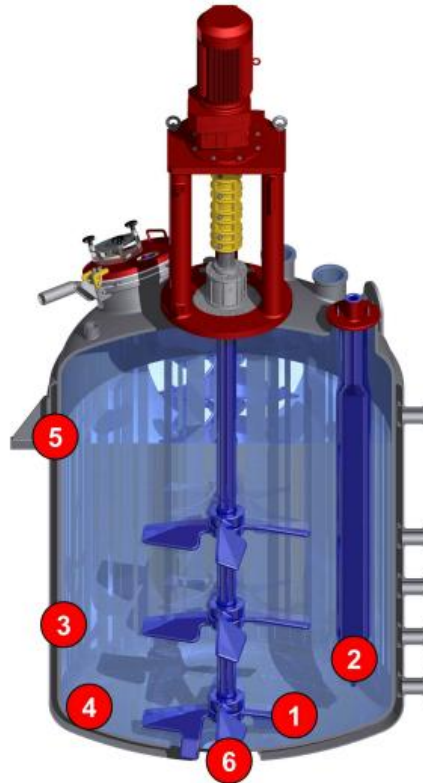


Abbildung 3-8: Durch Hydroabrasion gefährdete Stellen in einem Rührapparat [13]

Darin ist zu erkennen, dass nicht nur die Flügelkanten der Rührer (1) der Gefahr ausgesetzt sind, sondern auch die angeströmten Flächen der Stromstörer (2), die auf Höhe der Rührer befindliche Behälterwand (3) und der Behälterboden unterhalb des Rührers (4). Sind an der Flüssigkeitsoberfläche aufschwimmende Partikel vorhanden, so besteht in diesem Bereich zusätzlich ein besonderes Risiko der Hydroabrasion (5). Die Auslaufstutzen eines Behälters sind ebenfalls gefährdet (6).

Prinzipiell kann zusammengefasst werden, dass Stellen

- hoher Strömungsgeschwindigkeiten und
- an Umlenkungen der Strömungsrichtung

ein erhöhtes Gefährdungspotential durch Hydroabrasion besteht [13].

Die Vermeidung bzw. Verringerung von Hydroabrasionsschäden basiert auf zwei unterschiedlichen Ansätzen. Zum einen kann eine besonders abriebfeste Beschichtung gewählt werden. So wurde von der Firma THALETEC eine Emaille namens ABRISIST® entwickelt. Diese zeichnet sich nach eigenen Angaben durch eine 20% höhere Korrosionsbeständigkeit gegenüber Standard-

emalls bei gleichzeitig hoher Abriebfestigkeit aus [13]. In diesem Ansatz werden aber nur die Folgen der Abrasion gemindert, jedoch nicht die Ursachen wie die Prozessbedingungen beeinflusst. Dies verfolgt der zweite Ansatz. So können mittels optimierter Prozessbedingungen und verbessertem Anlagendesign die Ursachen der Hydroabrasion bekämpft werden. So kann u. a. durch eine andere Anzahl oder eines anderen Typs von Stromstörern die erforderliche Drehzahl gesenkt und somit gleichzeitig die kinetische Energie der Partikel reduziert werden. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Hydroabrasion [18].

Da die Hydroabrasion kaum komplett vermeidbar ist, gibt es zahlreiche Möglichkeiten Prozesse auf ihren Verschleiß zu überwachen. So besteht die Möglichkeit spezielle Sonden (z. B. Ultraschallsonden) anzubringen oder ähnlich der Farbschichtmethode auf der Oberfläche besonders gefährdeter Bereiche unterschiedlich farbige Schichten aufzutragen. Dies ermöglicht eine visuelle Beurteilung des Verschleißes während Inspektionsarbeiten.

4 Der Versuchsstand

4.1 Aufbau des Versuchsstandes

Die experimentellen Untersuchungen fanden in einem Glasbehälter ($D = 300\text{mm}$) mit Klöpferboden statt (siehe Abbildung 4-1). Die Bewehrung erfolgte nach der DIN 28146 mit einem Paddelstromstörer. Für den Antrieb der Rührer wurde das drehzahlregelbare Laborrührwerk RZR 2102 Control der Firma Heidolph gewählt. Neben der Drehzahl wird durch dieses Rührwerk auch das aktuelle Drehmoment angezeigt.



Abbildung 4-1: Der Versuchsstand

Als Rührer fanden mittels Rapid Prototyping hergestellte Schrägblatt- und Blattrührer aus ABS-Kunststoff (Acrylnitril-Butadien-Styrol) Verwendung. Diese wurden mit einer Wachsschicht beschichtet um eine weiche Oberfläche zu erhalten. Die geometrischen und charakteristischen Parameter der unbeschichteten Rührer sind in der Tabelle 4-1 zusammengefasst dargestellt. Eine vierblättrige Rührergruppe ist aus zwei einzelnen Teilen zusammengesetzt.

Tabelle 4-1: Parameter der verwendeten Rührer

| <i>Parameter</i> | <i>Schrägblattrührer</i> | <i>Blattrührer</i> |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| d/D | 0,44 | 0,44 |
| Anzahl Flügel | 2 | 2 |
| Einbauhöhe h_r/D | 0,15 | 0,15 |
| Anstellwinkel | 45° | 90° |
| Blattstärke | 4 mm | 4 mm |
| Gewicht | 17,662 g | 17,087 g |

4.2 Verwendete Versuchsparameter

Die Parameter der Teilversuche ergeben sich durch einen Plackett-Burman-Versuchsplan mit $m = 8$ Versuchspunkten. Grundlage der Tabelle 4-2 bildet der normierte Plan aus den theoretischen Grundlagen (siehe Tabelle 2-1). Folgende Einflussfaktoren wurden betrachtet:

- Drehzahl N
- Volumenkonzentration der Feststoffpartikel φ_v
- Härte der Feststoffpartikel H_M
- Partikeldurchmesser d_p
- Viskosität der Flüssigkeit η

Die Härte und der Partikeldurchmesser wurden dabei zusammengefasst unter den Oberbegriff Feststoff. Des Weiteren enthält der Versuchsplan zwei fiktive Einflussfaktoren.

Tabelle 4-2: Verwendete Versuchsparameter

| <i>Versuch</i> | <i>Drehzahl</i> | <i>Volumenkonzentration</i> | <i>Feststoff</i> | <i>Viskosität</i> |
|----------------|-----------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| | N | φ_v | | η |
| | [1/min] | [Vol%] | | [mPa·s] |
| 1 | 400 | 10 | Harz grob | 4,8 |
| 2 | 400 | 10 | Glas grob | ≈1 |
| 3 | 300 | 5 | Glas grob | 4,7 |
| 4 | 300 | 5 | Glas fein | 4,8 |
| 5 | 300 | 10 | Harz fein | 4,7 |
| 6 | 400 | 5 | Harz grob | ≈ 1 |
| 7 | 400 | 10 | Glas fein | ≈ 1 |
| 8 | 300 | 5 | Harz fein | ≈ 1 |

Nach der Aufstellung des Versuchsplans wurde eine kleine Anpassung bei den Versuchen 2 und 4 erforderlich. Es wurden die Drehzahlen getauscht, da ansonsten die Suspendierkriterien bei Versuch 2 aufgrund der hohen Volumenkonzentration nicht erfüllt gewesen wären.

Die Füllhöhe der Flüssigkeit betrug stets $H/D = 1,25$. Als Flüssigkeit mit geringer Viskosität wurde normales Leitungswasser verwendet. Eine höhere Viskosität wurde durch Zugabe von Glycerin erreicht (Verhältnis 1:2). Die Viskosität des Wasser-Glycerin-Gemisches wurde mithilfe des Laborgeräts Physica MCR301 bestimmt. Im Anhang C befinden sich die jeweiligen Viskositäten vor und nach den Versuchen.

Die jeweiligen Parameter der unterschiedlichen Feststoffe sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Stoffdaten der Feststoffe

| <i>Feststoff</i> | <i>Dichte</i> | <i>Durchmesser</i> | <i>Härte nach Mohs</i> |
|------------------|----------------------|--------------------|------------------------|
| | ρ | d_p | H_M |
| | [kg/m ³] | [μm] | [-] |
| Glas fein | 2500 | 225 | 7,0 |
| Glas grob | 2500 | 565 | 7,0 |
| Harz fein | 1500 | 240 | 3,5 |
| Harz grob | 1500 | 650 | 3,5 |
| Siliziumcarbid | 3800 | 500 | 9 |

4.3 Beschichten der Rührer mit Wachs

Um einen Volumen- oder einen Massenabtrag mit einer annehmbaren Versuchszeit nachweisen zu können, mussten die Rührer mit einer relativ weichen Oberfläche beschichtet werden. Dazu kam ein handelsübliches Kerzenwachs (Schmelztemperatur bei ca. 60°C [19], geschätzte Härte nach Mohs kleiner 1) zum Einsatz (siehe Abbildung 4-2). Dieses besitzt bei einer Wassertemperatur von 20°C eine ausreichende Härte, ist aber dennoch so weich, um einen Abtrag nachweisen zu können.



Abbildung 4-2: Mit Wachs beschichteter und unbeschichteter Rührer

Die Beschichtung der Rührer erfolgte durch mehrmaliges Eintauchen in flüssiges Kerzenwachs, welches durch ein Wasserbad auf 60°C erhitzt wurde.

Um eine ausreichende Wachssicht zu erhalten, erfolgte das Eintauchen in mehren Teilschritten. Somit konnte die gebildete Wachsschicht aushärten und darauf eine neue Schicht anheften.

Für die Versuche zur Bestimmung des Volumenabtrages wurde das Beschichten beendet, sobald die Rührer einen ungefähren Durchmesser von 140mm aufwiesen. Das Abbruchkriterium beim Beschichten der Rührer für die Massenbestimmung lag bei ca. 49 ± 1 g (Grundgewicht der Rührer ca. 17g). Aufgrund der Wachsschicht vergrößerte sich das Durchmesser Verhältnis d/D von 0,44 auf ca. 0,47.

Im Anschluss an das Beschichten mussten die Rührer nachbearbeitet werden. Dadurch wurden Unebenheiten ausgeglichen, überschüssige Teile entfernt und die Kanten eckig geformt. Bevor die Rührer im Versuchsstand verwendet werden konnten, mussten diese mehrere Stunden aushärten.

5 Bestimmung der Abrasion über den Volumenabtrag

5.1 Allgemeines

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, verfolgt diese Arbeit das Ziel den Einfluss einzelner Parameter auf die Abrasion, wie sie zur Aufstellung des Buckingham'schen Π -Theorems in [3] verwendet bzw. zusätzlich bestimmt wurden, zu bestätigen oder auszuschließen. Hierzu wurden derselbe Versuchsaufbau sowie die gleiche Versuchsdurchführung verwendet.

5.2 Versuchsdurchführung

Grundlage der Experimente bilden die einzelnen Teilversuche aus dem Plackett-Burman-Versuchsplan (siehe Tabelle 4-2). Aufgrund der aufwändigen Scanmethode konnten nur die oberen Rührer untersucht werden.

Vor Versuchsbeginn wurde von diesen ein Nullscann angefertigt. Die Rührer im Anschluss daran eine Stunde im Versuchsstand gerührt und wiederum gescannt. Die Abrasion wurde insgesamt pro Versuchspunkt und Rührer über vier Stunden analysiert, wodurch jeweils fünf Messpunkte entstanden.

Nachdem dreidimensionale Modelle der einzelnen Versuchspunkte erstellt und die Differenzvolumen zwischen diesen Punkten bestimmt wurden, konnte das abgetragene Volumen nach einer Stunde im Versuchsstand ermittelt werden.

5.3 Die Scantechnik und deren Auswertung

5.3.1 Vorbereiten der Rührer

Die Scantechnik erfordert eine helle, nicht spiegelnde Oberfläche. Daher musste diese vor dem Scannen mattiert werden. Dazu wurde eine handelsübliche, weiße Temperafarbe verwendet. Äquivalent dazu hätte auch Kreidespray o. ä. Verwendung finden können. Wichtig dabei ist, dass die Farbschicht keine Nasen aufwirft bzw. immer die gleiche Stärke hat.

5.3.2 Das Scansystem

Für die Aufnahme eines 3D-Modells kam das Low-Cost-Laserscannersystem der Firma DAVID Vision Systems GmbH zum Einsatz (siehe Abbildung 5-1). Dieses umfasst

- eine Kalibrierfläche (sog. Panel) mit Grundplatte,
- ein fokussierbares Lasermodul (grünes Laserlicht bei einer Wellenlänge von $\lambda = 532\text{nm}$),
- eine USB-CCD-Monochromkamera mit einer Auflösung von 1024x768 Pixeln und einer Einzelbildrate von 30 Bildern pro Sekunde,
- ein Objektiv der Firma Pentax mit einer Brennweite von 6mm sowie
- die DAVID-Auswertungssoftware.

Der Antrieb des Lasers erfolgte durch eine selbstgebaute Vorrichtung mit einem Gleichstromgetriebemotor.

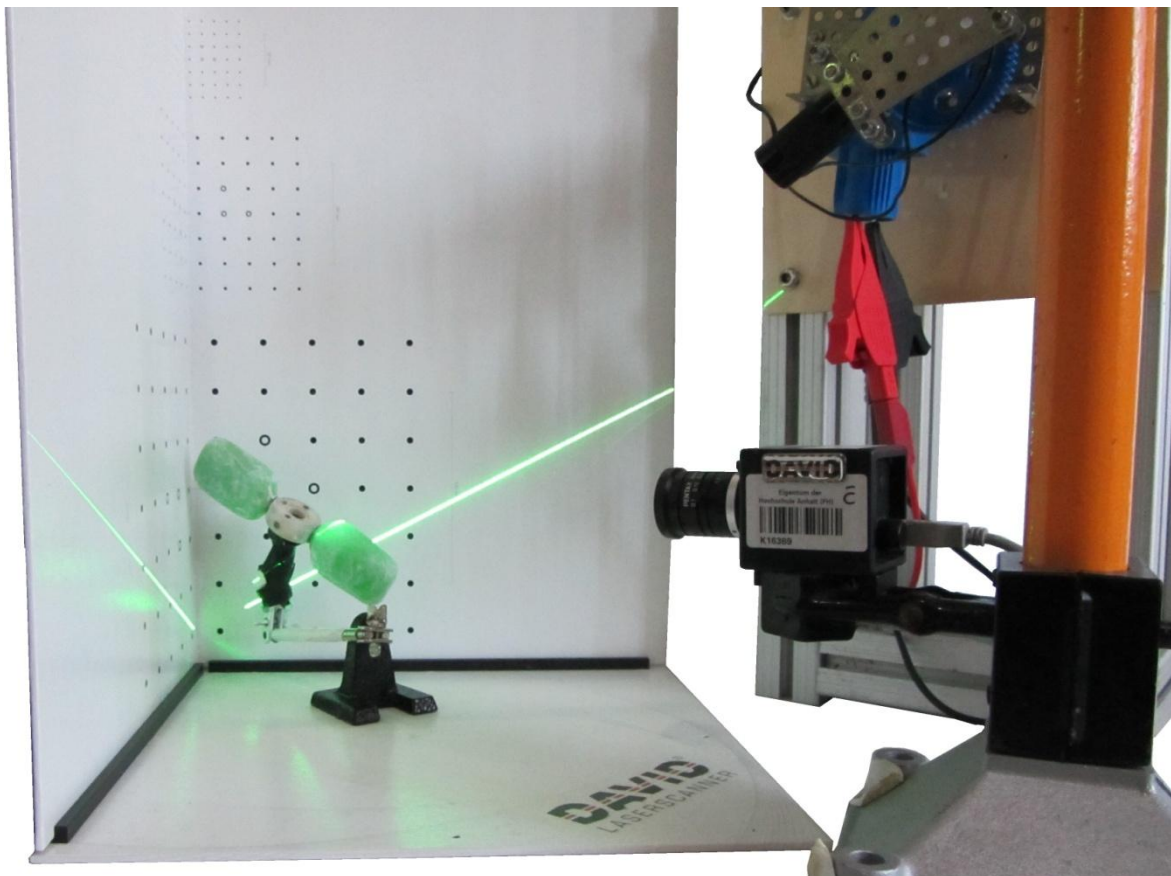


Abbildung 5-1: Low-Cost-Scannersystem mit Kalibrierfläche, Lasermodul mit Antrieb, Kamera und mattiertem Rührer

Das Scansystem beruht auf dem Prinzip der Triangulation und nimmt sich dabei das Lichtschnittverfahren zu Hilfe. Dabei vergleicht es die Position einer Laserlinie auf der bekannten Oberfläche einer Referenzgeometrie im Hintergrund und auf der unbekanntenen Oberfläche des zu scannenden

Objektes im Vordergrund. Anhand trigonometrischer Funktionen und Algorithmen können dadurch die exakten Punkte der Oberfläche des Objektes im dreidimensionalen Raum berechnet werden [20].

Die Erstellung eines 3D-Modells kann in drei Teilschritte gegliedert werden. Zu Beginn erfolgen eine Kalibrierung sowie die Abstimmung des Systems. Anschließend werden vom Objekt aus mehreren Perspektiven die Oberflächenkoordinaten bestimmt und im letzten Teilschritt zusammengesetzt. Die folgenden Abschnitte geben eine ausführlichere Beschreibung dieser Schritte.

5.3.3 Kalibrieren des Messsystems

Bevor ein 3D-Modell erstellt werden kann, müssen alle Komponenten aufeinander abgestimmt und kalibriert werden.

Zu Beginn ist es erforderlich, die Kamera genau mittig auf die zwei rechtwinklig zueinanderstehenden Kalibrierseiten (Referenzgeometrie) und des gewünschten Rasters auszurichten. Die verwendete Kalibrierfläche umfasst insgesamt drei verschiedene große Raster. Aufgrund der Abmessungen der Rührer wurde stets das größte Raster mit 120mm als Maßstab verwendet.

Um die notwendigen Koordinaten der Referenzgeometrie zu erhalten, muss dieses mittels der aufgedruckten Punkte kalibriert werden. Dazu sollte die Kamera fokussiert, die Belichtungszeit auf hoch gestellt, alle automatischen Bildanpassungsfunktionen deaktiviert und mindestens die sechs großen Punkte des verwendeten Rasters von der Kamera erfasst werden [3].

Durch die aufgenommenen Punkte wird es der Software ermöglicht einen Zusammenhang zwischen den Pixelkoordinaten der Kamera und der Oberfläche der Referenzgeometrie herzustellen.

Nach der Kalibrierung dürfen der Aufbau und die Einstellungen der Kamera nicht mehr verändert werden, bis alle notwendigen Scans erstellt wurden.

5.3.4 Scannen eines Objektes

Die Scanmethode registriert keine schwarzen Flächen, daher wurden auf der Nabe der Rührer Bezugspunkte aufgezeichnet. Diese ermöglichen beim Zusammensetzen der Scans eine eindeutige Zuordnung der gescannten Oberflächen. Um die Wellenbohrung nicht mit aufzunehmen, wurde diese mittels Klebestreifen abgedeckt.

Das Scannen erfordert eine möglichst dünne, scharfe und helle Laserlinie, daher sollten während des Scanvorgangs dunkle Lichtverhältnisse herrschen.

Das zu scannende Objekt sollte so nah wie möglich in die Ecke der beiden Kalibrierseiten bzw. innerhalb des verwendeten Rasters gestellt werden.

Im Anschluss daran wird durch den über einen Motor angetriebenen Laser das Objekt gleichmäßig abgetastet. Dies muss für eine Perspektive so oft wiederholt, bis ausreichend Punkte der Oberfläche im dreidimensionalen Raum aufgenommen wurden. In der Abbildung 5-2 ist links ein Scan mit einmaliger und rechts ein Scan mit zweimaliger Abtastung dargestellt.

