

Kuratorium für Forschung und Technik
der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.



AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14168 N

Laufzeit: 01.07.2004 bis 31.12.2006

gefördert aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



Zeitnahe Erfassung klebender Verunreinigung in Faserstoffsuspensionen

Schlussbericht

Mai 2007

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet für Papierfabrikation
und Mechanische Verfahrenstechnik

Leiter der Forschungsstelle:
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Klaus Villforth



AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14168 N

**Zeitnahe Erfassung klebender
Verunreinigung in
Faserstoffsuspensionen**

Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik (PMV),
Technische Universität Darmstadt

Leiter: Prof. Dr.-Ing. S. Schabel

Dipl.-Ing. Klaus Villforth

Darmstadt, 09. Mai 2007

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Sensors zur zeitnahen Erfassung klebender Verunreinigungen in Faserstoffsuspensionen. Der Sensor zielt auf jene klebenden organischen Substanzen, die mit dem Altpapier eingetragen werden und sich bevorzugt in der Papiermaschine ablagern und dort Störungen verursachen. Diese klebenden Verunreinigungen, die als Stickys bezeichnet werden, beeinträchtigen auch das produzierte Papier und machen sich bei der Weiterverarbeitung störend bemerkbar.

Die bestehenden Sticky-Bestimmungsmethoden sind durchweg zeitaufwändige Offline-Methoden und eignen sich daher nicht zur laufenden Prozessüberwachung. Unterschiede in der Sticky-Beladung im Altpapiereintrag oder Veränderungen in der Sticky-Abtrennung bei der Altpapieraufbereitung bleiben in der Praxis meist unerkannt. Eine laborgestützte Prozessüberwachung rechnet sich bestenfalls, wenn es zu wiederholten massiven Produktionsstörungen oder Reklamationen kommt. Kleinere und mittlere Unternehmen haben weder die labortechnische Ausrüstung noch das Personal, um selbst Sticky-Analytik zu betreiben.

Die entwickelten Messmethoden basieren auf dem optischen Effekt potentiell klebender Partikel in Faserstoffsuspensionen an der Phasengrenze eines lichtleitenden Mediums. Der Effekt tritt bei der Annäherung und der Anlagerung von Partikeln mit vergleichbarer oder höherer Brechzahl wie das optische Medium auf. Mit faseroptischen Lichtwellenleitern lassen sich klebende Verunreinigungen eindeutig detektieren, die sich auf der Oberfläche anlagern. Faserstoffkomponenten und Stickys, die den Lichtwellenleiter nur streifen, erzeugen ähnliche Signale, die sich mit den untersuchten Methoden nicht in ausreichender Schärfe trennen lassen.

Der entwickelte Impaktor liefert Information zur Art und Größenverteilung der Partikel, die von der Strömung an das Messfenster getragen werden. Eine Kamera beobachtet den Weg der Objekte, die sich dem lichtdurchfluteten Messfenster nähern und durch ihre Brechzahl in Erscheinung treten. Adhäsionskräfte bremsen Stickys mehr oder weniger stark ab. Es lassen sich Partikel beobachten, die bis zum Stillstand abgebremst werden und kurzzeitig am Messfenster kleben, ganz im Gegensatz zu anderen Bestandteilen der Faserstoffsuspension. Dadurch wird eine Differenzierung zwischen Stickys und nicht klebrigen Partikeln möglich. Partikelgröße und deren Geschwindigkeit werden aus den Messdaten bildanalytisch ausgewertet und eine Sticky-Beladung berechnet.

Die Messergebnisse der Impaktormethode von Faserstoffen aus der Praxis korrelieren mit offline im Labor ermittelten Sticky-Konzentrationen. Der im Rahmen dieses Projektes als Demonstrator entwickelte online Sticky-Sensor kann nun zur Marktreife gebracht werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Stand des Wissens	7
2.1	Klassifikation klebender Verunreinigungen.....	7
2.2	Methoden zur Bestimmung klebender Verunreinigungen	8
2.3	Potentiell klebende Verunreinigungen und ihre Ablagerungsneigung	9
2.3.1	Stickys aus Heißklebern (Hotmelts).....	10
2.3.2	Stickys aus Dispersionsklebstoffen	10
2.3.3	Stickys aus Haftklebern (PSA).....	10
2.3.4	Fällung kolloidal gelöster Substanzen.....	11
2.4	Grundlagen zum optischen Messprinzip	14
2.4.1	Lichttransport	15
2.5	Grundlagen zur Abscheidung von Partikeln im Impaktor	26
2.5.1	Wirksamkeit des Impaktors.....	27
2.5.2	Abscheidungsgrad in Abhängigkeit der Partikelgröße.....	30
2.5.3	Restimpuls bei Annäherung an das Messfenster	30
2.6	Zusammenfassender Stand des Wissens	30
3	Entwicklung der Sticky-Bestimmungsmethode	32
3.1	Konzeption des Versuchsaufbaus mit Lichtwellenleiter	32
3.2	Realisierung des Versuchsaufbaus mit Lichtwellenleiter	33
3.2.1	Aufbau der Messtechnik.....	33
3.2.2	Bedienungssoftware	34
3.2.3	Aufbau des Versuchsstands.....	36
3.3	Versuchsaufbau mit Impaktor	38
3.3.1	Impaktor Version I	38
3.3.2	Impaktor Version II.....	40
3.3.3	Bildanalytischer Teil	41
4	Ergebnisse	47
4.1	Versuche mit Lichtwellenleiter	47
4.1.1	Grundlegende Beobachtungen und Erfahrungen	47
4.1.2	Erkennung von Substanzen unterschiedlicher Brechzahl	48
4.1.3	Sensibilität gegenüber Zellstoff- und Holzstofffasern	49
4.1.4	Erkennung von Stickys im Altpapierstoff.....	49
4.1.5	Erfassung von Makrostickys in Modellsuspensionen	50
4.2	Versuche mit Impaktor.....	52
4.2.1	Versuche unterschiedlicher Beleuchtung.....	53
4.2.2	Versuche mit unterschiedlichen Substraten	53
4.2.3	Auswahl des Detektors.....	54
4.2.4	Versuche zur Düsengeometrie und Düseneinstellung.....	54
4.2.5	Modellsuspension.....	54
4.2.6	Messungen an Faserstoffen einer Altpapieraufbereitungsanlage.....	58
5	Interpretation	60

5.1	Analyse der Ergebnisse mit Lichtwellenleiter	60
5.2	Analyse der Ergebnisse mit Impaktor	60
6	Anwendung und Ausblick	62
7	Literaturverzeichnis	63
8	Danksagung	65

1 Einleitung

Mit dem Altpapier werden jene klebenden organischen Substanzen in die Altpapieraufbereitung eingetragen, die der Papierhersteller als Stickys bezeichnet. Klebende Verunreinigungen im Faserstoff und in Kreislaufwässern neigen dazu, sich an Papiermaschinenbespannungen wie Filzen und Sieben sowie an Zylindern und Walzen abzulagern. Im Papier führen sie zu Fehlstellen, die in der Weiterverarbeitung zu Störungen führen und den Gebrauchswert einschränken. Diese klebenden Verunreinigungen stellen mittlerweile eines der größten Probleme bei der Wiederverwertung von Altpapier dar. Anders als papierfremde Bestandteile lassen sich Stickys bei der Altpapiersortierung und der Altpapieraufbereitung nur schwer entfernen.

Aber auch Harze in Primärfaserstoffen wie Zellstoffen und Holzstoffen sowie Papierhilfsmittel mit hydrophobem Charakter führen regelmäßig zu klebenden Ablagerungen an Maschinenteilen und Papiermaschinenbespannungen. Die Neigung klebende Ablagerungen zu bilden hängt von chemischen und physikalischen Randbedingungen, wie z. B. der Temperatur, dem pH-Wert, der Konzentration an gelösten und kolloidal gelösten Substanzen sowie der Strömungsgeschwindigkeit ab. Häufig werden mineralische Adsorbentien wie Talkum und Bentonite eingesetzt, um klebende Verunreinigungen zu bekämpfen. Um Verunreinigungen an das Fasermaterial zu binden und Ablagerungen zu vermeiden, werden auch kationische Polymere (Fixiermittel) dosiert.

Untersucht man die chemische Zusammensetzung von Ablagerungen in der Papiermaschine, so findet man folgende wesentliche Bestandteile:

- Polyvinylacetate (PVAc),
- Polyacrylate (PAA),
- Harzester und Harzsäuren,
- Styrol-Butadienverbindungen (SBR) und
- Ethylenvinylacetat (EVA).

Polyvinylacetate, Polyacrylate und Styrol-Butadienverbindungen sind typische Vertreter synthetischer Latizes, wie sie üblicherweise als Binder in Streichrezepturen eingesetzt werden. Sie sind als Polymere wichtige Bestandteile von Haftklebern (Pressure Sensitive Adhesive PSA) und Hot-Melts. In letzteren findet sich auch das Ethylenvinylacetat. Diese Polymere geben den Klebern den inneren Zusammenhalt durch Kohäsion, während Harzbestandteile die Adhäsionskraft bestimmen. Die mit dem Altpapier eingebrachten potentiell klebenden Stoffe können mit den zugegebenen chemischen Hilfsstoffen unterschiedliche Konglomerate bilden (Koazervatbildung), so dass man unter den wechselnden Randbedingungen mit der Ablagerungsanalytik nicht auf konkrete Verursacher schließen kann.

Eine viel zitierte Kategorisierung klebender Verunreinigung stammt von Moreland¹. Einen Einblick in die Mannigfaltigkeit von Art und Herkunft wesentlicher Inhaltsstoffe von Ablagerungen gibt Abb. 1.

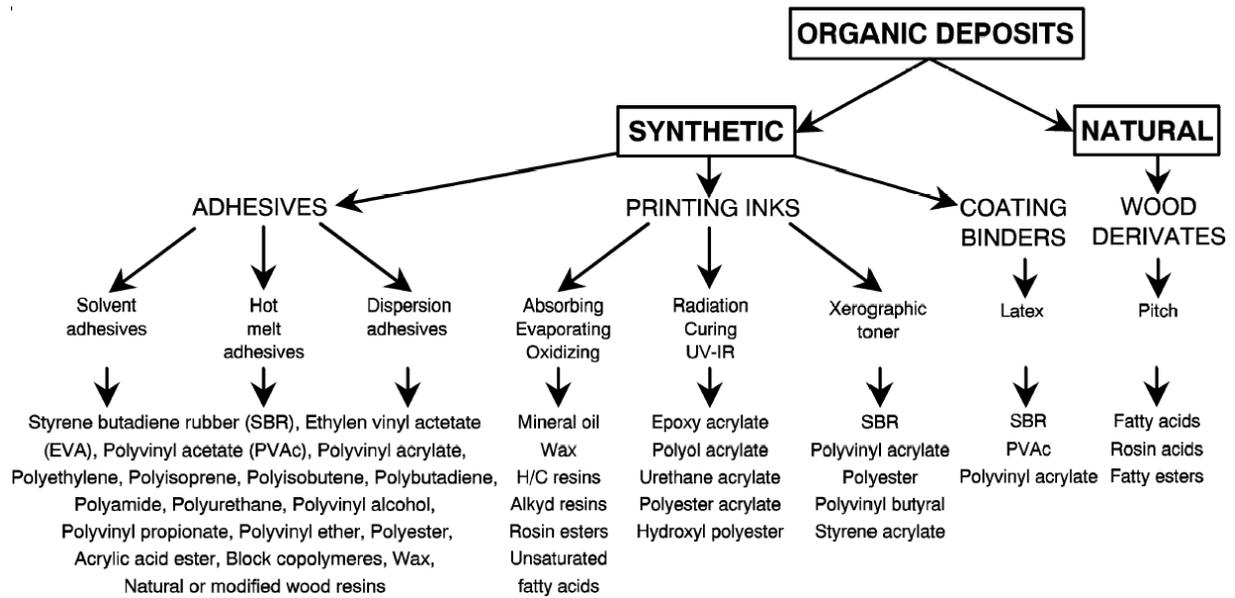


Abb. 1: Häufige Inhaltsstoffe von Ablagerungen in altpapierverarbeitenden Anlagen

Anders als bei der Rückführung gestrichener Produktionsabfälle ist das Spektrum an potentiell klebenden Verunreinigungen im Altpapiereintrag schwer überschaubar. Die permanente oder nur unter bestimmten Randbedingungen auftretende Klebrigkeit machen die Erfassung von Stickys und ihre Identifizierung extrem schwierig.

2 Stand des Wissens

Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Zusammensetzung und dem grundlegenden Verhalten potentiell klebender Verunreinigungen. Aufgrund unterschiedlichen Inhaltstoffe, wie in Abb. 1 dargestellt, und den daraus erwachsenen zahllosen Kombinationen birgt das Thema eine Komplexität, deren Darstellung sich hier auf die für das Forschungsvorhaben wesentlichen Aspekte beschränkt. Neben der Klassifikation klebender Verunreinigungen und Methoden zu deren Bestimmung wird im Weiteren auf die in den Papierkreislauf eingebrachten Klebstoffe und auf die Theorie des Fällungsmechanismus eingegangen.

Zum Stand des Wissens gehören die aus der physikalischen Optik bekannten Grenzflächenphänomene sowie die strömungstechnischen Grundlagen zur Beschreibung der Prallströmung im Impaktor. Neben dem Stand des Wissens werden auch die theoretischen Zusammenhänge hergeleitet und die mathematischen Grundlagen für das Projekt geschaffen.

2.1 Klassifikation klebender Verunreinigungen

Klebende Bestandteile können bei der Verarbeitung von Primär- und Sekundärfaserstoffen auftreten. Stickys ist die Bezeichnung für klebende Partikel, die aus dem Rohstoff Altpapier resultieren. Sie lassen sich nach folgenden Merkmalen klassifizieren:

Klassifizierung nach Herkunft / Entstehung

- Primärstickys und
- Sekundärstickys.

Klassifizierung physikalisch-chemisch (unter Prüfbedingungen)

- Abtrennbarkeit,
- Adhäsion / Klebrigkeit,
- Oberflächenenergiedichte und
- Größe.

Während Primärstickys mit dem Rohstoff eingetragen werden, entstehen Sekundärstickys durch chemisch-physikalische Einflüsse im Prozess.

Makro- und Mikrostickys unterscheiden sich nach ihrer Abtrennbarkeit unter Prüfbedingungen. Trennkriterium ist in der Regel die Schlitzweite einer Laborsortierung. Empfohlen wird die Verwendung einer Schlitzweite von 100 µm. Für die Untersuchung von Altpapierstoffen zur Herstellung von Verpackungspapieren sind Schlitzweiten von 150 µm möglich.

Die im Siebrückstand detektierten Stickys stellen Makrostickys dar, während die im Durchlauf befindlichen klebrigen Partikel als Mikrostickys bezeichnet werden.

Kolloidale und gelöste Substanzen werden nicht als Mikrostickys bezeichnet. Wenn sie klebrig sind oder klebrig werden können, stellen sie das Potenzial für Sekundärstickys dar. Methoden zum Nachweis von Mikrostickys müssen mindestens eines der Klassifizierungsmerkmale Anzahl, Größe oder Gewicht sowie mindestens eines der Klassifizierungsmerkmale Adhäsion/Klebrigkeit oder Oberflächenenergiedichte detektieren².

2.2 Methoden zur Bestimmung klebender Verunreinigungen

Zur Erfassung klebender Verunreinigungen und ihrer Charakterisierung gibt es bislang auf nationaler oder internationaler Ebene nur für die Bestimmung der Makrostickys standardisierte Messmethoden wie z. B. INGEDE-Methode 4, TAPPI T277 pm-99 und ISO 15360-2. Einzelne Firmen haben eigene Messgeräte und Methoden entwickelt, die auf ihre speziellen Bedürfnisse und Anforderungen ausgerichtet sind^{3, 4}. Dementsprechend variieren Selektivität, Zeitaufwand und Aussagekraft. Chemische Analysemethoden beleuchten alleine die Zusammensetzung von Ablagerungen, geben aber keine Auskunft über die Konzentration ihrer Bestandteile im Faserstoff. Auch das Anfärben kolloidal suspendierter Teilchen im Filtrat mit einem Fluoreszenzfarbstoff und die Auswertung mit einer laseroptischen Anordnung, dem so genannten Pitch-Counter, betrachten nur einen Teil des Stoffgemischs⁵.

Die meisten Methoden zielen darauf ab, mit unterschiedlichen Mitteln die Stickys aus der Suspension abzutrennen und anschließend einer geeigneten Auswertung zuzuführen⁶. Die Abtrennung erfolgt im Wesentlichen durch:

- Sortierung mit Laborsortiergeräten,
- Adsorption an einer Oberfläche,
- Ausfällung mikrodisperser Partikel mit anschließender Filtration bzw. Adsorption oder
- Extraktion mit Lösungsmitteln.

Unter diesen vier Konzepten nutzt nur die Adsorption die Klebrigkeit der Stickys tatsächlich als Trennprinzip aus. Da die Klebrigkeit jedoch die einzige gemeinsame Eigenschaft von Stickys darstellt, finden sich Adsorptionsschritte auch in einigen Methoden anderer Konzepte.

Neben den Methoden mit Abtrennung der Stickys aus dem Stoff gibt es auch Methoden, die auf die Abtrennung der Stickys verzichten. Als Vertreter der direkten Bestimmungsmethoden von Stickys sind die Laborblattmethoden zu erwähnen^{7, 8}.

Zahlreiche quantitative und halbquantitative Methoden basieren auf Probelblättern, deren zeitaufwändige Herstellung und Auswertung den Einsatz als Online-Messung ausschließt. Ähnliches gilt für Absorptionsmethoden, bei denen ein Absorbens mit der Suspension benetzt wird, um nach einer gewissen Zeit die Gewichtszunahme durch angelagerte Partikel zu bestimmen. Als Adsorbens kommen Papiermaschinensiebe^{9, 10}, Papiermaschinenfilze¹¹, Kunststofffolienstücke^{12, 13}, PE-Flaschen¹⁴ und sogar PP-Schaum¹⁵ zum Einsatz. Die Anströmung erfolgt hauptsächlich über Turbulenzerzeugung in der Suspension, beispielsweise mit einem Rührgerät oder wie im Falle des ersten Pira-Tack-Tests über eine Düse. Lediglich das von der BASF entwickelte Impinging-Jet-Verfahren ermöglicht es, das Anlagerungsverhalten bei der senkrechten Anströmung einer Glasplatte mitzuverfolgen.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts „Wirksame Bekämpfung von Mikro- und Sekundärstickys durch Modellierung von Entstehungsmechanismen von Sticky-Ablagerungen“ (AiF-Nr. 12581 BG) wurden Methoden zur Stickybestimmung untersucht¹⁶. Tab. 1 zeigt eine Übersicht von Messmethoden.

Die Untersuchung kommt zum Ergebnis, dass bislang lediglich die ARS-Methode (Adsorption am rotierenden Sieb)¹⁷ und die INGEDE-Makrostickymethode in der Lage sind, Praxisstoffe sinnvoll zu differenzieren.

Tab. 1: Einordnung von Methoden zur Stickybestimmung

Substrate	Stickyanalyse	Ablagerungsanalyse	Sekundärsticky-bildungspotenzial
Stoff	Sortiermethoden (INGEDE-Methode 4, TAPPI T 277 pm-99, ISO 15360-2)	FAC-Methode ARS-Methode Modifizierte INGEDE-Methode 9	
Filtrat/Siebwasser	Sortiermethoden (INGEDE-Methode 4, TAPPI T 277 pm-99, ISO 15360-2)	ARS-Methode INGEDE-Methode 9 CTP-Methode PIRA-Methode	INGEDE-Methode 6 CTP-Methode
Superfiltrat		Impinging Jet-Methode	Pitch Counter-Methode

Die bestehenden Sticky-Bestimmungsmethoden sind durchweg zeitaufwändige Offline-Methoden und eignen sich daher nicht zur laufenden Prozessüberwachung. So bleiben die Schwankungen technologischer Randbedingungen (z.B. pH-Wert, Ladungshaushalt, Temperatur, Stoffdichte, Hilfsmitteldosierung, Faserstoffinhaltsstoffe) unberücksichtigt.

Fehlen diese Einflussgrößen, so besteht die Gefahr der Über- oder Unterdosierung der zur Störstoffbekämpfung eingesetzten Fixiermittel. Diese greifen in den Ladungshaushalt des Papiermaschinenkreislaufs ein und verändern die Entwässerungseigenschaft der Faserstoffsuspension und die Zurückhaltung auf dem Papiermaschinensieb (Retention), was sich in der Papierqualität und in der Fracht potentiell klebender Verunreinigung im Kreislaufwasser niederschlägt. Wegen der starken gegenseitigen Beeinflussung müssen Fixier- und Retentionsmittel präzise abgestimmt werden. Zur genauen Dosierung von Chemikalien zur Bekämpfung klebender Partikel in der Faserstoffsuspension fehlt jedoch ein geeigneter Online-Sensor.

Die wissenschaftlich-technische Problemstellung liegt in der Quantifizierung klebender Verunreinigungen direkt im Faserstoffstrom. Ein Online-Sensor eröffnet die Möglichkeit, klebende Verunreinigungen unter Produktionsbedingungen gezielt zu bekämpfen und Produktionsstörungen durch Ablagerungen zu vermeiden. Mit einem solchen Sensor lässt sich die Dosierung der Hilfsstoffe optimieren. Dies ermöglicht eine Senkung der Produktionskosten, reduziert den Anfall von Ausschuss und führt zu geringeren Stillstandszeiten bei höheren Erlösen aus verbesserter Papierqualität und weniger Reklamationen.

Die besondere Herausforderung bei der Konzeption eines Online-Sticky-Sensors liegt darin begründet, dass neben mindestens einem der Partikelmerkmale Größe oder Gewicht auch die Klebrigkeit der Teilchen unter definierten Bedingungen detektiert werden muss.

2.3 Potentiell klebende Verunreinigungen und ihre Ablagerungsneigung

Grob wird unter drei Arten von Störstoffen unterschieden:

- Stickys, die aus dem Altpapier stammen,
- Pitch aus Frischfaserstoffen (Harze) und
- White Pitch aus gestrichenem Ausschuss.

Da es aber große Schwierigkeiten gibt, die Verunreinigungen zu identifizieren, geschweige denn zu quantifizieren, spricht man meist von Stickys im Allgemeinen. Eine Hochrechnung

des durch diese Störstoff-Problematik entstehenden Schadens gibt Hamann¹⁸ mit 170 Mio. Euro für die deutsche Papierindustrie im Jahr 1996 an. Verlässliche Zahlen sind allerdings schwer zu bekommen.

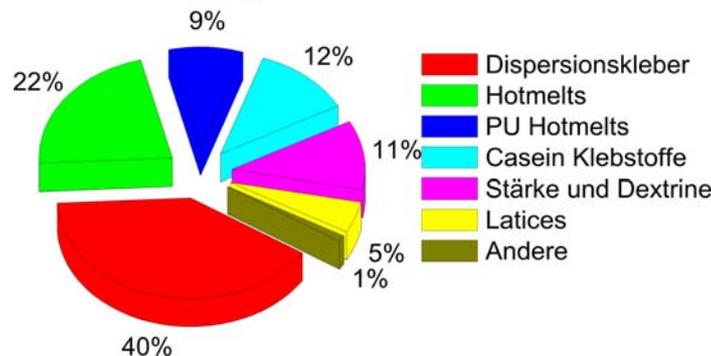


Abb. 2: Einsatz unterschiedlicher Klebstoffe in der Papierindustrie [14]

2.3.1 Stickys aus Heißklebern (Hotmelts)

Heißkleber werden flüssig aufgetragen und härten beim Abkühlen aus. Eine weitere chemische Vernetzung durch Wasser aus der Umgebung ist zudem möglich. Sie entfalten ihr Schadpotential bei hohen Temperaturen und Druck. Wichtigste Einsatzgebiete sind Buchrücken und Magazine sowie das Kleben von Schachteln. Eingesetzte Klebstoffe sind Ethylen-Vinyl-Acetat, Styren-Butadien-Kautschuk, Polyethylen, Polyamid, Polyurethan und Polyisopren. Alles tendenziell hydrophobe Substanzen, die schon aus diesem Grund zum Ausfallen oder Ablagern neigen. Dazu kommen noch zum Teil modifizierte Harze, die als Klebrigmacher (Tackifier) für die nötige Anfangsklebrigkeit beim Auftrag sorgen^{19, 20}.

2.3.2 Stickys aus Dispersionsklebstoffen

Dispersionskleber bestehen aus fein dispergierten Polymeren, die zwischen zwei Oberflächen durch Dispersionswechselwirkungen vermitteln können. Diese Dispersion wird in der wässrigen Phase während des Auftrags durch Polyvinylalkohole stabilisiert. Nach dem Auftrag wird das Wasser durch Verdunstung und Wegschlagen ins Papier entzogen und die kolloidal verteilten Partikel verschmelzen zu einer Klebstoffschicht. Dazu ist eine Mindest-Film-Bildungstemperatur nötig, die für normale Anwendungen nahe der Raumtemperatur liegen sollte. Daraus folgt allerdings auch eine Plastifizierung ähnlich der Hotmelts bei Temperaturen von 60°C bis 150°C je nach Polymerisationsgrad. Damit ergibt sich bei der weiteren Verarbeitung die gleiche Problematik wie bei Hotmelts. Die Verarbeitungspalette an Polymeren für Dispersionskleber ist mit Polyvinylacetat, Polyethylen, Vinyl-Propionat und Acrylat ähnlich wie bei Hotmelts.

2.3.3 Stickys aus Haftklebern (PSA)

Haftklebstoffe (Pressure Sensitive Adhesives) sind extrem hochviskos und entropie-elastisch. Aufgrund ihrer Verformbarkeit und Benetzungseigenschaften können sie an fast allen Materialien bei Druck haften. Diese beständige Klebrigkeit unter allen Bedingungen auch lange nach ihrem Auftrag unterscheidet sie von den anderen Sticky-Quellen. Typische Einsatzbereiche für Haftkleber sind Klebebänder, Klebeetiketten und Couverts. Die wichtigsten Materialien

hierfür sind Poly-Butadien-Kautschuk, Naturkautschuk, Polyisobuten, Polyvinylether und Polyacrylat. Dazu kommt noch eine Vielzahl anderer Hilfsmittel, die die nötigen Eigenschaften für den jeweiligen Anwendungszweck sicherstellen:

- Polymere (30 % bis 50 %),
- Harze / Tackifier (20 % bis 40 %),
- Weichmacher (bis zu 40 %),
- Füllstoffe (bis zu 10 %) und
- Stabilisatoren (bis zu 2%).

Bei Haftklebstoffen auf Naturkautschukbasis ist das Polymer alleine für die Klebrigkeit verantwortlich während bei synthetischem Kautschuk Block-Copolymere die adhäsiven Gruppen tragen. Polymere auf Acrylatbasis entfalten zusammen mit Harzen ihre Klebrigkeit. Wasserlösliche Dispersionen verfügen zusätzlich über Feuchte- und Viskositätsregulatoren. Bei der Aufbereitung von Altpapier werden diese Substanzen freigesetzt und tragen unter entsprechenden Umgebungsbedingungen zur Bildung von Sekundärstickys bei.

2.3.4 Fällung kolloidal gelöster Substanzen

Retentionsmittel und andere Hilfsstoffe in der Papierindustrie sind wasserlöslich oder zumindest kolloidal löslich. Von daher sollten vordergründig keine Probleme durch Ausfällen oder Ablagern auftreten. Vor allem aber bei pH-Änderungen, bei der Schockbekämpfung mit Säure, Lauge oder Biozid gegen Schleim und Ablagerungen ist ein vermehrtes Auftreten von Sekundärstickys zu beobachten; hierzu gehören nicht nur Elektrolyte, die durch polymere Gegenionen gefällt werden, sondern auch Substanzen einheitlicher Zusammensetzung.