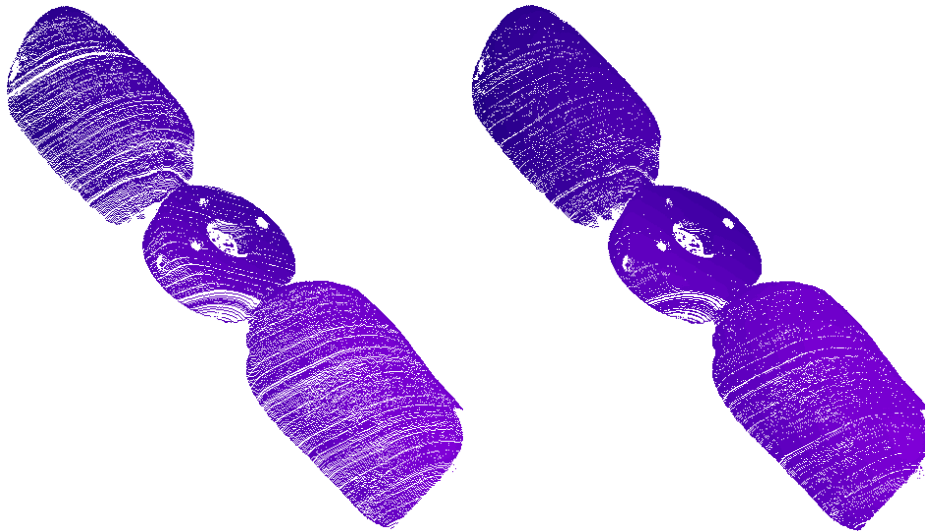


Abbildung 5-2: Aufnahmen während eines Scans

Da es mit diesem Verfahren nur möglich ist, die Oberfläche des für die Kamera sichtbaren Teils im Raum abzubilden, muss diese Prozedur mindestens für so viele Perspektiven des Objektes wiederholt werden, so dass im Anschluss ein komplettes 3D-Modell aus den einzelnen Objektdateien (*.obj) zusammengesetzt werden kann.

Während des Scannens gibt die Software Aussagen über die Qualität des derzeitigen Scanvorgangs. In der Abbildung 5-3 sind diese Scan-Qualitäts-Bewertungen dargestellt.

a=29.8° **w=2.6px** **b=1.0** **l=305px** **r=236px** **p=0.5**

Abbildung 5-3: Scan-Qualitäts-Bewertungen

Die Hintergrundfarbe der Werte gibt die Qualität wieder. Sie verläuft von grün, sehr gut, über gelb, akzeptabel bis rot, schlecht. Die Werte an sich haben folgende Bedeutung [21]:

- a Schnittwinkel [°] zwischen Laserlicht-Ebene und Kamera-Blickrichtung
- w Durchschnittliche Laserlinien-Breite (pro Bildspalte) [Pixel]
- b Durchschnittliche Helligkeit des gesamten Bildes
- l Länge [Pixel] der Laserlinie auf dem linken Kalibrier-Panel
- r Länge [Pixel] der Laserlinie auf dem rechten Kalibrier-Panel
- p „Qualität der Laserebene“, Genauigkeit der berechneten Raumlage der Laserlichtebene

5.3.5 Zusammensetzen der einzelnen Scans

Die einzeln abgespeicherten Scans (siehe Abbildung 5-4, Bild A) werden mit dem zur DAVID-Software gehörenden Tool Shapefusion zu einem kompletten Modell (Bild C) zusammengesetzt.

Dazu stehen in diesem Tool mehrere Werkzeuge zum Ausrichten und Verschmelzen der einzelnen Scans bereit.

Zu Beginn müssen zwei Scans anhand der angebrachten Bezugspunkte grob zueinander ausgerichtet werden. Im Anschluss daran erfolgt eine automatische Ausrichtung mit der sog. Feinregistrierung. Diese legt die charakteristischen Punkte der einzelnen Oberflächen direkt übereinander (siehe Bild B). Im Anschluss werden die Flächen miteinander verknüpft und die restlichen Scans um dieses Modell herum „gebaut“, bis eine geschlossene Oberfläche entstanden ist (Bild C).

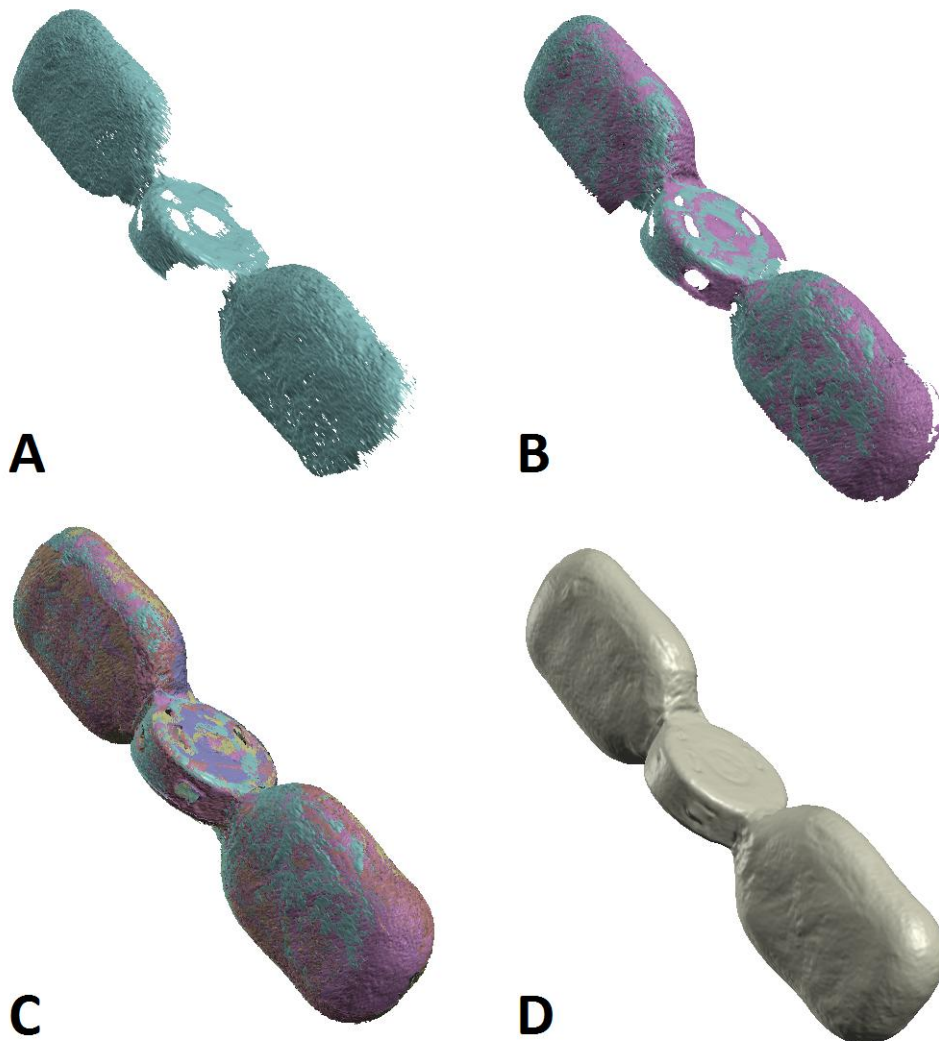


Abbildung 5-4: Zusammensetzen der einzelnen Scans zu einem kompletten 3D-Modell

Den letzten Schritt bildet das Verschmelzen der einzelnen Scans nach der Poisson-Methode zu einem Vollkörper (siehe Bild D). Dieser wird als *.obj-Datei abgespeichert und kann anschließend in verschiedenen CAD-Programmen weiterverarbeitet werden.

5.3.6 Auswertung der Scans

5.3.6.1 Übereinanderlegen der einzelnen Scans

Damit die aufeinanderfolgenden 3D-Modelle (zu den Zeitpunkten 0h und 1h, 1h und 2h usw.) von einander abgezogen und somit das fehlende Volumen bestimmt werden kann, müssen diese zunächst aneinander ausgerichtet werden.

Dies wird ähnlich dem Zusammenfügen der einzelnen Scans durchgeführt. In diesem Fall kommen die aufgemalten schwarzen Bezugspunkte wiederum zum Einsatz. Das Programm Shapefusion kann anhand dieser Punkte, die leichte Vertiefungen auf dem Modell hinterlassen, die verschmolzenen Modelle automatisch aneinander ausrichten, ohne dass die Seiten der Rührer o. ä. vertauscht werden.

Die aneinander ausgerichteten Modelle werden separat abgespeichert.

5.3.6.2 Bestimmung des abgetragenen Volumens

Nachdem die zwei zusammengehörenden Modelle aneinander ausgerichtet sind, müssen sie voneinander abgezogen werden. Dies wird durch das Program netfabb Studio Professional 4 realisiert.

In der Abbildung 5-5 sind links die zwei ausgerichteten Modelle zu sehen. Das grüne Modell entspricht in diesem Fall dem Nullscann und das rote Modell dem Abbild des Rührers nach einer Stunde im Versuchsstand. Die gelbe Darstellung ist das verbleibende Volumen nach der Bool'schen Operation bzw. das durch das Rühren abgetragene Volumen. Dies wird durch netfabb ermittelt und bildet die Grundlage zur Bestimmung der Volumenabnahme in Abhängigkeit von der Zeit.

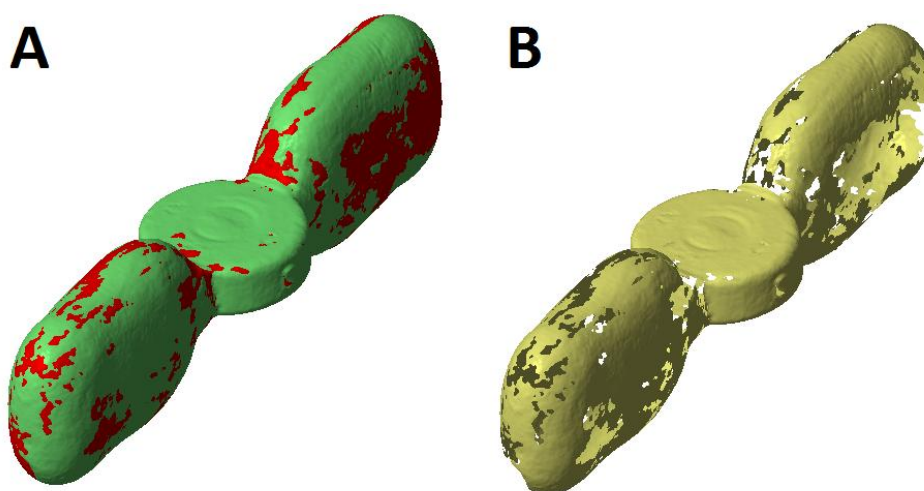


Abbildung 5-5: Aneinander ausgerichtete Scans und abgetragenes Volumen

Neben dem Volumen besteht zusätzlich die Möglichkeit die Länge, Breite, Höhe und die Oberfläche der 3D-Modelle zu bestimmen.

5.4 Auswertung der Versuche

Wird die Auswertung äquivalent der Auswertung in [3] durchgeführt, so werden die mittels Bool'scher Operation bestimmten Volumen(-abträge) (siehe Tabelle D-1 und Tabelle E-1 im Anhang) aufsummiert und über der Versuchszeit grafisch dargestellt (siehe Abbildung 5-6 für den Schrägblattrührer und Abbildung 5-7 für den Blattrührer).

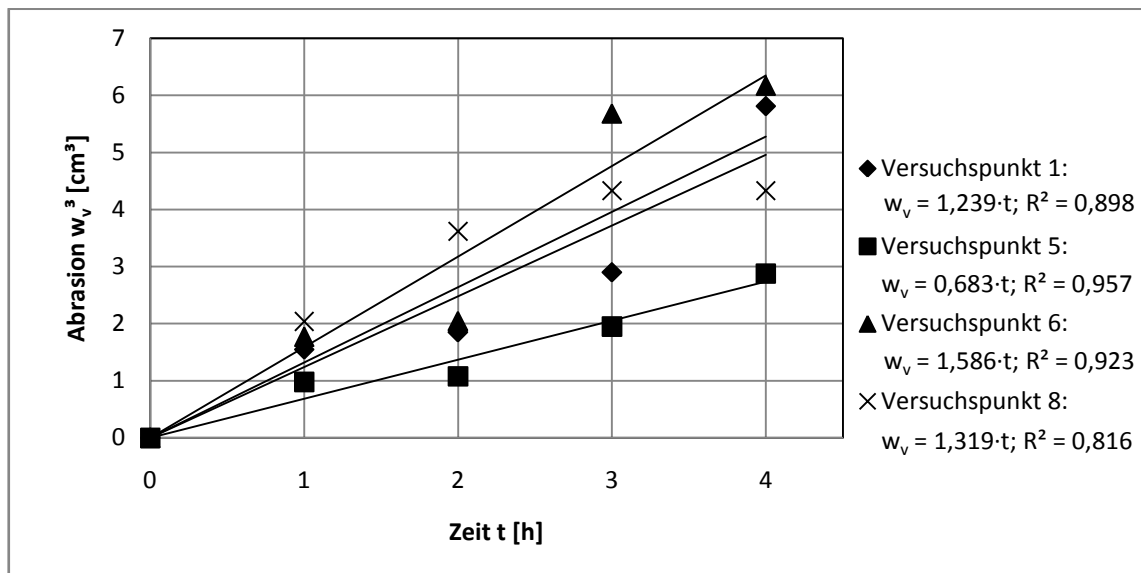


Abbildung 5-6: Darstellung der mittels Bool'scher Operation erzeugten Versuchsergebnisse für die Versuchspunkte 1, 5, 6 und 8 des Schrägblattrührers

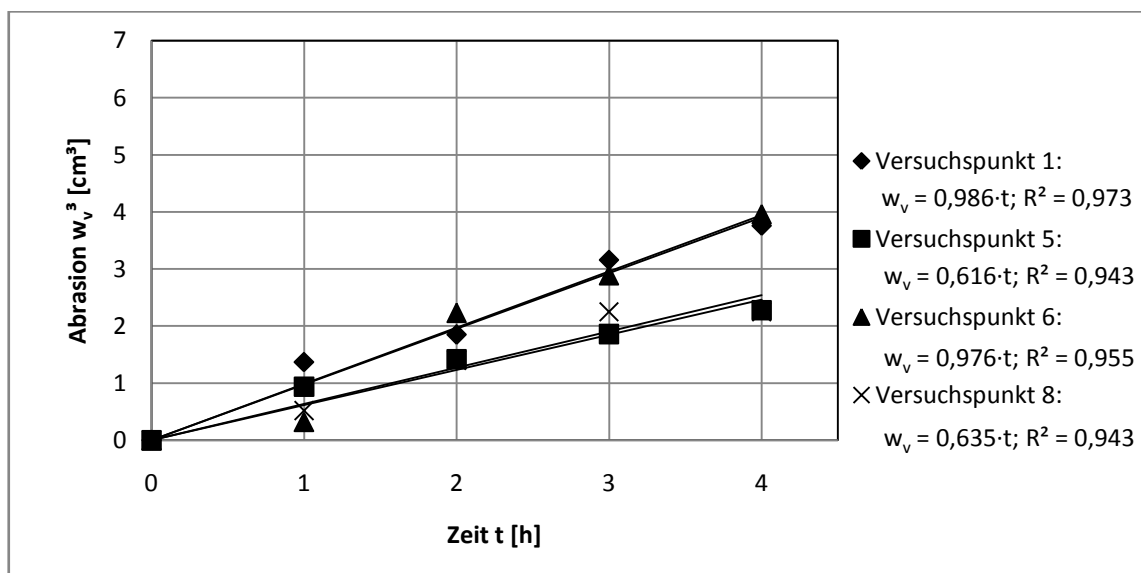


Abbildung 5-7: Darstellung der mittels Bool'scher Operation erzeugten Versuchsergebnisse für die Versuchspunkte 1, 5, 6 und 8 des Blattrührers

Der Theorie nach beschreibt der Anstieg der Regressionsgeraden C_v ($C...$ engl. Constant, $v...$ engl. volume) die Stärke des Volumenabtrags w_v ($w...$ engl. wear) infolge der Abrasion. Mathematisch kann dies wie folgt dargestellt werden:

$$w_v = C_v \cdot t \quad (5-1)$$

mit

$$[C_v] = \frac{cm^3}{h}$$

Aus dieser Formel lässt sich folgender Zusammenhang ableiten. Je größer die Konstante C_v ist, desto größer ist das abgetragene Volumen in einer bestimmten Zeit und somit die Abrasion im untersuchten System.

Werden jedoch die absoluten Volumene, also ohne Abziehen eines 3D-Modells von einem anderen, betrachtet, so ergibt sich für den Schrägblattrührer am Versuchspunkt 6 die Situation in der Abbildung 5-8.

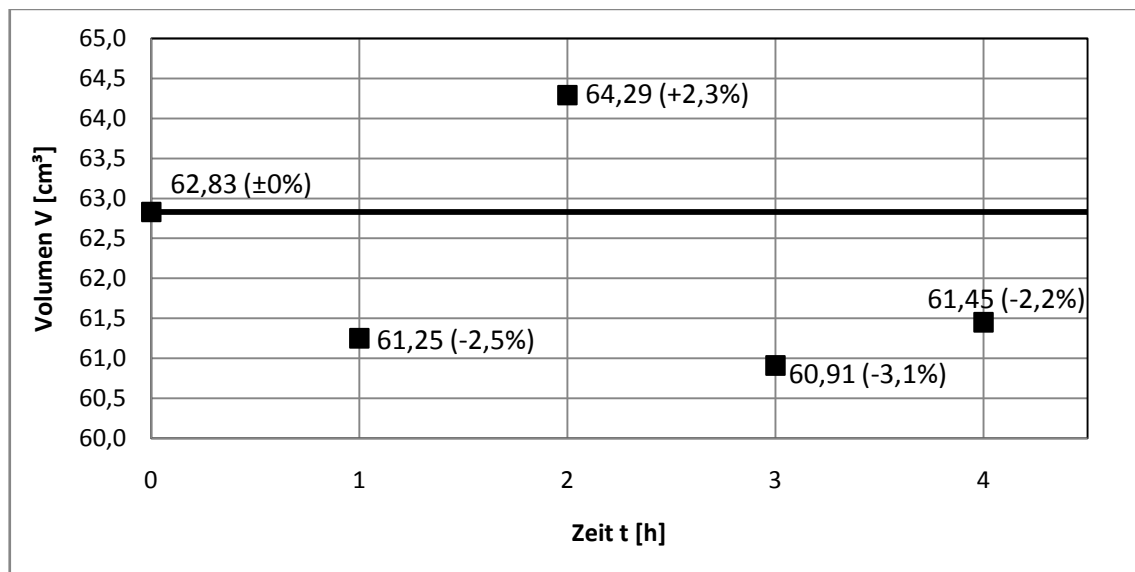


Abbildung 5-8: Volumen der einzelnen Scans für den Schrägblattrührer am Versuchspunkt 6

In dieser wird deutlich, dass die Volumene um das Nullvolumen schwanken. Werden die Ergebnisse anderer Versuchspunkte bzw. die des Blattrührers untersucht, so ergibt sich teilweise das Bild, dass die Volumene mit der Versuchszeit zunehmen.

Eine Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse kann durch die Berechnung der Dichte erfolgen. Werden die Masse und das Volumen als Differenzwerte in die Gleichung zur Berechnung der Dichte eingegeben, so müsste der Quotient aus beiden der Dichte des Wachses entsprechen (Dichte von Wachs ca. $0,90 - 0,98g/cm^3$ [22]).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\Delta m}{w_v} \quad (5-2)$$

Für den Versuchspunkt 6 des Schrägblattrührers ($-\Delta t = 0h - 1h$) wird dies nachfolgend beispielhaft dargestellt:

$$\rho = \frac{m_{t=0h} - m_{t=1h}}{w_{v,-\Delta t=0h-1h}} = \frac{55,927 - 55,770g}{1,586cm^3} = 0,10 \frac{g}{cm^3} \quad (5-3)$$

Anhand der berechneten Dichte wird deutlich, dass mindestens ein Wert mit Fehlern behaftet sein muss. Wird die Bestimmung der Masse näher betrachtet, so besteht die Möglichkeit, dass diese zum Zeitpunkt $t = 1h$ viel zu groß ist. Eine geringere Masse zu diesem Zeitpunkt hätte eine größere Dichte zur Folge.

Im Vorfeld der Massenbestimmung wurden die Rührer mit einem Föhn getrocknet. Da aber nicht ausgeschlossen werden kann, dass dennoch Wasserreste am Rührer vorhanden waren, kann ein Fehler bei der Massenbestimmung nicht ausgeschlossen werden. Probleme während der Massenbestimmung werden im Kapitel 6.4 näher betrachtet.

Wird das Gesamtvolumen bzw. das Gewicht des Rührers betrachtet, so ergibt sich folgende Mischdichte ρ_m :

$$\rho_m = \frac{m_{t=0h}}{V_{t=0h}} = \frac{55,927g}{62,83cm^3} = 0,89 \frac{g}{cm^3} \quad (5-4)$$

Der Anteil des ABS-Kunststoffes (Dichte ca. $1,04 - 1,12g/cm^3$ [23]) am Gesamtgewicht beträgt ca. 68%. Daraus ergibt sich eine berechnete Mischdichte des beschichteten Rührers von $1,04g/cm^3$. Wird diese mit der ermittelten Dichte aus (5-4) verglichen, so ist der experimentell bestimmte Wert zu gering. Gründe hierzu sind u. a. in folgenden Punkten zu suchen:

- Nichtbeachtung der Wellenbohrung beim Scannen,
- durch die Herstellung bedingte Lufteinschlüsse im ABS-Kunststoff sowie
- Luft zwischen Wachs und Kunststoff.

Die mit Wachs bedeckte Oberfläche macht ca. 80% der Gesamtoberfläche aus. Wird die abgetragene Höhe über der Zeit für die mittlere Abrasionsgeschwindigkeit von $C_v = 1,586cm^3/h$ (siehe Abbildung 5-6, Versuchspunkt 6) und einer Gesamtoberfläche von ca. $A = 125cm^2$ betrachtet, so ergibt sich eine Höhenabnahme Δh über der gesamten Wachsfläche von

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = \frac{C_v}{0,8 \cdot A_{ges}} = \frac{1,586 \frac{cm^3}{h}}{0,8 \cdot 125cm^2} = 0,01586cm \quad (5-5)$$

Unter der Annahme, dass nur die Druckseite des Rührers einem Verschleiß ausgesetzt ist, halbiert sich die Fläche. Daraus ergibt sich eine Höhenabnahme von ca. 0,3mm pro Stunde. Dieser Wert könnte punktuell realistisch sein, jedoch nicht für die gesamte Fläche der Druckseite.

Bei der Betrachtung der Längen, Höhen und Breiten (siehe Anhang D und E) der einzelnen Modelle fällt auf, dass diese ähnlich dem Volumen im Verlauf der Zeit schwanken und teilweise zu- oder abnehmen. Eine Art Einpegeln der Versuchsergebnisse nach einer bestimmten Zeit wurde nicht festgestellt.

Als weiterer Beweis für die Unsicherheit der erhaltenen Ergebnisse in Bezug zur Bestimmung des Volumenabtrags mit der Bool'schen Operation ist, dass selbst das Abziehen eines Volumenkörpers eines früheren von einem späteren Zeitpunkt zu einem Volumenabtrag führt. Beispielhaft wird dies in der Tabelle 5-1 verdeutlicht.

Tabelle 5-1: Mittels Bool'scher Operation bestimmte Volumenabträge, links normaler zeitlicher Verlauf, rechts umgekehrter zeitlicher Verlauf

| <i>Zeit</i> | <i>Differenzvolumen</i> | <i>Zeit</i> | <i>Differenzvolumen</i> |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| $-\Delta t$ | ΔV | $-\Delta t$ | ΔV |
| <i>[h]</i> | <i>[cm³]</i> | <i>[h]</i> | <i>[cm³]</i> |
| 0 – 1 | 0,98 | 1 – 0 | 0,50 |
| 1 – 2 | 0,10 | 2 – 1 | 1,60 |
| 2 – 3 | 0,87 | 3 – 2 | 0,21 |
| 3 – 4 | 0,93 | 4 – 3 | 0,36 |
| 0 – 4 | 1,00 | 4 – 0 | 0,80 |

Zwar sind die Werte im rechten Teil der Tabelle in der Regel geringer als im linken, aber um einen expliziten Beweis zur Volumenabnahme zu erbringen, reichen die Ergebnisse nicht aus.

Ein angeblicher Abtrag von Volumen auf der Rührernabe unterstützt zusätzlich die These, dass die erhaltenen Ergebnisse nicht korrekt sind (siehe Abbildung 5-5: „Aneinander ausgerichtete Scans und abgetragenes Volumen“).

Die oben genannten Fakten lassen den Schluss zu, dass eine qualitative und quantitative Bestimmung der einzelnen Abhängigkeiten einzelner Einflussparameter wie sie im Plackett-Burman-Versuchsplan als Grundlage genommen wurden, mit der verwendeten Scantechnik und der angewandten Auswertungsprozedur zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich ist. Daher wurden die Versuche abgebrochen.

5.5 Untersuchung des Scansystems

Aufgrund der mangelhaften Ergebnisse des Versuchsplans wurde das Scansystem u. a. auf den relativen Fehler bei der Bestimmung des Differenzvolumens und der geometrischen Größen untersucht (Rohdaten siehe Anhang F).

Dazu wurde zum einen ein und derselbe Rührer (gleiche Wachsschicht, gleiche Farbschicht usw.) fünfmal gescannt, zusammengesetzt und ausgewertet. Ein anderer Ansatzpunkt ist das fünfmalige Zusammensetzen derselben Scans nach der gleichen Prozedur (gleiche Ausrichtung der einzelnen Scans zueinander, Verwendung gleicher Werkzeuge usw.). Die Untersuchung wurde nur für den Blattrührer durchgeführt.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Differenzvolumen mit Hilfe der Bool'schen Operation (wie in [3]) und über die absoluten Volumen der Rührer ist in der Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Betrachtung der Volumina

| <i>Mittelwert Differenzvolumen</i> | |
|------------------------------------|-------|
| <i>[cm³]</i> | |
| <i>Fünfmaliges Scannen</i> | |
| Bool'sche Operation | 0,696 |
| Absolute Volumen | 0,558 |
| <i>Fünfmaliges Zusammensetzen</i> | |
| Bool'sche Operation | 0,216 |
| Absolute Volumen | 0,403 |

Um aussagekräftige Ergebnisse bei der Bestimmung einzelner Einflussfaktoren des Plackett-Burman-Versuchsplans zu erhalten, müsste der Fehler bei dieser Betrachtung deutlich kleiner sein als der zu erwartende Abtrag bei der gewählten Versuchszeit. Der Idealfall wäre ein Differenzvolumen von null Kubikzentimetern. Praktisch ergibt sich bei dieser Untersuchung, dass die Abweichung größer als der zu erwartende Abtrag bei einer Stunde Versuchszeit (Erwartungswert ca. 0,1cm³/h) ist.

Bezüglich der Bool'schen Operation ist ersichtlich, dass die Abweichung beim Scannen um das dreifache größer ist als beim reinem Zusammensetzen der gleichen Scans. Wird das Differenzvolumen jedoch über die absoluten Volumen der 3D-Modelle bestimmt, so ist der Abstand der beiden Werte wiederum geringer.

Eine eindeutige Beurteilung, welcher Schritt (Scannen oder Zusammensetzen) dementsprechend den größeren Einfluss auf das Ergebnis hat, kann anhand dieser Werte nicht getroffen werden, da sich die beiden Fehler beim Scannen überlagern und somit nicht getrennt untersucht werden können.

Beim Vergleich der ermittelten Differenzvolumen des Plackett-Burman-Versuchsplans (siehe Tabelle D-1 und Tabelle E-1 im Anhang) mit diesen Werten (siehe Tabelle F-1 im Anhang) ist kaum ein Unterschied in der Größenordnung erkennbar.

Werden die geometrischen Parameter betrachtet, so ist der Fehler für das Volumen am größten, da in diesem auch die einzelnen Abweichungen der Länge, Breite und Höhe mit eingehen (siehe Tabelle 5-3). Die Ermittlung dieser Maße basiert auf der Abbildung E-1.

Für die Untersuchung des fünfmaligen Scannens wurden immer alle erforderlichen Scans eines 3D-Modells nacheinander aufgenommen. Daher konnte nicht gewährleistet werden, dass für alle

fünf 3D-Modelle immer genau die gleichen Perspektiven (gleicher Winkel des Rührers zur Kamera etc.) gescannt wurden. Die ungefähren Perspektiven während des Scanvorgangs sind im Anhang G abgebildet.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Betrachtung der geometrischen Größen

| | | Mittelwert | Standartabweichung | Variationskoeffizient |
|-----------------------------------|--------------------|------------|--------------------|-----------------------|
| <i>Fünfmaliges Scannen</i> | | | | |
| Volumen | [cm ³] | 52,80 | 0,419 | 0,79% |
| Höhe | [mm] | 140,33 | 0,505 | 0,36% |
| Breite | [mm] | 37,36 | 0,153 | 0,41% |
| Länge | [mm] | 31,84 | 0,075 | 0,24% |
| Oberfläche | [cm ²] | 117,43 | 0,363 | 0,31% |
| <i>Fünfmaliges Zusammensetzen</i> | | | | |
| Volumen | [cm ³] | 52,74 | 0,338 | 0,64% |
| Höhe | [mm] | 139,61 | 0,044 | 0,03% |
| Breite | [mm] | 37,22 | 0,073 | 0,20% |
| Länge | [mm] | 31,80 | 0,062 | 0,19% |
| Oberfläche | [cm ²] | 117,01 | 0,420 | 0,36% |

Werden die geometrischen Parameter der beiden untersuchten Aspekte miteinander verglichen, so weichen die Standartabweichungen der Höhen im Vergleich zu den restlichen Parametern am stärksten voneinander ab.

Wird ein Scan ohne weitere Bearbeitung in netfabb Studio Professional betrachtet, so ist erkennbar, dass die gescannte Oberfläche aus einzelnen Dreiecken zusammengesetzt ist (siehe Abbildung 5-9). Wird der Winkel zwischen der Oberfläche und dem Laser zu klein, so schweifen diese Dreiecke nach außen aus. Diese Gefahr besteht hauptsächlich an der Flügelspitze, wodurch die große Abweichung der Höhen in der Tabelle 5-3 zu erklären ist. Besonders problematisch an dieser Tatsache ist, dass genau an dieser Stelle der größte Abtrag erwartet wird.

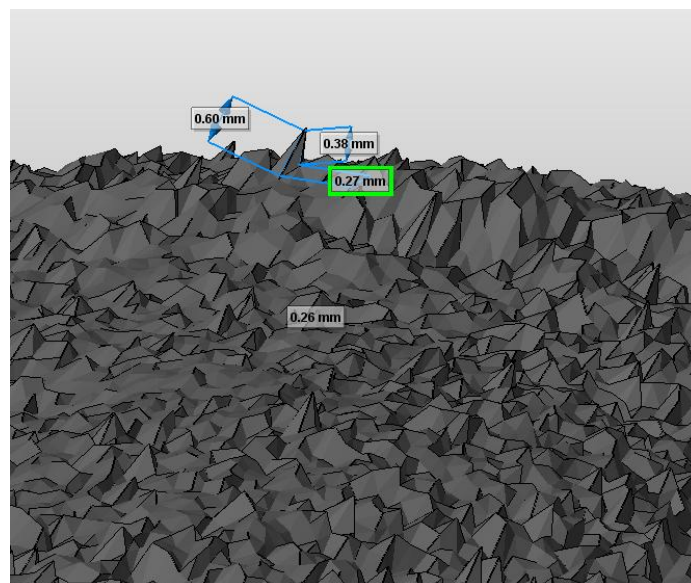


Abbildung 5-9: Aus Dreiecken zusammengesetzte Oberfläche eines Scans (Blickrichtung Flügelspitze)

5.6 Mögliche Fehlerursachen

Die Betrachtung des Scansystems im vorherigen Kapitel offenbart bereits einige Fehlerursachen, die das Ergebnis verfälschen. Aufgrund der Tatsache, dass die Versuche abgebrochen wurden, bezieht sich dieses Kapitel allein auf die möglichen Fehler, die im direkten Zusammenhang mit der Bestimmung des Volumens durch das Scansystem stehen. Fehler, die die Verfälschung eines Faktors nach sich ziehen, werden nicht weiter betrachtet.

Der Einfluss der folgenden Fehler auf die Versuchsergebnisse kann vernachlässigt werden, da beim Auftreten einer dieser Fehler die Versuchsreihe komplett abgebrochen oder im Hinblick zur Scantechnik, die Aufnahme des 3D-Modells komplett wiederholt wurde.

Hinsichtlich der Versuchsführung ergibt sich folgende Fehlerquelle:

- *Mechanische Beschädigung des Wachses*
Durch mechanische Einflüsse, wie sie z.B. während des Einspannens der Rührer auf der Welle auftreten können, besteht die Gefahr des Abplatzens von Wachs.

Bezüglich der Scantechnik besteht folgender grober Fehler:

- *Verändern der Messeinrichtung*
Durch Veränderung der Lage der Referenzgeometrie oder der Kamera ist die Kalibrierung des Messsystems hinfällig. Als Folge würde die Oberfläche des gescannten Objekts vergrößert oder verkleinert aufgenommen werden.

Der Einfluss der folgenden Fehlerquellen auf das Volumen kann durch korrektes und gleichmäßiges Arbeiten bzw. durch Wahl geschickter Scanperspektiven gering gehalten, jedoch nicht komplett ausgeschlossen werden:

- *Unterschiedliche Dicke der Farbschicht*
Das Volumen wird durch die für den Scanprozess notwendige weiße Farbe minimal vergrößert.
- *Unzureichende Anzahl an Scans/ fehlende Oberflächenfragmente*
Fehlende Flächen werden während des Verschmelzens durch das Programm Shapefusion interpoliert.
- *Vertauschen einzelner Perspektiven*
Aufgrund der Symmetrie der Rührer sind die Oberflächen subjektiv gesehen gleich und können daher beim Zusammensetzen vertauscht bzw. verdreht werden.
- *Fehlende Überlappung der einzelnen Scans*
Die einzelnen Scans werden anhand charakteristischer Punkte vom Shapefusion zusammengesetzt. Fehlen Übereinstimmungen auf der Oberfläche zweier Scans, so können diese geringfügig gegeneinander verschoben werden.

- *Abdriften der Qualitätsparameter beim Scannen*

Entsprechend der Abbildung 5-3 führen rot unterlegte Parameter zu einer schlechten Qualität der Scans.

Auf die nachfolgenden Fehler kann nur geringer Einfluss genommen werden, da sie zum Teil von der Funktionsweise des Scansystems abhängig sind.

- *Vertiefungen im 3D-Modell durch die Referenzpunkte bzw. der Wellenbohrung*

Die schwarzen Referenzpunkte auf dem Rührer rufen kleine Vertiefungen auf dem 3D-Modell hervor. Trotz derselben Referenzpunkte für einen Rührer sind diese Vertiefungen nicht immer gleich tief.

- *Erstellen einzelner 3D-Modelle mit unterschiedlichen Scanperspektiven*

Wie bereits im vorherigen Kapitel bewiesen, beeinflusst die zufällige Position der Perspektiven beim mehrmaligen Scannen des ein und desselben Rührers das bestimmte Volumen. Ob durch die Wahl definierter Positionen dieser Fehler verringert werden kann, wurde nicht weiter untersucht.

- *Zusammensetzen der Scans*

Ähnlich dem vorherigen Punkt wurde nachgewiesen, dass das Zusammensetzen gleicher Scans zu einem 3D-Modell nicht immer das gleiche Ergebnis liefert. Die Ursache liegt darin begründet, dass z. B. das Werkzeug *Feinregistrierung* zufallsbasiert arbeitet [24]. Dieser Fakt ist während des Zusammensetzens erkennbar. Nach jeder Feinregistrierung bewegen sich die Scans zueinander, wenn auch subjektiv gesehen nur geringfügig.

- *Oberfläche der Scans*

In der Abbildung 5-9 ist ersichtlich, dass die Oberfläche aus einzelnen Dreiecken zusammengesetzt ist. Dieser Fehler ist stark abhängig vom Winkel zwischen Laser und Oberfläche.

- *Verschmelzen der Scans*

Durch das Verschmelzen der Scans mit Hilfe der Poisson-Methode wird die Oberfläche geglättet. Dies relativiert die degenerierten Dreiecke, wodurch aber je nach Anzahl der Ausschweifungen ein größeres oder kleineres Volumen erzeugt wird.

5.7 Schlussbetrachtung und Ansätze zur Verbesserung

Die Verwendung einer Scantechnik zur Bestimmung des Volumenabtrags bringt erhebliche Vorteile im Vergleich zu anderen Methoden, da gleichzeitig eine qualitative und quantitative Beurteilung möglich ist. Innerhalb dieses Versuchs stellte sich jedoch heraus, dass das hier verwendete Low-Cost-System noch Verbesserungen benötigt. Nach Angaben des Herstellers DAVID Vision Systems GmbH besitzt das David-Starter-Kit eine Genauigkeit von ungefähr 0,5% der Objektgröße.

Die verwendete Konfiguration ist bereits eine modifizierte Variante mit besserer Kamera und einem Laser mit geringerer Wellenlänge. Werden die Ergebnisse der Untersuchung des Scansystems (siehe Tabelle F-2) mit dieser Genauigkeit verglichen, so ist eine Verbesserung erkennbar. Das Ziel, die Bestimmung der Einflussgrößen auf die Abrasion, konnte aber mithilfe dieses Systems und der verwendeten Versuchsdurchführung aufgrund der erhaltenen Auflösung nicht erreicht werden.

Durch eine Vergrößerung der zu messenden Abrasion kann die erforderliche Auflösung des Scansystems herabgesetzt werden. Realisierbar ist dies durch Wahl einer längeren Zeitspanne zwischen zwei Messpunkten oder durch Einsatz eines weicheren Waxes.

Einen wichtigen Ansatzpunkt stellt die nähere Untersuchung des Scansystems dar. Die Ermittlung einer festen Prozedur zum Scannen mit geringstem Fehler und reproduzierbaren Ergebnissen sind dabei die wichtigsten Ziele dieser Untersuchung. Basis dieser möglichen Prozedur ist die Ermittlung der optimalen Scanperspektiven. Durch Verwendung fest eingestellter Stative für eine Perspektive auf fest definierten Punkten des Versuchstisches kann sichergestellt werden, dass immer dieselben und somit optimalen Ansichten gescannt werden.

Auf Grundlage dessen ist realisierbar, dass immer die gleichen Werkzeuge (Ausrichtung, Feinregistrierung etc.) zur Erstellung des 3D-Modells Anwendung finden.

Diese Prozedur hätte zur Folge, dass einige mögliche Fehlerquellen auf ein Minimum reduziert werden könnten.

Die Form des Rührers ging bisher noch nicht in die Betrachtungen ein, da auf eine Fehlerbetrachtung hinsichtlich des Versuchsplans verzichtet wurde. Die Möglichkeit der Herstellung einer gleichmäßigen Wachsbeschichtung sollte dementsprechend zusätzlich betrachtet werden. Die Rührergeometrie beeinflusst direkt die Abrasion.

6 Bestimmung der Abrasion über den Massenabtrag

6.1 Allgemeines

Die Versuche zur Bestimmung der Abrasion über den Massenabtrag verliefen ähnlich den Versuchen zur Bestimmung des Volumenabtrages mittels 3D-Scantechnik. Die Versuche wurden jedoch unabhängig voneinander durchgeführt.

Gemeinsamkeiten bestehen in der Verwendung der gleichen Versuchspunkte des in der Tabelle 4-2 beschriebenen Plackett-Burman-Versuchsplans, des Aufbaus des Versuchsstandes und des Zieles, die Abhängigkeiten einzelner Parameter auf die Abrasion zu untersuchen.