Denn es reichern sich diese durch die Zwischenreinigung schwer oder gar nicht erfassbaren Substanzen im Kreislaufwasser an. Prinzipiell neigen alle gleichartigen Substanzen zum Ausfällen mit ihresgleichen, denn es ist energetisch am günstigsten, mit Molekülen der gleichen Art umgeben zu sein, weil dann die Oberflächenenergie absinkt. Bei hinreichend niedriger Konzentration bleibt eine kolloidale Lösung lange Zeit stabil; steigt die Konzentration aber über einen kritischen Wert an, so ist mit einem Ausfällen der gelösten oder molekular dispergierten Substanz zu rechnen, auch wenn abstoßende elektrische Kräfte existieren²¹.

Ein Modell für diesen Zusammenhang gibt die Theorie nach B. Derjaguin, L. Landau, E. J. W. Verwey und J. T. G. Overbeek (DLVO-Theorie) an. Sie geht von abstoßenden elektrischen Kräften zwischen den einzelnen kugelförmigen dispergierten Teilchen aus, anziehende Kräfte sind die Van-der-Waals-Kräfte zwischen zwei Dipolen. Die quantenmechanische Deutung nach London sieht folgenden Zusammenhang für die Anziehung durch induzierte Dipole vor:

$$V_A = \frac{b_{12}}{r^6} \quad (1)$$

Dabei sind:

- V_A der Potentialverlauf der anziehenden Kraft
- b_{12} eine Materialkonstante für die beiden beteiligten Atome
- r der Abstand zwischen den beiden Dipolen

Eine Abstoßung ergibt sich über folgenden Zusammenhang:

$$V_R^{sph} = - \int_{\infty}^0 V_R^{pl} * 2 * \pi * H dH \quad (2)$$

Für kugelförmige Partikel lässt sich über Integration der Potentialverlauf für die anziehenden Kräfte wie auch für die abstoßenden Kräfte berechnen:

$$2 * \pi * a * \epsilon * \epsilon_0 = \left(\frac{4 * R * T * \gamma}{z * F} \right)^2 * e^{-\kappa * h_0} = V_R^{sph} - \frac{a * A}{12 * h_0^2} \approx V_A^{sph} \quad (3)$$

Damit lässt sich eine kritische Länge bestimmen, bei der anziehende und abstoßende Kräfte sich die Waage halten. Wird diese Länge unterschritten, fallen die beiden Kolloide auf einander zu und verschmelzen zu einem Partikel. Kritische Länge und Konzentration:

$$\frac{A * z^2}{\left(\tanh\left(\frac{z * F * \phi_w}{4 * R * T}\right) \right)^2} \propto \kappa_{krit}^{-1} \frac{1}{A^2 * z^6} \left(\tanh\left(\frac{z * F * \phi_w}{4 * R * T}\right) \right)^4 \propto c_{krit} \quad (4)$$

Dabei sind:

- κ_{krit} die kritische Länge, bei deren Unterschreitung die Flockung einsetzt
- A die Hamakerkonstante
- z die Ladungszahl der Gegen-Ionen
- F die Faraday-Konstante
- c_{krit} die kritische Konzentration, bei deren Überschreitung die Flockung einsetzt
- V_R^{sph} das Potential der abstoßenden Kraft
- $V_R^{pl} = 2 * \epsilon * \epsilon_0 * \phi_w^2 * e^{-\kappa * \frac{h}{2}}$ das Potential einer geladenen Platte
- V_A^{sph} die anziehende Kraft nach London für eine Kugel
- a der Radius der Kugel
- H der Abstand des betrachteten Punktes auf der Kugeloberfläche von der Verbindungslinie Kugelmitte - Kugelmitte
- ϵ die Dielektrizitätskonstante
- ϵ_0 die elektrische Feldkonstante
- ϕ_w das Potential der geladenen Wand
- κ die Debye-Länge
- h der Abstand zwischen den Partikeln
- R die Gaskonstante
- T die absolute Temperatur
- γ der Aktivitätskoeffizient

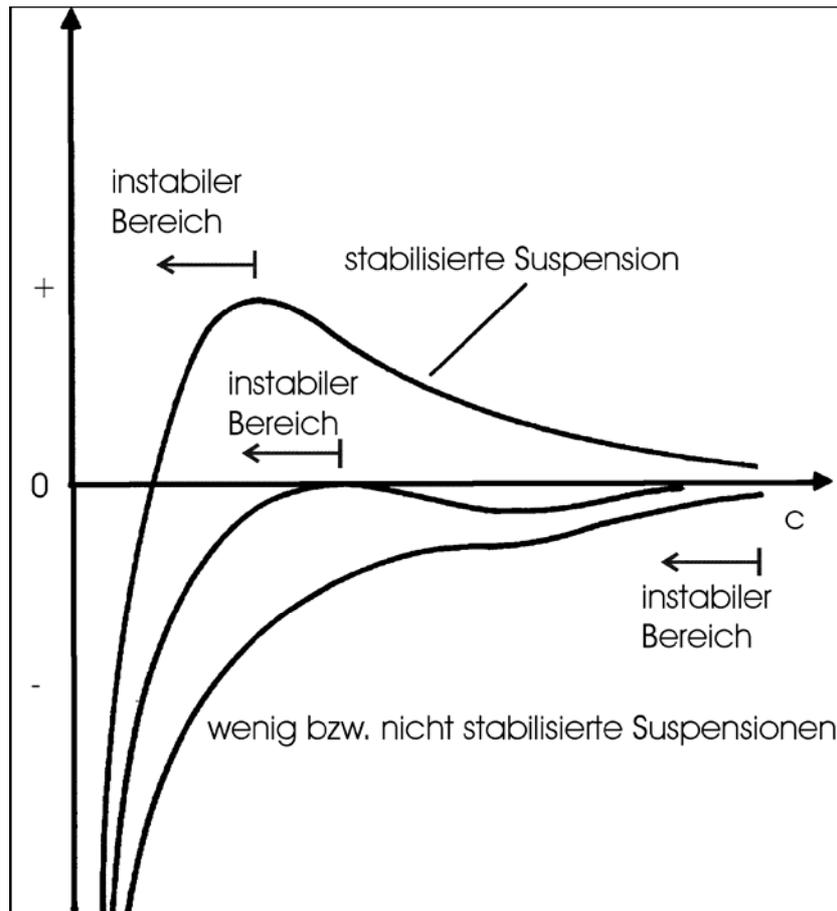


Abb. 3: Potentialverläufe nach der DLVO-Theorie

Geschieht das Zusammentreffen in großem Maßstab, bilden sich makroskopische Teilchen, die als Sekundärstickys in der Papierproduktion selber entstehen. Gefördert wird dieser Prozess im Siebwasser durch die stetige Verdampfung, dazu kommt noch der Effekt der Aussalzung, bei der die schwerer löslichen Polymere zugunsten von einatomigen, leicht löslichen Salzen ausfallen. Besonders auffällig ist hier der große Einfluss von hoch geladenen Gegenionen, zu denen natürlich auch die eingesetzten Retentionsmittel selber zählen. So ist bei vermehrtem Einsatz von Retentionsmitteln und anderen Prozesschemikalien sowie stark geschlossenen Wasserkreisläufen auch mit einem vermehrten Auftreten von Sekundärstickys zu rechnen. Deren Entstehung im Papierherstellungsprozess selber und die hohe Oberflächenenergie dieser Teilchen in statu nascendi sorgen für eine besonders starke Klebrigkeit, hohe schädigende Wirkung und schlechte Sortierbarkeit. Eine Überwachung des Siebwassers mit einem sehr schnell reagierenden System kann helfen, die Entstehungsmechanismen zu verstehen und die Ursachen zu bekämpfen.

BASF unterscheidet die Störstofffracht nach der gewichtsspezifischen Ladungsdichte und der Partikelgröße, wie in Abb. 4 dargestellt. Demnach bestehen etwa 10 % des Störstoffvolumens aus löslichen Verbindungen oder Makromolekülen. Diese Störstoffe können eine sehr hohe Ladung tragen und auf diese Weise mit kationischen, chemischen Additiven, wie z. B. Retentionsmittel, Verfestiger sowie Leimungsmittel, in Wechselwirkung treten.

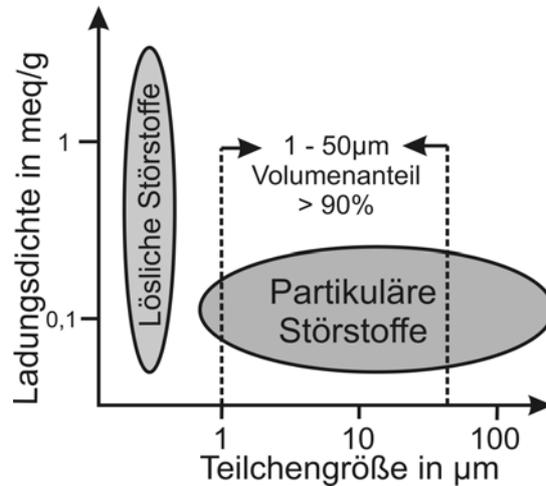


Abb. 4: Ladungsdichte und Teilchengröße bei Störstoffen (Quelle: BASF)

Bei den unlöslichen Partikeln spielt deren Oberflächenladung eine untergeordnete Rolle. Die Ablagerungsneigung dieser Partikel nimmt aus hydrodynamischen Gründen mit zunehmender Partikelgröße zu. Der in Abb. 5 gezeigte Zusammenhang zwischen Partikeldurchmesser und Ablagerungswahrscheinlichkeit ist für die Auslegung einer Nachweismethode von grundlegender Bedeutung.

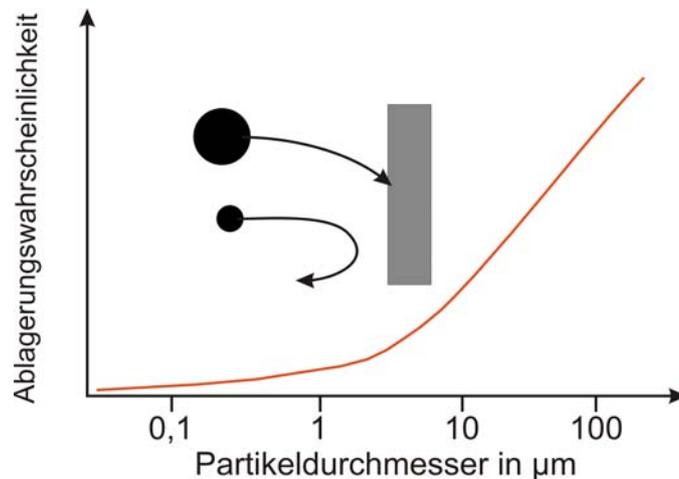


Abb. 5: Ablagerungsneigung in Abhängigkeit der Partikelgröße (Quelle: BASF)

2.4 Grundlagen zum optischen Messprinzip

Das Messprinzip basiert auf der lokalen Störung der Totalreflexion von Lichtstrahlen in einem optisch dichteren Medium an seiner Grenzfläche zu einer Faserstoffsuspension.

Ausschlaggebend sind die Randbedingungen, unter denen Energie der elektromagnetischen Welle an der Grenzschicht entzogen wird und Partikel erscheinen lässt, die eine vergleichbare oder eine höhere Brechzahl als das lichtleitende Medium besitzen.

Auf diesem Prinzip beruhen heutzutage die meisten Fingerabdruck-Scanner, um Kontaktstellen der Haut auf einem Messfenster sichtbar zu machen. Das Prinzip wird im Kontaktanteil-

messgerät eingesetzt, um die Oberflächenbeschaffenheit von Papier unter Variation des Anpressdrucks zu untersuchen.

2.4.1 Lichttransport

Die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge des Lichttransports auch in Verbindung mit dem Medium Papier sind seit langem bekannt und gut dokumentiert²². Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen dargestellt und durch neueste Erkenntnisse auf dem Gebiet der Lichtwellenleiter ergänzt, soweit sie für die Entwicklung des Messsystems beitragen.

2.4.1.1 Lichttransport in einer Kunststofffaser

Lichtwellenleiter sind dielektrische Leiter, in denen sich elektromagnetische Energie ausbreiten kann. Ihre Übertragungseigenschaften hängen vom geometrischen Aufbau und den physikalischen Eigenschaften des verwendeten Materials ab. Bei den in dieser Arbeit eingesetzten Lichtleitern handelt es sich um Stufenindexfasern, die aus einem Polymethylmethacrylat-Kern (Plexiglas) mit einer fluorierten Polymerummantelung. Der Mantel ist als optisch dünneres Medium für den Lichttransport durch Totalreflexion in der Glasfaser verantwortlich. Das Prinzip der Totalreflexion lässt sich aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz folgendermaßen ableiten:

Ein Lichtstrahl, der die Phasengrenzfläche zweier transparenter Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 passiert, wird teilweise reflektiert und teilweise gebrochen. Der Winkel des reflektierten Strahls zur Flächennormalen entspricht dem Winkel des einfallenden Strahls. Der Winkel des gebrochenen Strahls hängt nach dem Gesetz von Snellius von den Brechungsindizes der beiden Medien ab²³:

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

Dabei sind Θ_1 und Θ_2 die Winkel des einfallenden bzw. gebrochenen Strahls zur Flächennormalen. Der Brechungsindex n_i eines Mediums ist gegeben durch den Quotienten aus der Phasengeschwindigkeit einer Lichtwelle im Vakuum c_0 und der Phasengeschwindigkeit in einem betreffenden Medium c_i .

$$n_i = \frac{c_0}{c_i} \quad (6)$$

Tritt ein Lichtstrahl von einem optisch dichteren Medium mit der Brechzahl n_1 in ein optisch dünneres Medium mit der Brechzahl n_2 ein, wird er nach Gleichung (5) vom Einfallslot weg gebrochen. Der Brechungswinkel Θ_2 steigt mit zunehmenden Einfallswinkel Θ_1 an, bis beim Einfallswinkel Θ_T der Brechungswinkel $\Theta_2=90^\circ$ wird. Θ_T ist der Grenzwinkel der Totalreflexion. Für $\Theta_1 > \Theta_T$ gibt es keinen gebrochenen Strahl mehr, sondern nur noch einen total reflektierten Strahl. Auf diese Weise wird der Lichtstrahl in der Faser geführt. Da ein optisch dichterer Faserkern von einem optisch dünneren Mantel umgeben ist, verhindert Totalreflexion den seitlichen Austritt aus der Faser.

Nur Lichtstrahlen, die innerhalb eines bestimmten Winkelbereichs in die Stirnfläche eines Faserkerns eintreten, erfahren Totalreflexion und können sich in der Faser fortpflanzen. Der maximale Winkel zur Faserachse, bei dem noch Totalreflexion der eintretenden Lichtstrahlen erfolgt heißt Akzeptanzwinkel Θ_m (vgl. Abb. 6). Er ist ein Maß für das Lichtaufnahme- und

Lichtabstrahlvermögen eines Lichtwellenleiters. Der Sinus des Akzeptanzwinkels wird numerische Apertur (NA) bezeichnet²⁴.

$$NA = \sin \Theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (7)$$

Die folgende Abbildung zeigt die Einkopplung und die Wellenleitung des Lichts in einer Faser:

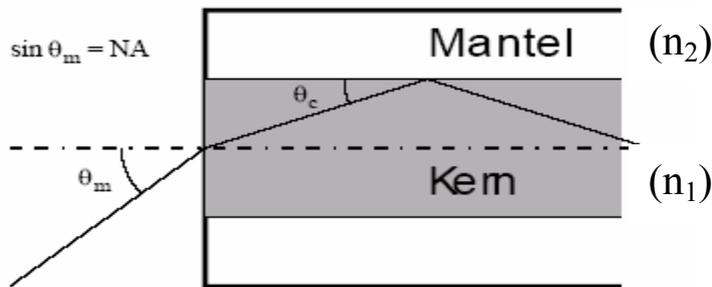


Abb. 6: Einkopplung im Winkel Θ_m der numerischer Apertur NA für Grenzwinkel Θ_c

Wegen der Welleneigenschaften des Lichts ist nicht bei jedem Einfallswinkel eine Ausbreitung von Lichtwellen in der Faser möglich. Infolge von Interferenzen können sich Lichtwellen auslöschen, verstärken oder abschwächen. Für eine bestimmte Wellenlänge gibt es deshalb eine diskrete Anzahl von Winkeln, bei denen die Möglichkeit zur Ausbreitung besteht. Die Wellenfronten, die ausbreitungsfähig sind, nennt man Eigenwellen oder Moden. Es gibt Moden hoher Ordnung mit Einfallswinkel Θ_1 nahe Θ_T und Moden niedriger Ordnung mit Θ_1 nahe 90° , die nahezu parallel zur Faserachse den Wellenleiter durchlaufen. Wie viele Moden sich in einem Lichtwellenleiter fortpflanzen können, hängt vom Radius des Faserkerns r , von der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts λ und von der numerischen Apertur NA ab. Da die Forderung der Totalreflexion erfüllt sein muss, existiert eine maximale Zahl von ausbreitungsfähigen Moden in einem LWL. Aus der normierten Frequenz f , in der die angegebenen Parameter enthalten sind, lässt sich die Zahl der maximal ausbreitungsfähigen Moden M näherungsweise bestimmen²⁵:

$$M \approx 4 \left(\frac{f}{\pi} \right)^2 \quad (f \gg 1) \quad (8)$$

mit

$$f = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} \cdot NA \quad (9)$$

So können beispielsweise bei der numerischen Apertur einer Faser von 0,46, einem Kerndurchmesser von 980 μm und einer Lichtwellenlänge von 650 nm 1,92 Millionen Moden geführt werden, falls es sich um einen ungekrümmten Lichtleiter handelt.

2.4.1.2 Evaneszentes Feld

Bei einer genaueren, wellenoptischen Betrachtung der geführten Moden in einem Wellenleiter muss berücksichtigt werden, dass es an jedem Reflexionspunkt zu einer Interferenz von einfallender und reflektierter Lichtwelle kommt. Aufgrund dieser Interferenz bildet sich an jedem Reflexionspunkt eine stehende Welle aus, die senkrecht auf der Grenzfläche zwischen

Faserkern und Fasermantel steht. Abb. 7 zeigt eine stehende Welle im transversal elektrischen Mode niedrigster Ordnung (TE₀-Mode). Die Wellenfunktion ist eine Lösung der Maxwell'schen Gleichungen²⁶.

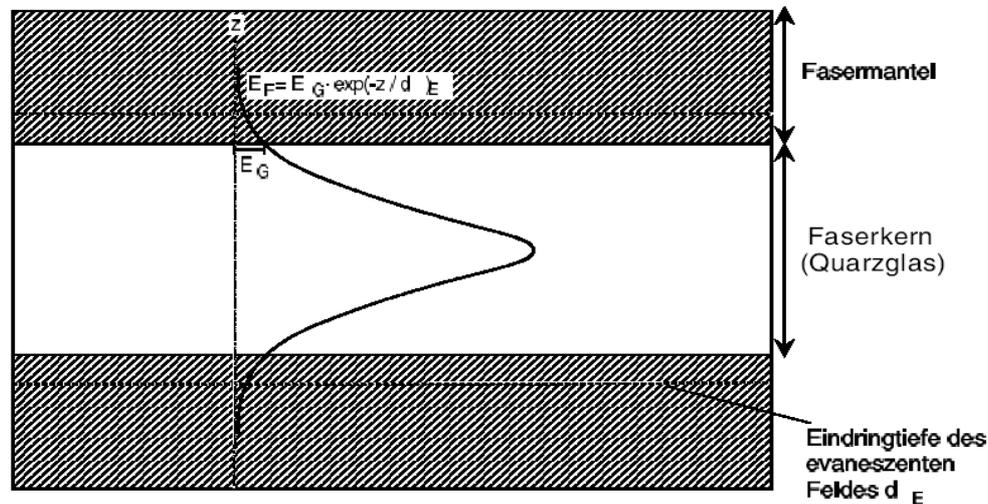


Abb. 7: Ausbildung des evaneszenten Feldes bei einer TE₀ Mode

Unter Voraussetzung der Stetigkeit und Differenzierbarkeit der Wellenfunktion, darf die Grenzfläche zum Fasermantel nicht abrupt auf Null sinken. Die stehende Welle klingt deshalb innerhalb des Fasermantels exponentiell mit zunehmenden Abstand von der Phasengrenzfläche ab, d. h. sie dringt über eine endliche Wegstrecke in den Fasermantel ein (Tunneleffekt). Das resultierende elektromagnetische Feld im Fasermantel wird als quergedämpftes oder evaneszentes Feld bezeichnet. Daraus ergibt sich, dass ein bestimmter Anteil an Lichtintensität im Fasermantel geführt wird, wie Abb. 7 veranschaulicht.

Die Eindringtiefe des evaneszenten Feldes d_E hängt von der Wellenlänge des Lichts λ , von den Brechungsindizes der beiden Medien n_1 und n_2 und vom Einfallswinkel der Lichtwelle Θ_1 ab und kann nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$d_E = \frac{\lambda}{n_1 \cdot 2\pi \cdot \sqrt{\sin^2 \Theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}} \quad (10)$$

Der Einfallswinkel Θ_1 kann Werte annehmen, die zwischen dem Grenzwinkel der Totalreflexion Θ_T und 90° liegen, damit der Lichttransport in der Faser durch Totalreflexion stattfindet. Wenn sich Θ_1 dem Grenzwinkel Θ_T annähert, nimmt die Eindringtiefe des evaneszenten Feldes d_E nach Gleichung (10) zu. Das bedeutet, dass Moden hoher Ordnung (Θ_1 nahe Θ_T) eine große Eindringtiefe in den Fasermantel haben, während bei Moden niedriger Ordnung (Θ_1 nahe 90°) die Eindringtiefe gegen Null geht. Für eine Wellenlänge λ von 650 nm und die Brechungsindizes $n_1 = 1,492$ (Kern) und $n_2 = 1,33$ (Wasser) erhält man einen Grenzwinkel Θ_T von 63° . Somit errechnet sich z. B. für eine geführte Mode, deren Einfallswinkel Θ_1 mit 64° nahe Θ_T geschätzt wird, eine maximale Eindringtiefe d_E von 604 nm. Damit liegt d_E in der Größenordnung der eingestrahlten Wellenlänge λ .

2.4.1.3 Dämpfungsverluste in Lichtwellenleitern

Ein weiterer Parameter, der zur Beschreibung der Eigenschaften eines Lichtwellenleiters benötigt wird, ist die Dämpfung. Beim Transport eines optischen Signals durch einen LWL treten Verluste auf. Ursachen dafür sind Streuung, Absorption und Strahlungsverluste. In der Praxis wird die Dämpfung üblicherweise in dB angegeben, und folgendermaßen berechnet:

$$\alpha \cdot l \text{ [dB]} = -10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} \quad (11)$$

Dabei ist P die Lichtleistung an einer bestimmten Position innerhalb der Faser. P_0 ist die in die Faser eingekoppelte Lichtleistung. Unter der Annahme, dass alle Dämpfungsmechanismen über die Länge l des LWLs konstant bleiben, ist die Abnahme der Lichtleistung als Funktion der Faserlänge P(l) durch das Lambertsche Gesetz gegeben:

$$P(l) = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l} \quad (12)$$

Wird ein Lichtimpuls mit der Leistung P_0 eingekoppelt, nimmt seine Intensität beim Durchlaufen der Faser exponentiell ab, so dass er nach einer Faserstrecke l nur noch die Leistung P besitzt. Der Dämpfungskoeffizient α setzt sich additiv aus den jeweiligen Koeffizienten der oben genannten Dämpfungsmechanismen zusammen,²⁷ wenn diese über die Faserlänge konstant bleiben.

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_A + \alpha_B \quad (13)$$

Dabei sind α_S , α_A und α_B die Dämpfungskoeffizienten für Streuung, Absorption und Strahlung.

2.4.1.4 Lichtstreuung in Lichtwellenleitern

In einem homogenen Medium kann sich eine Welle ungehindert ausbreiten. Wenn die Welle aber auf ein Hindernis trifft, das die Homogenität auf irgendeine Weise hindert, dann sendet dieses Hindernis Streuwellen aus. Beispiele für solche Inhomogenitäten sind Moleküle, Staubpartikel, Dichteschwankungen, Risse, Blasen oder andere Hindernisse. Der Streumechanismus wird je nach Größe der Streuzentren entweder Mie-Streuung, oder Rayleigh-Streuung bezeichnet. Bei der Mie-Streuung ist die Größenordnung der Streuzentren größer oder gleich der eingestrahlten Wellenlänge λ , während die Streuzentren der Rayleigh-Streuung klein im Vergleich zur eingestrahlten Wellenlänge sind. Man kann allerdings davon ausgehen, dass die Mie-Streuung bei qualitativ hochwertigen Fasern vernachlässigbar klein ist, so dass α_S dem Rayleigh-Koeffizienten α_R gleichgesetzt werden kann. Der Koeffizient α_R wird nach folgender Gleichung berechnet²⁸:

$$\alpha_S = \alpha_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \cdot \Delta n^4 \cdot V_S \quad (14)$$

Demnach hängt der Rayleigh-Streukoeffizient α_R nicht nur von der eingestrahlten Wellenlänge λ^4 , sondern auch vom Streuvolumen $\Delta n^4 \cdot V_S$ ab. Dabei ist Δn die Abweichung der Brechzahl in einem Würfel mit dem Volumen V_S von der mittleren Brechzahl des Mediums. Je größer also die Brechzahlschwankungen in einem Medium sind und je kurzwelliger das Licht, desto stärker ist die Rayleigh-Streuung.

2.4.1.5 Lichtabsorption in Lichtwellenleitern

Bei Lichtverlusten in einem LWL durch Absorption muss zwischen Eigenabsorption und durch Verunreinigungen verursachte Absorption unterschieden werden. Die materialbedingte Eigenabsorption, die auch als intrinsische Absorption bezeichnet wird, kommt zum einen durch Elektronenübergänge in UV-Bereich zustande. Zum anderen treten im Glas Wechselwirkungen zwischen Molekülgruppen und Lichtenergie auf, die zu Molekülschwingungen führen. Die dadurch entstehenden Absorptionsbänder liegen im nahen Infrarotbereich (NIR) und steigen mit zunehmender Wellenlänge an. Dadurch ergibt sich nur ein schmaler, für den Transport von Lichtenergie in einer Glasfaser geeigneter Wellenlängenbereich, der sich vom UV- zum NIR- Bericht erstreckt. Hinzu kommen noch die extrinsischen, durch Verunreinigungen hervorgerufenen Absorptionsverluste. Sie entstehen beim Herstellungsprozess durch im Glasverbleibende OH⁻ und Metallionen.

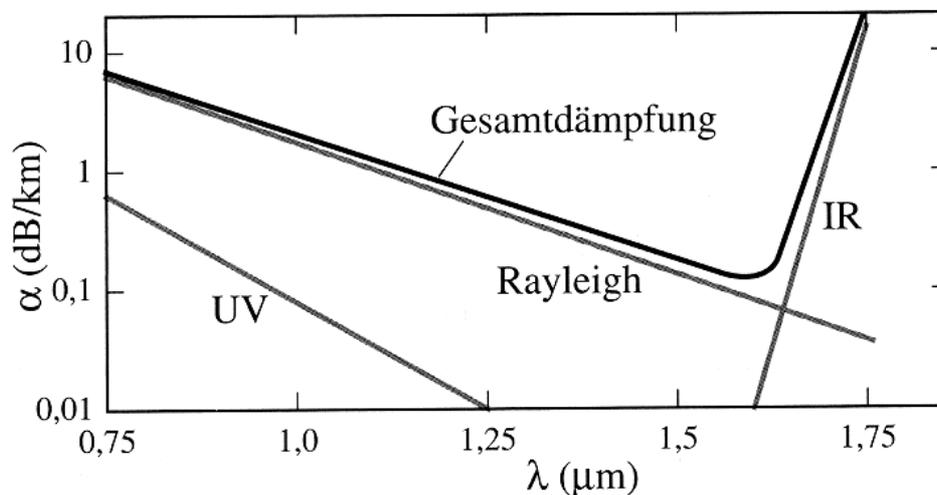


Abb. 8: Überlagerung von Absorption und der Rayleigh Streuung

Kunststofffasern zeigen im reinen und fehlerfreien Zustand grundsätzlich gleiche Dämpfungscharakteristika, nur dass bei ihnen im Allgemeinen die elektronischen und molekularen Absorptionsschwänze stärker ausgebildet sind und sie deshalb keine so niedrige Gesamtdämpfung haben, wie das reine Quarzglas.²⁹

Die folgende Abbildung zeigt die Dämpfung der eingesetzten Kunststofffaser. Bei einer Wellenlänge von 650 nm beträgt die Dämpfung weniger als 0,2 dB/m.

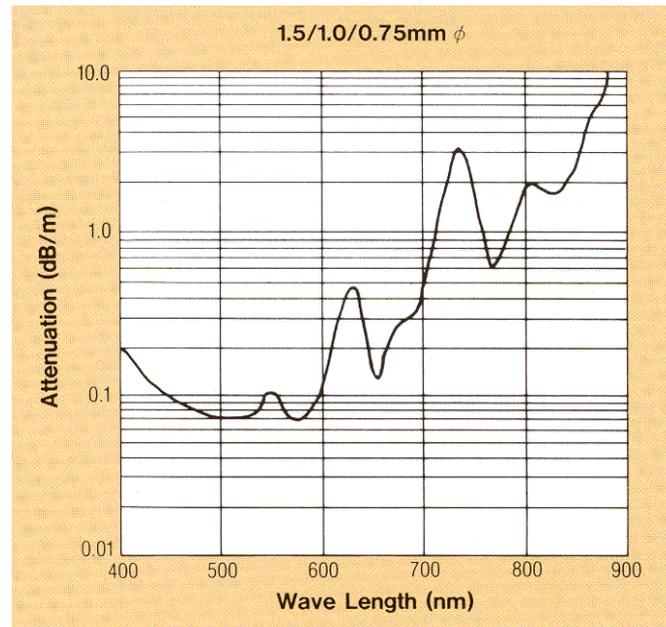


Abb. 9: Spektrale Dämpfung der eingesetzten Faser. (Quelle: Toray)

Das in der Faser transportierte Licht kann im evaneszenten Feld absorbiert werden, wenn sich Analytmoleküle im Fasermantel anreichern, die bei der eingestrahlten Wellenlänge eine Absorptionsbande aufweisen. Ein Maß für die durch Absorptionsvorgänge verursachte Dämpfung ist der Absorptionskoeffizient α_A , der sich aus dem im evaneszenten Feld transportiertem Lichtanteil η , dem molaren Extinktionskoeffizienten ϵ_m und der molaren Analytkonzentration im Fasermantel C_M ergibt.

$$\alpha_A = \eta \cdot \epsilon_m \cdot C_M \quad (15)$$

2.4.1.6 Strahlungsverluste in gekrümmten Lichtwellenleitern

Strahlungsverluste in einem LWL entstehen zum einen, wenn die Brechzahldifferenz zwischen Faserkern und Mantel z. B. durch Anreicherung von Chemikalien im Fasermantel vermindert wird (vgl. Abb. 10), oder zum zweiten durch Krümmungen des LWLs. Im Folgenden werden die Strahlungsverluste in gekrümmten Fasern näher untersucht.

Die Lichtausbreitung wird durch eine Krümmung gestört, was dazu führt, dass es vor allem bei Moden hoher Ordnung zur Abstrahlung durch Auskopplung aus der Faser kommt. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht, wie sich der Einfallswinkel Θ_1 eines Lichtstrahls durch eine Krümmung mit dem Radius R auf Θ_1' verkleinert. Alle Moden mit $\Theta_1' < \Theta_T$ werden ausgekoppelt.

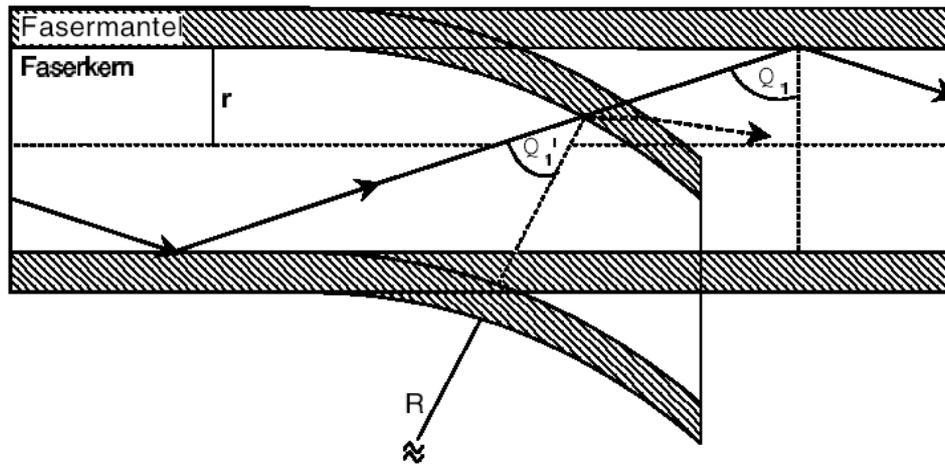


Abb. 10: Totalreflexion in einer geraden und einer gekrümmten Faser

Für die Anzahl der Moden M_R , die bei einem bestimmten Biegeradius R noch den LWL durchlaufen kann, näherungsweise folgendermaßen bestimmt:

$$M_R = M - M \cdot \left[\frac{r}{R} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot \lambda}{4\pi \cdot n_2 \cdot R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (16)$$

M ist die durch einen ungekrümmten LWL transportierte Zahl an Moden gemäß Gleichung (8). Demnach sinkt die Zahl der im Lichtleiter geführten Moden mit abnehmendem Biegeradius.

Ein in folgender Gleichung betrachteter Anteil des im evaneszenten Feld transportierten Lichts η , zeigt, dass das im Mantel geführte Licht mit sinkender Modenzahl steigt.²⁸

$$\eta = \frac{4}{3 \cdot \sqrt{M}} = \frac{\lambda \cdot 2\sqrt{2}}{3\pi \cdot r \cdot NA} \quad (17)$$

Die Moden niedriger Ordnung gehen an einer Faserkrümmung zu Moden höherer Ordnung über, welche eine größere Eindringtiefe in den Fasermantel besitzen. Durch das Biegen der Faser wird also ein größerer Lichtanteil in das evaneszente Feld gedrängt, wobei allerdings die insgesamt in der Faser geführte Lichtintensität aufgrund der Lichtauskopplung abnimmt.

Die Krümmung der Faser bewirkt ebenfalls eine Verminderung der numerischen Apertur, da durch die Auskopplung von Moden hoher Ordnung beim Biegen der Faser der Akzeptanzwinkel Θ_m praktisch verringert wird.

Die Strahlungsverluste sind nicht von der Faserlänge abhängig. Auch wenn die numerische Apertur über eine längere Faserstrecke den verringerten Wert behält, werden keine weiteren Moden ausgekoppelt, da die Moden, welche die Bedingungen der Totalreflexion nicht mehr erfüllen, bereits nach wenigen Zentimetern die Faser verlassen haben. Es wird hierbei vorausgesetzt, dass der Biegeradius konstant bleibt.

Da die Strahlungsverluste, die aufgrund der verminderten numerischen Apertur hervorgerufen werden, unabhängig von der Faserlänge sind, treffen die Gleichungen (11) und (12) nicht mehr zu. Im Dämpfungskoeffizienten α_B werden nur solche Strahlungsverluste berücksichtigt, die über die gesamte Faserlänge l konstant bleiben, also z.B. durch Mikrokrümmungen oder Defekte im LWL hervorgerufene Strahlungsverluste. Aus diesem Grund wird die Dämpfung, die durch verminderte numerische Apertur verursacht wird, in einem Faktor $NA^2 \cdot NA_0^{-2}$ in folgender Gleichung berücksichtigt:

$$P(l) = \frac{NA^2}{NA_0^2} \cdot P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l} \quad (18)$$

mit

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_A \quad (19)$$

Dabei ist NA_0 die numerische Apertur der ungekrümmten und unbeladenen Faser und NA die aufgrund von Biegungen in der Faser verminderte numerische Apertur.

Nachfolgend wird gezeigt, dass auch die Brechungszahl des, außen an den gebogenen Kern, angrenzenden Mediums einen Einfluss auf den Intensitätsverlust hat.

Die Lichtwelle kann bezüglich ihrer Periodizität in der Ausbreitungsrichtung durch die, in der folgenden Abbildung eingezeichneten, Linien gleicher Phase (Wellenberge) charakterisiert werden.

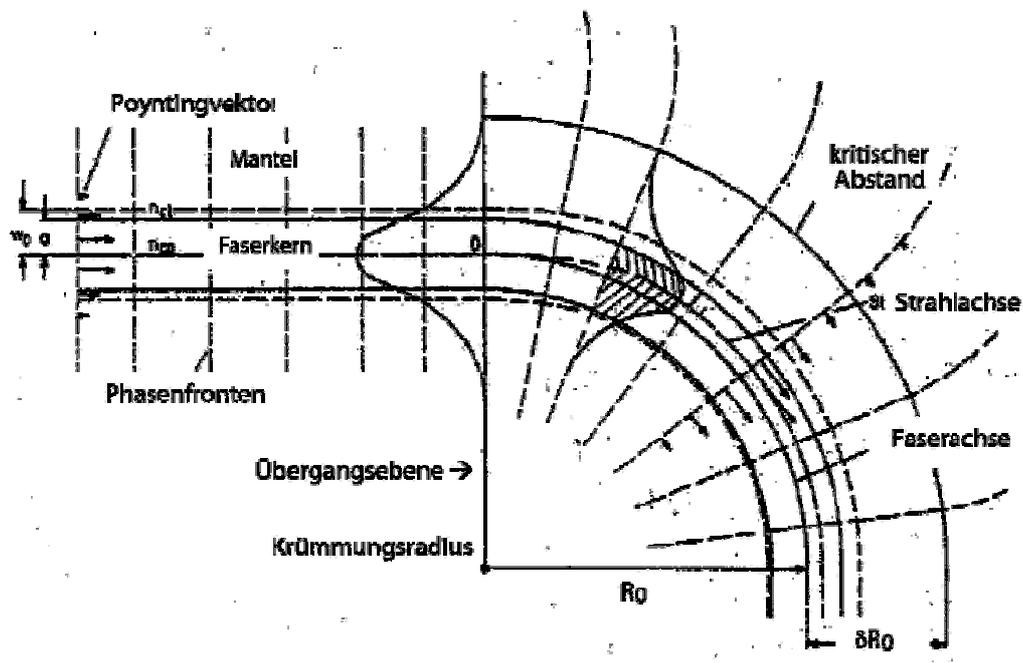


Abb. 11: Lichtstrahl in gekrümmter Single-Mode-Faser (Quelle: Siemens)

Die in der Welle enthaltene Energie ist stets senkrecht zu diesen Phasenfronten. Die lokale Richtung und Größe des Phasenflusses wird durch die eingezeichneten Poyntingvektoren repräsentiert. Da alle Poyntingvektoren in der geraden Faser parallel zur Faserachse verlaufen, und damit keine Komponente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufweisen, bleibt sowohl Form als auch die Energie des Lichtstrahls erhalten, das heißt der Strahl wird verlustfrei geführt.

In der gekrümmten Faser ist die Phasengeschwindigkeit c_0/n in der inneren Teilwelle kleiner als die der Äußeren, da n_{co} stets größer als n_{cl} ist. Die nun lokal unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten bewirken, dass die Phasenfronten einschnellen und um die Krümmungsachse der Faser rotieren. Rotiert die ebene Phasenfront bezüglich der Krümmungsachse um einen Winkel φ , so muss die Wellenfront auf der Innenseite der Krümmung einen kleineren Weg s , als auf der Außenseite zurücklegen ($s = \varphi \cdot R$). Um die Phasenfront nicht zu „verbiegen“, muss daher die lokale Phasengeschwindigkeit der Lichtwelle linear mit dem Abstand R zur Krümmungsachse ansteigen. ($v = d\varphi/dt \cdot R$). Dies geht jedoch bis zu einem kritischen Abstand, an dem die Phasenfront ihre maximal mögliche Phasengeschwindigkeit c_0/n_{cl} erreicht³⁰. Darüber hinaus „hinken“ die Phasenfronten mit steigendem Abstand immer stärker nach, wodurch sie entgegen der Ausbreitungsrichtung gebogen werden. Manche der Polygonvektoren bekommen Komponenten, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen und es kommt zum Leistungsverlust des Lichtstrahls.

Hieraus folgt die Annahme, dass wenn der Mantel der Faser auf der Außenseite abgeschliffen wird, und wenn die Faser anschließend mit Partikeln verschiedener Brechungsindizes tangiert wird, ein Intensitätsunterschied aufgrund der Art der Partikel messbar wird. Das liegt darin begründet, dass die obere Begrenzung der Phasengeschwindigkeit durch die Brechzahl des Außenmediums n_a über die Beziehung c_0/n_a vorgegeben ist.

Mit kleinerem Krümmungsradius können Partikel erfasst werden, deren Brechzahl unterhalb der des Kerns liegen. Das liegt unter anderem daran, dass sich die Dichte des Materials im äußeren Bereich des Faserkerns senkt und im Inneren, durch das Stauchen der Faser, erhöht wird.

2.4.1.7 Einfluss von Partikeln auf lichtleitende Schichten

Grundsätzlich müssen hierbei zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall wird angenommen, dass die klebende Verunreinigung eine neue Phasengrenze zum Kern bildet. Im zweiten Fall wird angenommen, dass die Partikel in den Bereich des evaneszenten Feldes gelangen, jedoch keinen Kontakt zum Kernmaterial ausbilden und somit keine neue Phasengrenze bilden.

Fall 1:

Der rot dargestellte Pfeil in Abb. 12 steht stellvertretend für einen für einen Lichtstrahl, der sich im LWL ausbreitet. Trifft dieser Lichtstrahl auf einen an der Leiteroberfläche haftenden Sticky mit einer höheren Brechzahl n_s , wird die Bedingung für eine Totalreflexion nicht mehr erfüllt, der Strahl wird gebrochen und breitet sich im Partikel aus. An der inhomogenen Oberfläche der Stickies wird der Lichtstrahl zum größten Teil gestreut und reflektiert.

Der Lichtstrahl würde in diesem Extremfall komplett ausgekoppelt werden. Das wird in der Abbildung deutlich, bei der die Eingangsintensität I_E mit einem großen Pfeil gegenüber der Ausgangsintensität I_A dargestellt ist. I_A ist verschwindend gering.

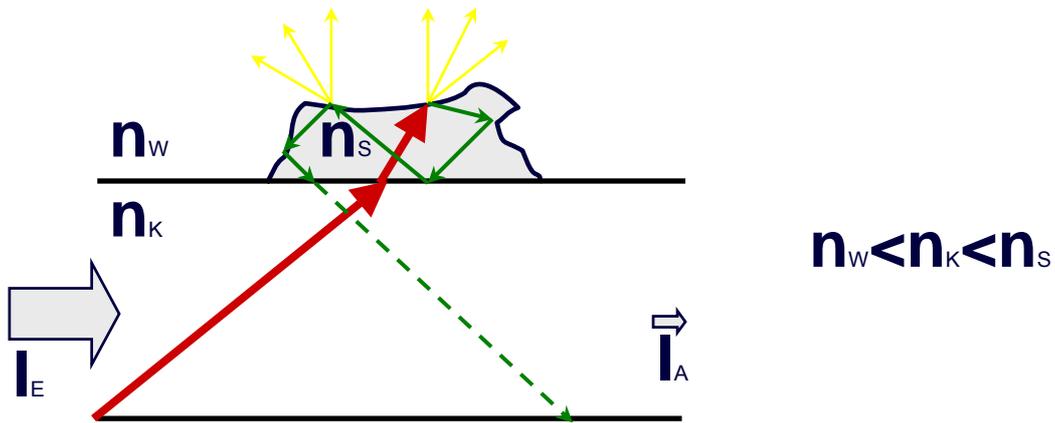


Abb. 12: Möglicher Strahlenverlauf bei einer Sticky-Anlagerung

Fall 2:

Abb. 13 illustriert den Fall, dass der Sticky nicht die nötige Adhäsion zum Faserkern aufbauen kann, um daran zu haften, aber die Annäherung groß genug ist, um in das evaneszente Feld des Lichtwellenleiters einzudringen.

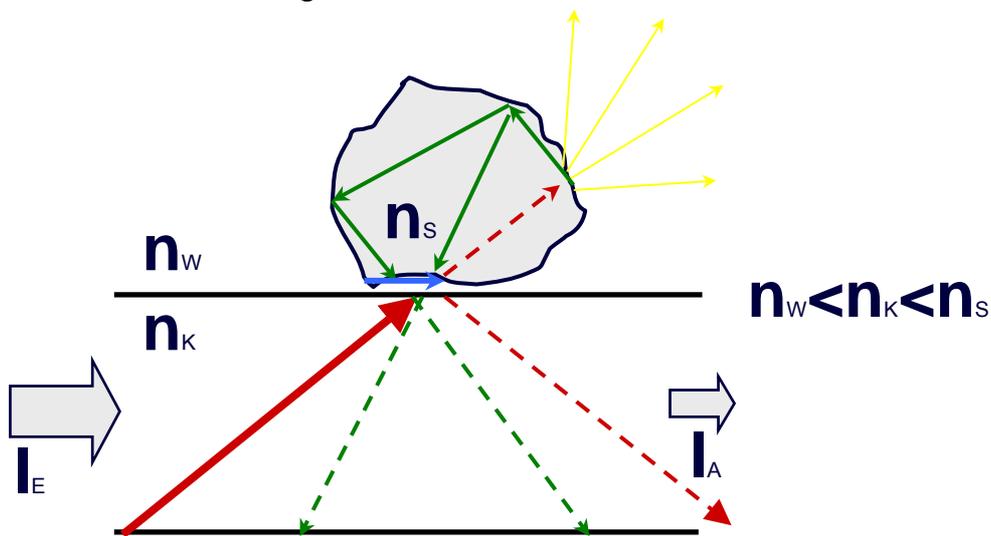


Abb. 13: Strahlenverlauf bei einer Sticky-Annäherung

Der ankommende Strahl wird an der Phasengrenze zum Teil total reflektiert, zum anderen in das Stickmaterial getunnelt. Diese Leitung des Lichtstrahls über eine Grenzschicht hinweg wird behinderte Totalreflexion genannt und tritt auf, falls die Dicke einer total reflektierenden Schicht hinreichend dünn wird, d. h. $d \leq d_E$ (vgl. Gleichung (10)) und auf der anderen Seite ein Medium mit $n_s > n_k \sin \Theta_1$ liegt, in dem die Welle ausbreitungsfähig ist. Die Welle breitet sich im Medium n_s mit verminderter Amplitude weiter aus³¹. In welchem Verhältnis der Strahl und seine Leistung geteilt werden, hängt in erster Linie von dem Abstand d des klebenden Partikels zum Faserkern ab.

Abb. 14 zeigt das Prinzip eines Strahlenteilerwürfels. Durch Ändern des Abstands Δx kann das Teilverhältnis variiert werden. Die Strahlenbreite soll die Intensität symbolisieren.

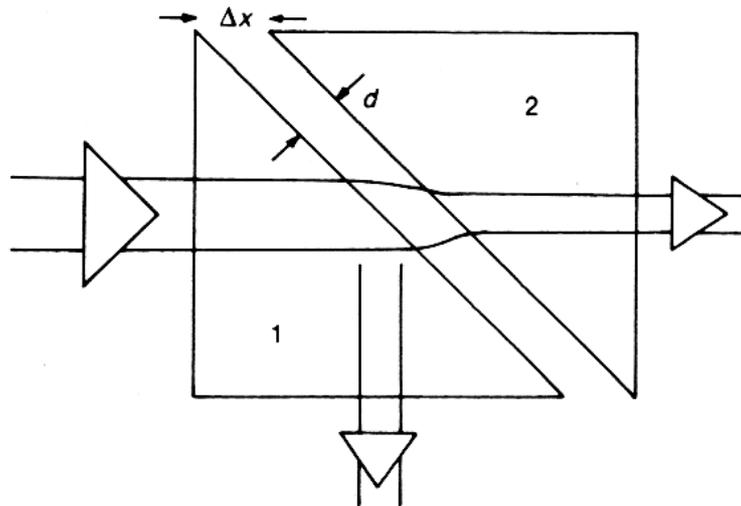


Abb. 14: Strahlenteilerwürfel, der auf behinderter Totalreflexion beruht

2.4.1.8 Bestimmung des minimalen Krümmungsradius

Damit die Erfassungsrate und die Empfindlichkeit der Sensorfaser maximiert werden, muss der Biegeradius der Faser möglichst klein sein. Auf diese Weise wird der im Mantel geführte Lichtanteil η erhöht. Mit Erniedrigung des Biegeradius verringert sich allerdings die übertragene Leistung. Außerdem kann das Kernmaterial nur bis zu einem gewissen Radius bruchfrei gebogen werden. Abb. 15 skizziert die geometrischen Grundlagen zur Bestimmung des minimalen Krümmungsradius, bei dem die Moden höchster Ordnung erzeugt werden.

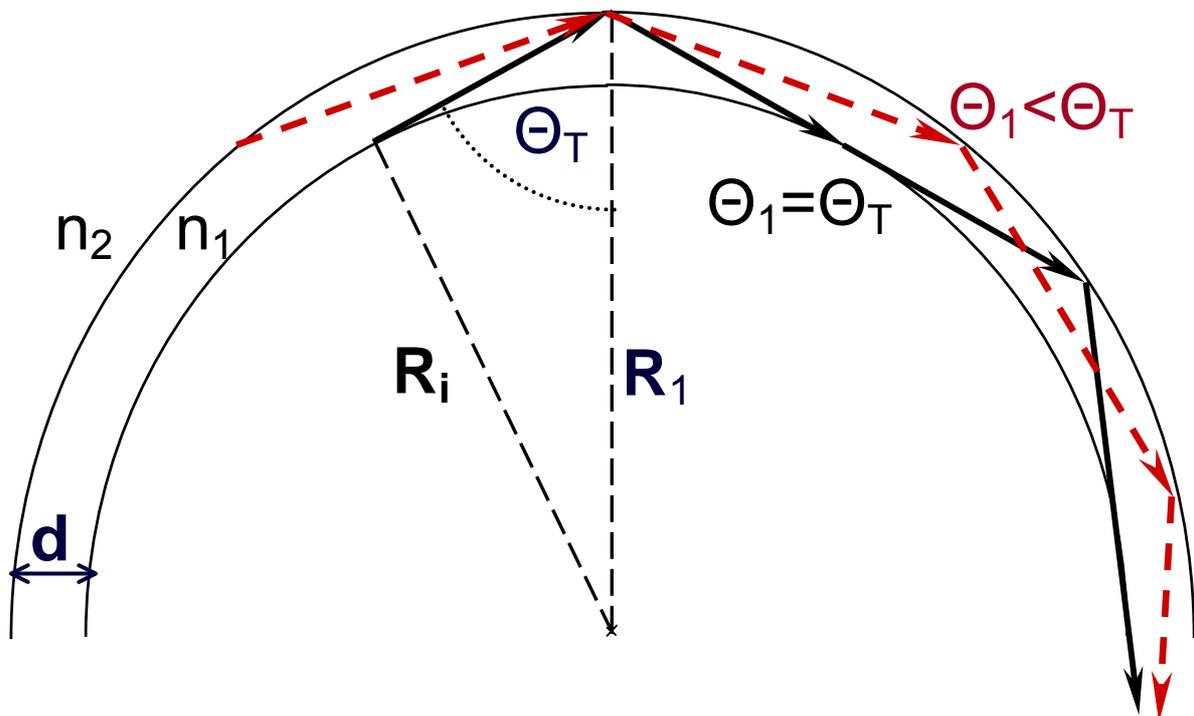


Abb. 15: Strahlenverlauf im gekrümmten LWL

Unter der Annahme, dass der Strahl die Innenwand des LWLs tangiert und mit dem Grenzwinkel Θ_T an der Außenwand gebrochen wird, ergibt sich eine einfache trigonometrische Beziehung:

$$\sin \Theta_T = \frac{R_i}{R_1} \quad (20)$$

Mit

$$d = R_1 - R_i \quad (21)$$

ergibt sich die Beziehung:

$$\sin \Theta_T = \frac{R_1 - d}{R_1} \quad (22)$$

Mit den beiden Brechzahlen des Kerns $n_K = 1,492$ und des Mantels $n_M = 1,419$, folgt für den Grenzwinkel Θ_T nach Gleichung (5) ein Wert von 72° .

Stellt man die Gleichung nach R_1 um und ersetzt $\sin \Theta_T$ durch n_2/n_1 aus Gleichung (5), folgt die folgende Gleichung zur Bestimmung des minimalen Krümmungsradius:

$$R_1 = \frac{d}{1 - \frac{n_2}{n_1}} \quad (23)$$

2.4.1.9 Lichttransport in einer Scheibe

Die dargestellten Grundlagen für den Lichttransport in LWL lassen sich prinzipiell auf Messfenster übertragen.

2.5 Grundlagen zur Abscheidung von Partikeln im Impaktor

Ein Impaktor besteht aus einer Düse, die auf eine Prallplatte gerichtet ist, wie in Abb. 16 skizziert. Normalerweise dient er der Abscheidung von Partikeln wie Schwebstoffen und Ruß aus der Luft oder Abgasströmen. Bei der Sticky-Messung dient allerdings eine Stoffsuspension als Medium. Durch den Stoffstrahl bildet sich eine Staupunktströmung aus, durch die die Suspension umgelenkt wird. In der Krümmung der Stromlinien erfährt die Suspension eine Beschleunigung, die zum Sedimentieren von spezifisch schwereren Partikeln führt. Diese sedimentieren auf die Platte zu und berühren sie im Idealfall dort. Sollen Partikeln abgeschieden werden, so ist es wichtig, dass sie dort dauerhaft haften bleiben. Für die Detektion der Stickys ist das allerdings nicht erforderlich; sie müssen lediglich so lange Kontakt mit der Oberfläche haben, bis sie erfasst sind.

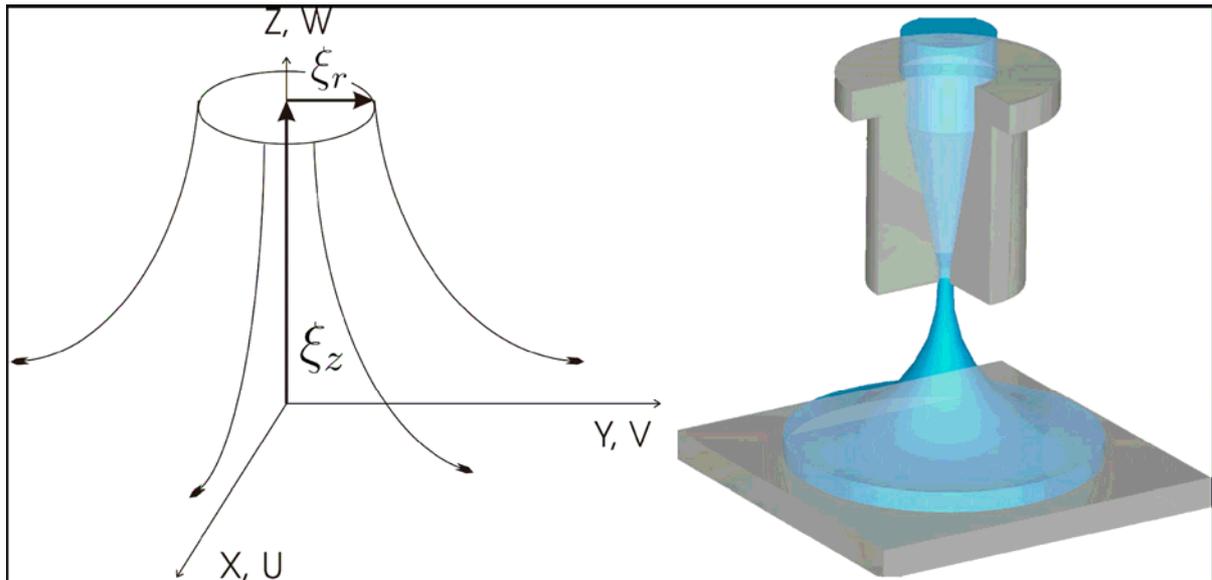


Abb. 16: Beschriftung der Hauptachsen und 3D-Darstellung eines Impaktors

2.5.1 Wirksamkeit des Impaktors

Nach Spurk³² lässt sich die rotationssymmetrische Prallströmung, eine Potentialströmung, wie sie beim Impaktor vorkommt, durch folgenden Polynomansatz beschreiben:

$$\phi = \frac{a}{2} * (x^2 + y^2 - 2z^2) \quad (24)$$

Damit ergibt sich für die einzelnen Geschwindigkeiten:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{u}{v} = \frac{x}{y} \quad (25)$$

$$\frac{dx}{dz} = \frac{u}{w} = \frac{-x}{2z} \quad (26)$$

$$\frac{dy}{dz} = \frac{v}{w} = \frac{-y}{2z} \quad (27)$$

Da es sich um ein rotationssymmetrisches Problem handelt, ist für die weitere Handhabung die Zusammenfassung der Koordinatenachsen x und y als Radius r zweckmäßig.