6.2 Versuchsdurchführung

Analog den Versuchen zur Bestimmung des Volumenabtrags, wurden die mittels Rapid-Prototyping hergestellten Rührer mit einer Wachsschicht überzogen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, betrug das Gesamtgewicht der Rührer ungefähr $49 \pm 1\text{g}$ nach der Beschichtung. Aufgrund dessen, dass die Dicke der Wachsschicht pro Eintauchen kaum beeinflussbar ist, ist es nicht möglich ein genaues Gewicht der Rührer einzustellen (Grundgewicht der Rührer ca. 17g).

Größter Unterschied in der Durchführung bezüglich der beschriebenen Versuche im Kapitel 5 besteht darin, dass der gewählte Zeitraum zwischen zwei Messungen anstatt einer, drei Stunden betrug. Dies ergibt eine Versuchsdauer für eine Versuchsreihe von über neun Stunden.

Darüber hinaus wurde sowohl der untere als auch der obere Rührer untersucht und ein Versuchspunkt zweimal pro Rührer aufgenommen.

Ziel dieser Änderung im Hinblick zu den Volumenversuchen besteht darin,

- einen größeren Massenabtrag über der Versuchszeit und somit eindeutigere Ergebnisse zu erhalten und
- um Mittelwerte berechnen zu können, wodurch Zufallsergebnisse bzw. Ausreißer minimiert werden sollten.

Als Waage kam die Analysenwaage R300S der Firma Sartorius mit einer Auflösung von 0,0001g zum Einsatz.

Der genaue Ablauf einer Versuchsreihe kann wie folgt zusammengefasst werden:

- 1) Beschichten der Rührer
- 2) Wiegen der Rührer zum Zeitpunkt $t = 0h$
- 3) Verwendung der Rührer über drei Stunden im Versuchsstand
- 4) Trocknen der Rührer über drei Stunden im Trockenschrank bei $30^{\circ}C$
- 5) Wiegen der Rührer
- 6) Wiederholung ab Schritt 3 bis zur Aufnahme von vier Messpunkten

Während der Trocknungszeit kam jeweils die andere Rührergruppe (Schräglblatt- oder Blatt-rührer) zum Einsatz. Für jeden Versuchspunkt wurde zusätzlich das Drehmoment bestimmt.

Um Abweichungen der Suspension innerhalb eines Versuchspunktes zu vermeiden, wurden alle Versuche für einen Versuchspunkt hintereinander durchgeführt. Nach jeder Versuchsreihe erfolgte eine Neubeschichtung der Rührer.

6.3 Auswertung der Versuche

6.3.1 Bestimmung der Abrasionskonstante

Die Grundlage der Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans bildet die Abrasionskonstante C_m (m... engl. mass). Diese entspricht der Zielgröße y des Versuchsplans. Die Ermittlung der Konstante ist ähnlich der Ermittlung der Abrasion in [3] oder der Bestimmung der Abrasionskonstante C_v im Kapitel 5.4.

Bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse, dargestellt im Anhang H und I, sind inkonsequente Messwerte erkennbar. So nehmen zum Teil die gemessenen Massen mit der Versuchszeit zu. Diese fehlerbehafteten Werte wurden für die Berechnung der Abrasionskonstante C_m nicht betrachtet und sind nur der Vollständigkeit halber im Anhang dargestellt.

Beispielhaft wird die Ermittlung der Abrasionskonstante für den Blatt-rührer unter dem Versuchspunkt 1 im Folgenden erläutert.

Zur Bestimmung der Konstante wurden von den einzeln gemessenen Massen die Differenzbeträge gebildet und aufsummiert. In der Abbildung 6-1 sind die aufsummierten Massenabträge über der Zeit grafisch dargestellt. Wird in dieser eine Regressionsgerade der Form

$$y = m \cdot x \tag{6-1}$$

eingefügt, so ergibt sich folgende Gleichung für die Abrasion:

$$w_m = C_m \cdot t \quad (6-2)$$

mit

$$[C_m] = \frac{g}{h}$$

Aus dem Grund, dass eine Rührergruppe aus zwei einzelnen Teilen (oben und unten) zusammengesetzt ist, besteht die Möglichkeit einer differenzierten Betrachtung.

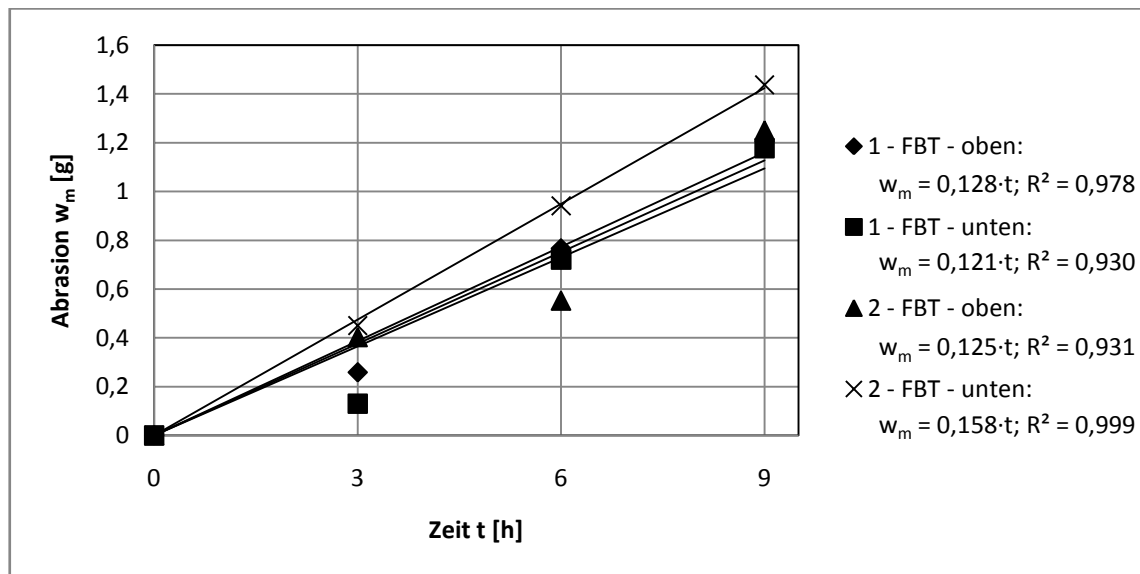


Abbildung 6-1: Bestimmung der Abrasionskonstante des Blattrührers (FBT) am Versuchspunkt 1

6.3.2 Vergleich der Rührer bzw. der Rührerteile

Grundlage des Vergleichs der beiden Rührertypen bildet die der Zielgröße y entsprechenden Abrasionskonstante C_m der Gesamtbetrachtung der beiden Rührergruppen. Unter der Annahme, dass die durchgeführten Versuche eine ausreichend große Stichprobe darstellen, unterscheiden sich die beiden Typen bezüglich der Abrasion kaum. Durch Aufsummieren der Abrasionskonstanten aller Versuchspunkte ergibt sich eine theoretisch gleichgroße Abrasion (siehe Abbildung 6-2). Werden jedoch die berechneten Effekte (siehe folgendes Kapitel) betrachtet, so scheint der Einfluss der Faktoren auf den Schrägblattrührer größer zu sein.

Bei der Betrachtung der Abrasionskonstanten der einzelnen Rührerteile, ist die Abrasion des unteren Schrägblattrührers ($\sum y_2 = 0,3563\text{g/h}$) größer als beim Oberen ($\sum y_1 = 0,2625\text{g/h}$). Der Unterschied beim Blattrührer kann hingegen als kaum vorhanden angesehen werden ($\sum y_4 = 0,3163\text{g/h}$, oben und $\sum y_5 = 0,3023\text{g/h}$, unten). Aufgrund dessen, dass die Abrasionskonstanten die Grundlage der Effekte bilden, ergibt sich bei diesen das gleiche Bild.

Hinsichtlich der relativ geringen Datenmenge bzw. der Nachbearbeitung der Versuchsergebnisse (Eliminieren der negativen Massendifferenzen), stellen die oben genannten Schlussfolgerungen nur vage Thesen dar.

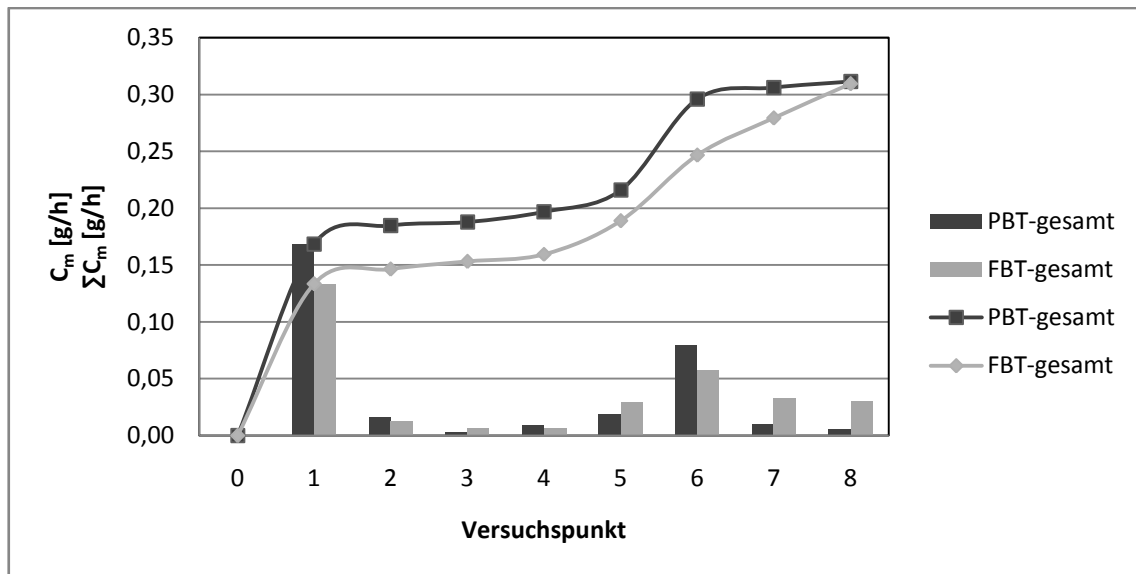
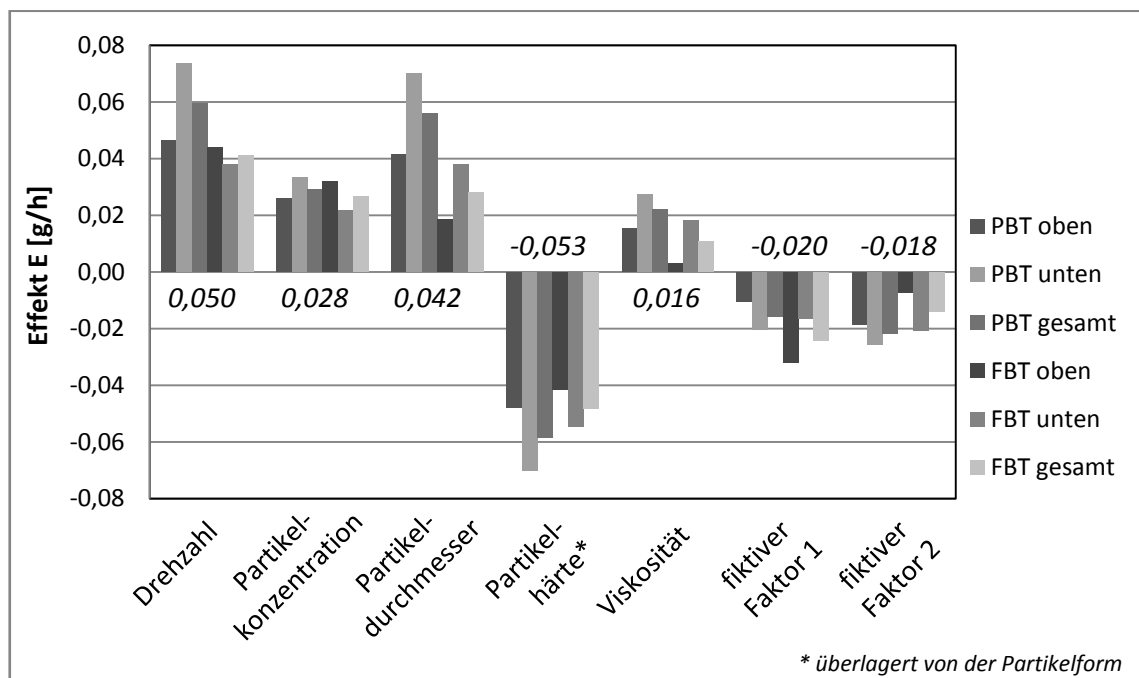


Abbildung 6-2: Aufsummierte Zielgrößen γ_3 und γ_6 der beiden Rührertypen

6.3.3 Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans

6.3.3.1 Die Effekte der Einflussfaktoren

Die Auswertung des Versuchsplans erfolgt analog der im Kapitel 2.4 „Statische Versuchsplanung“ beschriebenen Theorie und ist im Anhang J detailliert dargestellt. Ein Schritt der Auswertung bildet die Berechnung der sog. Effekte. Diese bilden die Stärke eines Einflussfaktors ab. Zur Beurteilung der Effekte wird ein Mittelwert aus allen Rührern bzw. Rührerteilen berechnet. Alle Effekte sind in der Abbildung 6-3 in Form eines Säulendiagramms bzw. der Mittelwert aus diesen als einzelne Zahl dargestellt.



* überlagert von der Partikelform

Abbildung 6-3: Bestimmte Effekte des Plackett-Burman-Versuchsplans

Die folgenden Ergebnisse sind immer unter der Prämisse zu betrachten, dass nicht alle Werte (negative Massendifferenzen) zur Auswertung herangezogen wurden. Somit ist nicht auszuschließen, dass aufgrund der Auswahl der Werte Abhängigkeiten bzw. Einflüsse erzeugt wurden.

Generell ergibt sich das Bild, dass bis auf die Viskosität, die wahren Einflussfaktoren die größten Effekte erzielen.

Bezüglich der untersuchten Faktoren, hat die „Partikelhärte“ den größten Einfluss auf die Abrasion. Entgegen der Annahme und des Stands der Wissenschaft, könnte die These aufgestellt werden, desto härter die Partikel sind, desto geringer ist die Abrasion. Bei näherer Betrachtung der Partikel (siehe Anhang K) fallen jedoch gravierende Unterschiede in der Form auf. Die verwendeten Glaspartikel haben eine kugelartige Form, die weicheren Harzpartikel dagegen eine sehr scharfkantige, unregelmäßige Oberfläche. Daher wurde im Versuchsplan nicht die Härte, sondern die Partikelform als Parameter untersucht.

Die Viskosität als wahrer Einflussfaktor hat nach dem Plackett-Burman-Versuchsplan einen vernachlässigbaren Einfluss. Ob dies jedoch nur eine Folge der gewählten Grenzen ist, wurde nicht weiter untersucht. Zur Erfüllung der Suspendierkriterien bei einer größeren Viskosität, sind höhere Drehzahlen erforderlich.

Eine gegenseitige Beeinflussung der Effekte, insbesondere der Partikelgröße und -form, ist sehr wahrscheinlich. So wird eine größere Oberfläche mit vielen Kanten, eine größere Abrasion hervorrufen, als eine größere, aber glatte Oberfläche.

6.3.3.2 Beurteilung der Signifikanz

Eine rechnerische Beurteilung der erhaltenen Ergebnisse ist durch die Bestimmung der Signifikanz der Effekte möglich. Diese kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen über die einzelnen Varianzen der Versuchspunkte und zum anderen auf Basis der fiktiven Effekte.

Wird der Versuchsplan als $n > 1$ betrachtet, so ergibt sich nach Tabelle 2-2, dass die Effekte keinen signifikanten Einfluss aufgrund der hohen Streuung der Einzelergebnisse haben.

Durch sog. Pooling der Effekte, also durch Berechnung der Vertrauensbereiche durch die Anzahl der fiktiven Einflussfaktoren, ergibt sich auf Basis der zwei realen fiktiven Einflussfaktoren ebenfalls kein signifikanter Einfluss.

Wird aufgrund des niedrigen Effekts der Viskosität, diese ebenfalls als fiktiv angesehen, ergibt sich die Einteilung der Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Betrachtung der Signifikanz unter Annahme von drei fiktiven Faktoren (Auszug Tabelle J-5)

| Faktor | A | B | C | D | E | F | G |
|-------------------------------------|----------|-----------------------|---------------------|---------------|---------------------|--------|--------|
| | Drehzahl | Partikelkonzentration | Partikeldurchmesser | Partikelhärte | Viskosität (FIKTIV) | FIKTIV | FIKTIV |
| | N | φ_V | d_p | H_M | η | | |
| <i>Signifikanz nach Tabelle 2-2</i> | | | | | | | |
| PBT-oben | ** | * | * | ** | - | - | - |
| PBT-unten | ** | - | ** | ** | - | - | - |
| PBT-gesamt | ** | * | ** | ** | - | - | - |
| FBT-oben | - | - | - | - | - | - | - |
| FBT-unten | * | - | * | * | - | - | - |
| FBT-unten | - | - | - | - | - | - | - |

Die Basis der Einteilung der Signifikanz ist zum einen der gewählte Vertrauensbereich, aber auch die Größe des entsprechenden Effekts. Aufgrund dessen, dass die Effekte beim Schrägblattrührer größer als beim Blattrührer sind, ist der Grad der Signifikanz auch bei diesem eher erreicht.

Prinzipiell kann zusammengefasst werden, dass der Einfluss der gewählten Einflussfaktoren, bis auf den der Viskosität, nachgewiesen werden konnte.

6.4 Fehlerbetrachtung und Ansätze zur Verbesserung

Bei der Bestimmung der Abrasion über den Massenabtrag ergibt sich unter den gewählten Randbedingungen ein signifikantes Problem. Durch den zweiteiligen Aufbau der Rührer (Wachsschicht und ABS-Kunststoff) kann sich im Zwischenraum der Werkstoffe Wasser ansammeln. Die Trocknung durch einen Trockenschrank ist in diesem Fall nur bedingt möglich. Im Zwischenraum ist die Wahrscheinlichkeit einer Konvektion der warmen Luft gleich Null. Des Weiteren kann eine Diffusion des Wassers durch die Wachsschicht ausgeschlossen werden. Die Bildung des Zwischenraums ist durch Vibrationen der Rührer im Versuchsstand kaum zu vermeiden. Wasserreste bilden somit die Hauptursache der negativen Massendifferenzen.

Eine Ursache von fehlerbehafteten Ergebnissen bezogen auf den Einfluss der Faktoren liegt in der unterschiedlichen Form der Rührer von Versuchspunkt zu Versuchspunkt. Aufgrund der manuellen Beschichtung der Rührer mit Wachs kann keine reproduzierbare Form gewährleistet werden. In welcher Stärke dieser Punkt jedoch die Ergebnisse beeinflusst, ist schwer nachzuweisen. Zur Untersuchung von unterschiedlichen Rührertypen ist diese Methode evtl. ausreichend, aber zur Analyse der Effizienz verschiedener Prototypen von Rührern mit leicht abgeänderten Formmerkmalen hinsichtlich der Abrasion ungenügend.

Durch Wahl einer anderen Technologie zur Herstellung der „Wachsrührer“ kann beiden Problemen entgegengewirkt werden. Anstatt der Beschichtung des ABS-Kunststoffes mit Wachs, könnten durch Gießen der Rührer in Formen aus ABS-Kunststoff reproduzierbare Oberflächen erzeugt

werden. Um möglichen Stabilitätsproblemen des Wachses entgegenzuwirken, müssten spezielle Unterkonstruktionen sowie Halterungen zum Einspannen auf der Welle zum Einsatz kommen.