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r \quad (28)$$

Betrachtet man die Bewegung eines in der Suspension enthaltenen Teilchen in Abhängigkeit der Zeit und dem Ausgangsort zur Zeit $t = 0$, so erhält man die Beschreibung der Bewegung durch die materielle oder Lagrangesche Betrachtungsweise. Dazu gehören Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit:

$$\xi_r * e^{at} = r(t, \xi_r) \quad (29)$$

$$\xi_z * e^{-2at} = z(t, \xi_z) \quad (30)$$

$$a * \xi_r * e^{at} = u_r(t, \xi_r) \quad (31)$$

$$-2 * a * \xi_z * e^{-2at} = u_z(t, \xi_z) \quad (32)$$

$$a^2 * \xi_r * e^{at} = b_r(t, \xi_r) \quad (33)$$

$$4 * a^2 * \xi_z * e^{-2at} = b_z(t, \xi_z) \quad (34)$$

Dabei sind:

- a eine Konstante,
- ξ_r die Hamakerkonstante,
- ξ_z der Abstand von der Rotationsachse in radialer Richtung und
- t die betrachtete Zeit als Laufvariable.

Für die weitere Berechnung sei angenommen, dass sich das suspendierte Partikel nur so wenig von der ursprünglichen Stromlinie entfernt, dass es gerechtfertigt ist, die auf der Bahnlinie auftretenden Kräfte zur Berechnung der Sedimentation heranzuziehen.

Aufgrund des Dichteunterschiedes Partikel - umgebende Flüssigkeit erfährt das Partikel eine Kraft, die es von der Stromlinie abbringt:

$$\Delta\rho * b_r * V = \delta\rho * a^2 * \xi_r * e^{at} * V = F_r \quad (35)$$

$$\Delta\rho * b_z * V = \delta\rho * 4 * a^2 * \xi_z * e^{-2at} * V = F_z \quad (36)$$

Diese Kraft sorgt für eine Stoke'sche Sedimentation³³ mit der Geschwindigkeit v_r bzw. v_z von der Stromlinie weg:

$$\Delta\rho * a^2 * \xi_r * e^{at} * V = 3 * \pi * 2 * r_{Partikel} * v_r \quad (37)$$

$$\Delta\rho * 4 * a^2 * \xi_z * e^{-2at} * V = 3 * \pi * 2 * r_{Partikel} * v_z \quad (38)$$

Diese Strecke erhält man genau wie die ursprüngliche Lage über Integration der Zeit. Interessant ist natürlich nur der Bereich bis zu einer Zeit T_1 , in der das Partikel das Detektionsfenster seitlich verlässt. Für die Übersichtlichkeit der Gleichungen wurde hier die Zeit des nicht abgelenkten Partikels verwendet; die Auslegung wird damit etwas konservativer. Die beiden Strecken werden addiert; befindet sich das Partikel im "negativen" Bereich der z-Achse, wenn es seitlich aus dem Messfenster austritt, dann hat es die Platte berührt ($Z \leq 0$). Die Bahnen von Partikeln, die bei gleichem Radius und gleicher Entfernung zu Scheibe starten, bilden dabei eine Oberfläche:

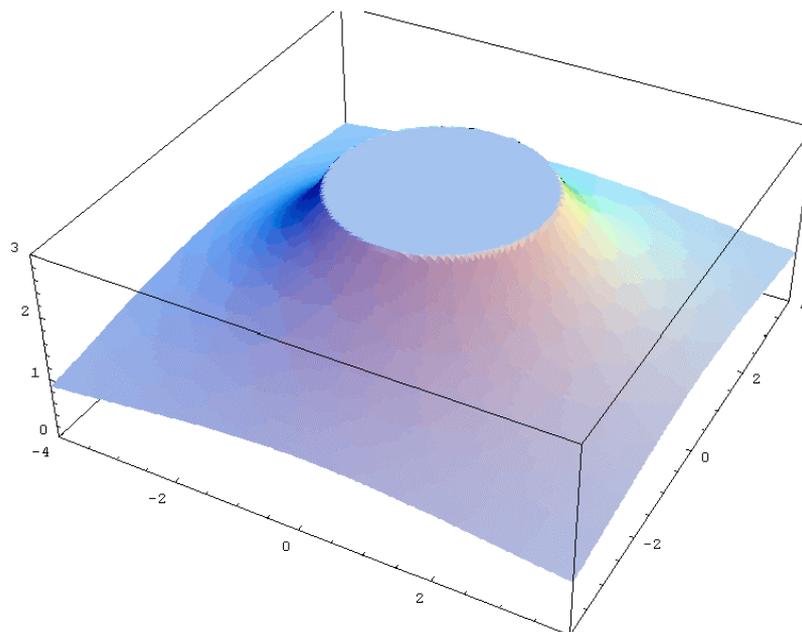


Abb. 17: Dreidimensionale Darstellung der Staupunktströmung als Oberfläche

Setzt man alle Vorgaben in die Gleichungen ein und vereinfacht das System, so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$R_{DF} - \frac{r_{Partikel}^2 * u_z * \Delta\rho * (R_{DF} - \xi_r)}{9 * \eta * \xi_z} = R \quad (39)$$

$$\frac{\xi_r * (2 * r_{Partikel}^2 * u_z * \Delta\rho * (R_{DF} - \xi_r) * (R_{DF} + \xi_r) + 9 * \eta * \xi_r * \xi_z^2)}{9 * R_{DF}^2 * \eta * \xi_z} = Z \quad (40)$$

Dabei sind:

- R_{DF} der Radius des kreisförmigen Messfensters, das das Partikel berühren soll,
- $r_{Partikel}$ der Radius des als kugelförmig angenommenen Partikels,
- u_z die senkrechte Austrittsgeschwindigkeit des Strahls aus der Düse,
- $\Delta\rho$ der Dichteunterschied Partikel und umgebendes Medium,
- ξ_r die Austrittsentfernung des betrachteten Partikels in radialer Richtung vom Düsenmittelpunkt (siehe Bezeichnung in Abb. 16),
- ξ_z der Abstand der Düse von der Prallplatte,
- η die Viskosität des umgebenden Mediums,
- R der Radius des Partikels zur Zeit T_1 und
- Z die Höhe des Partikels über der Platte zur Zeit T_1 .

Damit sollten alle Partikel innerhalb eines Radius R_{Grenz} auf der Platte abgeschieden werden. Bei der angenommenen Gleichverteilung der Geschwindigkeit über den gesamten Düsendurchmesser müssen damit alle Partikel innerhalb von einem Radius $R_{Grenz} = \frac{R_{Düse}}{\sqrt{2}}$ auf die Platte auftreffen. Dazu ist bei gegebenen Stoffdaten sowie Düsenabstand und Düsendurchmesser nur die Geschwindigkeit u_z variabel.

Damit ergibt sich mit den zuvor verwendeten Symbolen für die notwendige Geschwindigkeit u_{z50} :

$$\frac{9 * \eta * R_{Grenz} * \xi_z^2}{2 * r_{Partikel} * \Delta\rho * (R_{DF} - R_{Grenz}) * (R_{DF} + R_{Grenz})} = u_{z50} \quad (41)$$

Oder anders ausgedrückt der Partikelradius, der bei einer bestimmten Geschwindigkeit gerade noch zur Hälfte abgeschieden wird:

$$\frac{3 * \sqrt{\eta * R_{Grenz}} * \xi_z}{\sqrt{2} * \sqrt{u_z * \Delta\rho * R_{Grenz}^2 - R_{DF}^2 * u_z * \Delta\rho}} = R_{50} \quad (42)$$

Allerdings bildet sich im Vergleich zu einem mit Luft betriebenen Impaktor eine deutliche Grenzschicht auf der abzuschneidenden Fläche, so dass ein gewisser Restimpuls nötig ist, um die Platte zu erreichen.

Das untenstehende Bild zeigt eine ungestörte Stromlinie im Vergleich zum spezifisch schwereren Sticky. Je steiler die Bahn die Null-Linie schneidet, desto größer ist der Restimpuls. In der Praxis gleitet das Teilchen die Scheibe nach der Berührung entlang und verlässt das Messfenster seitlich.

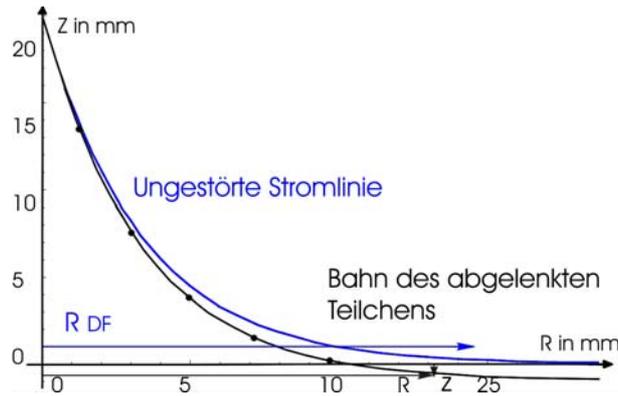


Abb. 18: Stromlinie des Transportmediums und die eines Stickys im Vergleich

2.5.2 Abscheidungsgrad in Abhängigkeit der Partikelgröße

Von jeder in der Suspension vorkommenden Größenklasse wird bei vorgegebenen Stoffdaten, Impaktorgeometrie und Strömungsgeschwindigkeit nur ein bestimmter Prozentsatz abgetrennt. Dies muss bei der Auslegung des Impaktors und beim Vergleich mit konventionellen Methoden berücksichtigt werden. Die folgende Gleichung ermittelt die Trefferquote bzw. die Detektionswahrscheinlichkeit P_D für Partikel im Impaktor:

$$P_D = \frac{(-9 * \eta * \xi_z^2 + \sqrt{16 * r_{DF}^2 * r_{Partikel}^4 * u_z^2 * \Delta\rho^2 + 81 * \eta^2 * \xi_z^4})^2}{16 * r_{Partikel}^4 * u_z^2 * \Delta\rho^2 * \xi_r^2} \quad (43)$$

2.5.3 Restimpuls bei Annäherung an das Messfenster

Das Partikel erreicht auf der abgelenkten Bahn die Platte nach einer Zeit T_2 . Ist T_2 kleiner als T_1 , berührt es die Platte innerhalb des Messfensters:

$$-\frac{\xi_z * \ln\left(1 - \frac{9 * \eta * \xi_z^2}{2 * r_{Partikel}^2 * u_z * \Delta\rho * \xi_r}\right)}{u_z} = T_2 \quad (44)$$

Mit den getroffenen Annahmen erreicht das Partikel die Platte mit einer Geschwindigkeit $u_{z,auftr.}$:

$$\frac{1500 * \left(333\frac{1}{3} * r_{Partikel}^2 * \Delta\rho * \xi_r + \eta * \xi_z\right) \left(1 - \frac{9 * \eta * \xi_z^2}{2 * r_{Partikel}^2 * u_z * \Delta\rho * \xi_r}\right)^{\frac{1500 * \xi_z}{u_z}}}{-\eta} = u_{z,auftr.} \quad (45)$$

Dieser Restimpuls muss ausreichen, um die Grenzschicht zu durchdringen bzw. nahe genug an die Messfenster zukommen, um detektiert zu werden. Eine Verformung des Partikels an der Glasscheibe ist für den Kontrast der Abbildung zudem wünschenswert.

2.6 Zusammenfassender Stand des Wissens

Als Makrosticky werden klebende Bestandteile aus dem Altpapier bezeichnet, die von einer Laborsortierung bei Schlitzweite von 100 μm zurückgehalten werden. Das AiF-Forschungsprojekt 12581 BG zeigte, dass lediglich die ARS-Methode und die INGEDE-Makrostickymethode in der Lage sind, Praxisstoffe sinnvoll zu differenzieren. Als zeitaufwändige Offline-Methoden eignen sie sich nicht zur laufenden Prozessüberwachung.

Der Anteil von Dispersionsklebern, Heißklebern und Haftklebern an den im Papierkreislauf eingesetzten Klebstoffen beträgt über 70 %. Ihre Bestandteile finden sich regelmäßig als klebrige Ablagerungen in der Papiermaschine. Diese Ablagerungen bilden sich aus Primärstickys, potentiell klebenden Partikel, die in Stufen der Altpapieraufbereitung nicht ausgeschleust wurden, und Sekundärstickys, die sich im Prozess bilden.

Einflussgrößen bei der Entstehung von Sekundärstickys liefert die DLVO-Theorie. Sie bilanziert die Kräfte zwischen kolloidal gelösten Substanzen. Von diesen Kräften hängt auch die Ablagerungsneigung von Substanzen auf einer Sensoroberfläche ab.

Die physikalischen Effekte bei Annäherung von Partikeln an lichtleitende Schichten bilden die Grundlage des Messprinzips. Hemmung der Totalreflexion durch Anlagerung oder Auskopplung von Energie (Tunneleffekt) durch Partikel im Nahfeld werden ebenso beschrieben, wie Randbedingungen für die Auslegung eines optischen Sensors.

Die Berechnungsgrundlagen zur Abscheidung von Partikeln in der Prallströmung eines Impaktors werden hergeleitet. Die Formeln für die Detektionswahrscheinlichkeit und für den Restimpuls bei Annäherung an das Messfenster sind im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden.

Die dargestellten Grundlagen und die daraus abgeleiteten Formeln bilden die theoretische Basis für die Ausgestaltung der Messmethode und die Auslegung des Sensors.

3 Entwicklung der Sticky-Bestimmungsmethode

Im Rahmen des Forschungsprojekts waren zwei Lösungsansätze zu untersuchen, um einen davon zur Messmethode weiter zu entwickeln. Der erste Ansatz beruht auf einem faseroptischen Lichtwellenleiter, welcher in die zu untersuchende Faserstoffsuspension taucht. Der zweite Ansatz nutzt die Prallströmung eines Impaktors, um Stickys zu separieren und mittels eines lichtdurchfluteten Messfensters zu detektieren.

Ziel der Versuchsaufbauten war es, die theoretischen Grundlagen zu überprüfen, Randbedingungen zu untersuchen und die Möglichkeiten der Systeme zu bewerten.

3.1 Konzeption des Versuchsaufbaus mit Lichtwellenleiter

Die Grundidee für den Einsatz einer Faseroptik zur Detektion klebender Verunreinigungen ist die hohe Sensitivität. Wegen der Reihenschaltung der Grenzflächen steigt die Empfindlichkeit proportional zur Länge des Lichtleiters. Abb. 19 skizziert eine Lichtleiter-Spule, die von Suspension umströmt wird. Die Erfassungsrate kann über den Biegeradius der Faser d. h. über den Spulendurchmesser D verändert werden.

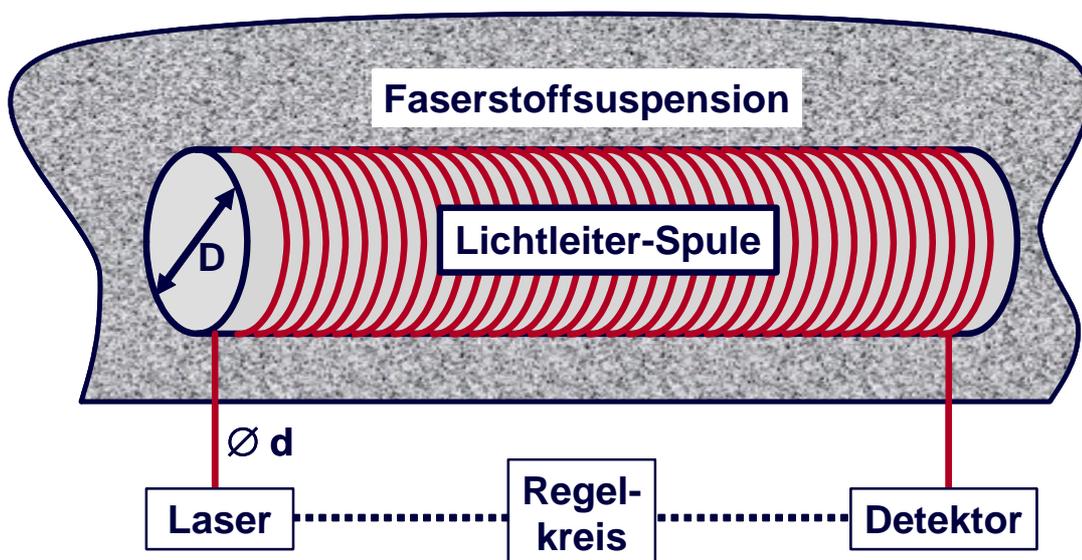


Abb. 19: Grundkonzept eines Sensors mit Lichtwellenleiter

Ein Halbleiterlaser speist den Lichtleiter. Eine Fotodiode als Detektor erfasst die Dämpfung des Lichtsignals, welche durch Partikel im Nahbereich der Grenzfläche oder durch Anhaftungen am Lichtleiter verursacht werden. Ein Regelkreis führt ggf. die Leistung des Lasers nach.

Das Konzept sieht die Möglichkeit einer rotierenden Spule vor, um Zonen unterschiedlicher Anströmung zu realisieren. Abb. 20 illustriert die gleichsinnige Anströmung mit geringen Scherkräften als Kontaktzone und die gegensinnige Anströmung mit hohen Scherkräften als Reinigungszone.

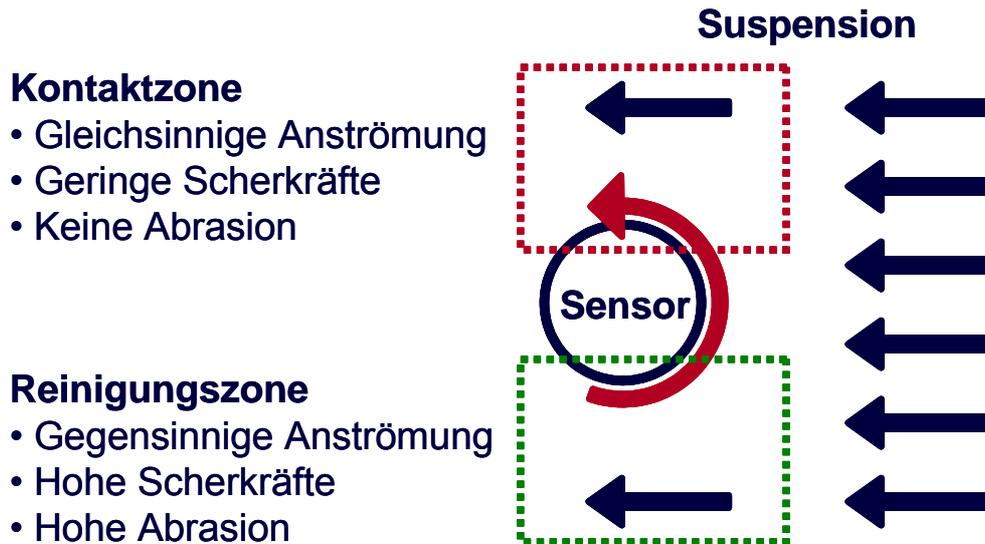


Abb. 20: Strömung am rotierenden Sensor

3.2 Realisierung des Versuchsaufbau mit Lichtwellenleiter

Im Folgenden werden die Messtechnik, die Bedienungssoftware und die Messapparatur für die Versuche am Lichtwellenleiter beschrieben.

3.2.1 Aufbau der Messtechnik

Die Messstrecke besteht aus einer Laserdiode als Sender, dem Lichtleiter als Sensor und einer Fotodiode mit speziellem Vorverstärker als Empfänger. Abb. 21 skizziert den messtechnischen Aufbau mit der Zerlegung des Empfangsignals in ein niederfrequentes DC-Signal und ein hochfrequentes AC-Signal.

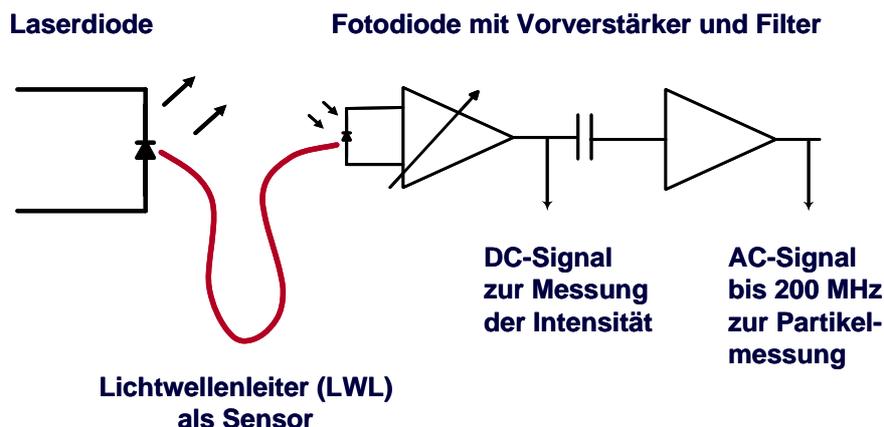


Abb. 21: Messtechnischer Aufbau mit Lichtwellenleiter

Als Lichtquelle wird eine Laserdiode verwendet, die Licht einer Wellenlänge von 650 nm emittiert. Diese Laserdiode der Firma Flexpoint ist mit einem SMA Anschluss versehen und weist dadurch eine hohe Koppelleffizienz zu der eingesetzten Multimode-Kunststofffaser der

Firma *Toray* auf. Die Ausgangsleistung der Diode beträgt konstante 3 mW bei einer Versorgungsspannung von 5 V. Sie fällt mit ihrer Leistung unter die Laserklasse 3R. Da diese Laserklasse unter Beachtung der Sicherheitsvorschriften BGV B2 als gefährlich für Augen und Haut angesehen wird, muss während des Aufbaus des Messkreises darauf geachtet werden, dass der Laser nicht eingeschaltet ist. Nachdem der Laser über den Lichtwellenleiter (LWL) mit der Fotodiode verbunden ist, fällt das nun geschlossene System in die Laserklasse 1. Die elektronische Verriegelung des Messkreises wurde von einem Laserschutzbeauftragten geprüft und die Unbedenklichkeit des Aufbaus bestätigt.

Das von einer Laserdiode ausgehende Licht wird in einen als Sensor präparierten Lichtwellenleiter eingespeist und bis zur Fotodiode weitergeleitet. Die Lichtleistung aus der Sensorfaser trifft auf die aktive Fläche der Fotodiode und wird in Strom umgewandelt. Die Stärke des Stroms ist proportional zur übertragenen Lichtintensität. Die Silikon Fotodiode Typ PDB-C503-ST der Firma *Fotonic Detectors INC* ist verstärkt für den Einsatz im blauen Wellenlängenbereich vorgesehen, kann aber in einem Wellenlängenbereich zwischen 350 und 1100 nm eingesetzt werden. Die Reaktionszeit beträgt 5 ns, was einer Bandbreite von 200 MHz entspricht. Die Empfindlichkeit beträgt bei einer Wellenlänge von 650 nm etwa 0,5 A/W.

Der Vorverstärker DHPA-100 der Firma *FEMTO* wandelt den Fotostrom mit einstellbarer Transimpedanz von 10^2 bis 10^8 V/A in Spannung um. Ein im Vorverstärker integrierter Tiefpass mit einer wählbaren Grenzfrequenz von 1 MHz oder 10 MHz dämpft das DC-gekoppelte Signal. Es wird zur Messung der Lichtleistung in einer A/D-Wandlerskarte digitalisiert und mittels des Programms *Testpoint* aufgezeichnet. Das ungedämpfte, AC-gekoppelte Signal wird in einer zweiten Stufe nochmals verstärkt und mit Hilfe der Oszilloskop-Karte *CompuScope 82G-8M* und dem Programm *GageScope* mit einer Auflösung von bis zu 200 MHz dargestellt.

3.2.2 Bedienungssoftware

Für die Messungen wurden die Programme *Testpoint* und *GageScope* verwendet und sollen an dieser Stelle nochmals kurz erklärt werden. Während, wie bereits vorher erläutert, *Testpoint* für die Messung und Aufzeichnung des DC-Signals zuständig ist, dient *GageScope* der Aufschlüsselung der sehr schnellen AC-Signale.

3.2.2.1 Testpoint

Testpoint der Firma *CEC Capital Equipment* ist eine graphische Programmierumgebung zur Erstellung von Programmen zur Prozesssteuerung, Prozessdatenverarbeitung und deren Visualisierung. Mit *Testpoint* erfolgt die Überwachung des Messkreises insbesondere die Steuerung des Lasers und seine Verriegelung.

Für Langzeitversuche wird das Signal kontinuierlich aufgezeichnet, bis es mit dem „Stop“ Button beendet wird. Die Abtastrate ist im Fenster „Timer in s“ bis 0,1 s einstellbar. Gleichzeitig wird das aktuelle DC-Signal des Vorverstärkers als digitaler Wert und als Trend angezeigt. Die Skalierung der Trenddarstellung kann mit Hilfe der beiden Schieber optimal eingestellt werden.

Daneben bietet das Programm die Möglichkeit, schnelle Messreihen von jeweils maximal 2048 Punkte mit bis zu 100.000 Werten/s aufzunehmen. Dabei werden die gewünschte Anzahl der Messpunkte und die Abtastrate in die entsprechenden Felder eingegeben und die Messreihe mit „Start“ begonnen. Nachdem alle Messpunkte aufgezeichnet worden sind, hört

das Programm eigenständig auf und zeigt den Intensitätsverlauf als Trend. In beiden Betriebsarten kann das Ergebnis mit dem „Data“ Button gespeichert werden. Abb. 22 zeigt die Benutzeroberfläche zur Steuerung von Laser und Datenerfassung.

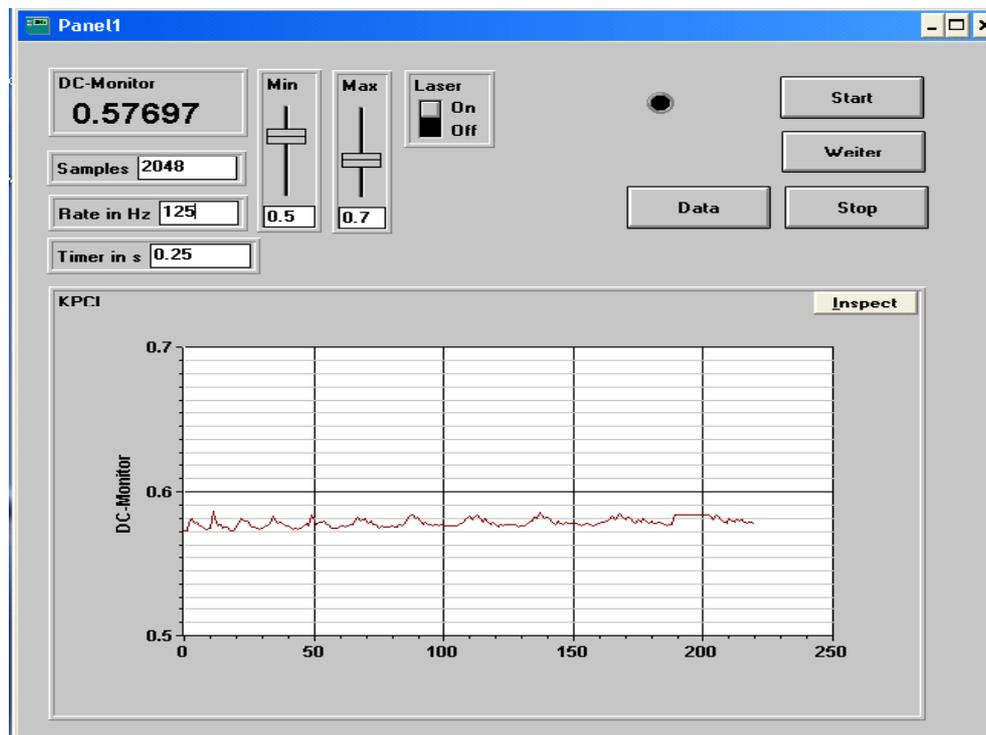


Abb. 22: Bedienungsoberfläche des Testpoint-Programms

3.2.2.2 GageScope

GageScope ist die Steuer- und Datenvisualisierungssoftware des CompuScope 82G-8M. Das Programm ist in der Lage, Signale bis zu 200 MHz kontinuierlich zu erfassen. Neben vielen Einstellungen, bei denen die Anzahl der Messpunkte oder die Auflösung der Signalbreite und der Amplitude variiert werden können, ist die variable Einstellung des Triggers wichtig für die Messungen. Der Trigger kann auf einen bestimmten positiven, oder negativen Wert eingestellt werden und zeichnet somit nur Signale an, die diesen Wert über- oder unterschreiten. Auf diese Weise können für Probenreihen, typische Kurvenverläufe herausgearbeitet werden. Bei der „Single shot“ Einstellung wird eine einzelne Sequenz aufgezeichnet, sobald der Trigger auslöst. Im kontinuierlichen Modus wird mit jedem Trigger eine Datensequenz aufgezeichnet. Hierbei können mit Hilfe der Mittelwerteinstellung bis zu 1000 Signalformen gemittelt und angezeigt werden. Abb. 23 zeigt die Benutzeroberfläche als Screenshot.

Die Skalierung der Achsen kann jederzeit variiert werden. Die Auflösung der Zeitachse ist auf jeder Kurve vermerkt. Die Auflösung der Ordinate ergibt sich aus der Einstellung des Verstärkungsfaktors. Rasterpunkte in der Benutzeroberfläche helfen den Signalverlauf zu vermessen.

Löst ein Partikel durch Störung der Lichtleitung eine Messsequenz aus, so ergibt sich die Dauer des Signals aus der Lage des ersten Spannungseinbruchs und dem Punkt, an dem die Kurve wieder die Ausgangslage erreicht. Im Falle des Überschwingens wird die Zeit zwi-

schen dem ersten Spannungseinbruch und dem ersten Maximum. Die Signalhöhe ergibt sich aus der Differenz des Minimums und des Maximums.

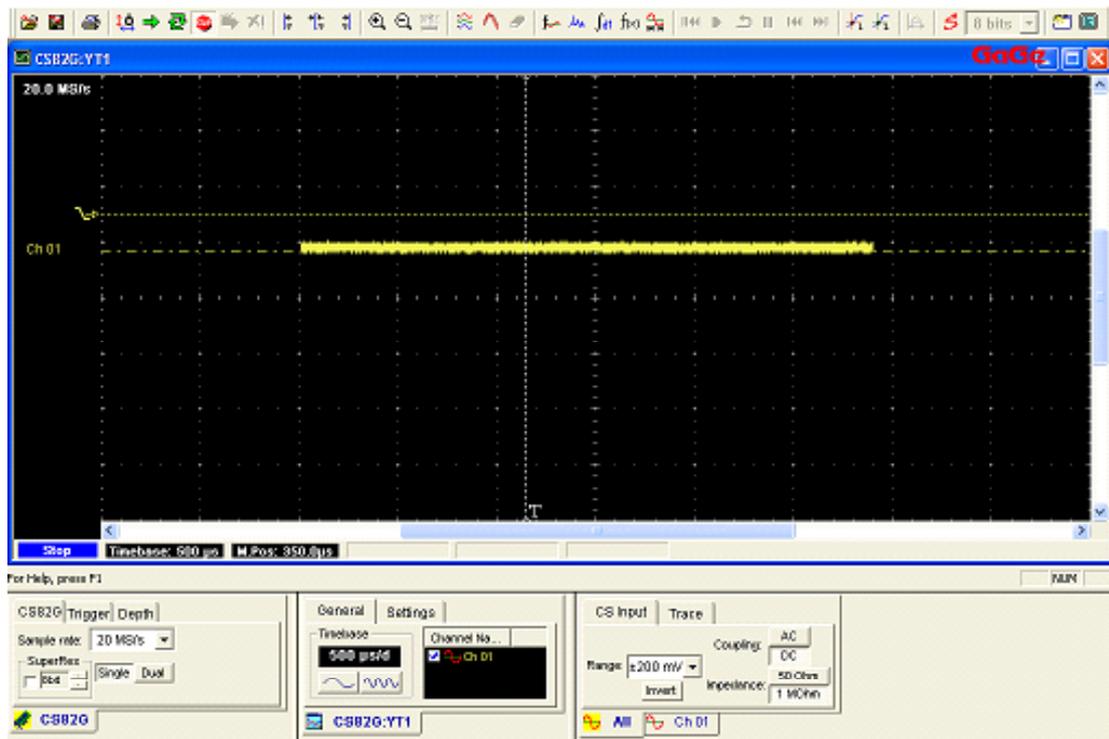


Abb. 23: Bedienungsoberfläche von GageScope

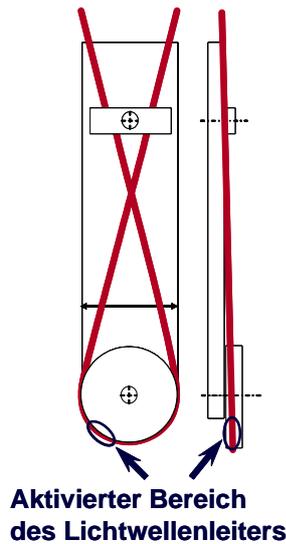
3.2.3 Aufbau des Versuchsstands

Das Grundkonzept für einen Sensor mit Faseroptik sieht einen Spulenkörper vor, der mit einer Kunststofffaser umwickelt ist. Der Mantel der Faser könnte zur Aktivierung über dem kompletten Spulenumfang abgeschliffen und poliert werden. Wegen der auf 3 mW beschränkten Leistung des Lasers, der Komplexität der Vorgänge an der Phasengrenze und wegen besserer Zuordnung der Messsignale wurde die Spule auf eine einzige Windung reduziert und nur einer Stelle aktiviert.

3.2.3.1 Aufbau der Lichtleiter-Spule

Die Versuche zur Untersuchung der physikalischen Effekte am gekrümmten Lichtleiter und zur Simulation unterschiedlicher Anströmungen erfolgten zweckmäßigerweise an einer Lichtleiter-Spule mit nur einer halben Windung. Wie in Abb. 24 skizziert, wurde eine lokal begrenzte Stelle des Lichtwellenleiters aktiviert.

Der Krümmungsradius, der die Sensitivität und den Erfassungsbereich bestimmt, wird durch Scheiben mit unterschiedlichem Durchmesser eingestellt. Der Anströmwinkel verschiebt sich mit der Position der aktivierten Stelle am Umfang der drehbar gelagerten Scheibe. Ein Bügel fixiert die Messschleife im oberen Teil der Halterung.



Krümmung der Faser bietet Vorteile:

- 1. Sensitivität steigt durch Erhöhung der Modenanzahl**
- 2. Erfassungsbereich steigt durch erhöhte Eindringtiefe des evaneszenten Feldes**
- 3. Erfassung niedrigerer Brechzahlen möglich**

Abb. 24: Messschleife

3.2.3.2 Messapparatur für unterschiedliche Relativgeschwindigkeit

Die Untersuchung der Ablagerungsneigung von Stickies bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt mit Hilfe eines Ankerrührers, wie in Abb. 25 skizziert.

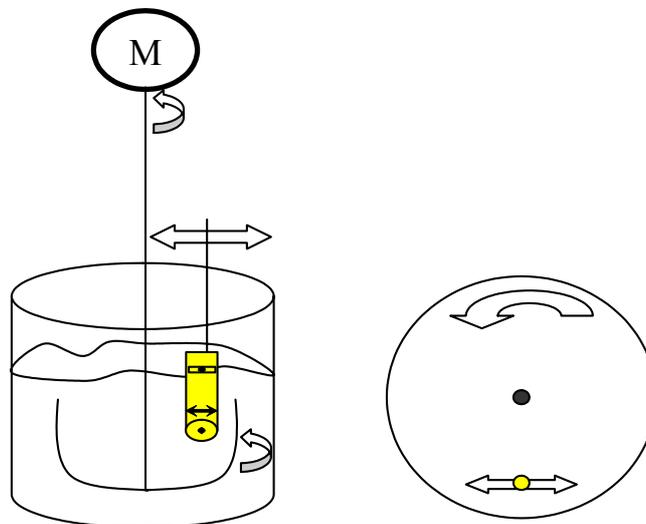


Abb. 25: Anströmung der Messschleife mit unterschiedlicher Relativgeschwindigkeiten

Neben der tangentialen Anströmung durch den Ankerrührer kann die Messschleife zusätzlich über einen externen Antrieb transversal bewegt werden. Die Überlagerung der Strömungsfelder simuliert die in Abb. 20 dargestellten Zonen mit geringer und hoher Scherrate.

Mit dieser Konstruktion können unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten an der aktivierten Sensorfaser erzeugt werden. Als Gefäß wird ein zylindrischer 7,5 l Behälter benutzt, dessen Öffnung groß genug ist, um die Halterung der Sensorfaser kollisionsfrei traversieren zu lassen. Die Strecke, die die Messstelle durchläuft beträgt etwa 8 cm. Die Temperatur kann mittels eines Tauchsieders variiert werden. Die benutzten Antriebe sind von der Firma *Heidolph*.

Die Umdrehungsgeschwindigkeiten von 45-300 U/min und 300-2000 U/min können stufenlos eingestellt werden.

3.2.3.3 Messapparatur mit stationärer Messspule

Um geringere Probenmengen untersuchen zu können und die Temperatur besser zu kontrollieren, taucht die Messschleife mit der aktivierten Sensorstelle in ein, zu etwa 600 ml gefülltes 1000 ml Becherglas, das auf einem magnetischen Heizrührer steht. Gerührt wird mit einem 5 cm langen Rührfisch. Nach dem Einschalten der Heizfläche wird die Temperatur der Probe mit Hilfe eines elektronischen Thermometers kontinuierlich überwacht.

3.3 Versuchsaufbau mit Impaktor

Die Entwicklung des Impaktors erfolgte in zwei Stufen. In der ersten Stufe erfolgte die strömungstechnische Auslegung der Düse. An diesem ersten Impaktor wurden unterschiedliche Messfenster und Beleuchtungsvarianten in Verbindung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erprobt. In einer zweiten Entwicklungsstufe flossen die Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem ersten Impaktor ein und mündeten in einer komplett überarbeiteten Version II. Für die Versuche standen eine drehzahlgeregelte Impeller-Pumpe mit Durchflussmesser und eine Monopumpe mit Regelgetriebe zur Verfügung.

3.3.1 Impaktor Version I

Der Impaktor besteht aus einem geschlossenen Impaktorgehäuse. Darin befinden sich eine Düse, eine Glasscheibe als Messfenster sowie die Beleuchtung. Die Kamera zur Aufnahme der optischen Effekte ist mittels eines Stativs am Versuchsaufbau befestigt. Die Baupläne zu dem in Abb. 26 skizzierten Aufbau finden sich im Anhang A.

Eine Grundplatte aus Aluminium trägt das runde Gehäuse aus Plexiglas sowie die Beleuchtung. Darauf ist das gläserne Messfenster mit einem runden Niederhalter aufgebracht. Das runde, dichtende Gehäuse verbindet Deck- und Bodenplatte und wird mit Zugschrauben verbunden. Die Deckplatte trägt den Düsenhalter mit der darin höhenverstellbaren Düse.

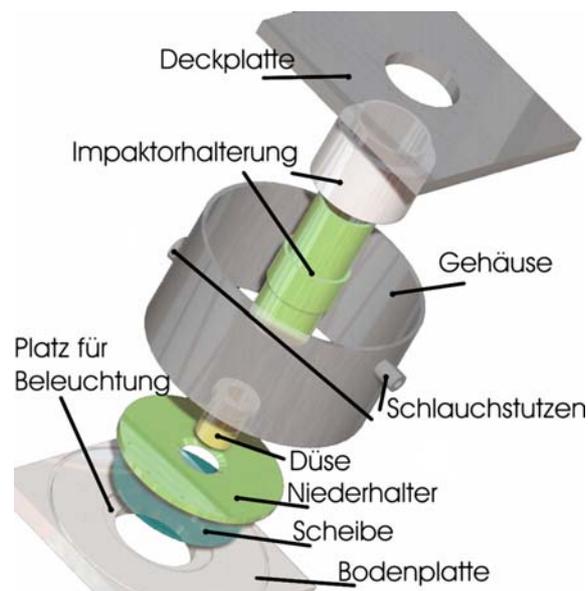


Abb. 26: Aufbau des Impaktors

Der Impaktor kann direkt mit Faserstoffsuspension beaufschlagt werden. Alternativ dazu ist es möglich, ihn mit Wasser zu betreiben und die zu testende Stoffsuspension zuzugeben.

Über die in Abb. 27 gezeigte Dosierstelle kann direkt vor der Düse eine Probe im Strömungszentrum eingespritzt werden. So dient der Wasserstrom außen nur als Hüllstrom und es kann mit weniger Probenmaterial gearbeitet werden. Zudem besteht die Möglichkeit, z. B. zur Kalibrierung, eine bestimmte Menge stoßweiße zuzugeben.



Abb. 27: Lanze für die Dosierung von Probenmaterial im Strömungszentrum

Die Beleuchtung sitzt so unter der Glasscheibe, dass das direkte Licht und Streulicht von der innen weiß beklebten Niederhalterscheibe möglichst vollständig in die Scheibe einkoppeln.

Verwendet werden jeweils 10 LUMILED LEDs der Farben weiß, rot und blau auf einer Trägerplatte. Als Stromquelle dient ein Schaltnetzteil. Für die Halogenbeleuchtung kommen 18 Halogenbirnen a 20 Watt zum Einsatz.

Als Glasscheibe wird Fensterglas verwendet. Acrylglas zeigt sehr schnell Verschleißerscheinungen und ist damit ungeeignet. Um die Lichtverluste durch Abstrahlung auf den Niederhalter gegenüber der Lichtquelle gering zu halten, ist die Glasscheibe teilweise mit weißer, opaker Folie beklebt. Um die Einstrahlung von Streulicht in die Suspension zu vermeiden, empfiehlt es sich, das Messfenster um den von der Kamera erfassten Bereich nicht mit Folie zu bekleben. Absorption von Licht lässt sich zudem vermeiden, wenn die LED-Träger und die gesamte Trägerplatte sowie die Ränder der Bodenplatte einschließlich der Kabel mattweiß eingefärbt werden.

Der Niederhalter ist im Außenbereich bis zum Innenradius der Lichtquelle ebenfalls weiß, der Bereich um das Messfenster ist schwarz lackiert, damit kein gestreutes Licht aus dem mit Wasser gefüllten Spalt zwischen Niederhalter und Folienschicht in die Suspension eingestrahlt wird. Die Oberfläche der Düse ist geschwärzt, um den Kontrast für die Stickys zu erhöhen. Der Strahlengang zur Kamera wird mit einem Zylinder aus schwarzem Karton lichtdicht abgedeckt. So wird zudem Lichteinfall aus der Umgebung in die Suspension vermieden.

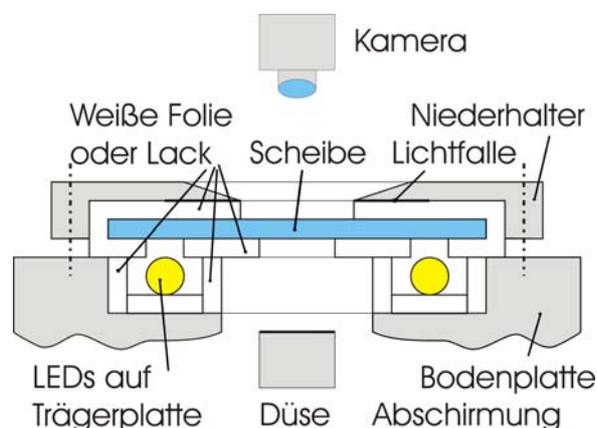


Abb. 28: Einkopplung von Licht in das gläserne Messfenster

Im Freiraum unter dem Messfenster können problemlos Halogenlampen statt LEDs untergebracht werden. Die Glühlampen werden auf einem Silikonstreifen aufgereiht und in die Nut eingelegt. Eine Fixierung ist aufgrund der Vorspannung im Silikonstreifen nicht nötig. Da die Birnen im Unterschied zu den LEDs beim Betrieb sehr heiß werden, ist nur ein sehr kurzer Betrieb möglich. Der Folienring auf der Scheibe kann unverändert übernommen werden. Die maximale installierbare elektrische Leistung beträgt 340 Watt.

3.3.2 Impaktor Version II

Die Version II zeichnet sich durch einen unkomplizierten Aufbau aus. Der Düsenabstand lässt sich leicht einstellen. Die Beleuchtungseinheit kann mit einem Handgriff entfernt werden und gibt eine darunterliegende Halterung des Messfensters frei. Das Messfenster lässt sich mit wenigen Handgriffen austauschen.

3.3.2.1 Mechanischer Aufbau

Die überarbeitete Grundeinheit verbindet Düsenhalter und Messfenster. Der verstellbare Düsenhalter und die Düse mit ihrer parabelförmigen Öffnung sowie das Messfenster sind kompatibel zu Impaktor I. Die Suspension wird nun in einer umlaufenden Kammer gesammelt und abgeführt, wie in Abb. 29 skizziert. Die Füllmenge des Impaktors ist deutlich niedriger. Alle Teile sind einfach zu öffnen und leicht zu reinigen. Die Kammer für die Beleuchtung ist für die 250 W Stiftsockellampen ausgelegt. Die Wärmeabfuhr erfolgt über das Gehäuse und die Suspension.

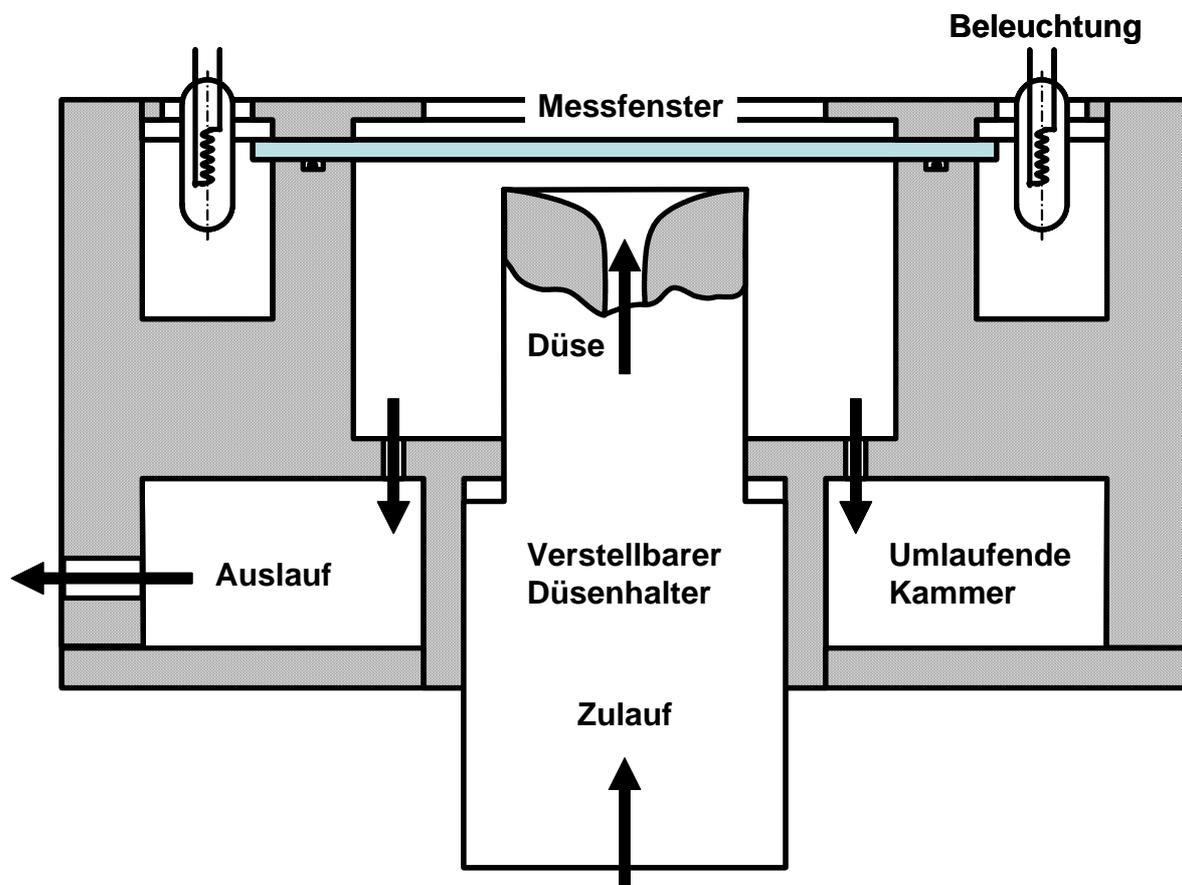


Abb. 29: Impaktor II: Prinzipieller Aufbau

Ein O-Ring dichtet das Messfenster ab. Eine Hochgeschwindigkeitskamera befindet sich in einem Abstand von ca. 70 cm über dem Impaktor. Eine schwarze Papphülse zwischen Messfenster und Objektiv schirmt Umgebungslicht ab.

3.3.2.2 Beleuchtung

Bis zu 10 Halogenlampen zu jeweils 250 W bei 24 V lassen sich am äußeren Rand des Messfensters platzieren. Mit der im Vergleich zu Impaktor I vielfach höheren Lichtleistung erscheinen Stickys deutlich heller. Das Netzteil wird von einem PC gesteuert. Eine Vorwärmzeit von 5 s reicht für stabile Beleuchtungsverhältnisse während der Aufnahmen.

Die in Abb. 30 abgelichtete Halterung für das Messfenster verfügt über schräg angeordnete Langlöcher für die optional horizontale Anordnung der Stiftsockellampen über dem Messfenster. In dieser Anordnung genügt eine elektrische Leistung von 1,75 kW d. h. eine Bestückung mit 7 Halogenlampen für Messungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera.

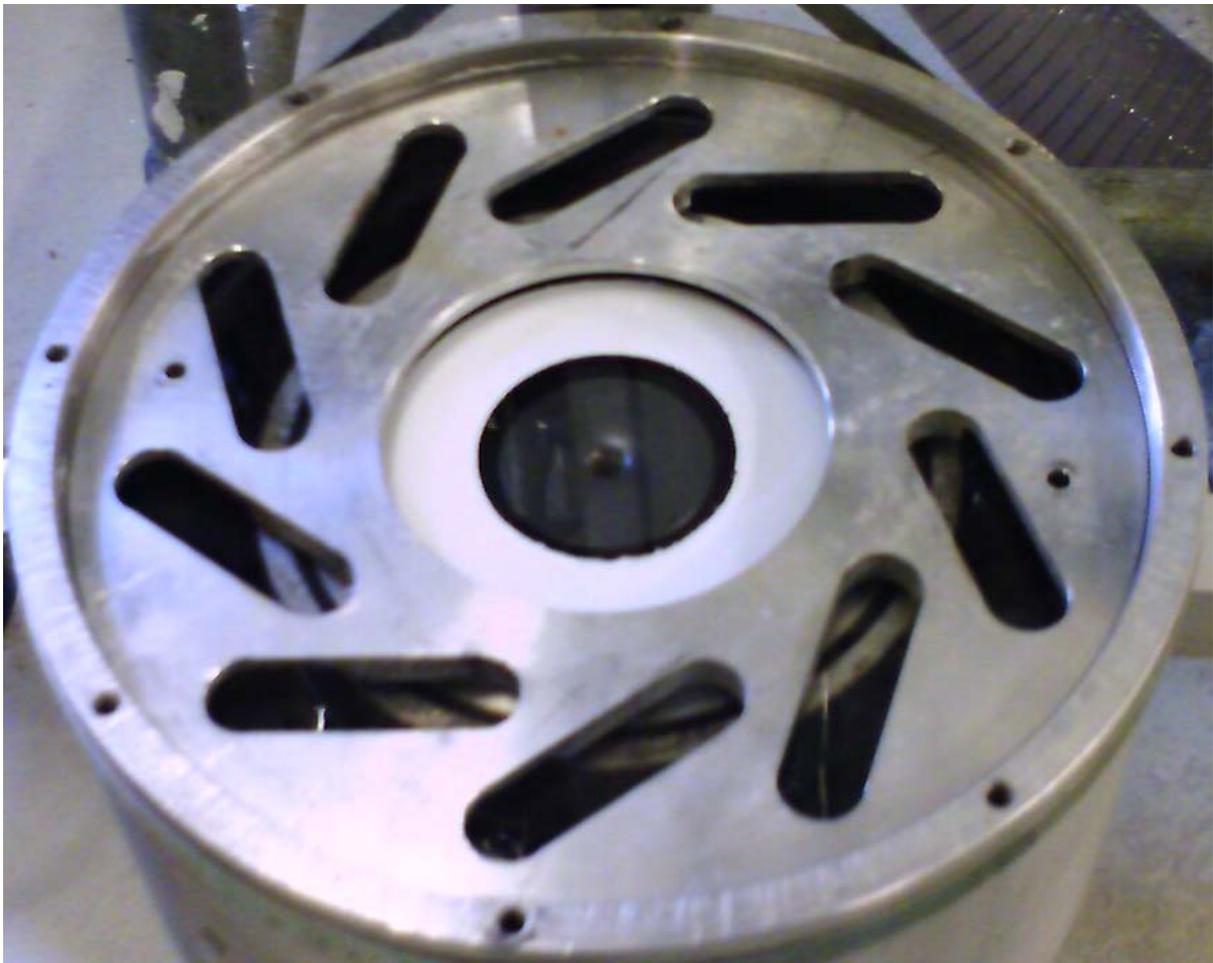


Abb. 30: Einspannung des Messfenster mit Aussparungen für Halogenlampen

3.3.3 Bildanalytischer Teil

Die Hochgeschwindigkeitskamera Vosskühler HCC-1000 erfasst die Prallströmung mit 1024 x 1024 Bildpunkten (Pixel) bei einer Auflösung von ca. 48 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$. Mit dieser Ortsauflösung lassen sich Stickys mit einer Länge von 100 μm sicher detektieren. Die maximale zeitliche Auflösung des Kamerasystems beträgt 462 Bilder/s (fps) bei 2,2 ms Belichtungszeit im Normalbetrieb. Die Verschlusszeit lässt sich im Shutter-Modus elektronisch verkürzen, um

Objekte im Strömungsfeld noch schärfer abzubilden. Dies geht jedoch auf Kosten der Bildwiederholrate. Sie beträgt bei 1,07 ms Verschlusszeit 231 fps.

Die Kamera hat einen Bildspeicher von 512 MBytes, so dass maximal 512 Bilder in voller Auflösung gepuffert werden. Die Kamerasoftware überträgt die Bilder über eine serielle IEEE-1394-Schnittstelle (Firewire) auf die Festplatte des angeschlossenen PCs. Die Transferrate beträgt derzeit etwa 3 bis 4 Bilder/s. Der Kamerahersteller hat ein Software-Update angekündigt, mit dem künftig deutlich höhere Übertragungsraten möglich sein sollen. In der aktuellen Konfiguration werden Bildsequenzen von 1,1 s Länge im Normalmodus oder 2,2 s Länge im Shutter-Modus zyklisch alle 3 min wiederholt. Dies entspricht 20 Messzyklen/h, unabhängig von der Betriebsart der Kamera.