6.5 Schlussbetrachtung

Aus den Ergebnissen der Bestimmung des Massenabtrags können folgende wichtige Aussagen abgeleitet werden:

1. Das verwendete Wachs wird durch die Suspension im Versuchsstand abgetragen.
2. Der Aufbau der beschichteten „Wachsrührer“ muss verbessert werden, so dass kein Wasser eingeschlossen und mit gewogen werden kann.
3. Die vermeintlich untersuchte Partikelhärte wird durch die Partikelform überlagert. Der Einfluss der Härte konnte somit nicht untersucht werden.
4. Die Viskosität der Flüssigkeit hat kaum einen Einfluss auf die Abrasion in den verwendeten Grenzen. Die Drehzahl, die Partikelkonzentration, -größe und -form haben einen signifikanten Einfluss auf die Abrasion.
5. Ein realer Unterschied hinsichtlich der Abrasionsbeständigkeit zwischen Blatt- und Schrägblattrührer konnte anhand des geringen Versuchsumfangs nicht ermittelt werden.

Der Vergleich zwischen den durch die Scantechnik ermittelten abgetragenen Volumen von über 1cm^3 nach einer Stunde Versuchszeit und der abgetragenen Masse von ca. $0,1\text{g}$ nach drei Stunden im Versuchsstand bestätigen die These, dass die verwendete Scantechnik bzw. deren Anwendung zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend ist zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Hydroabrasion.

7 Zusammenfassung

Die Hydroabrasion ist ein wesentlicher Kostenfaktor in der Industrie und beeinflusst maßgeblich die Zuverlässigkeit von Maschinen und Anlagen. Eine genaue Kenntnis der möglichen Faktoren und deren Wirkungen ist zur Reduktion des Verschleißes ein essentieller Ansatzpunkt. In dieser Arbeit wurden dazu verschiedene Einflüsse im Bereich der Rührtechnik betrachtet.

Neben der Darstellung der allgemeinen Theorie der Rührtechnik und insbesondere des Suspendierens, wurden die Grundlagen der Tribologie und des Plackett-Burman-Versuchsplans erläutert. Die 3D-Laser-Scantechnik spielte in der Diplomarbeit eine zentrale Rolle. Das eigentliche Ziel, die Einflussfaktoren des mathematischen Modells der HS-Anhalt unter Verwendung dieser Methode und einem Plackett-Burman-Versuchsplans zu überprüfen, konnte jedoch nicht erfüllt werden. Nach subjektiver Einschätzung der Versuchsergebnisse der Volumenabtragsversuche wurden diese abgebrochen. Eine wesentliche Rolle spielte dabei, dass beim Abziehen der 3D-Modelle von der Richtung unabhängig (z. B. zum Zeitpunkt $t = 1h$ von $t = 0h$ bzw. umgekehrt) Differenzvolumen „erzeugt“ sowie, dass bei der Berechnung der Dichte des abgetragenen Volumens unrealistische Werte bestimmt wurden.

Die Ermittlung der Ursachen ergab u. a., dass an der Methodik der Bestimmung des Volumenabtrags mit dem gewählten Low-Cost-Laserscanner Verbesserungen bzw. allgemeine Untersuchungen notwendig sind. So muss für die Ermittlung des Differenzvolumens für alle erforderlichen Teilschritte: Scannen, Zusammensetzen der Scans und Bestimmung des Volumenabtrags eine Prozedur mit reproduzierbaren Ergebnissen aufgestellt werden. Bezüglich des Abtrags von Zehntel Millimetern und der Auflösung des Scansystems ist dabei eine exakte Arbeitsweise und Befolgung der Prozedur zur Erzielung reproduzierbarer Ergebnisse notwendig.

Aufgrund der mangelhaften Ergebnisse der Scantechnik wurden die Einflüsse der Faktoren mithilfe des Massenabtrages bestimmt. Neben der Bestätigung des signifikanten Einflusses der Drehzahl, der Volumenkonzentration, der Partikelgröße und der Partikelform konnte der Einfluss der Viskosität der Flüssigkeit unter Beachtung der gewählten Grenzen ausgeschlossen werden. Für den im Plackett-Burman-Versuchsplan aufgenommenen Faktor Partikelhärte stellte sich heraus, dass dieser von der Partikelform überlagert wurde. Für eine genaue Bestimmung des Einflusses der Härte ist es deshalb essentiell, unterschiedlich harte Partikel mit der gleichen Form im Versuchsstand zu suspendieren.

Die Weiterentwicklung der Scantechnik bis hin zur Ermittlung von reproduzierbaren Ergebnissen könnte eine wesentliche Rolle in der Erforschung des Verschleißes bei Rührern spielen. Im Gegensatz zu anderen Verfahren wie der Farbschichtmethode sind gleichzeitig qualitative als auch quantitative Aussagen möglich. Abgesehen von der bisherigen Verfahrensweise mit Wachs als weiche Oberfläche, könnten auch reale Rührer ohne Beeinflussung der originalen Oberfläche untersucht werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Reuschel, A., Merkle, T., Schmauder, S.: *Dem Verschleiß auf der Spur: Verknüpfung numerischer Berechnungen mit experimentellen Untersuchungen*. Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Uni Stuttgart, 2010. [Zitat vom 21. September 2013: www.imwf.uni-stuttgart.de/forschung/forschungsschwerpunkte/veroeffentlichungen/372.pdf]
- [2] Jung, J., Keller, W.: *Länger durchhalten: Erosiver Verschleiß an Rührorganen muss nicht sein*. – In: *cav chemie anlagen verfahren*, S. 46f., Dezember 2010.
- [3] Altwasser, S., Wirth, J.: *Modellierung und Optimierung des Hydroabrasivverschleißes in emaillierten Rührbehältern*. Abschlussbericht: Hochschule Anhalt, 2011.
- [4] Stieß, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik 1*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [5] Kraume, M.: *Mischen und Rühren: Grundlagen und moderne Verfahren*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [6] Kuhlmann, A., Medra, E., Rößner, F., Schneider, M.: *Reale Reaktoren für homogene Reaktionen*. [Zitat vom 13. Oktober 2013: www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/homogene_reaktoren/reale_reaktoren/reale_reaktoren.vlu.html]
- [7] Jembere, S.: *Versuchsanleitung zum Praktikum „Rührtechnik“*. Hochschule Anhalt (FH), 2010.
- [8] Altwasser, S.: *Nutzung der FBRM-Technik zur Bestimmung der Dispersphasenverteilung in gerührten Behältern*. Diplomarbeit: Hochschule Anhalt (FH), 2010.
- [9] Zlokarnik, M.: *Rührtechnik: Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1999.
- [10] Durst, O.: *Korrosions- und Verschleißigenschaften neuartiger kohlenstoffhaltiger PVD-Schichten*. Dissertation: TU Darmstadt, 2008. [Zitat vom 20. April 2013: tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1187/4/Dissertation_Durst_2008.pdf]
- [11] Czichos, H., Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. 3. Auflage. Berlin: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [12] Hydroabrasion - TVT University of Kaiserslautern. [Zitat vom 13. März 2013: www.uni-kl.de/index.php?id=13593&L=1&S=0]
- [13] THALETEC GmbH: *Modellierung und Minimierung des Hydroabrasionsverschleißes beim Rühren in emaillierten Rührbehältern*. Rev 15.10.2011. Thale, 2011.
- [14] Kleppmann, W.: *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 7. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [15] Fořt, I., Jirout, T.: *An Investigation of the Erosion Wear of Pitched Blade Impellers in a Solid-Liquid Suspension*. – In: *Acta Polytechnica* Vol. 48 No. 4/2008.

- [16] Fořt, I., Medek, J., Ambros, F.: *Erosion Wear of Axial Flow Impellers in a Solid-liquid Suspension*. – In: Acta Polytechnica. Vol. 41 No. 1/2001.
- [17] Sigloch, H.: *Technische Fluidodynamik*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [18] industrie.de: *Abnutzung vorgebeugt*. [Zitat vom 01. August 2013: www.industrie.de/industrie/live/index2.php?menu=1&submenu=3&object_id=32428351]
- [19] Wikipedia: *Kerze*. [Zitat vom: 27. Januar 2013: de.wikipedia.org/wiki/Kerze]
- [20] Winkelbach, S., Molkenstruck, S. und Wahl, F.: *Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach*. – In Franke, K. et al. (Hrsg.): *DAGM 2006, LNCS 4174*, S. 718 - 728. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [21] DAVID-WIKI: *Benutzeranleitung: Anzeige der Scan-Qualität*. [Zitat vom 30. Juli 2013: www.david-laserscanner.com/wiki/benutzeranleitung/anzeige_scan_qualitaet]
- [22] Wikibooks: *Tabellensammlung Chemie/ Dichte fester Stoffe*. [Zitat vom 31. Juli 2013: de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Dichte_fester_Stoffe]
- [23] Wikipedia: *Acrylnitril-Butadien-Styrol*. [Zitat vom 31. Juli 2013: de.wikipedia.org/wiki/Acrylnitril-Butadien-Styrol]
- [24] DAVID-WIKI: *Benutzeranleitung: Shape Fusion*. [Zitat vom 31. Juli 2013. www.david-laserscanner.com/wiki/benutzeranleitung/shape_fusion]

Anhang

| | | |
|-----------|--|-----|
| Anhang A: | t-Werte | ii |
| Anhang B: | Verwendete Rührer von [3]..... | iii |
| Anhang C: | Viskositäten | iv |
| Anhang D: | Rohdaten der Volumenabtragsversuche des Schrägblattrührers | v |
| Anhang E: | Rohdaten der Volumenabtragsversuche des Blattrührers..... | vii |
| Anhang F: | Rohdaten der Untersuchung des Scansystems | ix |
| Anhang G: | Gescannte Perspektiven..... | xi |
| Anhang H: | Rohdaten der Masseversuche des Schrägblattrührers | xii |
| Anhang I: | Rohdaten der Masseversuche des Blattrührers | xiv |
| Anhang J: | Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans für die Masseversuche | xvi |
| Anhang K: | Mikroskopaufnahmen der Partikel..... | xx |

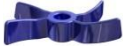










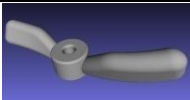
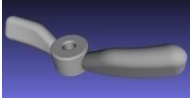
Anhang A: t-Werte

Tabelle A-1: t-Werte zur Berechnung des zweiseitigen Vertrauensbereiches

| <i>Freiheitsgrad</i> | 95% | 99% | 99,9% |
|----------------------|--------|-------|---------|
| 1 | 12,710 | 63,66 | 636,620 |
| 2 | 4,303 | 9,925 | 31,600 |
| 3 | 3,182 | 5,841 | 12,920 |
| 4 | 2,776 | 4,604 | 8,610 |
| 5 | 2,571 | 4,032 | 6,869 |
| 6 | 2,447 | 3,707 | 5,959 |
| 7 | 2,365 | 3,499 | 5,408 |
| 8 | 2,306 | 3,355 | 5,041 |
| 9 | 2,262 | 3,250 | 4,781 |
| 10 | 2,228 | 3,169 | 4,587 |
| 12 | 2,179 | 3,055 | 4,318 |
| 15 | 2,131 | 2,947 | 4,073 |
| 20 | 2,086 | 2,845 | 3,850 |
| 30 | 2,042 | 2,750 | 3,646 |
| 40 | 2,021 | 2,704 | 3,551 |
| 50 | 2,009 | 2,678 | 3,496 |
| 70 | 1,994 | 2,648 | 3,435 |
| 100 | 1,984 | 2,626 | 3,390 |
| 1.000 | 1,962 | 2,581 | 3,300 |
| ∞ | 1,960 | 2,576 | 3,291 |

Anhang B: Verwendete Rührer von [3]

Tabelle B-1: In [3] auf Abrasion untersuchte Rührer

| <i>Abbildung</i> | <i>Typ</i> | <i>d/D</i> |
|---|------------|------------|
|  | CXU | 0,42 |
|  | CXR | 0,42 |
|  | RCleco | 0,55 |
|  | IJT | 0,40 |
|  | FBT | 0,44 |
|  | RCI | 0,55 |
|  | TAF | 0,50 |
|  | TAR | 0,50 |
|  | DCT | 0,47 |
|  | PBX | 0,44 |
|  | PBT | 0,44 |
|  | ART3 | 0,52 |
|  | ART4 | 0,50 |

Anhang C: Viskositäten

Tabelle C-1: Ermittelte Viskositäten vor und nach den entsprechenden Versuchspunkten mit Glycerin für die Volumenversuche

| <i>Viskosität</i> | | | |
|-------------------|---------------|-------------|-------------------|
| η | | | |
| <i>[mPa·s]</i> | | | |
| <i>Versuch</i> | <i>Anfang</i> | <i>Ende</i> | <i>Mittelwert</i> |
| 1 | 4,74 | 5,02 | 4,88 |
| 3 | n. b. | n. b. | n. b. |
| 4 | n. b. | n. b. | n. b. |
| 5 | 4,74 | 4,72 | 4,73 |

Tabelle C-2: Ermittelte Viskositäten vor und nach den entsprechenden Versuchspunkten mit Glycerin für die Masseversuche

| <i>Viskosität</i> | | | |
|-------------------|---------------|-------------|-------------------|
| η | | | |
| <i>[mPa·s]</i> | | | |
| <i>Versuch</i> | <i>Anfang</i> | <i>Ende</i> | <i>Mittelwert</i> |
| 1 | 4,67 | 4,99 | 4,83 |
| 3 | 4,65 | 4,79 | 4,72 |
| 4 | 4,76 | 4,83 | 4,79 |
| 5 | 4,59 | 4,74 | 4,67 |

Anhang D: Rohdaten der Volumenabtragsversuche des Schrägblattrührers

Tabelle D-1: Mittels Bool'scher Operation bestimmter Volumenabtrag [cm³] des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|-------------|---------|---|---|---|------|------|---|------|
| $-\Delta t$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 – 1 | 1,55 | | | | 0,98 | 1,77 | | 2,04 |
| 1 – 2 | 0,30 | | | | 0,10 | 0,28 | | 1,58 |
| 2 – 3 | 1,05 | | | | 0,87 | 3,63 | | 0,71 |
| 3 – 4 | 2,91 | | | | 0,93 | 0,49 | | |
| 0 - 4 | 3,24 | | | | 1,00 | 1,63 | | 2,07 |

Tabelle D-2: Volumen [cm³] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 52,44 | | | | 53,64 | 62,83 | | 58,57 |
| 1 | 51,21 | | | | 53,16 | 61,25 | | 56,80 |
| 2 | 53,19 | | | | 54,66 | 64,29 | | 56,34 |
| 3 | 52,31 | | | | 54,01 | 60,91 | | 56,69 |
| 4 | 49,65 | | | | 53,44 | 61,45 | | |

Tabelle D-3: Höhen [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|--------|--------|---|--------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 139,45 | | | | 138,78 | 140,82 | | 143,03 |
| 1 | 140,12 | | | | 138,62 | 140,44 | | 143,48 |
| 2 | 139,61 | | | | 138,78 | 141,81 | | 143,44 |
| 3 | 139,76 | | | | 139,05 | 141,11 | | 142,90 |
| 4 | 139,94 | | | | 139,33 | 140,44 | | |

Tabelle D-4: Breiten [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 31,93 | | | | 32,43 | 32,37 | | 32,24 |
| 1 | 32,21 | | | | 32,14 | 32,22 | | 32,46 |
| 2 | 32,62 | | | | 32,21 | 32,19 | | 32,73 |
| 3 | 32,28 | | | | 32,35 | 31,82 | | 32,05 |
| 4 | 32,35 | | | | 32,48 | 31,95 | | |

Tabelle D-5: Längen [mm] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 29,58 | | | | 30,70 | 31,31 | | 30,67 |
| 1 | 28,95 | | | | 30,55 | 30,69 | | 30,58 |
| 2 | 29,20 | | | | 29,89 | 31,53 | | 30,43 |
| 3 | 29,44 | | | | 29,62 | 31,12 | | 30,25 |
| 4 | 28,86 | | | | 29,71 | 30,73 | | |

Tabelle D-6: Oberflächen [cm²] der gescannten Modelle des Schrägblattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|--------|--------|---|--------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 114,84 | | | | 114,46 | 124,99 | | 122,28 |
| 1 | 113,75 | | | | 113,85 | 123,55 | | 120,88 |
| 2 | 115,24 | | | | 115,40 | 126,60 | | 120,82 |
| 3 | 114,23 | | | | 114,82 | 123,04 | | 120,49 |
| 4 | 112,02 | | | | 114,12 | 123,23 | | |

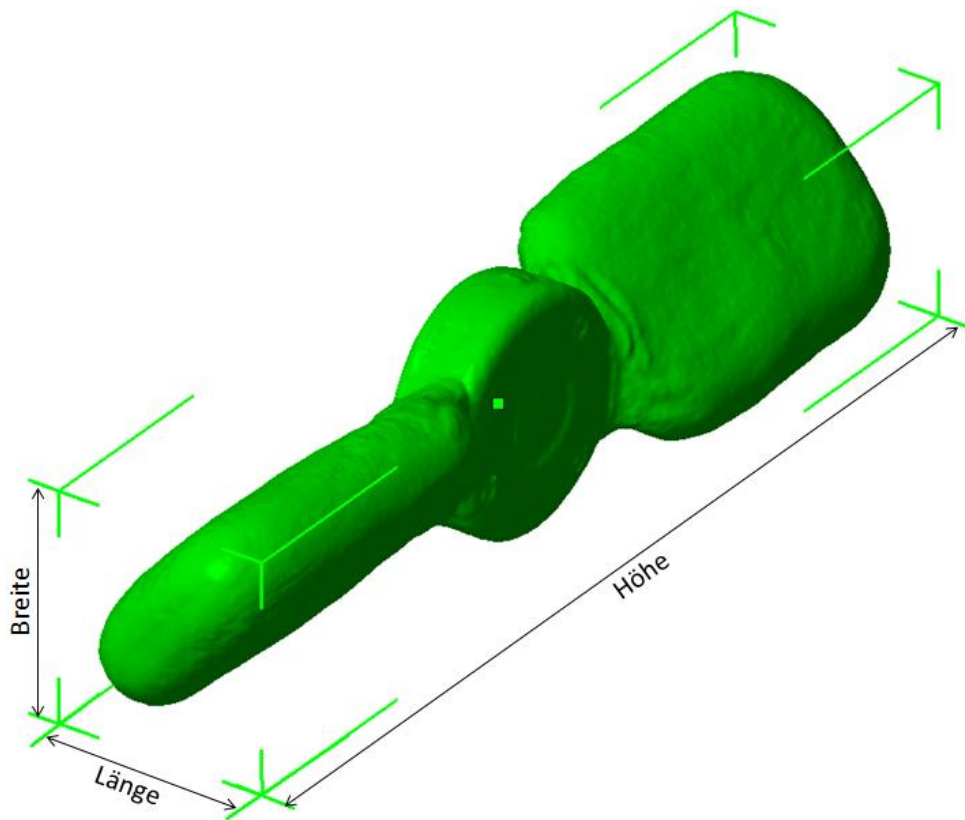


Abbildung D-1: Bemaßung des Schrägblattrührers

Anhang E : Rohdaten der Volumenabtragsver- suche des Blattrührers

Tabelle E-1: Mittels Bool'scher Operation bestimmter Volumenabtrag [cm³] des Blattrührers

| <i>Zeit</i> | <i>Versuch</i> | | | | | | | |
|-------------|----------------|---|---|---|------|------|---|------|
| $-\Delta t$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 – 1 | 1,37 | | | | 0,94 | 0,32 | | 0,52 |
| 1 – 2 | 0,48 | | | | 0,48 | 1,91 | | 0,88 |
| 2 – 3 | 1,31 | | | | 0,44 | 0,66 | | 0,85 |
| 3 – 4 | 0,60 | | | | 0,42 | 1,07 | | |
| 0 - 4 | 1,66 | | | | 0,60 | 0,76 | | 0,61 |