Die zyklisch abgelegten Bildsequenzen werden mit MATLAB[®] bildanalytisch ausgewertet. MATLAB ist eine leistungsfähige Programmiersprache für technische Anwendungen. Das Auswerteprogramm filtert störende Einflüsse und Randeffekte, bereitet die Bildinformation auf, detektiert Objekte in der Prallströmung, vermisst deren Größe und Geschwindigkeit, um Anzahl und Größenverteilungen potentiell klebender Verunreinigungen zu ermitteln. Die bildanalytische Erfassung von Stickys ist ein wesentlicher Bestandteil des Sensors. Sie bestimmt maßgeblich die Erfassungsrate und die Genauigkeit der entwickelten Messmethode.

3.3.3.1 Vorverarbeitung der Bilder

Eine Programmschleife liest die einzelnen Bilder einer Messsequenz. Im ersten Schritt wird ein kreisrunder Bildausschnitt um das Zentrum der Prallströmung isoliert. Die dazu notwendige Maske berechnet sich aus den Bildkoordinaten der Düse und ihrem Radius in Bildpunkten. Sind die Daten für die Messanordnung nicht hinterlegt, so erscheint ein interaktives Bildfenster. Per Mausklick werden die in Abb. 31 dargestellten diagonalen Linien so positioniert, dass sie mit dem Rand der geschwärzten Düse abschließen. Lage und Größe der Düse werden abgespeichert. Das Programm ermittelt daraus die Position der Kamera und deren tatsächliche Auflösung in $\mu\text{m}/\text{Pixel}$.

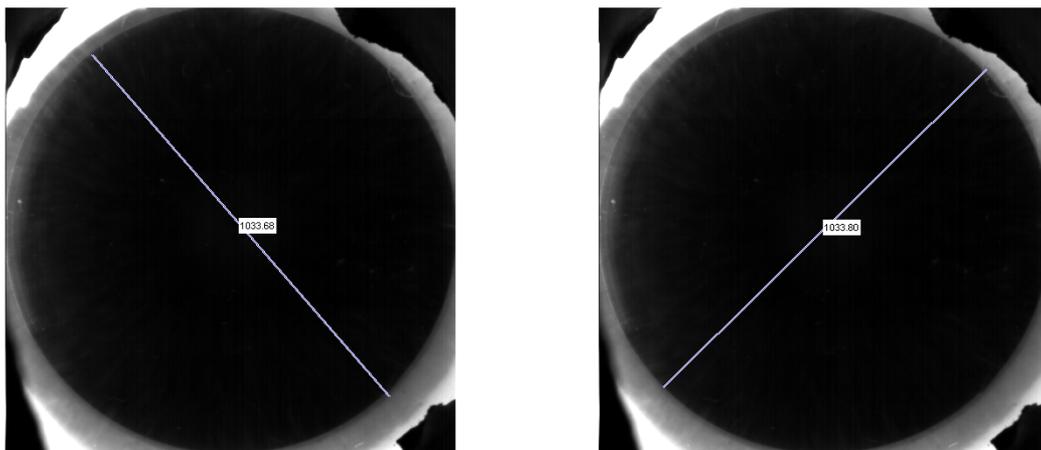


Abb. 31: Interaktive Positionsbestimmung der Düse im Messfenster

Die strömende Fasersuspension vor geschwärzte Düse erscheint dunkel. Lediglich am äußeren Rand der Düse erhellt Streulicht die Fasern, so dass diese wie eine graue Corona um die Düse

sichtbar werden. Die unregelmäßigen Konturen am Bildrand stammen von der schwarzen Papphülse zur Abschirmung des Messfensters gegen Fremdlicht.

Abb. 32 zeigt links die generierte Maske, welche den Randbereich ausgeblendet und rechts daneben das zur besseren Darstellung invertierte Bild der Prallströmung. Partikel, die Licht aus der Scheibe auskoppeln erscheinen im invertierten Bild dunkel. Im gezeigten Bild heben sich zwei Partikel bereits deutlich von der Strömung ab.

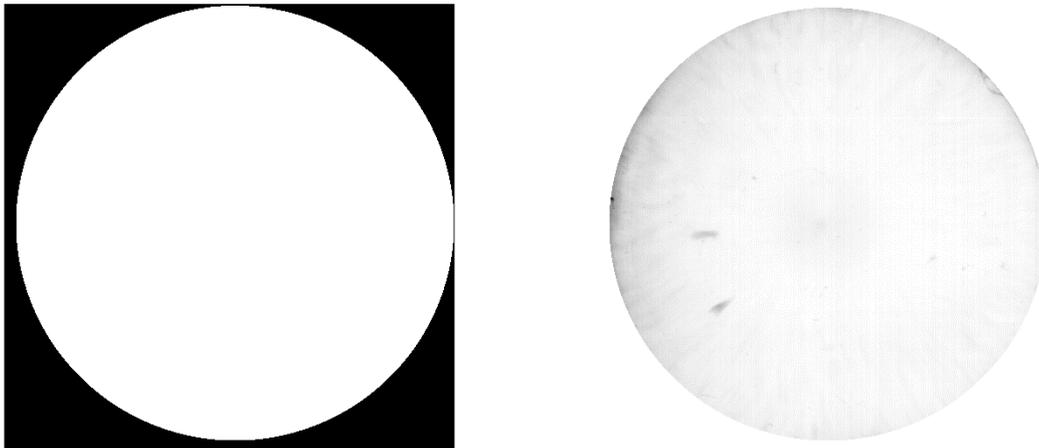


Abb. 32: Generierte Maske blendet die Randzonen im invertierten Bild aus

Weitere Schritte sind notwendig, um bewegte Objekte aus dem Bild zu extrahieren. Ein Lösungsansatz zur Zerlegung des Bilds in statische und dynamische Anteile liefert die sogenannte Shading-Korrektur. Dieses klassische Verfahren korrigiert eine einseitige Ausleuchtung von Bildern dadurch, dass mittels eines passenden Filters die Störung isoliert und anschließend vom Original abgezogen wird. Üblicherweise werden Tiefpass-Filter eingesetzt, um eine einseitige Ausleuchtung zu isolieren.

Stickys unterscheiden sich vom restlichen Bildinhalt dadurch, dass sie kurzzeitig als helle Punkte im Bild erscheinen. Es bietet sich daher an, störende Bildinformation über eine zeitliche Mittelung zu isolieren. Diese zeitliche Mittelung lässt sich als Filter mit begrenztem Impulsansprechverhalten (**Finite Impulse Response, FIR**) oder unbegrenztem Impulsansprechverhalten (**Infinite Impulse Response, IIR**) realisieren.

Das gleitende Mittel $y(t_\mu)$ errechnet sich aus m Originalbildern $x(t_\mu..t_{\mu-m})$ gemäß

$$y(t_\mu) = \sum_{j=0}^m b_j x(t_{\mu-j}) \quad (46)$$

und wird auch als Moving-Average-Modell (MA-Modell) bezeichnet. Es handelt sich dabei um einen FIR-Filter.

Der entsprechende IIR-Filter wird auch als Auto-Regressions-Modell (AR-Modell) bezeichnet. Das gefilterte Signal $y(t_\mu)$ ergibt sich im einfachsten Fall aus dem vorherigen Signal $y(t_{\mu-1})$ und dem aktuellen Originalbild $x(t_\mu)$. Ein Filter n -ter Ordnung ist über folgende allgemeingültige Formel definiert:

$$y(t_\mu) = x(t_\mu) + \sum_{i=1}^n a_i y(t_{\mu-i}) \quad (47)$$

Um den statischen Anteil in den Bildern der Prallströmung zu isolieren, bedarf es eines Tiefpass-Filters mit relativ niedriger Grenzfrequenz. Ein Filter mit niedriger Grenzfrequenz bedeutet beim MA-Modell entsprechend viele Werte in die Mittelung einzubeziehen, während ein IIR-Filter mit vergleichbarer Grenzfrequenz bereits als Filter 1. Ordnung den Zweck erfüllt.

Das Hintergrundbild der Bildsequenz wird mit Hilfe eines IIR-Filters 1. Ordnung nach folgender Formel berechnet:

$$y(t_\mu) = (1 - a)x(t_\mu) + ay(t_{\mu-1}) \quad (48)$$

mit

$x(t_\mu)$	Aufnahme zum Zeitpunkt t_μ
$y(0) = x(0)$	Initialisierung des Filters zu Beginn der Bildsequenz und
$a = 0,99$	empirisch ermittelter Filterkoeffizient.

Mit Hilfe eines zweidimensionalen FIR-Filters wird das aktuelle, in der Zeitachse geglättete Hintergrundbild $y(t_\mu)$ auch in der Bildebene geglättet, um lokale Störungen zu eliminieren. Diese Störungen können z. B. durch Vibrationen des Aufbaus, durch pendelnde Anhaftungen am Messfenster oder durch Rauschen in der Signalübertragung verursacht werden. Die zweidimensionale Filtermatrix htp ist von der Größe $m = n = 9$ mit konstanten Koeffizienten $htp(i, j) = 1/mn = 1/81$.

Das korrigierte Bild $z(t_\mu)$ ergibt sich aus der Aufnahme $x(t_\mu)$ zum Zeitpunkt t_μ abzüglich des IIR- und FIR-geglätteten Hintergrundbilds $y(t_{\mu-1})$ zum Zeitpunkt $t_{\mu-1}$

$$z(t_\mu) = x(t_\mu) - y(t_{\mu-1}) \quad (49)$$

Abb. 33 zeigt als Negative das aktuelle Originalbild, das in der Zeitachse gemittelte und im Ortsbereich geglättete Hintergrundbild sowie das daraus resultierende, korrigierte Bild. Am unteren Bildrand des Hintergrundbilds kann man eine lokale Verschmutzung des Messfensters erkennen, die im korrigierten Bild zwar geschwächt, aber nicht vollständig ausgeblendet erscheint. Daneben sind im Negativ des Originals zwei Stickys als dunkle Punkte zu erkennen, die im korrigierten Bild deutlicher hervortreten.

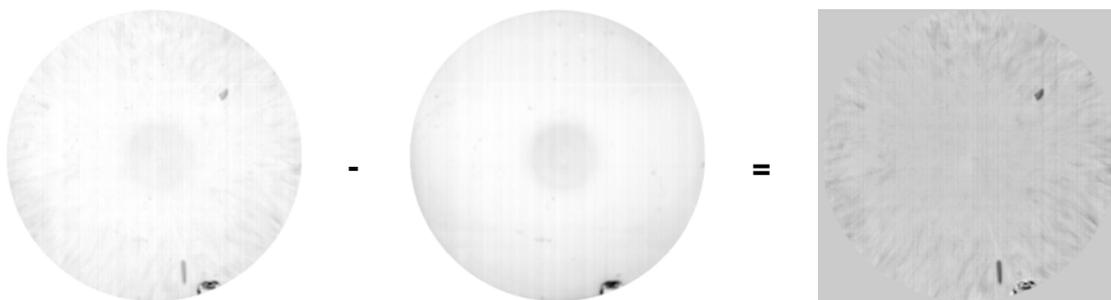


Abb. 33: Originalbild abzüglich Hintergrundbild ergibt korrigiertes Bild

Das resultierende Bild $z(t_\mu)$ beinhaltet alle zu detektierenden Objekte. Die Grenze zwischen Partikel und Hintergrund hängt vom Auftreffpunkt ab. Das Rauschen im Hintergrund, das durch Fasern im Streulicht erzeugt wird, nimmt von der Mitte der Prallströmung zum Düsenrand zu. Abb. 33 veranschaulicht den Effekt. Der Auswertealgorithmus berücksichtigt das mit steigendem Radius abnehmende Signal-Rausch-Verhältnis.

Diese lokaladaptive Schwelle (threshold) ergibt sich aus der Grauwertverteilung des Bildes. Dazu werden Mittelwert \tilde{z}_{Center} und Standardabweichung σ_{Center} in einem Bereich von 100 Pixeln um das Zentrum der Prallströmung d. h. in einem Radius von ca. 5 mm berechnet sowie Mittelwert \tilde{z}_{Border} und Standardabweichung σ_{Border} in einem 100 Pixel breiten Randbereich der Düse ermittelt. Auf der Basis der gaußschen Normverteilungskurve und empirischen Versuchen wurde für das Zentrum eine Toleranzschwelle von 6-facher Standardabweichung $k = 6$ (6-Sigma) und im Randbereich 8-fache Standardabweichung $k = 8$ gewählt. Die Grauwertschwellen $thres_{Center}$ und $thres_{Border}$ ergeben sich aus folgender der Beziehung:

$$thres = \tilde{z} + k\sigma \quad (50)$$

Die Schwellenwerte steigen mit der Stoffdichte an. Damit wird Gewährleistet, dass Fasern und störende Bestandteile, wie z. B. Luftblasen, detektiert werden. Bei Stoffdichten von 0,37 % bis 1 % steigen die Schwellenwerte üblicherweise von 7 auf 25 Grauwerte im Zentrum und von 18 auf 55 Grauwerten im Randbereich, um eine Größenordnung zu nennen.

Diese Schwellenwerte werden für die Digitalisierung des Bilds linear vom Zentrum zum Rand hin interpoliert. Abb. 34 zeigt das Binärbild als logische Verknüpfung des korrigierten Bildes mit der lokaladaptiven Schwelle.

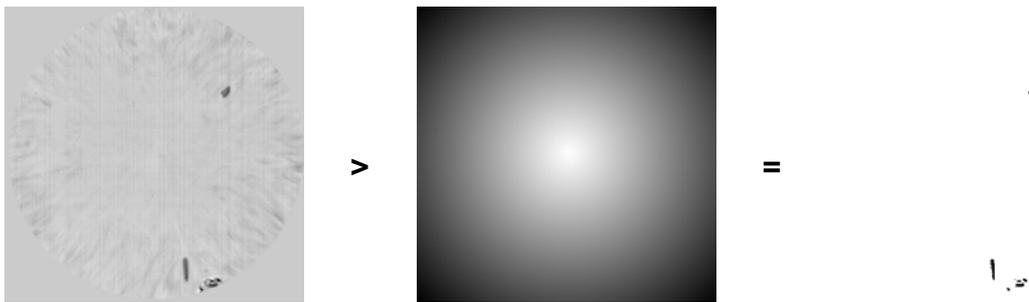


Abb. 34: Korrigiertes Bild verknüpft mit lokaladaptiver Schwelle ergibt ein Binärbild

Das in Abb. 34 dargestellte Binärbild stellt die Grundlage für die quantitative Bewertung dar, d. h. an diesem Bild werden Größe, Lage und Ausrichtung der Objekte ermittelt. Zuvor erfolgt die Zuordnung der detektierten Bildpunkte zu einem Objekt. Dieser Schritt ist notwendig, da bei einer Binarisierung von Grauwertbildern regelmäßig Objekte in Teilobjekte fragmentiert werden.

Die Rekonstruktion von Objekten erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird eine binäre Maske erzeugt, in der Bereiche deutlich größer sind als im Binärbild. Fragmentierte Bereiche im Binärbild wachsen in dieser Maske zusammen. Im zweiten Schritt werden die zusammengehörenden Bereiche durchnummeriert. Bei diesem sogenannten Labeling erhält jeder Bildpunkt die zugehörige Nummer des Bereichs, d. h. sein Label. Bildpunkte, die keinem Bereich zugeordnet sind, besitzen das Label 0. Die Verknüpfung der Label mit dem ursprünglichen Binärbild liefert zusammengehörige Objekte unverfälschter Größe und Lage. Statische Objekte werden vor dem Labeling maskiert, um deren wiederholte Erfassung auszuschließen.

Abb. 35 zeigt die Erzeugung der binären Maske mit erweiterten Bereichsrändern. Zunächst werden Bereichsränder mittels einer quadratischen Operatormaske von 3x3-Pixel erodiert, um einzelne, alleinstehende Punkte zu entfernen, die bei der anschließenden Dilatation stören könnten. Die Dilatation vergrößert mit einer kreisförmigen Operatormaske die Bereichsränder um 20 Bildpunkte.



Abb. 35: In Pfeilrichtung zunächst Erosion und dann Dilatation des Binärbildes

Die in Abb. 35 gezeigte binäre Maske zum Zeitpunkt t_μ wird mit einem um 30 Bildpunkte dilatierten Binärbild vom Zeitpunkt $t_{\mu-1}$ maskiert. Die vergleichsweise größere Maske aus dem Vorgänger blendet statische Objekte zuverlässig aus, wie Abb. 36 demonstriert.



Abb. 36: Verknüpfung einer Maske mit ihrem Vorgänger blendet statische Objekte aus

Die Bereiche der von statischen Objekten befreiten binären Maske werden beim Labeling durchnummeriert. Die Multiplikation mit dem ursprünglichen Binärbild liefert Objekte mit eindeutig zugeordneten Bildpunkten. Abb. 37 zeigt die Verbindung von gelabelter Maske, ursprünglichem Binärbild und resultierendem Bild mit diskreten Objekten.

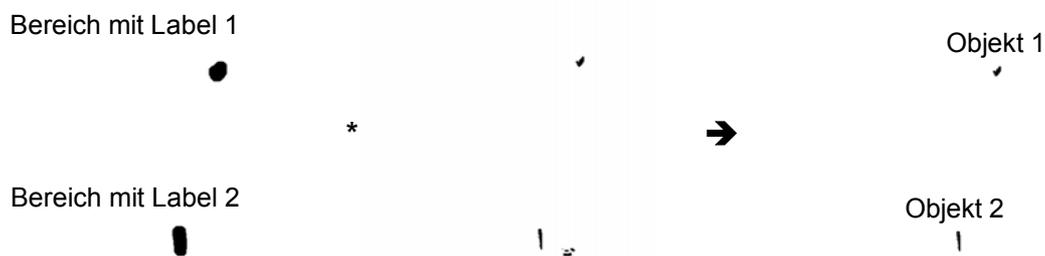


Abb. 37: Multiplikation einer gelabelten Maske mit einem Binärbild

Die einzelnen Objekte werden hinsichtlich ihres Flächeninhalts, ihrem flächengleichen Kreisdurchmesser, der Länge von Haupt- und Nebenachse, ihr Hauptachsenwinkel, ihr Perimeter und der Schwerpunktskoordinaten vermessen. Die statistische Aufbereitung liefert Größenverteilungen nach Anzahl und Fläche. Die Stickybelastung ergibt sich im Bezug auf den beobachteten Volumenstrom und der Stoffdichte der Suspension.

4 Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Bestimmung von Art und Größenverteilung klebender Partikel in Faserstoffsuspensionen durch die Messung optischer Effekte an der Phasengrenze zwischen Suspension und Messfenster. Das zu entwickelnde Messverfahren soll es ermöglichen, die Belastung des Faserstoffstroms durch klebende Verunreinigungen zeitnah, d. h. online, zu quantifizieren.

Im Folgenden werden die grundlegenden Erkenntnisse aus den Versuchen an faseroptischen Lichtwellenleitern und mittels Impaktor dargestellt.

4.1 Versuche mit Lichtwellenleiter

Die Versuchsaufbauten mit faseroptischen Lichtwellenleitern beleuchten die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge des Lichttransports sowie das prinzipielle Verhalten gegenüber sieben untersuchten Klebstoffe und weiterer Substanzen. Sie liefern wichtige Erkenntnisse und Erfahrung im Umgang mit Faseroptik und der Erfassung von Signalen in unterschiedlichen Medien.

4.1.1 Grundlegende Beobachtungen und Erfahrungen

Der im Kapitel 2.4.1.6 beschriebene Strahlungsverlust in gekrümmten Lichtleitern ist deutlich zu beobachten. Hellrot leuchtet die austretende Strahlung des Halbleiterlasers bei überzogener Krümmung der Faser. Gleichzeitig sinkt die Intensität des Empfangssignals. Dies betrifft die Krümmung am einstellbaren Durchmesser der Sensorschleife sowie die Führung des Lichtleiters in den Zuleitungen. Hier ist entsprechende Sorgfalt geboten, um Störungen bei der Versuchsdurchführung zu vermeiden. Eine Überdehnung der Faser führt meist zu einer irreversiblen Schädigung im Mantel ggf. auch im Kern. Diese Schadstellen leuchten und sind daher meist gut zu erkennen.

Die Stoßempfindlichkeit der Faseroptik ist ein aus den Vorarbeiten unbekannter Effekt. Das Anschlagen des Lichtleiters löst hochfrequente Impulse aus, die den Transimpedanzverstärker durchlaufen und im GageScope erscheinen. Schon das leichte Antippen des Lichtleiters mit dem bloßen Finger erzeugt erhebliche Störimpulse. Vermutlich verursachen lokale Dichteschwankungen eine signifikante Störung der Lichtleitung. Damit steht das Störsignal in direkter Konkurrenz zum Nutzsignal, das auf einer Störung der Lichtleitung durch klebende Verunreinigungen basiert.

Das Anschleifen erfolgt am besten bei eingeschaltetem Laser. Während der Mantel vorsichtig entfernt wird, sinkt das DC-Signal um 20 bis 30 % und die Schleifstelle leuchtet rot. Das Signal steigt bei der Behandlung der Faser mit flüssiger Politur auf bis zu 96 % des ursprünglichen Wertes an und es tritt deutlich weniger Licht aus. Beim Eintauchen der frisch polierten Faser in Wasser kann gelegentlich ein geringfügiger Anstieg des Transmissionssignals gemessen werden. Die Höhe des Signals nach der Politur ist ein Maß für die erreichte Oberflächengüte.

Die Empfindlichkeit der Messeinrichtung ist sehr hoch. Vor allem die durch die Faserführung hervorgerufenen Störungen verfälschten die Messsignale. Aus diesen Beobachtungen lassen sich drei essentielle Aussagen für die Entwicklung eines Sensors machen:

1. **Freie Faserwege vermeiden.** Biegeschwingungen der Faser verursachen Störungen.

2. **Verbindungen zwischen Laser, Faser und Fotodiode fixieren.** Die Ein- und Auskopplung von Licht reagiert empfindlich auf Vibrationen.
3. **Faser vor Beschädigungen schützen.** Wird der Mantel durch Biegung oder äußere Einflüsse wie z. B. starke Temperaturwechsel rissig, so entstehen unkontrolliert sensitive Stellen z. B. für Lage oder Luftfeuchtigkeit.

Diese Fehlerquellen erschweren die Versuchsdurchführung und beeinträchtigen die Einsatzmöglichkeit der Faser als optischen Sensor.

4.1.2 Erkennung von Substanzen unterschiedlicher Brechzahl

Bring man flüssige Substanzen unterschiedlicher Brechzahl auf die angeschliffene Stelle der Faser, so wird die Lichtleitung mehr oder weniger gestört. Der Versuch beweist die Richtigkeit der Messidee. Die Messung erfolgt mit der Lichtleiterschleife gemäß Abb. 24.

Die Brechzahlen dieser Substanzen wurden mittels eines Refraktometers gemessen. Im folgenden Blockdiagramm werden die erzielten Intensitätsminderungen gezeigt.

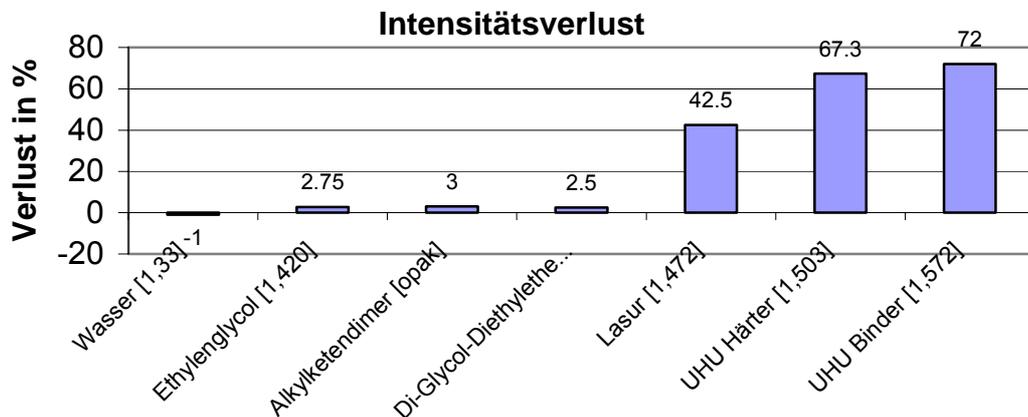


Abb. 38: Intensitätsverlust bei Berührung mit Substanzen unterschiedlicher Brechzahlen

Der Versuch am gekrümmten Lichtleiter bestätigt die Theorie, der zufolge sich die Erfassungsgrenze in Richtung niedrigerer Brechzahlen verschieben lässt, wie Abb. 39 illustriert.

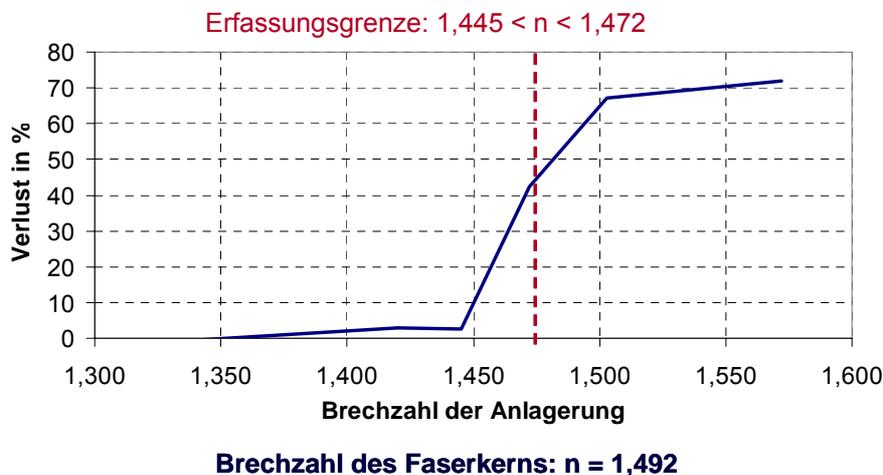


Abb. 39: Erfassungsgrenze des gekrümmten Lichtleiters für unterschiedliche Brechzahlen

4.1.3 Sensibilität gegenüber Zellstoff- und Holzstofffasern

Der Versuchsaufbau mit bewegter Messschleife, wie in Abb. 25 skizziert, liefert für hoch verdünnte Holzschliffsuspensionen mit einer Stoffdichte unter 0,1 % keine faserstoffspezifischen Signale. Das beobachtete Signal korreliert eindeutig mit der traversierenden Bewegung des Lichtleiters, unabhängig von der Faserstoffdichte.

Die Messapparatur mit stationärer Messspule, wie in Kapitel 3.2.3.3 beschrieben, liefert dagegen Signalverläufe, die der Faserstoffdichte zuzuordnen sind. Abb. 40 zeigt die hochfrequenten Anteile einer Zellstoffsuspension mit unterschiedlicher Stoffdichte. Die oberste Kurve ist die Wasserreferenz. Die zweitoberste Kurve zeigt den Verlauf für vereinzelte Zellstofffasern bei einer Stoffdichte unter 0,1 %. Die beiden unteren Kurven wurden bei einer Stoffdichte von 3 % aufgezeichnet.

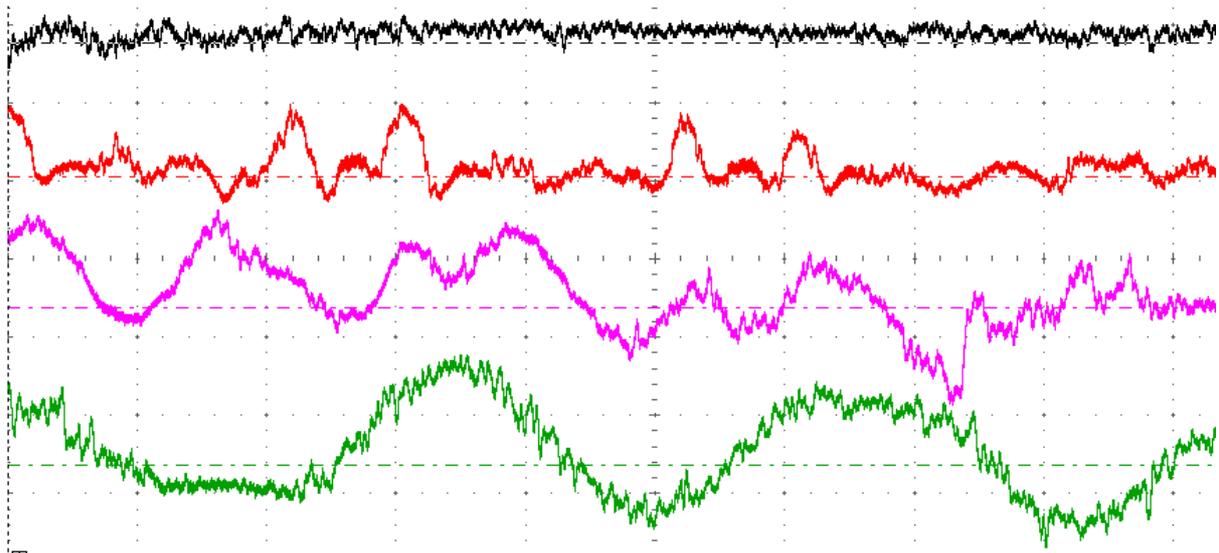


Abb. 40: Signale unterschiedlicher Faserstoffdichte über eine Zeitdauer von 9,4 ms

Bei einer angenommenen Faserbreite von $30\ \mu\text{m}$ und bei einer Länge von $1,5\ \text{mm}$ ergeben sich bei einer konstanten Rührerdrehzahl von $250\ \text{min}^{-1}$ typische Signalbreiten im Bereich von $34\ \mu\text{s}$ bis $2,9\ \text{ms}$.

Das Signal der hochverdünnten Probensuspension weist Spannungsspitzen von $42\ \text{mV}$ und Signalbreiten von $350\ \mu\text{s}$ auf. Vereinzelt treten in unregelmäßigen Abständen auf. Bei einer Stoffdichte von 3 % zeigen sich breitere Signale mit höherer Amplitude, als im hochverdünnten Bereich. Das DC-Signal zeigt einen Intensitätsrückgang von etwa 3 %.

4.1.4 Erkennung von Stickys im Altpapierstoff

Die Messapparatur mit stationärer Messspule beinhaltet ein beheizbares Rührwerk. Eine Faserstoffprobe einer Kartonfabrik liefert bei Zimmertemperatur und einer eingestellt Rührerdrehzahl von $500\ \text{min}^{-1}$ keine eindeutigen Signalausschläge. Wird die Suspension jedoch auf etwa $80\ \text{C}$ erhitzt so ist eine irreversible Schwächung des Signals in Höhe von 7,6 % zu beobachten.

Nach dem Versuch wurde der LWL ausgebaut und unter einem Mikroskop auf sichtbare Ablagerungen hin untersucht.

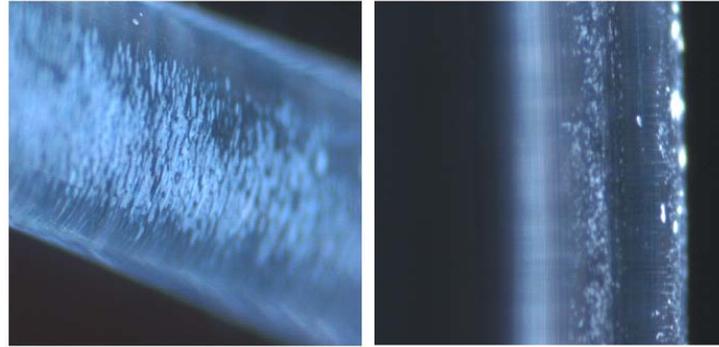


Abb. 41: Sensorfaser in Draufsicht (links) und seitlicher Betrachtung (rechts)

Unter dem Mikroskop konnten Ablagerungen festgestellt werden. Wie in der oberen Abbildung ersichtlich ist, handelt es sich um Partikel in der Größenordnung kleiner als $100\ \mu\text{m}$, die sich vereinzelt oder schichtweise auf der hydrophoben Oberfläche abgelagerten. Auf der Innenfläche des benutzten Becherglases wurden nach der Temperaturerhöhung ebenfalls Ablagerungen festgestellt.

4.1.5 Erfassung von Makrostickys in Modellsuspensionen

Die Sticky-Modellsuspension gemäß INGEDE-Methode 12 beinhaltet eine Flächenbelegung von $133\ \text{cm}^2$ PSA-Ettiketten je $300\ \text{g}$ holzfreies Kopierpapier. PSA-Kleber und Kopierpapier sind hausintern festgelegt. Die Überprüfung erfolgt nach INGEDE-Methode 4.

Die Probe zeigte bei Raumtemperatur keine signifikanten Signalverläufe. Erst ab einer Temperatur von 45°C liefert der Versuchsaufbau Signale, die Makrostickys zugeordnet werden können. Abb. 42 zeigt drei typische vom GageScope aufgezeichnete Signale mit einer Amplitude von rund $110\ \text{mV}$.

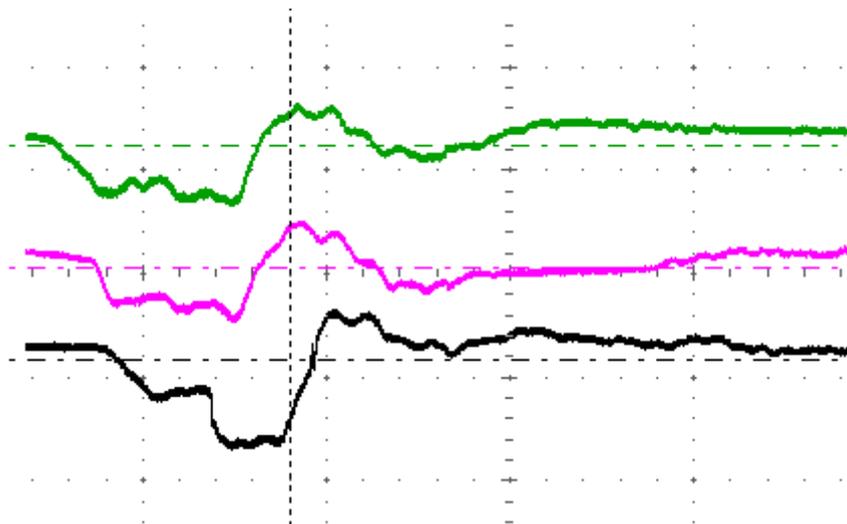


Abb. 42: Drei typische Makrosticky-Signale entlang eines Zeitbereichs von $10\ \text{ms}$

Nach erneuter Erhitzung der Suspension auf 45°C am Folgetag konnten mit der Faseroptik keine Makrostickys detektiert werden. Die Veränderung des Anströmwinkels brachte keine Verbesserung.

Abb. 43 zeigt den Signalverlauf bei Kontakt der sensitiven Fläche des Lichtleiters mit PSA. Ausgehend vom konstanten Pegel von über 0,88 V für ungestörte Lichtleitung in Wasser, fällt der Pegel beim Anpressen des Klebstoffs auf unter 0,8 V. Ohne Anpressdruck stellt sich ein Pegel von etwa 0,85 V ein. Mit dem Ablösen des Klebers stellt sich wieder der Ausgangspegel ein. Der Versuch lässt sich beliebig oft wiederholen.

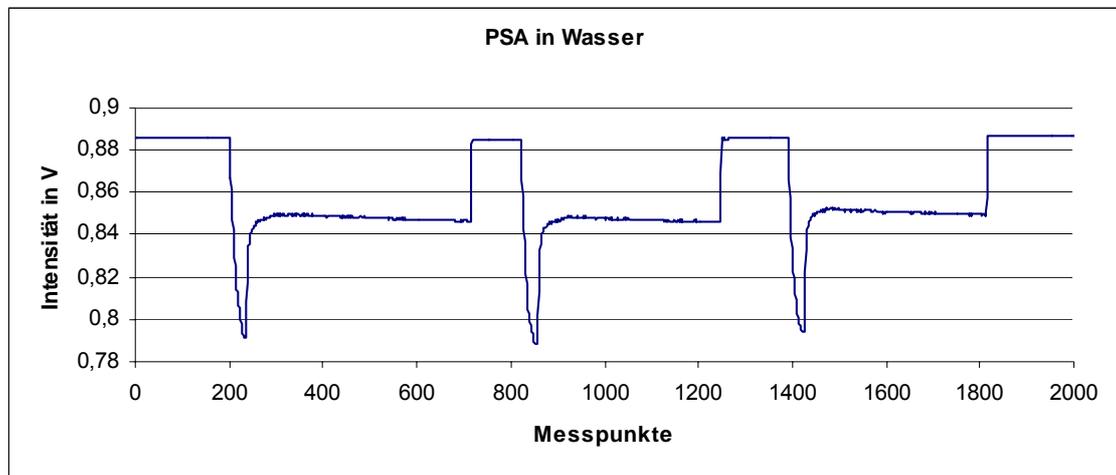


Abb. 43: Signalverlauf bei direktem Kontakt der Messfläche mit PSA

Die tiefsten Werte erreichte der Graph stets bei maximalem Anpressdruck der Probe an die Messstelle. Betrachtet man die Minimalausschläge während einer Messreihe, so können Aussagen über die Konstanz des Anpressdrucks gemacht werden. Bei konstantem Anpressdruck erreichten die Minima stets einen vergleichbaren Wert. Der Anpressdruck und der, sich durch die Klebrigkeit der Proben einstellende, Haftungswert kann nach folgender Gleichung in Zusammenhang gebracht werden:

$$K = \frac{I_{\text{Ausgang}} - \text{Haftungswert}}{I_{\text{Ausgang}} - \text{Minimalwert}} \cdot 100[\%] \quad (51)$$

K kann Werte zwischen Null für nicht klebrig und Eins für sehr klebrig annehmen, wobei K sowohl für die Klebrigkeit der Probe in Luft und in Wasser ermittelt werden kann. Die folgende Tabelle gibt die gemittelten K-Werte der verwendeten Proben an, die mit einer Lochschablone von 2 mm Ø appliziert wurden:

Tab. 2: K-Werte verschiedener Proben

Probe	Buchensulfit	Pattex (5h alt)	PSA	Klebeband
K _{Luft}	11,4 %	29,1 %	78,8 %	93,7 %
K _{Wasser}	15,2 %	31,6 %	40,7 %	93,7 %

Der K-Wert von PSA im Medium Luft ist nahezu doppelt so groß wie in wässriger Umgebung. Dies deckt sich mit der Erfahrung aus der Praxis, dass potentiell klebende Partikel in einer Faserstoffsuspension relativ geringe Adhäsionskräfte ausbilden. Bei einem niedrigen K-Wert nicht mit einer Anlagerung an die Sensorfläche zu rechnen. Der K-Wert kann bei höheren Temperaturen stark ansteigen und ist damit ein Maß für die Ablagerungsneigung.

Vergleichende Untersuchungen erfolgten an klebrigen und nicht klebrigen Feststoffen. Folgende Stoffe besitzen einen höheren Brechungsindex als die Faseroptik:

- Pattex Kraftkleber
- Klebstoff eines doppelseitigen Klebebands (TESA)
- Pattex Holzleim
- Strichbindemittel: Basoplast PR 8172
- Leimungsmittel: Alkylketendimer
- Verpackungskleber Adhesin A 7088
- PSA Klebstoff eines Etikettenpapiers: Polyvinylacrylat
- Pflanzen-Öl

So zeigt Abb. 44 beispielhaft den Signalverlauf bei Kontakt der Sensorfläche mit einem Tropfen Öl. Die obere Kurve wird von einem Tropfen erzeugt, der sich in Faserrichtung bewegt, d. h. die Messfläche überstreicht. Im Gegensatz dazu zeigt die untere Kurve den Effekt eines Tropfens, der senkrecht auftrifft, also die Fläche als Ganzes benetzt und abtropft.

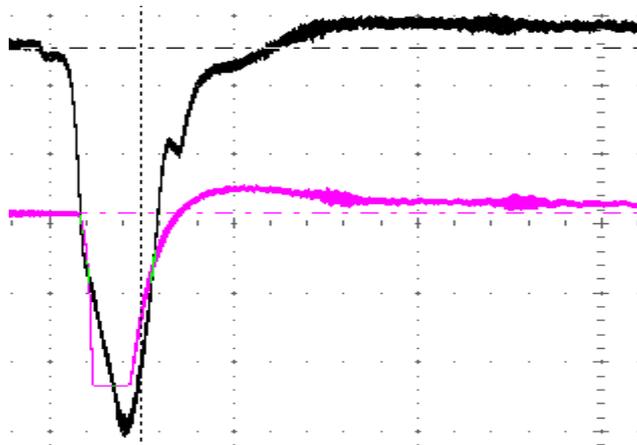


Abb. 44: Signalverlauf bei Kontakt der Messfläche mit Öl

Der Vergleich deutet auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen getroffener Fläche und Intensitätsverlust hin.

Die Messungen mit unterschiedlichen Materialien bestätigen die gefundenen Zusammenhänge zwischen Brechzahl, Kontaktanteil und Signalintensität.

4.2 Versuche mit Impaktor

Die Untersuchungen am Impaktor umfassen die Messzelle und deren Basiseinstellungen. An Modellsuspensionen erfolgte die Entwicklung bildanalytischer Auswertelgorithmen. Weitere Versuche erfolgten an Suspensionen und Kreislaufwasserproben aus industrieller Altpapieraufbereitung.

Die für die Entwicklung des Impaktors wesentlichen Versuche sind im Folgenden dargestellt.

4.2.1 Versuche unterschiedlicher Beleuchtung

Die Auswahl der Lichtquelle ist für das Messprinzip und für den nachhaltigen Betrieb des Impaktors von grundlegender Bedeutung. Untersucht wurden Licht emittierende Dioden (LED) mit unterschiedlichen Wellenlänge sowie Halogenlampen.

4.2.1.1 Beleuchtung mit Licht emittierenden Dioden

Je nach Beleuchtungsart lassen sich Unterschiede im Kontrast zwischen den hell aufleuchtenden Stickys und dem Hintergrundrauschen unterschiedlich gut erkennen. Gewünscht ist natürlich ein besonders hoher Kontrast.

Rotes Licht lässt die Fasern sehr gut erkennen, vor allem Holzschliff streut im roten und gelben Wellenlängenbereich besonders stark und sorgt so für bemerkbare Streuung in die Suspension hinein, so dass das Rauschen im Hintergrund besonders störend ist. Bessere Ergebnisse liefert weißes Licht; noch ein wenig kontrastreicher ist dagegen blaues Licht. Faserstoffe absorbieren im kurzen Wellenlängenbereich erheblich mehr Licht, was auch störendes Streulicht mit einschließt.

Die Unterschiede sind jeweils so gut mit dem bloßen Auge auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu erkennen, dass es dafür keine bildanalytische Auswertung.

Die Beleuchtung mit 10 Hochleistungs-LEDs mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 30 Watt, genügt für eine Auflösung von ca. 0,2 mm/Bildpunkt. Für höhere Auflösung ist die LED-Beleuchtung zu dunkel.

4.2.1.2 Beleuchtung mit Halogenbirnen

Im Vergleich zur LED-Beleuchtung liefert eine Beleuchtungseinheit mit achtzehn 20 Watt Halogenbirnen deutlich mehr Licht. Die elektrische Leistung von 360 Watt erfordert zusätzliche Maßnahmen zur Wärmeabfuhr.

Die Detektionsschärfe ist im Vergleich zu weißen oder blauen LEDs nicht eingeschränkt. Jedoch reicht die Lichtleistung nicht aus, um bei kürzeren Belichtungszeiten Stickys zu detektieren.

Versuche mit weitaus höheren Lichtleistungen können mit dem Impaktor der Version II gefahren werden. Das Potential der Hochgeschwindigkeitskamera wird bereits bei etwa 1,8 kW der maximal 2,5 kW Lampenleistung erreicht.

4.2.2 Versuche mit unterschiedlichen Substraten

Als Substrat eignen alle klaren Medien mit einer Brechzahl um 1,5 mit möglichst hoher Verschleißfestigkeit und hinreichender Bruchsicherheit. Acrylglas hat sich im Punkt Verschleißfestigkeit nicht bewährt. Normales Fensterglas hält den Temperaturdifferenzen nicht Stand. Das temperaturbeständige Borosilikat-Glas zeigte in den Versuchen als ausreichend beständig. Es wird im Impaktor als Messfenster mit einer Stärke von 5 mm erfolgreich eingesetzt.

Versuche mit Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) konnten wegen langer Lieferzeiten innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden.

4.2.3 Auswahl des Detektors

Die Hochgeschwindigkeitskamera Vosskühler HCC-1000 bietet gegenüber der hochauflösenden Kamera PCO-4000 eine erheblich höhere Bildfrequenz, so dass innerhalb einer Messsequenz von 512 Bildern die Suspension lückenlos erfasst werden kann. Die höhere Dynamik (14 Bit) der PCO-4000 bringt in dieser Applikation keinen Vorteil.

Messreihen unterschiedliche Objektive mit Auflösungen von 200 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$, 48 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ und 24 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ zeigten eine hinreichende Bildqualität bei der mittleren Auflösung.

4.2.4 Versuche zur Düsengeometrie und DüsenEinstellung

Bei der einfach gebohrten Düse kommt es zu einer Rückströmung, so dass die Suspension zwischen Düse und Messfenster rotiert. Mitgeführte Stickys werden regelmäßig mehrfach gegen die Scheibe gefördert, was die Zählung - vor allem in Hinblick auf die automatische Auswertung - sehr erschwert, was folgende Skizze verdeutlicht.

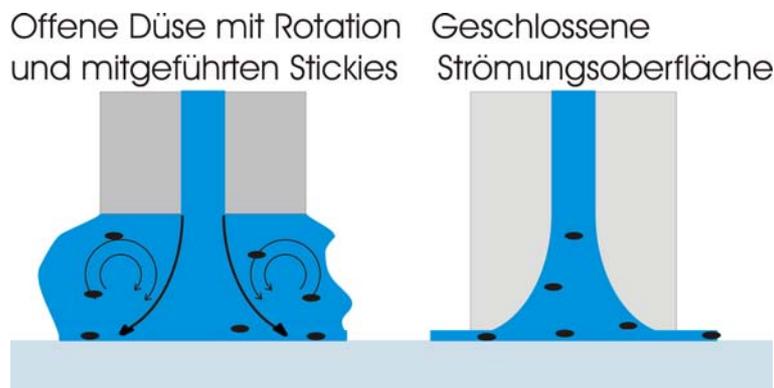


Abb. 45: Rotation der Strömung bei nicht geführter Strömungsoberfläche

Abhilfe schafft hier eine Düse mit parabelförmigem Auslauf, so dass die Prallströmung keine freie Oberfläche hat. So wird die Rückströmung effektiv vermieden. Der richtige Abstand zur Scheibe lässt sich leicht einstellen: Wenn es zu keiner Rückströmung mehr kommt, ist der Abstand zur Scheibe in Ordnung. Allerdings fällt damit der Freiheitsgrad des Düsenabstands weg, der aber bei der unbearbeiteten Düse kaum Einfluss auf Rückströmung und Qualität der Detektion hat. Winkelabweichungen bei Impaktor Version I können mit Hilfe von vier Spannschrauben am Gehäuse korrigiert werden, bis die Strömung in alle Richtungen gleich erfolgt. Dieses Problem wurde bei Version II konstruktiv gelöst, so dass lediglich der Düsenabstand zum Messfenster einstellbar ist.

Für eine hinreichend genaue Strömungsführung ist eine Bearbeitung der Düse mit einer CNC-Maschine erforderlich. Die Düse ist elektrochemisch dauerhaft geschwärzt, um Reflexion von Streulicht zu minimieren.

4.2.5 Modellsuspension

Die Modellsuspension nach INGEDE-Methode 12 mit definiertem Gehalt an Stickys aus PSA-Etiketten erlaubt eine Bewertung des Messsystems unter der Annahme, dass sich der mit den Etiketten flächig aufgebrauchte Klebstoff sich als Film auf dem Messfenster ähnlich abbildet, wie auf dem Laborblatt. Da sich Klebstofffilme einrollen können oder nicht eben das Messfenster des Impaktors berühren, ist diese Annahme nur eingeschränkt gültig.

Die Makrosticky-Messungen nach INGEDE-Methode 4 und die Mikrosticky-Bestimmungen mittels PMV-Hausmethode bilden die Referenz für den Impaktor. Im Folgenden wird gezeigt, wie sich der Gehalt an Makrostickys und Mikrostickys in den Größenklassen überlappen.

Es ist sinnvoll und notwendig, die nach der PMV-Hausmethode gemessenen Mikrostickys mit in die Bewertung einzubeziehen, da die Modellsuspension als Basis die Versuche aus beiden Komponenten besteht. Bei dieser Mikrosticky-Bestimmungsmethode wird das Filtrat aus der Makrosticky-Messung nach INGEDE-Methode 4 aufgefangen und abfiltriert. Die Filterblätter werden analog der Makrosticky-Bestimmungsmethode ausgewertet.

Die größten Unterschiede zeigt die anzahlgewichtete Größenverteilung, wie aus Tabelle 3 der Labormessung ersichtlich.

Tab. 3: Mikro- und Makrostickys der Modellsuspension nach Anzahl

	Größenklassen in µm								Gesamtstickyanzahl
	100 - 200	200 - 400	400 - 600	600 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 10000	10000 - 20000	
Makros	931	1.599	6.060	17.084	17.489	3.269	406	0	46.837
	883	1.145	6.275	17.561	18.921	2.648	620	0	48.054
Mw, Anzahl/kg	907	1.372	6.168	17.322	18.205	2.959	513	0	47.446
Verteilung, %	2	3	13	37	38	6	1	0	100
Mikros	34.299	56.668	23.860	7.456	2.983	0	0	0	125.265
	28.632	32.211	16.702	7.158	1.193	0	0	0	85.896
Anzahl/kg	31.465	44.439	20.281	7.307	2.088	0	0	0	105.581
Verteilung, %	30	42	19	7	2	0	0	0	100
Gesamtstickys									
Σ Anzahl/kg	32.372	45.811	26.449	24.629	20.293	2.959	513	0	153.026
Verteilung, %	21	30	17	16	13	2	0	0	100

Abb. 46 veranschaulicht die Dominanz die zahlreichen kleinen Partikel aus der Mikrostickymessung bei der Größenverteilung nach Anzahl.

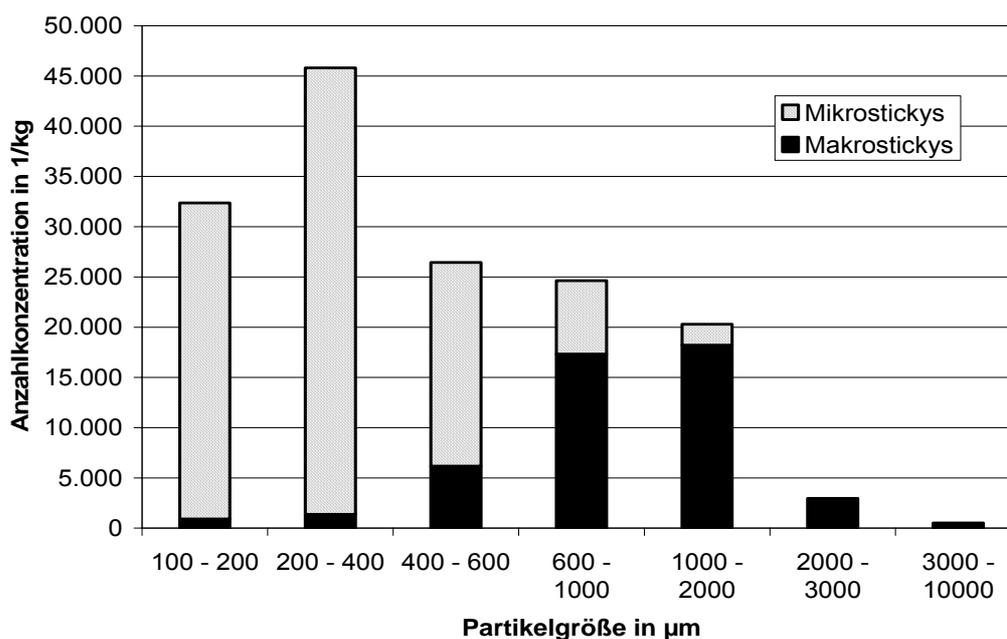


Abb. 46: Größenverteilung von Mikro- und Makrostickys nach Anzahl

Der Impaktor liefert für die Modellsuspension eine anzahlgewichtete Größenverteilung die zwischen der Makrosticky- und der Mikrostickymessung liegt. Abb. 47 zeigt, dass kleine Stickys im Größenbereich zwischen 100 µm und 200 µm im Vergleich zur Labormessung unterrepräsentiert sind.

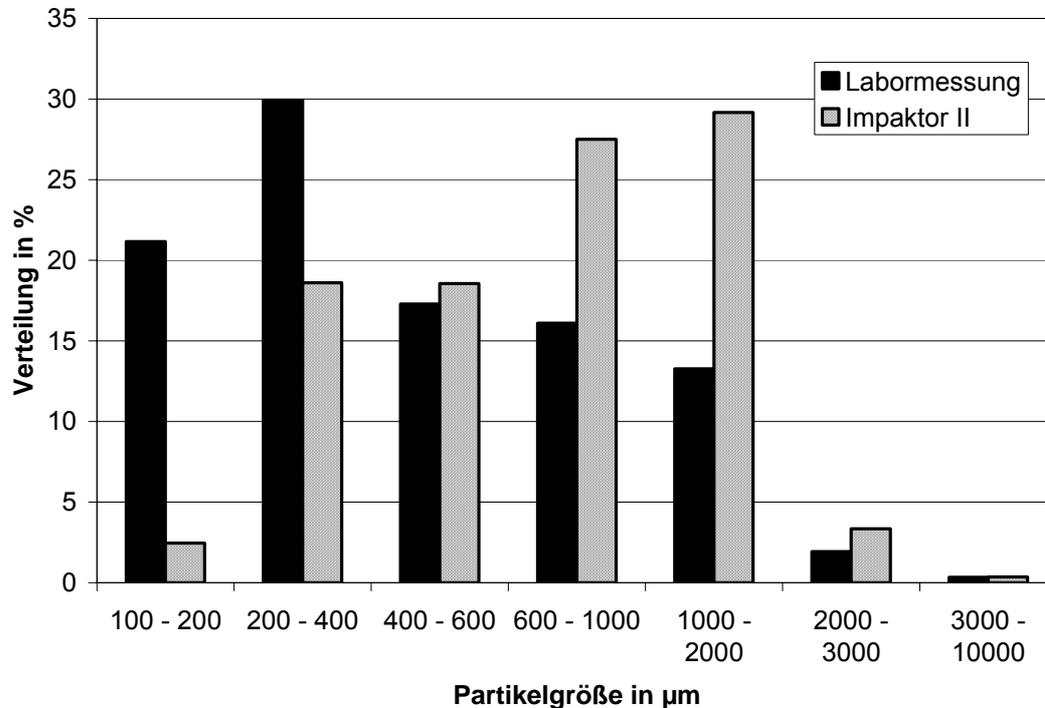


Abb. 47: Vergleich der Größenverteilung nach Anzahl

Von technologischer Bedeutung ist weniger die Verteilung nach Anzahl als die flächengewichteten Anteile. Wegen der flächigen Gestalt korrelieren diese Werte mit der Stickyfracht im Faserstoff.

Die zahlreichen kleinen Partikel aus der Mikrostickymessung verändern die flächengewichtete Größenverteilung der Makrostickys in der Modellsuspension nur geringfügig, wie aus Tabelle 4 ersichtlich.