Tabelle E-2: Volumen [cm³] der gescannten Modelle des Blattrührers

| <i>Zeit</i> | <i>Versuch</i> | | | | | | | |
|-------------|----------------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 51,65 | | | | 56,62 | 60,62 | | 57,26 |
| 1 | 50,74 | | | | 55,88 | 61,43 | | 57,99 |
| 2 | 51,57 | | | | 55,78 | 59,79 | | 57,58 |
| 3 | 50,39 | | | | 56,06 | 60,85 | | 57,31 |
| 4 | 50,50 | | | | 56,44 | 60,75 | | |

Tabelle E-3: Höhen [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers

| <i>Zeit</i> | <i>Versuch</i> | | | | | | | |
|-------------|----------------|---|---|---|--------|--------|---|--------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 139,19 | | | | 139,74 | 142,00 | | 142,18 |
| 1 | 139,31 | | | | 139,59 | 141,76 | | 142,01 |
| 2 | 139,48 | | | | 139,79 | 141,73 | | 142,10 |
| 3 | 139,34 | | | | 139,67 | 141,48 | | 142,18 |
| 4 | 139,37 | | | | 139,34 | 141,63 | | |

Tabelle E-4: Breiten [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers

| <i>Zeit</i> | <i>Versuch</i> | | | | | | | |
|-------------|----------------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 35,16 | | | | 36,60 | 37,04 | | 36,73 |
| 1 | 34,81 | | | | 36,15 | 36,96 | | 37,00 |
| 2 | 35,13 | | | | 36,15 | 36,70 | | 37,00 |
| 3 | 34,83 | | | | 36,32 | 37,48 | | 36,71 |
| 4 | 35,11 | | | | 36,29 | 36,58 | | |

Tabelle E-5: Längen [mm] der gescannten Modelle des Blattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|-------|-------|---|-------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 32,10 | | | | 32,51 | 32,01 | | 32,21 |
| 1 | 32,38 | | | | 32,39 | 32,59 | | 32,34 |
| 2 | 32,26 | | | | 32,23 | 31,98 | | 32,27 |
| 3 | 32,18 | | | | 32,34 | 32,11 | | 32,41 |
| 4 | 32,02 | | | | 32,40 | 32,67 | | |

Tabelle E-6: Oberflächen [cm²] der gescannten Modelle des Blattrührers

| Zeit | Versuch | | | | | | | |
|------|---------|---|---|---|--------|--------|---|--------|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| [h] | | | | | | | | |
| 0 | 113,58 | | | | 116,97 | 122,25 | | 120,66 |
| 1 | 112,23 | | | | 116,04 | 123,15 | | 121,37 |
| 2 | 113,59 | | | | 115,86 | 121,36 | | 121,39 |
| 3 | 112,12 | | | | 116,10 | 122,40 | | 120,63 |
| 4 | 112,30 | | | | 116,62 | 121,93 | | |

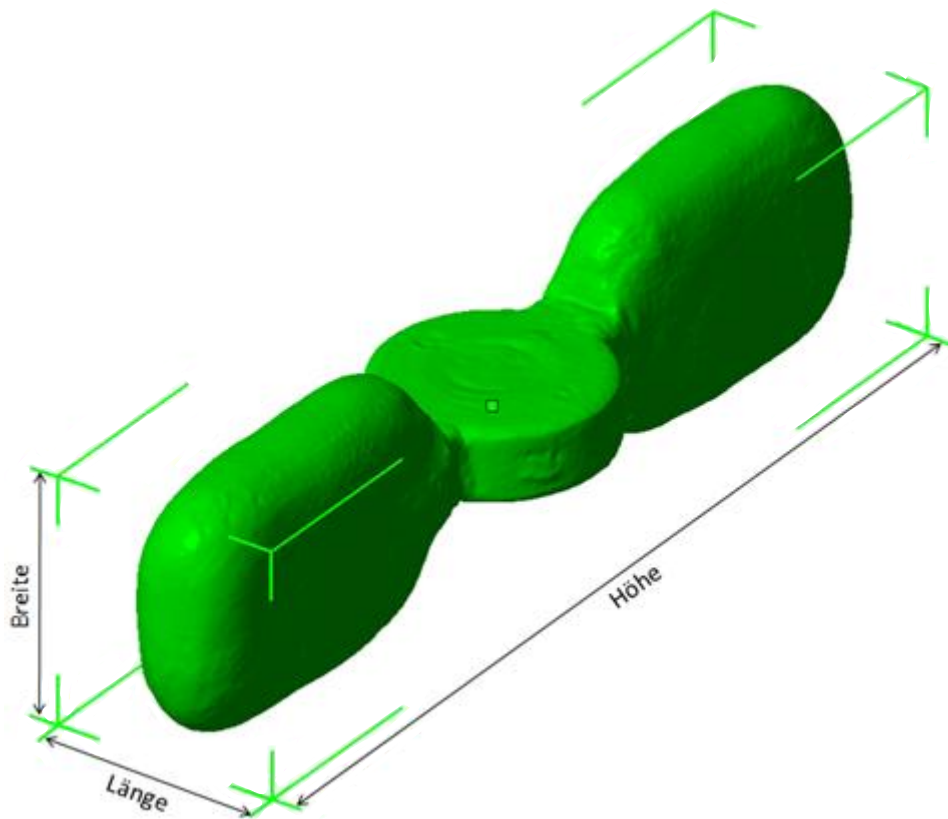


Abbildung E-1: Bemaßung des Blattrührers

Anhang F: Rohdaten der Untersuchung des Scansystems

Tabelle F-1: Differenzvolumen für fünfmaliges Scannen bzw. Zusammensetzen

| Nummer | 5x Scannen | | 5x Zusammensetzen | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | Differenzvolumen | | Differenzvolumen | |
| | durch Bool'sche Operation | der absoluten Volumen | durch Bool'sche Operation | der absoluten Volumen |
| | [cm ³] | [cm ³] | [cm ³] | [cm ³] |
| 1 von 2 | 1,47 | 0,63 | 0,01 | -0,22 |
| 1 von 3 | 1,19 | 0,63 | 0,07 | -0,09 |
| 1 von 4 | 1,05 | 0,02 | 0,07 | 0,04 |
| 1 von 5 | 0,69 | -0,31 | 0,01 | -0,79 |
| 2 von 1 | 0,85 | | 0,24 | |
| 2 von 3 | 0,38 | 0,00 | 0,20 | 0,13 |
| 2 von 4 | 0,28 | -0,61 | 0,27 | 0,26 |
| 2 von 5 | 0,11 | -0,94 | 0,01 | -0,57 |
| 3 von 1 | 0,56 | | 0,16 | |
| 3 von 2 | 0,80 | | 0,06 | |
| 3 von 4 | 0,11 | -0,61 | 0,17 | 0,13 |
| 3 von 5 | 0,04 | -0,94 | 0,01 | -0,70 |
| 4 von 1 | 1,03 | | 0,04 | |
| 4 von 2 | 0,89 | | 0,01 | |
| 4 von 3 | 0,72 | | 0,05 | |
| 4 von 5 | 0,19 | -0,33 | 0,01 | -0,83 |
| 5 von 1 | 1,00 | | 0,81 | |
| 5 von 2 | 1,05 | | 0,58 | |
| 5 von 3 | 0,98 | | 0,71 | |
| 5 von 4 | 0,52 | | 0,83 | |
| Mittelwert | 0,696 | | 0,216 | |
| Mittelwert nach (F-1) | | 0,558 | | 0,403 |

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{V_i^2} \quad (\text{F-1})$$

Tabelle F-2: Geometrische Größen für fünfmaliges Scannen

| <i>Lfd. Nummer</i> | <i>Volumen</i> [cm ³] | <i>Höhen</i> [mm] | <i>Breite</i> [mm] | <i>Länge</i> [mm] | <i>Oberfläche</i> [cm ²] |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---|
| 1 | 52,61 | 140,99 | 37,09 | 31,87 | 117,32 |
| 2 | 53,24 | 139,65 | 37,45 | 31,85 | 117,63 |
| 3 | 53,24 | 140,38 | 37,45 | 31,84 | 117,88 |
| 4 | 52,63 | 140,57 | 37,40 | 31,91 | 117,40 |
| 5 | 52,30 | 140,08 | 37,41 | 31,71 | 116,91 |
| Mittelwert | 52,80 | 140,33 | 37,36 | 31,84 | 117,43 |
| Standartabweichung | 0,419 | 0,505 | 0,153 | 0,075 | 0,363 |
| Variationskoeffizient | 0,79% | 0,36% | 0,41% | 0,24% | 0,31% |

Tabelle F-3: Geometrische Größen für fünfmaliges Zusammensetzen der Scans

| <i>Lfd. Nummer</i> | <i>Volumen</i> [cm ³] | <i>Höhen</i> [mm] | <i>Breite</i> [mm] | <i>Länge</i> [mm] | <i>Oberfläche</i> [cm ²] |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---|
| 1 | 52,95 | 139,65 | 37,36 | 31,89 | 117,36 |
| 2 | 52,73 | 139,64 | 37,32 | 31,77 | 117,01 |
| 3 | 52,86 | 139,61 | 37,34 | 31,78 | 117,09 |
| 4 | 52,99 | 139,63 | 37,37 | 31,83 | 117,28 |
| 5 | 52,16 | 139,54 | 37,19 | 31,73 | 116,30 |
| Mittelwert | 52,74 | 139,61 | 37,32 | 31,80 | 117,01 |
| Standartabweichung | 0,338 | 0,044 | 0,073 | 0,062 | 0,420 |
| Variationskoeffizient | 0,64% | 0,03% | 0,20% | 0,19% | 0,36% |

Anhang G: Gescannte Perspektiven

Die Abbildung G-1 zeigt die gescannten Perspektiven der Oberseite des Rührers während der Untersuchung des Scansystems. Die Unterseite wurde analog der Oberseite gescannt, wodurch zwölf Scans für ein 3D-Modell entstanden sind. Der Unterschied zwischen der rechten und linken Seite der Abbildung besteht darin, dass der Rührer um 180° gedreht wurde.

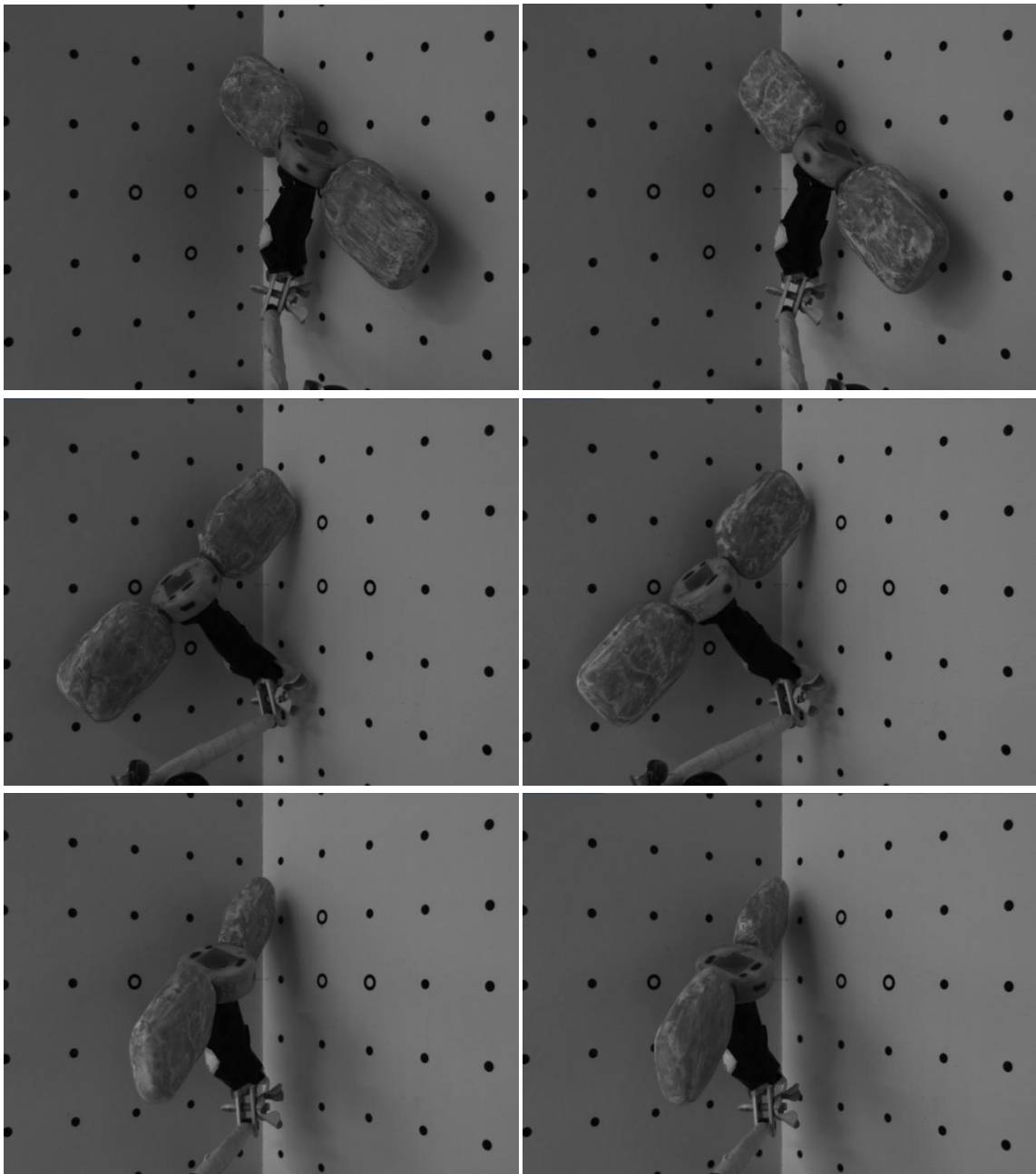


Abbildung G-1: Gescannte Perspektiven

Anhang H: Rohdaten der Masseversuche des Schrägblattrührers

Tabelle H-1: Rohdaten der Masseversuche des Schrägblattrührers¹

| Zeit | Oberer Rührer | | | Unterer Rührer | | |
|---------------------------|---------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| | Masse | Differenz- masse | Masse auf- summiert | Masse | Differenz- masse | Masse auf- summiert |
| [h] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] |
| <i>Versuch 1 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 51,0632 | 0,0000 | 0,0000 | 49,8808 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,7233 | 0,3399 | 0,3399 | 49,2438 | 0,6370 | 0,6370 |
| 6 | 50,2750 | 0,4483 | 0,7882 | 48,5350 | 0,7088 | 1,3458 |
| 9 | 49,7681 | 0,5069 | 1,2951 | 47,8982 | 0,6368 | 1,9826 |
| <i>Versuch 1 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,1650 | 0,0000 | 0,0000 | 49,1950 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,9500 | 0,2150 | 0,2150 | 48,7890 | 0,4060 | 0,4060 |
| 6 | 48,4070 | 0,5430 | 0,7580 | 48,0634 | 0,7256 | 1,1316 |
| 9 | 47,9536 | 0,4534 | 1,2114 | 47,4780 | 0,5854 | 1,7170 |
| <i>Versuch 2 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 51,8936 | 0,0000 | 0,0000 | 51,9489 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 52,0008 | -0,1072 | 0,0000 | 52,1149 | -0,1660 | 0,0000 |
| 6 | 51,9882 | 0,0126 | 0,0126 | 51,1569 | 0,9580 | 0,0000 |
| 9 | 51,9351 | 0,0531 | 0,0657 | 51,1110 | 0,0459 | 0,0459 |
| <i>Versuch 2 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 52,3313 | 0,0000 | 0,0000 | 51,3194 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 52,5653 | -0,2340 | 0,0000 | 51,4620 | -0,1426 | 0,0000 |
| 6 | 52,4828 | 0,0825 | 0,0825 | 51,3990 | 0,0630 | 0,0630 |
| 9 | 52,4936 | -0,0108 | 0,0825 | 51,3964 | 0,0026 | 0,0656 |
| <i>Versuch 3 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 49,8786 | 0,0000 | 0,0000 | 50,6806 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,1670 | -0,2884 | 0,0000 | 50,7148 | -0,0342 | 0,0000 |
| 6 | 50,1970 | -0,0300 | 0,0000 | 50,8513 | -0,1365 | 0,0000 |
| 9 | 50,2001 | -0,0031 | 0,0000 | 50,8461 | 0,0052 | 0,0052 |
| <i>Versuch 3 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 50,2012 | 0,0000 | 0,0000 | 50,1533 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,5573 | -0,3561 | 0,0000 | 50,2779 | -0,1246 | 0,0000 |
| 6 | 50,5906 | -0,0333 | 0,0000 | 50,3443 | -0,0664 | 0,0000 |
| 9 | 50,5949 | -0,0043 | 0,0000 | 50,3303 | 0,0140 | 0,0140 |
| <i>Versuch 4 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 51,3071 | 0,0000 | 0,0000 | 51,5383 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 51,5663 | -0,2592 | 0,0000 | 51,6516 | -0,1133 | 0,0000 |
| 6 | 51,6010 | -0,0347 | 0,0000 | 51,7870 | -0,1354 | 0,0000 |
| 9 | 51,5796 | 0,0214 | 0,0214 | 51,7462 | 0,0408 | 0,0408 |

¹ Rote Zahlen wurden für die weitere Auswertung nicht betrachtet

| Zeit [h] | Oberer Rührer | | | Unterer Rührer | | |
|---------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| | Masse [g] | Differenz- masse [g] | Masse auf- summiert [g] | Masse [g] | Differenz- masse [g] | Masse auf- summiert [g] |
| <i>Versuch 4 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 50,9359 | 0 | 0 | 51,0015 | 0 | 0 |
| 3 | 51,3887 | -0,4528 | 0,0000 | 51,5141 | -0,5126 | 0,0000 |
| 6 | 51,4025 | -0,0138 | 0,0000 | 51,4841 | 0,0300 | 0,0300 |
| 9 | 51,4344 | -0,0319 | 0,0000 | 51,4809 | 0,0032 | 0,0332 |
| <i>Versuch 5 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 49,2139 | 0,0000 | 0,0000 | 48,6972 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,4762 | -0,2623 | 0,0000 | 48,7025 | -0,0053 | 0,0000 |
| 6 | 49,4115 | 0,0647 | 0,0647 | 48,6606 | 0,0419 | 0,0419 |
| 9 | 49,3195 | 0,0920 | 0,1567 | 48,6270 | 0,0336 | 0,0755 |
| <i>Versuch 5 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,4973 | 0,0000 | 0,0000 | 49,0334 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,7770 | -0,2797 | 0,0000 | 49,2766 | -0,2432 | 0,0000 |
| 6 | 49,7453 | 0,0317 | 0,0317 | 49,2001 | 0,0765 | 0,0765 |
| 9 | 49,6524 | 0,0929 | 0,1246 | 49,1670 | 0,0331 | 0,1096 |
| <i>Versuch 6 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 50,6895 | 0,0000 | 0,0000 | 49,6778 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,8261 | -0,1366 | 0,0000 | 49,5742 | 0,1036 | 0,1036 |
| 6 | 50,6833 | 0,1428 | 0,1428 | 49,3446 | 0,2296 | 0,3332 |
| 9 | 50,3765 | 0,3068 | 0,4496 | 48,9601 | 0,3845 | 0,7177 |
| <i>Versuch 6 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 53,0989 | 0,0000 | 0,0000 | 53,5445 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 52,9509 | 0,1480 | 0,1480 | 53,2169 | 0,3276 | 0,3276 |
| 6 | 52,7520 | 0,1989 | 0,3469 | 52,7980 | 0,4189 | 0,7465 |
| 9 | 52,6010 | 0,1510 | 0,4979 | 52,4070 | 0,3910 | 1,1375 |
| <i>Versuch 7 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 48,4989 | 0,0000 | 0,0000 | 48,6511 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,6464 | -0,1475 | 0,0000 | 48,9290 | -0,2779 | 0,0000 |
| 6 | 48,6342 | 0,0122 | 0,0122 | 48,9515 | -0,0225 | 0,0000 |
| 9 | 48,6118 | 0,0224 | 0,0346 | 48,9690 | -0,0175 | 0,0000 |
| <i>Versuch 7 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 48,5121 | 0,0000 | 0,0000 | 48,0632 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,6900 | -0,1779 | 0,0000 | 48,3001 | -0,2369 | 0,0000 |
| 6 | 48,6427 | 0,0473 | 0,0473 | 48,2757 | 0,0244 | 0,0244 |
| 9 | 48,6058 | 0,0369 | 0,0842 | 48,2318 | 0,0439 | 0,0683 |
| <i>Versuch 8 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 48,5251 | 0,0000 | 0,0000 | 49,4556 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,6048 | -0,0797 | 0,0000 | 49,4848 | -0,0292 | 0,0000 |
| 6 | 48,5803 | 0,0245 | 0,0245 | 49,4840 | 0,0008 | 0,0008 |
| 9 | 48,5520 | 0,0283 | 0,0528 | 49,5088 | -0,0248 | 0,0008 |
| <i>Versuch 8 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,7634 | 0,0000 | 0,0000 | 48,8943 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,8753 | -0,1119 | 0,0000 | 49,0345 | -0,1402 | 0,0000 |
| 6 | 49,8442 | 0,0311 | 0,0311 | 49,0279 | 0,0066 | 0,0066 |
| 9 | 49,8444 | -0,0002 | 0,0311 | 49,0198 | 0,0081 | 0,0147 |

Anhang I: Rohdaten der Masseversuche des Blattrührers

Tabelle I-1: Rohdaten der Masseversuche des Blattrührers¹

| Zeit | Oberer Rührer | | | Unterer Rührer | | |
|---------------------------|---------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| | Masse | Differenz- masse | Masse auf- summiert | Masse | Differenz- masse | Masse auf- summiert |
| [h] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] |
| <i>Versuch 1 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 49,8589 | 0,0000 | 0,0000 | 50,1188 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,5999 | 0,2590 | 0,2590 | 49,9882 | 0,1306 | 0,1306 |
| 6 | 49,0922 | 0,5077 | 0,7667 | 49,3973 | 0,5909 | 0,7215 |
| 9 | 48,6525 | 0,4397 | 1,2064 | 48,9417 | 0,4556 | 1,1771 |
| <i>Versuch 1 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 50,5032 | 0,0000 | 0,0000 | 50,4010 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,1001 | 0,4031 | 0,4031 | 49,9506 | 0,4504 | 0,4504 |
| 6 | 49,9506 | 0,1495 | 0,5526 | 49,4601 | 0,4905 | 0,9409 |
| 9 | 49,2528 | 0,6978 | 1,2504 | 48,9640 | 0,4961 | 1,4370 |
| <i>Versuch 2 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 48,3045 | 0,0000 | 0,0000 | 47,8606 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,3915 | -0,0870 | 0,0000 | 47,9795 | -0,1189 | 0,0000 |
| 6 | 48,3670 | 0,0245 | 0,0245 | 47,9032 | 0,0763 | 0,0763 |
| 9 | 48,3333 | 0,0337 | 0,0582 | 47,8462 | 0,0570 | 0,1333 |
| <i>Versuch 2 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,1524 | 0,0000 | 0,0000 | 48,3938 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,2308 | -0,0784 | 0,0000 | 48,3668 | 0,0270 | 0,0270 |
| 6 | 49,2000 | 0,0308 | 0,0308 | 48,4003 | -0,0335 | 0,0270 |
| 9 | 49,2182 | -0,0182 | 0,0308 | 48,3734 | 0,0269 | 0,0539 |
| <i>Versuch 3 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 50,7705 | 0,0000 | 0,0000 | 50,6609 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,9435 | -0,1730 | 0,0000 | 50,7290 | -0,0681 | 0,0000 |
| 6 | 50,9350 | 0,0085 | 0,0085 | 50,7162 | 0,0128 | 0,0128 |
| 9 | 50,9364 | -0,0014 | 0,0085 | 50,7572 | -0,0410 | 0,0128 |
| <i>Versuch 3 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 50,9364 | 0,0000 | 0,0000 | 50,7572 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 50,9350 | 0,0014 | 0,0014 | 50,7340 | 0,0232 | 0,0232 |
| 6 | 50,8705 | 0,0645 | 0,0659 | 50,6670 | 0,0670 | 0,0902 |
| 9 | 50,9023 | -0,0318 | 0,0659 | 50,6972 | -0,0302 | 0,0902 |
| <i>Versuch 4 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 48,9135 | 0,0000 | 0,0000 | 49,2330 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,2578 | -0,3443 | 0,0000 | 49,7867 | -0,5537 | 0,0000 |
| 6 | 49,2594 | -0,0016 | 0,0000 | 49,7730 | 0,0137 | 0,0137 |
| 9 | 49,2512 | 0,0082 | 0,0082 | 49,7900 | -0,0170 | 0,0137 |

¹ Rote Zahlen wurden für die weitere Auswertung nicht betrachtet

| Zeit [h] | Oberer Rührer | | | Unterer Rührer | | |
|---------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| | Masse [g] | Differenz- masse [g] | Masse auf- summiert [g] | Masse [g] | Differenz- masse [g] | Masse auf- summiert [g] |
| <i>Versuch 4 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,2512 | 0,0000 | 0,0000 | 49,7900 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,2548 | -0,0036 | 0,0000 | 49,7224 | 0,0676 | 0,0676 |
| 6 | 49,2445 | 0,0103 | 0,0103 | 49,7102 | 0,0122 | 0,0798 |
| 9 | 49,2746 | -0,0301 | 0,0103 | 49,7192 | -0,0090 | 0,0798 |
| <i>Versuch 5 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,8315 | -0,2898 | 0,0000 | 48,7272 | -0,3579 | 0,0000 |
| 6 | 48,7354 | 0,0961 | 0,0961 | 48,6533 | 0,0739 | 0,0739 |
| 9 | 48,6272 | 0,1082 | 0,2043 | 48,5530 | 0,1003 | 0,1742 |
| <i>Versuch 5 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 48,6272 | 0,0000 | 0,0000 | 48,5530 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,5773 | 0,0499 | 0,0499 | 48,4505 | 0,1025 | 0,1025 |
| 6 | 48,4803 | 0,0970 | 0,1469 | 48,3538 | 0,0967 | 0,1992 |
| 9 | 48,4110 | 0,0693 | 0,2162 | 48,2716 | 0,0822 | 0,2814 |
| <i>Versuch 6 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 55,4930 | 0,0000 | 0,0000 | 55,0325 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 55,2852 | 0,2078 | 0,2078 | 54,7797 | 0,2528 | 0,2528 |
| 6 | 55,2004 | 0,0848 | 0,2926 | 54,6384 | 0,1413 | 0,3941 |
| 9 | 55,0463 | 0,1541 | 0,4467 | 54,5363 | 0,1021 | 0,4962 |
| <i>Versuch 6 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,7941 | 0,0000 | 0,0000 | 50,3945 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,6274 | 0,1667 | 0,1667 | 50,2167 | 0,1778 | 0,1778 |
| 6 | 49,4552 | 0,1722 | 0,3389 | 50,0241 | 0,1926 | 0,3704 |
| 9 | 49,3096 | 0,1456 | 0,4845 | 49,7804 | 0,2437 | 0,6141 |
| <i>Versuch 7 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 48,2908 | 0,0000 | 0,0000 | 48,2044 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,4760 | -0,1852 | 0,0000 | 48,4025 | -0,1981 | 0,0000 |
| 6 | 48,7724 | -0,2964 | 0,0000 | 48,3845 | 0,0180 | 0,0180 |
| 9 | 48,4696 | 0,3028 | 0,3028 | 48,3591 | 0,0254 | 0,0434 |
| <i>Versuch 7 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 48,4696 | 0,0000 | 0,0000 | 48,3591 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 48,4766 | -0,0070 | 0,0000 | 48,3345 | 0,0246 | 0,0246 |
| 6 | 48,5042 | -0,0276 | 0,0000 | 48,3010 | 0,0335 | 0,0581 |
| 9 | 48,4911 | 0,0131 | 0,0131 | 48,2670 | 0,0340 | 0,0921 |
| <i>Versuch 8 – Teil 1</i> | | | | | | |
| 0 | 49,4170 | 0,0000 | 0,0000 | 50,0287 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,4991 | -0,0821 | 0,0000 | 49,9864 | 0,0423 | 0,0423 |
| 6 | 49,4320 | 0,0671 | 0,0671 | 49,9090 | 0,0774 | 0,1197 |
| 9 | 49,4150 | 0,0170 | 0,0841 | 49,8515 | 0,0575 | 0,1772 |
| <i>Versuch 8 – Teil 2</i> | | | | | | |
| 0 | 49,2891 | 0,0000 | 0,0000 | 49,6587 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 49,2958 | -0,0067 | 0,0000 | 49,6760 | -0,0173 | 0,0000 |
| 6 | 49,1466 | 0,1492 | 0,1492 | 49,5696 | 0,1064 | 0,1064 |
| 9 | 49,1744 | -0,0278 | 0,1492 | 49,5740 | -0,0044 | 0,1064 |

Anhang J: Auswertung des Plackett-Burman- Versuchsplans für die Masseversuche

Tabelle J-1: Zielgrößen und Varianzen der Versuchsergebnisse des Schrägblattrührers

| Rührer | Einzelwerte | | | | Mittelwerte | | | Varianz | | |
|----------|-------------|---------|--------|---------|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | 1-Oben | 1-Unten | 2-Oben | 2-Unten | Oben | Unten | Gesamt | Oben | Unten | Gesamt |
| Ver-such | [g/h] | [g/h] | [g/h] | [g/h] | y_1 | y_2 | y_3 | s_1 | s_2 | s_3 |
| 1 | 0,1381 | 0,2209 | 0,1277 | 0,1862 | 0,1329 | 0,2036 | 0,1682 | 0,00735 | 0,02454 | 0,04339 |
| 2 | 0,0096 | 0,0153 | 0,0275 | 0,0129 | 0,0186 | 0,0141 | 0,0163 | 0,01266 | 0,00170 | 0,00781 |
| 3 | | 0,0017 | | 0,0047 | 0,0000 | 0,0032 | 0,0032 | | 0,00212 | 0,00212 |
| 4 | 0,0071 | 0,0136 | | 0,0064 | 0,0071 | 0,0100 | 0,0090 | | 0,00509 | 0,00397 |
| 5 | 0,0252 | 0,0129 | 0,0187 | 0,0197 | 0,0220 | 0,0163 | 0,0191 | 0,00460 | 0,00481 | 0,00504 |
| 6 | 0,0695 | 0,0696 | 0,0556 | 0,1246 | 0,0626 | 0,0971 | 0,0798 | 0,00983 | 0,03889 | 0,03057 |
| 7 | 0,0054 | | 0,0144 | 0,0107 | 0,0099 | 0,0107 | 0,0102 | 0,00636 | | 0,00452 |
| 8 | 0,0087 | 0,0003 | 0,0104 | 0,0024 | 0,0096 | 0,0014 | 0,0055 | 0,00120 | 0,00148 | 0,00486 |

Tabelle J-2: Zielgrößen und Varianzen der Versuchsergebnisse des Blattrührers

| Rührer | Einzelwerte | | | | Mittelwerte | | | Varianz | | |
|----------|-------------|---------|--------|---------|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | 1-Oben | 1-Unten | 2-Oben | 2-Unten | Oben | Unten | Gesamt | Oben | Unten | Gesamt |
| Ver-such | [g/h] | [g/h] | [g/h] | [g/h] | y_4 | y_5 | y_6 | s_4 | s_5 | s_6 |
| 1 | 0,1288 | 0,1215 | 0,1252 | 0,1582 | 0,1270 | 0,1399 | 0,1334 | 0,00255 | 0,02595 | 0,01678 |
| 2 | 0,0094 | 0,0229 | 0,0103 | 0,0090 | 0,0099 | 0,0160 | 0,0129 | 0,00064 | 0,00983 | 0,00669 |
| 3 | 0,0014 | 0,0019 | 0,0098 | 0,0142 | 0,0056 | 0,0081 | 0,0068 | 0,00594 | 0,00870 | 0,00624 |
| 4 | 0,0027 | 0,0046 | 0,0034 | 0,0143 | 0,0031 | 0,0095 | 0,0063 | 0,00049 | 0,00686 | 0,00542 |
| 5 | 0,0336 | 0,0282 | 0,0236 | 0,0320 | 0,0286 | 0,0301 | 0,0294 | 0,00707 | 0,00269 | 0,00445 |
| 6 | 0,0508 | 0,0602 | 0,0547 | 0,0657 | 0,0528 | 0,0630 | 0,0579 | 0,00276 | 0,00389 | 0,00650 |
| 7 | 0,1090 | 0,0070 | 0,0044 | 0,0099 | 0,0567 | 0,0085 | 0,0326 | 0,07396 | 0,00205 | 0,05100 |
| 8 | 0,0157 | 0,0194 | 0,0497 | 0,0355 | 0,0327 | 0,0275 | 0,0301 | 0,02404 | 0,01138 | 0,01565 |

Tabelle J-3: Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n > 1^1$

| Versuch | A | B | C | D | E | F | G |
|---|----------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------------|------------|--------------|
| | Drehzahl | Partikelkonzentration | Partikeldurchmesser | Partikelhärte | Viskosität | FIKTIV | FIKTIV |
| | N | φ_V | d_p | H_M | η | | |
| 1 | + | + | + | - | + | - | - |
| 2 | + | + | + | + | - | + | - |
| 3 | - | - | + | + | + | - | + |
| 4 | - | - | - | + | + | + | - |
| 5 | - | + | - | - | + | + | + |
| 6 | + | - | + | - | - | + | + |
| 7 | + | + | - | + | - | - | + |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Summe</i> | | | | | | | |
| \sum_1 | 0,1853 | 0,1041 | 0,1655 | -0,1914 | 0,0614 | -0,0422 | -0,0737 |
| \sum_2 | 0,2946 | 0,1330 | 0,2796 | -0,2803 | 0,1098 | -0,0813 | -0,1017 |
| \sum_3 | 0,2377 | 0,1163 | 0,2238 | -0,2339 | 0,0878 | -0,0627 | -0,0867 |
| \sum_4 | 0,1764 | 0,1281 | 0,0742 | -0,1659 | 0,0123 | -0,1278 | -0,0290 |
| \sum_5 | 0,1522 | 0,0865 | 0,1514 | -0,2185 | 0,0727 | -0,0654 | -0,0832 |
| \sum_6 | 0,1643 | 0,1073 | 0,1128 | -0,1922 | 0,0425 | -0,0966 | -0,0561 |
| <i>Effekte nach (2-19)</i> | | | | | | | |
| E_1 | 0,0463 | 0,0260 | 0,0414 | -0,0479 | 0,0154 | -0,0106 | -0,0184 |
| E_2 | 0,0737 | 0,0333 | 0,0699 | -0,0701 | 0,0275 | -0,0203 | -0,0254 |
| E_3 | 0,0594 | 0,0291 | 0,0560 | -0,0585 | 0,0220 | -0,0157 | -0,0217 |
| E_4 | 0,0441 | 0,0320 | 0,0185 | -0,0415 | 0,0031 | -0,0319 | -0,0072 |
| E_5 | 0,0380 | 0,0216 | 0,0378 | -0,0546 | 0,0182 | -0,0163 | -0,0208 |
| E_6 | 0,0411 | 0,0268 | 0,0282 | -0,0480 | 0,0106 | -0,0241 | -0,0140 |
| <i>Mittelwert der Einzelvarianzen nach (2-20)</i> | | | | <i>Standardabweichung der Effekte nach (2-22)</i> | | | |
| s_1^2 | | 0,0053 | | | $s_{\bar{d},1}$ | 0,0402 | |
| s_2^2 | | 0,0098 | | | $s_{\bar{d},2}$ | 0,0512 | |
| s_3^2 | | 0,0128 | | | $s_{\bar{d},3}$ | 0,0427 | |
| s_4^2 | | 0,0147 | | | $s_{\bar{d},4}$ | 0,0606 | |
| s_5^2 | | 0,0089 | | | $s_{\bar{d},5}$ | 0,0472 | |
| s_6^2 | | 0,0141 | | | $s_{\bar{d},6}$ | 0,0420 | |
| <i>Vertrauensbereiche nach (2-23)</i> | | | <i>Versuchsumfang</i> | | <i>t-Werte nach Tabelle A-1</i> | | |
| | 95,0% | 99,0% | 99,9% | N | $t_{95\%}$ | $t_{99\%}$ | $t_{99,9\%}$ |
| $t \cdot s_{d,1}$ | 0,0869 | 0,1213 | 0,1703 | 13 | 2,1630 | 3,0190 | 4,2363 |
| $t \cdot s_{d,2}$ | 0,1091 | 0,1509 | 0,2085 | 15 | 2,1310 | 2,9470 | 4,0730 |
| $t \cdot s_{d,3}$ | 0,0876 | 0,1183 | 0,1576 | 28 | 2,0508 | 2,7690 | 3,6868 |
| $t \cdot s_{d,4}$ | 0,1286 | 0,1773 | 0,2441 | 16 | 2,1220 | 2,9266 | 4,0284 |
| $t \cdot s_{d,5}$ | 0,1002 | 0,1382 | 0,1902 | 16 | 2,1220 | 2,9266 | 4,0284 |
| $t \cdot s_{d,6}$ | 0,0855 | 0,1150 | 0,1522 | 32 | 2,0378 | 2,7408 | 3,6270 |
| <i>Signifikanz nach Tabelle 2-2</i> | | | | | | | |
| $Sig_{\cdot 1}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 2}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 3}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 4}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 5}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 6}$ | - | - | - | - | - | - | - |

¹ Vorzeichen der Versuchspunkte 2 und 4 beim Faktor A wurden vertauscht

Tabelle J-4: Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n = 1^1$

| Versuch | A | B | C | D | E | F | G |
|---|----------|-----------------------|---------------------|---------------|---------------------------------|------------|--------------|
| | Drehzahl | Partikelkonzentration | Partikeldurchmesser | Partikelhärte | Viskosität | FIKTIV | FIKTIV |
| | N | φ_V | d_p | H_M | η | | |
| 1 | + | + | + | - | + | - | - |
| 2 | + | + | + | + | - | + | - |
| 3 | - | - | + | + | + | - | + |
| 4 | - | - | - | + | + | + | - |
| 5 | - | + | - | - | + | + | + |
| 6 | + | - | + | - | - | + | + |
| 7 | + | + | - | + | - | - | + |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Summe</i> | | | | | | | |
| \sum_1 | 0,1853 | 0,1041 | 0,1655 | -0,1914 | 0,0614 | -0,0422 | -0,0737 |
| \sum_2 | 0,2946 | 0,1330 | 0,2796 | -0,2803 | 0,1098 | -0,0813 | -0,1017 |
| \sum_3 | 0,2377 | 0,1163 | 0,2238 | -0,2339 | 0,0878 | -0,0627 | -0,0867 |
| \sum_4 | 0,1764 | 0,1281 | 0,0742 | -0,1659 | 0,0123 | -0,1278 | -0,0290 |
| \sum_5 | 0,1522 | 0,0865 | 0,1514 | -0,2185 | 0,0727 | -0,0654 | -0,0832 |
| \sum_6 | 0,1643 | 0,1073 | 0,1128 | -0,1922 | 0,0425 | -0,0966 | -0,0561 |
| <i>Effekte nach (2-19)</i> | | | | | | | |
| E_1 | 0,0463 | 0,0260 | 0,0414 | -0,0479 | 0,0154 | -0,0106 | -0,0184 |
| E_2 | 0,0737 | 0,0333 | 0,0699 | -0,0701 | 0,0275 | -0,0203 | -0,0254 |
| E_3 | 0,0594 | 0,0291 | 0,0560 | -0,0585 | 0,0220 | -0,0157 | -0,0217 |
| E_4 | 0,0441 | 0,0320 | 0,0185 | -0,0415 | 0,0031 | -0,0319 | -0,0072 |
| E_5 | 0,0380 | 0,0216 | 0,0378 | -0,0546 | 0,0182 | -0,0163 | -0,0208 |
| E_6 | 0,0411 | 0,0268 | 0,0282 | -0,0480 | 0,0106 | -0,0241 | -0,0140 |
| <i>Standartabweichung der Effekte nach (2-25)</i> | | | | | | | |
| | | | | | $s_{\bar{d},1}$ | 0,0205 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},2}$ | 0,0324 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},3}$ | 0,0264 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},4}$ | 0,0277 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},5}$ | 0,0263 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},6}$ | 0,0270 | |
| <i>Vertrauensbereiche nach (2-23)</i> | | | | | | | |
| | 95,0% | 99,0% | 99,9% | Freiheitsgrad | <i>t-Werte nach Tabelle A-1</i> | | |
| | | | | f | $t_{95\%}$ | $t_{99\%}$ | $t_{99,9\%}$ |
| $t \cdot s_{d,1}$ | 0,0882 | 0,2033 | 0,6474 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| $t \cdot s_{d,2}$ | 0,1392 | 0,3211 | 1,0223 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| $t \cdot s_{d,3}$ | 0,1137 | 0,2622 | 0,8348 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| $t \cdot s_{d,4}$ | 0,1192 | 0,2749 | 0,8753 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| $t \cdot s_{d,5}$ | 0,1130 | 0,2605 | 0,8295 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| $t \cdot s_{d,6}$ | 0,1161 | 0,2677 | 0,8524 | 2 | 4,3030 | 9,9250 | 31,6000 |
| <i>Signifikanz nach Tabelle 2-2</i> | | | | | | | |
| $Sig_{\cdot 1}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 2}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 3}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 4}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 5}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{\cdot 6}$ | - | - | - | - | - | - | - |

¹ Vorzeichen der Versuchspunkte 2 und 4 beim Faktor A wurden vertauscht

Tabelle J-5: Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans mit $n = 1$ und Viskosität als fiktiven Faktor¹

| Versuch | A | B | C | D | E | F | G |
|---|----------|-----------------------|---------------------|---------------|----------------------------------|------------|--------------|
| | Drehzahl | Partikelkonzentration | Partikeldurchmesser | Partikelhärte | Viskosität | FIKTIV | FIKTIV |
| | N | φ_V | d_p | H_M | η | | |
| 1 | + | + | + | - | + | - | - |
| 2 | + | + | + | + | - | + | - |
| 3 | - | - | + | + | + | - | + |
| 4 | - | - | - | + | + | + | - |
| 5 | - | + | - | - | + | + | + |
| 6 | + | - | + | - | - | + | + |
| 7 | + | + | - | + | - | - | + |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Summe</i> | | | | | | | |
| \sum_1 | 0,1853 | 0,1041 | 0,1655 | -0,1914 | 0,0614 | -0,0422 | -0,0737 |
| \sum_2 | 0,2946 | 0,1330 | 0,2796 | -0,2803 | 0,1098 | -0,0813 | -0,1017 |
| \sum_3 | 0,2377 | 0,1163 | 0,2238 | -0,2339 | 0,0878 | -0,0627 | -0,0867 |
| \sum_4 | 0,1764 | 0,1281 | 0,0742 | -0,1659 | 0,0123 | -0,1278 | -0,0290 |
| \sum_5 | 0,1522 | 0,0865 | 0,1514 | -0,2185 | 0,0727 | -0,0654 | -0,0832 |
| \sum_6 | 0,1643 | 0,1073 | 0,1128 | -0,1922 | 0,0425 | -0,0966 | -0,0561 |
| <i>Effekte nach (2-19)</i> | | | | | | | |
| E_1 | 0,0463 | 0,0260 | 0,0414 | -0,0479 | 0,0154 | -0,0106 | -0,0184 |
| E_2 | 0,0737 | 0,0333 | 0,0699 | -0,0701 | 0,0275 | -0,0203 | -0,0254 |
| E_3 | 0,0594 | 0,0291 | 0,0560 | -0,0585 | 0,0220 | -0,0157 | -0,0217 |
| E_4 | 0,0441 | 0,0320 | 0,0185 | -0,0415 | 0,0031 | -0,0319 | -0,0072 |
| E_5 | 0,0380 | 0,0216 | 0,0378 | -0,0546 | 0,0182 | -0,0163 | -0,0208 |
| E_6 | 0,0411 | 0,0268 | 0,0282 | -0,0480 | 0,0106 | -0,0241 | -0,0140 |
| <i>Standartabweichung der Effekte nach (2-25)</i> | | | | | | | |
| | | | | | $s_{\bar{d},1}$ | 0,0079 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},2}$ | 0,0106 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},3}$ | 0,0089 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},4}$ | 0,0208 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},5}$ | 0,0109 | |
| | | | | | $s_{\bar{d},6}$ | 0,0159 | |
| <i>Vertrauensbereiche nach (2-23)</i> | | | | | | | |
| | 95,0% | 99,0% | 99,9% | Freiheitsgrad | <i>t</i> -Werte nach Tabelle A-1 | | |
| | | | | f | $t_{95\%}$ | $t_{99\%}$ | $t_{99,9\%}$ |
| $t \cdot s_{d,1}$ | 0,0250 | 0,0459 | 0,1016 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| $t \cdot s_{d,2}$ | 0,0336 | 0,0617 | 0,1365 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| $t \cdot s_{d,3}$ | 0,0283 | 0,0520 | 0,1149 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| $t \cdot s_{d,4}$ | 0,0663 | 0,1218 | 0,2694 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| $t \cdot s_{d,5}$ | 0,0348 | 0,0639 | 0,1414 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| $t \cdot s_{d,6}$ | 0,0506 | 0,0929 | 0,2054 | 3 | 3,1820 | 5,8410 | 12,9200 |
| <i>Signifikanz nach Tabelle 2-2</i> | | | | | | | |
| $Sig_{.1}$ | ** | * | * | ** | - | - | - |
| $Sig_{.2}$ | ** | - | ** | ** | - | - | - |
| $Sig_{.3}$ | ** | * | ** | ** | - | - | - |
| $Sig_{.4}$ | - | - | - | - | - | - | - |
| $Sig_{.5}$ | * | - | * | * | - | - | - |
| $Sig_{.6}$ | - | - | - | - | - | - | - |

¹ Vorzeichen der Versuchspunkte 2 und 4 beim Faktor A wurden vertauscht

Anhang K: Mikroskopaufnahmen der Partikel

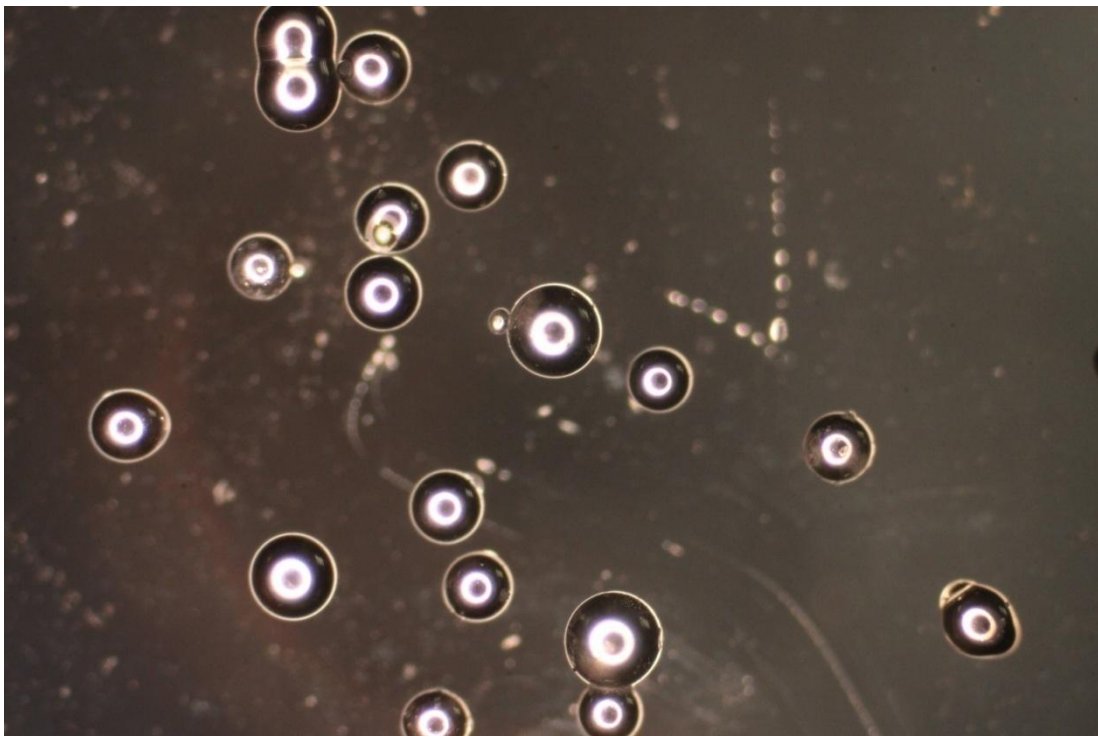


Abbildung K-1: Form der Partikel „Glas fein“ (40fache Vergrößerung)

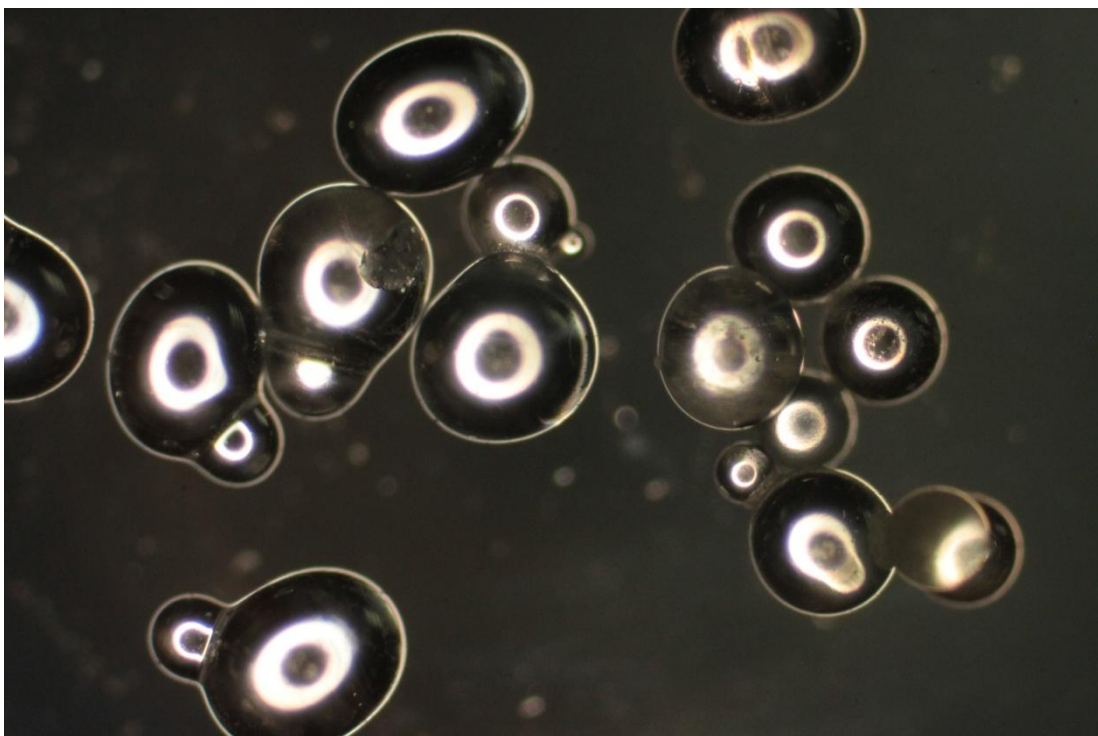


Abbildung K-2: Form der Partikel „Glas grob“ (40fache Vergrößerung)

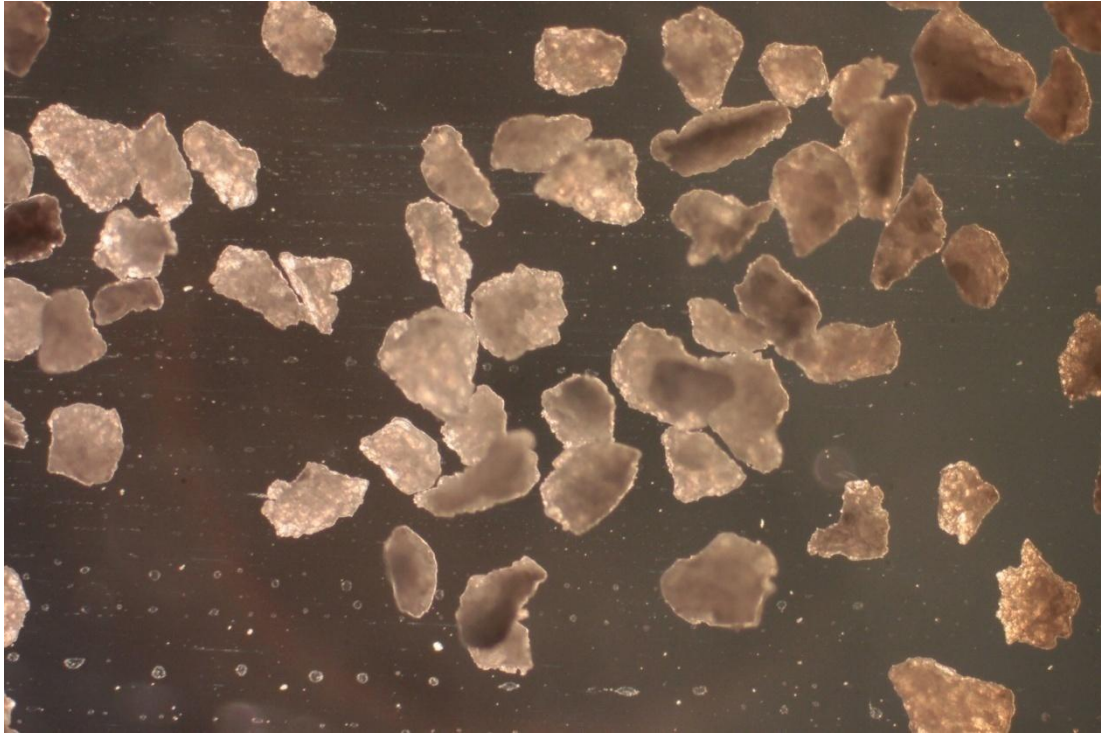


Abbildung K-3: Form der Partikel „Harz fein“ (40fache Vergrößerung)

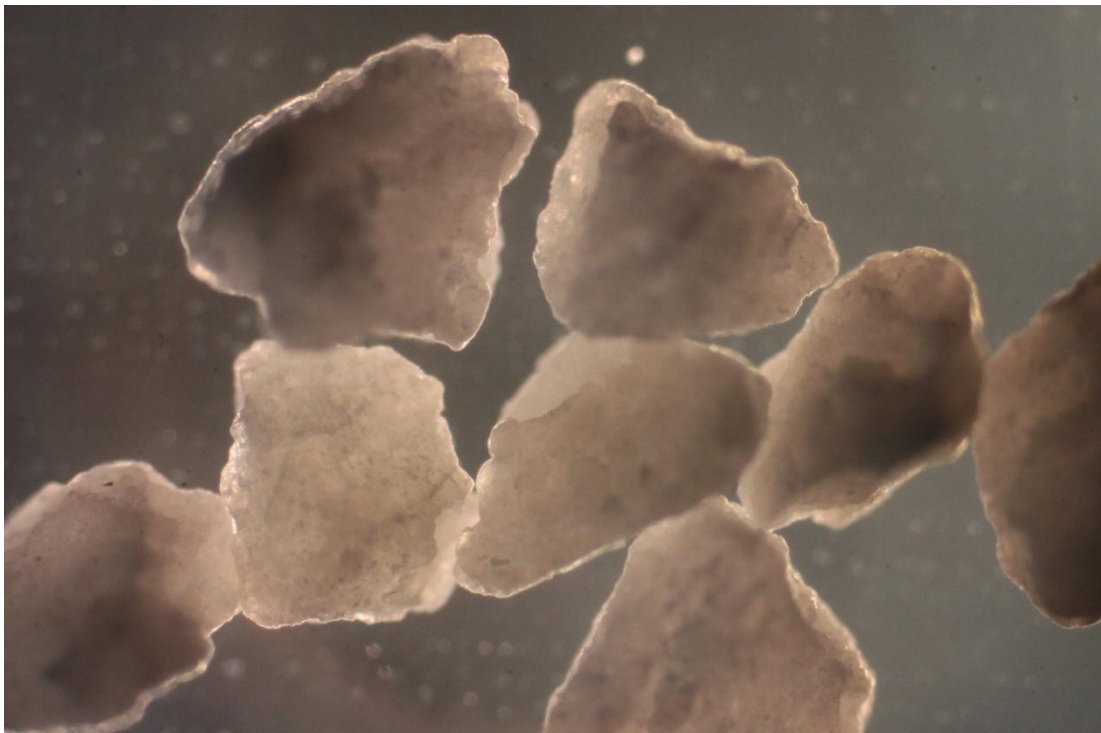


Abbildung K-4: Form der Partikel „Harz grob“ (40fache Vergrößerung)

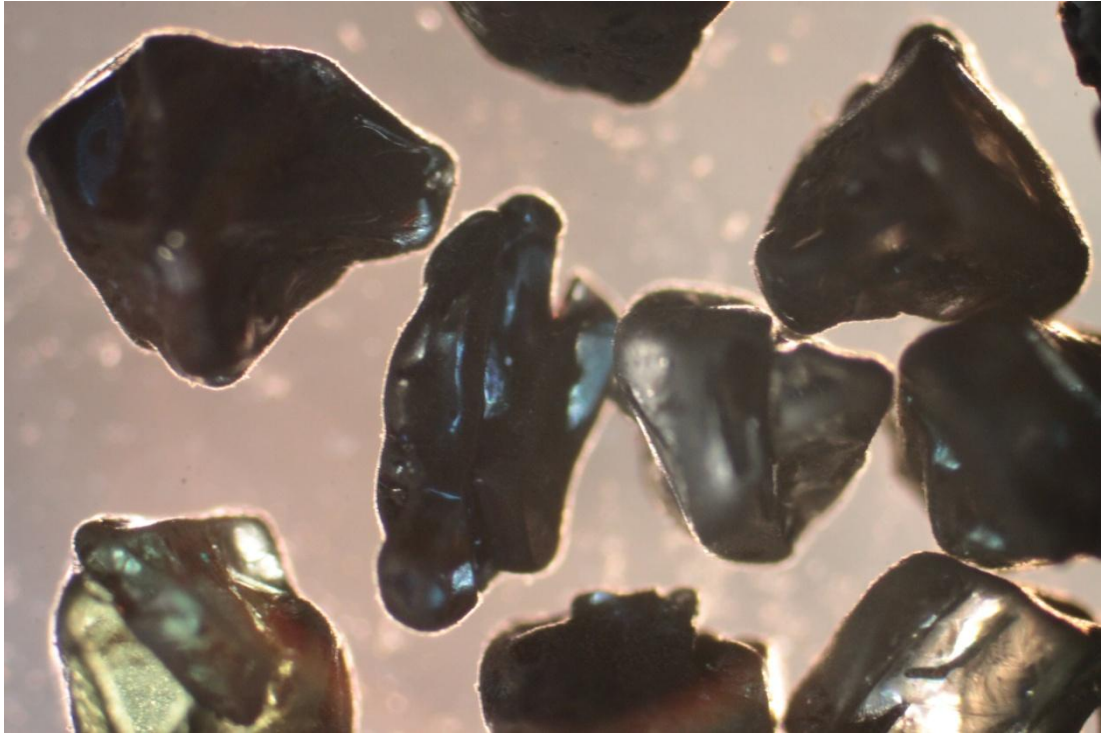


Abbildung K-5: Form der Partikel „Siliziumcarbid“ (40fache Vergrößerung)