Tab. 4: Mikro- und Makrostickys der Modellsuspension nach Fläche

	Größenklassen in µm								Gesamtstickyfläche
	100 - 200	200 - 400	400 - 600	600 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 10000	10000 - 20000	
Makros	15	146	1.283	8.852	26.572	14.637	3.775	0	55.279
	11	105	1.320	8.769	28.906	11.318	5.865	0	56.294
mm ² /kg	13	125	1.301	8.810	27.739	12.978	4.820	0	55.786
Verteilung, %	0	0	2	16	50	23	9	0	100
Mikros	641	4.399	4.340	2.789	3.892	0	0	0	16.061
	477	2.493	2.935	2.780	1.265	0	0	0	9.950
Mw, mm ² /kg	559	3.446	3.637	2.784	2.578	0	0	0	13.005
Verteilung, %	4	26	28	21	20	0	0	0	100
Gesamtstickys									
Σ mm ² /kg	572	3.572	4.939	11.594	30.317	12.978	4.820	0	68.792
Verteilung, %	1	5	7	17	44	19	7	0	100

Abb. 48 zeigt die Dominanz der Makrostickys bei der Gewichtung nach Stickyfläche.

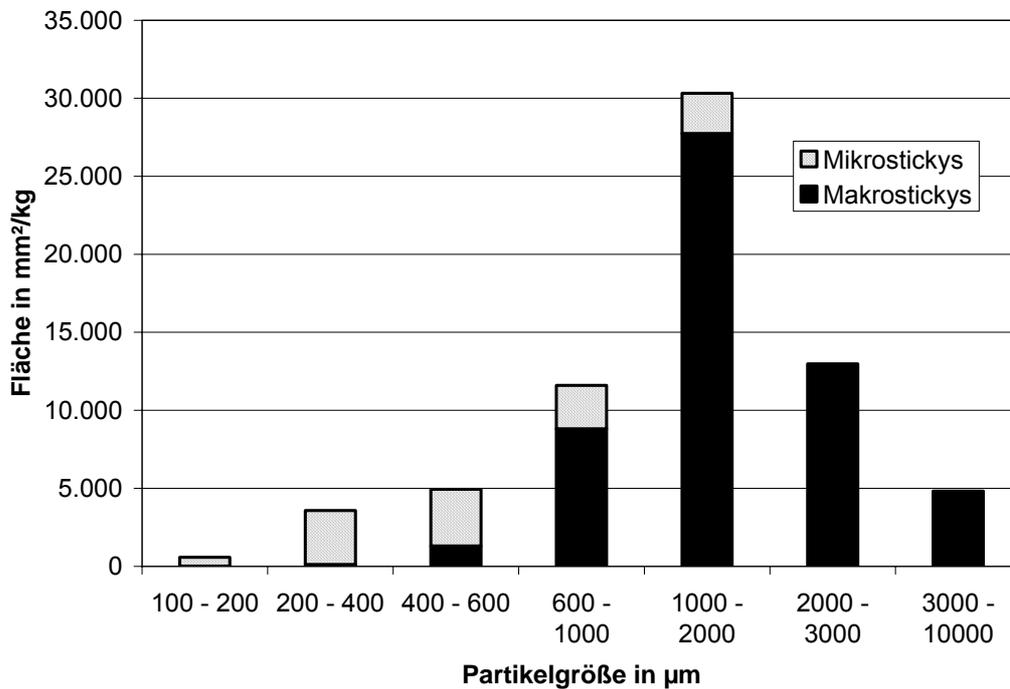


Abb. 48: Größenverteilung von Mikro- und Makrostickys nach Fläche

Vergleicht man die mit dem Impaktor gemessene flächengewichtete Größenverteilung mit der Labormessung, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messmethoden, wie Abb. 49 veranschaulicht.

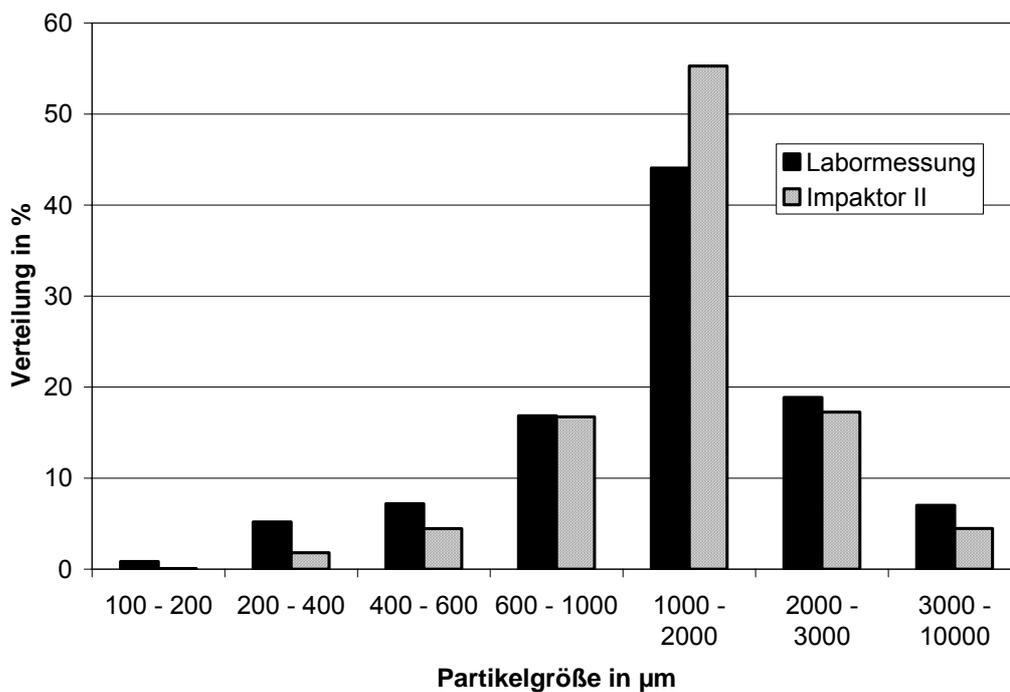


Abb. 49: Vergleich der flächengewichteten Größenverteilung

Die Versuche mit der Modellsuspension wurden mit unterschiedlicher Faserstoffdichte im Bereich zwischen 0,38 % und 1,0 % durchgeführt, um das Verhalten des Sensors bei den in der Praxis üblichen Schwankungen der Konsistenz zu überprüfen.

Als Testparameter dient die mittlere, innerhalb einer Messsequenz von 512 Bildern erfasste Stickyfläche herangezogen. Die in Abb. 50 dargestellten Messwerte demonstrieren, dass der Impaktor Stickyflächen unabhängig von der Stoffdichte detektiert.

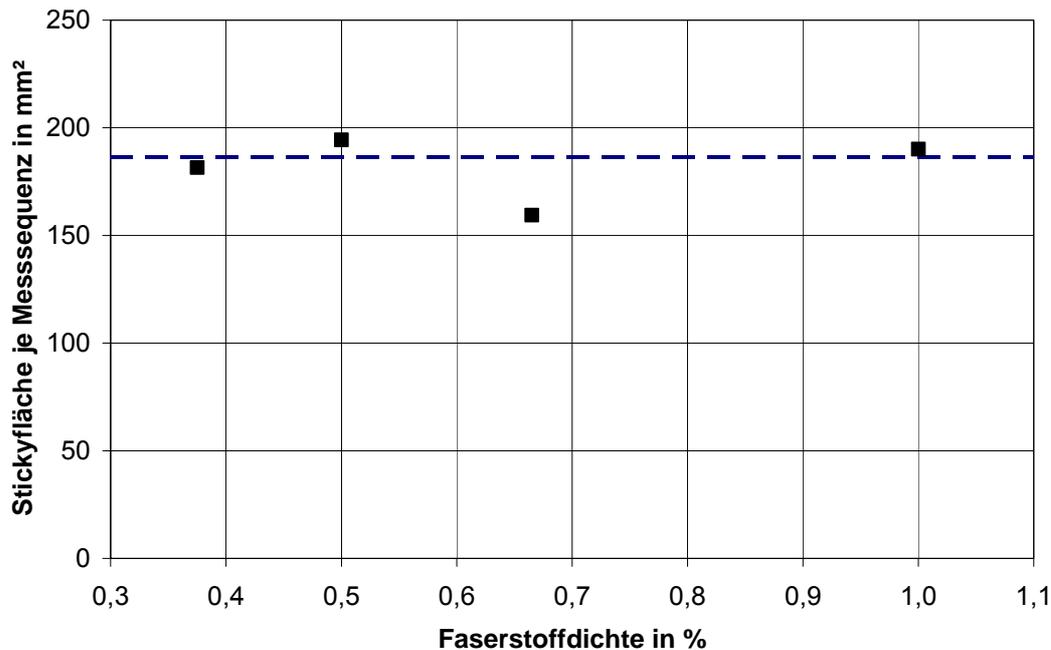


Abb. 50: Vergleich der flächengewichteten Größenverteilung

4.2.6 Messungen an Faserstoffen einer Altpapieraufbereitungsanlage

Neben Modellsuspensionen wurden Faserstoffsuspensionen und Kreislaufwasser einer industriellen Altpapieraufbereitungsanlage mit dem Impaktor analysiert. Die Faserstoffe stammen aus dem Suspensionsstrom einer Flotationsstufe zur Druckfarbentfernung. Der Impaktor wurde zudem mit Deinkingschlamm getestet.

Trotz der unterschiedlichen Konsistenz von Kreislaufwasser, es handelte sich um Trübfiltrat eines Scheibenfilters, und Faserstoff, liefert der Impaktor gute Bilder. Sogar im Deinkingschlamm zeichnen sich Stickys als helle Partikel deutlich von der Suspension ab. Die Beleuchtung liefert ausreichend Licht.

Dauerhafte Ablagerungen oder erschleißbedingte Trübung des Messfensters wurden nicht beobachtet. Jedoch können sich größere Partikel zwischen Düse und Messfenster verkeilen und die Prallströmung stören. Diese Partikel verlassen den Impaktor, sobald der Spalt zwischen Düse und Messfenster kurzzeitig vergrößert wird. Beim Demonstrator geschieht dies im laufenden Betrieb über das Absenken der Düsenhalterung um eine viertel Umdrehung mit der Hand. In der Praxis muss dieser Vorgang automatisiert werden, damit der Impaktor nicht verstopft. Die Bildanalyse kann hierzu das notwendige Signal liefern.

Die Zuverlässigkeit der Komponenten ist als hoch einzuschätzen. Bis auf die Düsenabsenkung gibt es keine zu bewegende Teile. Sollte die Düse relativ häufig bewegt werden, um verkeilte Partikel zu entfernen, so kann es zur Undichtigkeit an der Dichtung der Düsenhalterung kommen.

Der Wartungsaufwand hält sich in überschaubaren Grenzen. Das Messfenster wird von der Bildanalyse überwacht und muss nur gelegentlich ausgetauscht werden. Die Standzeit hängt von der jeweiligen Faserstoffsuspension ab. Hierzu liegen noch keine Erfahrungswerte vor. Die Halogenlampen sollten nach etwa 1000 h gewechselt werden, was bei einer Betriebsdauer von ca. 10 s / Messsequenz und einer Zykluszeit von 180 s einem Zeitraum von rund 2 Jahren entspricht.

Die Versuche mit unterschiedlichen Suspensionen demonstrieren die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten des Impaktors in der Praxis. So zeigt Abb. 51 den Effekt der Sticky-Abtrennung bei der Entwässerung eines Faserstoffs auf die flächengewichtete Größenverteilung. Die größeren Stickyfraktionen des Faserstoffs gelangen nicht über Scheibenfilter in das Trübfiltrat.

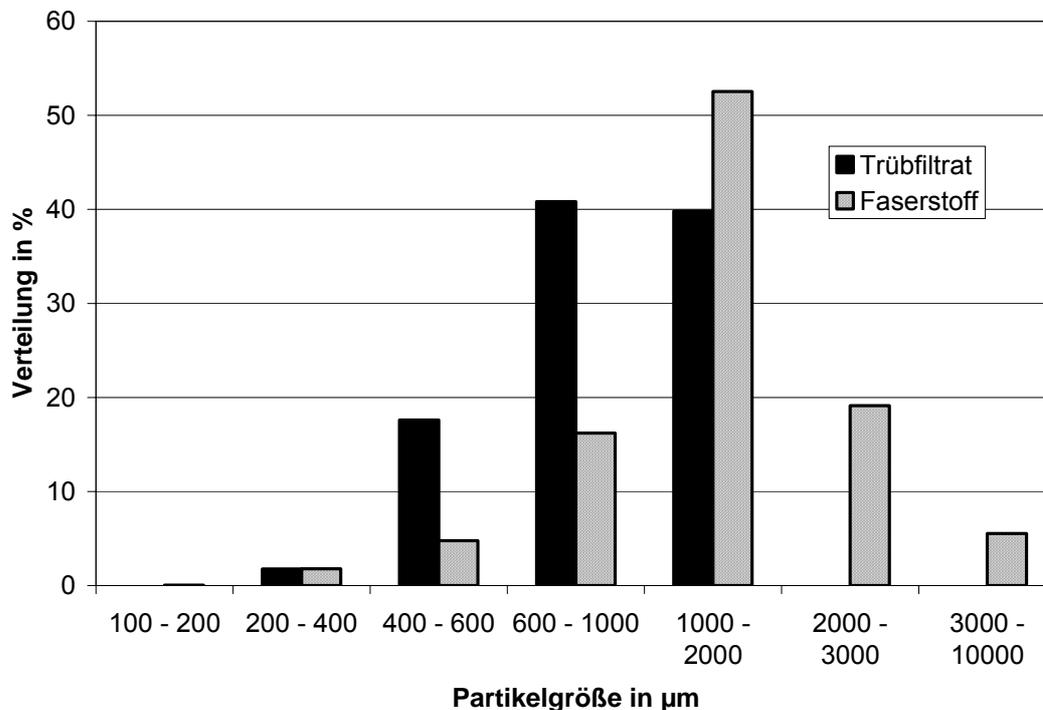


Abb. 51: Vergleich der flächengewichteten Größenverteilung von Praxisproben

Das Potential des Impaktors als Online-Sensor zur Prozessoptimierung und Qualitätsüberwachung kann mit letzter Sicherheit nur im Praxistest abschließend bewertet werden. Ein noch zu lösendes Problem ist dabei der Vergleich der Messwerte des Impaktors mit denen der Labormethode.

Anders als die Modellsuspension beinhalten Praxisstoffe nicht nur flächige Stickys aus Haftetiketten, sondern eine undefinierte Mischung aus unterschiedlichen Applikationen. Voluminöse Stickys werden bei der Makrosticky-Messung nach INGEDE Methode 4 flachgepresst und ausgeschmolzen. Die Partikelgrößen der Labormessung lassen sich daher nicht ohne weiteres mit denen der Impaktor-Messung vergleichen.

5 Interpretation

Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den Versuchen mit der Faseroptik helfen bei der Interpretation der Versuchsergebnisse mit der Impaktor-Methode.

5.1 Analyse der Ergebnisse mit Lichtwellenleiter

Mit Hilfe der Faseroptik konnten grundlegende Untersuchungen zum Messprinzip und zur Klebrigkeit potentiell klebender Verunreinigungen in Faserstoffsuspensionen durchgeführt werden. Dabei erweist sich der Lichtwellenleiter als höchst empfindlicher Sensor aber auch als empfindlich im Sinne seiner Handhabung. Andererseits kann die Faseroptik sehr flexibel und direkt in Faserstoffsuspensionen eingesetzt werden.

Die beobachteten Effekte bei der Annäherung von Partikeln, wie Stickys und Fasern, gehen von der Störung der evaneszenten Welle aus. Die massive Störung der Totalreflexion durch Kontakt mit der Sensorfläche ist in wässriger Umgebung eher die Ausnahme. Dieser Kontakt kann aber strömungstechnisch forciert werden. Unter besonderen Randbedingungen, wie z. B. hohen Temperaturen, findet eine spontane, dauerhafte Anlagerung statt.

Die Faseroptik kann als Sensor für die Klebrigkeit eingesetzt werden. Mit Hilfe des K-Wertes, der sich aus dem Signalverlauf errechnet, der sich bei Annäherung und Kontakt mit einer Probe ergibt, lassen sich bei überschaubarem Aufwand Substanzen unter Variation der Umgebungsbedingungen testen.

Die Analyse der Signale aus den Versuchen mit Faserstoffsuspensionen brachte keine befriedigende Lösung zur Quantifizierung von Stickys und deren Größenverteilungen. Das Problem liegt in der Überlagerung unterschiedlicher Suspensionsbestandteile. Nur bedingt können Signalbreiten und Amplituden einzelnen Fasern zugeordnet werden. Vielfältig sind Art und Weise, wie eine Faser die Sensorfläche passiert. Bei höheren Stoffdichten wird die Messstelle nicht mehr von einzelnen Fasern, sondern überwiegend von Flocken gestreift. Möglicherweise kann aus dem Messprinzip mit der Faseroptik ein Stoffdichtesensor entwickelt werden. Dessen ungeachtet liegt das größte Potential in der Erfassung von Mikrostickys in einer ggf. erhitzten Probe.

5.2 Analyse der Ergebnisse mit Impaktor

Die Stärke des Impaktors liegt in der Kombination physikalischer Effekte mit einem bildgebenden Detektor. Die Prallströmung separiert Partikel und bringt diese nahe genug an das Messfenster, um von der evaneszenten Welle erfasst zu werden. Eine Hochgeschwindigkeitskamera detektiert das von Partikeln aus dem Messfenster ausgekoppelte und gestreute Licht. Die entwickelten bildanalytischen Algorithmen werten die aufgezeichneten Bildsequenzen hinsichtlich Partikelanzahl und Partikelgröße aus.

Partikelgrößenverteilungen des Impaktors lassen sich mit denen der Labormessung unter der Annahme vergleichen, dass Stickys ihre Größe bei der Labormessung durch Flachpressen und Ausschmelzen nicht signifikant ändern. Diese Annahme kann für Modellsuspension mit ihren überwiegend flächigen Stickys getroffen werden, jedoch nicht für Suspension aus der Praxis.

Die Partikelgrößenverteilung, die mit dem Impaktor an Modellsuspensionen ermittelt wurde, zeigt einen zur Labormessung relativ geringen Anteil an kleinen Partikeln im Intervall von 100 μm bis 200 μm . Eine mögliche Ursache liegt in Separation von Partikeln in der Prall-

strömung. Die Wahrscheinlichkeit, ob ein Partikel das Messfenster tangiert, kann für kugelförmige Partikel berechnet werden. Abb. 52 veranschaulicht die theoretische Detektionswahrscheinlichkeit für eine Austrittsgeschwindigkeit der Suspension an der Düse von $v_0 = 20$ m/s.

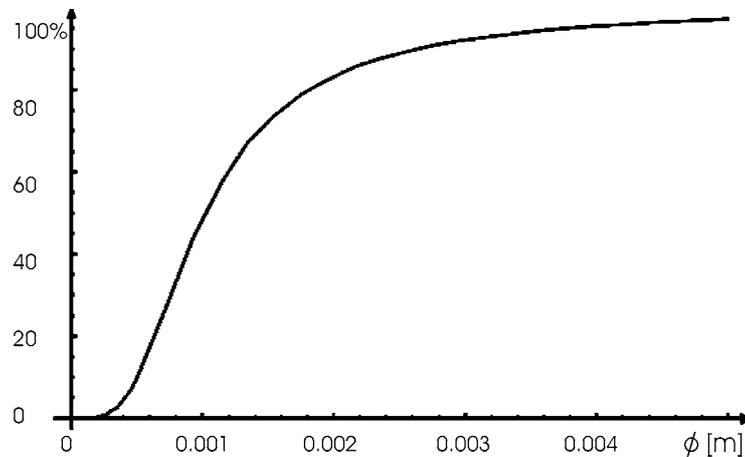


Abb. 52: Theoretische Detektionswahrscheinlichkeit bei $v_0 = 20$ m/s ($\cong 2$ bar)

Wie sich flächige Stickys in der Strömung verhalten, lässt sich mit diesem Modell nicht berechnen. Offensichtlich werden mehr kleine Partikel erfasst als die dargestellte Kurve erwarten lässt.

Betrachtet man die flächengewichtete Größenverteilung, so fällt der Unterschied zur Labormessung geringer aus. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Makrostickys in der Modellsuspension dominieren, die sich mit dem Impaktor gut erfassen lassen.

In der Praxis soll ein Online-Sensor in erster Linie Trends zuverlässig erfassen. Erst in zweiter Linie steht die Frage, welche Genauigkeit wird im Vergleich zu einer Labormessung erreicht. Insofern haben die Versuche an Modellsuspensionen und Suspensionen aus der Praxis die Funktionstüchtigkeit des Demonstrators gezeigt.

6 Anwendung und Ausblick

Ein mögliches Einsatzgebiet der Faseroptik ist die Messung von Mikrostickys, die sich bei Temperaturen um 80°C dauerhaft anlagern. Denkbar ist der Einsatz im Bereich einer Dispergierung ohne zusätzliche Heizung oder mit einer Probenerhitzung an einer beliebigen Position im Prozess. Beide Applikationen erfordern eine zyklische Reinigung der Sensorfläche. Die sukzessive Belegung der Sensorfläche lässt das DC-Signal bis auf einen Schwellenwert für die Sensorreinigung sinken. Diese Anordnung kommt ohne teure Hochfrequenztechnik aus.

Der Impaktor eignet sich für die zeitnahe Erfassung von Makrostickys in Faserstoffsuspensionen. Er kann prinzipiell zur Qualitätsüberwachung und zur Prozessoptimierung in den Verfahrensstufen eingesetzt werden, um z. B. die Abscheidung von Makrostickys bei der Feinreinigung oder bei der Druckfarbenentfernung zu bewerten. Denkbar ist auch der Einsatz des Impaktors zur Überwachung von Kreislaufwässern und deren Reinigung.

Der im Rahmen dieses Projektes als Demonstrator entwickelte Impaktor kann nun als online Sticky-Sensor zur Marktreife gebracht werden.

7 Literaturverzeichnis

- 1 Moreland, R. D.: Stickys Control by Detackification. TAPPI Pulping Conference 1986, TAPPI Press, Atlanta, 193-196
- 2 Faul, A.: Stickies Terminology – The Zellcheming Approach. Progress in Paper Recycling 11(2002): February pp. 66-69
- 3 N. N.: Test Methods for Assessing Stickey Contamination-A Review. 1987 TAPPI Pulping Conference, TAPPI Press, Atlanta, 725-728
- 4 Scholz, W. F.: Summary of Stickys Test Methods. In: Paper Recycling Challenge / M. R. Doshi [Hrsg.]. Appleton, WI : Doshi & Associates, 1997
- 5 Esser, A.; Auhorn, W.J.: Reaktionsmechanismen kationischer Polymere mit partikulären und löslichen Störstoffen. Wochenblatt für Papierfabrikation 129(2001), Nr. 23/24, S. 1597-1602.
- 6 Krauthauf, T.; Ackermann, A.; Putz, H.-J.: Möglichkeiten und Grenzen bestehender Sticky-Bestimmungsmethoden. Wochenbl. f. Papierfab. 126 (1998), Nr. 3, 81-84
- 7 Jean, M.; Nguyen, X. T.: Quantification and Removal of Stickys from OCC Waste Papers. CPPA: 2nd Research Forum on Recycling 1993, 61-69
- 8 Klungness, J. H.; Fernandez, L. E.; Plantinga, P. L.: Image Analysis for Measuring Adhesive Contaminants in Pulp. Rec. Paper: From Fiber to Finish Products. TAPPI-Press Atlanta, 1990, Vol. 1, 455-461
- 9 Cathie, K.; Haydock, R.; Dias, I.: Understanding the Fundamental Factors Influencing-Stickys Formation and Deposition. Pulp Paper Can. 93 (1992), Nr. 12, 157-160
- 10 McKinney, R. W. J.; Currie, P. C. G.: Stickey Pacification - New Additive Shows Considerable Promise. 1986Tappi Papermakers Conference, TAPPI Press, Atlanta, 161-168
- 11 Fukui, T.; Okagawa, A.: The Use of a Rotating Felt to Study the Behavior of Organic Colloids in Papermaking Stock. Tappi J. 69 (1986), Nr. 9, 134 - 135
- 12 Elsbey, L. E.: Experiences from Tissue and Board Production Using Stickys Additives. 1986TAPPI Pulping Conference, TAPPI Press, Atlanta, 187-191
- 13 Krauthauf, T.; Putz, H.-J.; Göttching, L.: Stickymessung mittels Adsorption nach der neuen INGEDE-FAC-Methode - Hintergründe und Erfahrungen. Wochenblatt für Papierfabrikation 128 (2000), Nr. 10, 658-665
- 14 Dykstra, G. M.; May, O. W.: Controlling Stickys with Water Soluable Polymers. 1987 TAPPI Pulping Conference, TAPPI Press, Atlanta, 585-596
- 15 Doshi, M. R.: Additives to Combat Sticky Contaminants in Secondary Fibers. Tappi Contaminant Problems and Strategies in Wastepaper Recycling Seminar. Madison 1989, 81-85
- 16 Putz, H.-J.; Hamann, A.: Methodenvergleich zur Bestimmung von Mikro-Stickys. Wochenblatt für Papierfabrikation 131(2003), Nr. 5, S. 218-225.
- 17 Gruber, E.; Gattermayer, J.; Pätzold, R.: Zur Adsorption fein dispergierter Polymere mit klebendem Potential (Mikrostickies). Int. Papierwirtschaft/Das Papier (2000), Nr. 5, S. T74-T80.
- 18 Hamann, A.: Untersuchung des Ablagerungsverhaltens klebender Verunreinigungen bei der Papierherstellung aus Altpapier. Dissertation, TU Darmstadt, 2003

- 19 Göttsching, L.; Pakarinen, H.: Recycled Fiber and Deinking. In: Papermaking science and technology. Vol. 7. Darmstadt, 1999, ISBN 952-5216-07-1
- 20 Wilken, R.: Skript zur Vorlesung Papierverarbeitung. TU Darmstadt, Stand 2004
- 21 Hampe, M.: Skript zur Vorlesung Grenzflächenverfahrenstechnik, TU Darmstadt, Stand 2006
- 22 Kortüm, G.: Reflexionsspektroskopie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969
- 23 Pedrotti, F. L.; Pedrotti, L. D.; Bausch, W.; Schmidt, H.: Optik für Ingenieure. Kap. 3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- 24 Barabas, U.: Optische Signalübertragung. Kap. 2.2.1, R. Oldenburg Verlag München Wien, 1993
- 25 Jahns, J.: Fotonik; Grundlagen, Komponenten und Systeme. Kap. 7.2, Oldenburg Verlag München Wien, 2001
- 26 Engelage, D.: Lichtwellenleiter in Energie- und Automatisierungsanlagen. Kap.2, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986.
- 27 Kersten, R.T.: Einführung in die optische Nachrichtentechnik. Kap. 2.6, Springer-Verlag, Heidelberg, 1983.
- 28 Sensfelder, E.: Entwicklung und Charakterisierung eines faseroptischen Meßsystems zur Erkennung und Ortung von Leckagen in chemikalienhaltigen Anlagen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997.
- 29 Unger, H.-G.: Optische Nachrichtentechnik. Band 1: Optische Wellenleiter. 3. Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1993.
- 30 Schwarz, J.; Haberhauer, R.; Krokisius, R.: Dämpfung in LWL-Krümmungen. Test Kompedium 2002, Kap. Optische Messtechnik, publish-industry Verlag GmbH, München, 2002
- 31 Pedrotti, F. L.; Pedrotti, L. D.; Bausch, W.; Schmidt, H.: Optik für Ingenieure. Kap. 20, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- 32 Spurk, J.H.: Strömungslehre Eine Einführung in die Theorie der Strömungen mit Aufgaben. Berlin: Springer, 2003, S290
- 33 Löffler F.; Raasch, J.: Grundlagen der mechanischen Verfahrenstechnik. Oldenburg, Vieweg ISBN 3-528-08341-7

8 Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF Nr. 14168 N wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt. Unser Dank gilt weiterhin den Projektbegleitern aus der Papierindustrie für deren Unterstützung.

Anhang A: Technische Zeichnungen

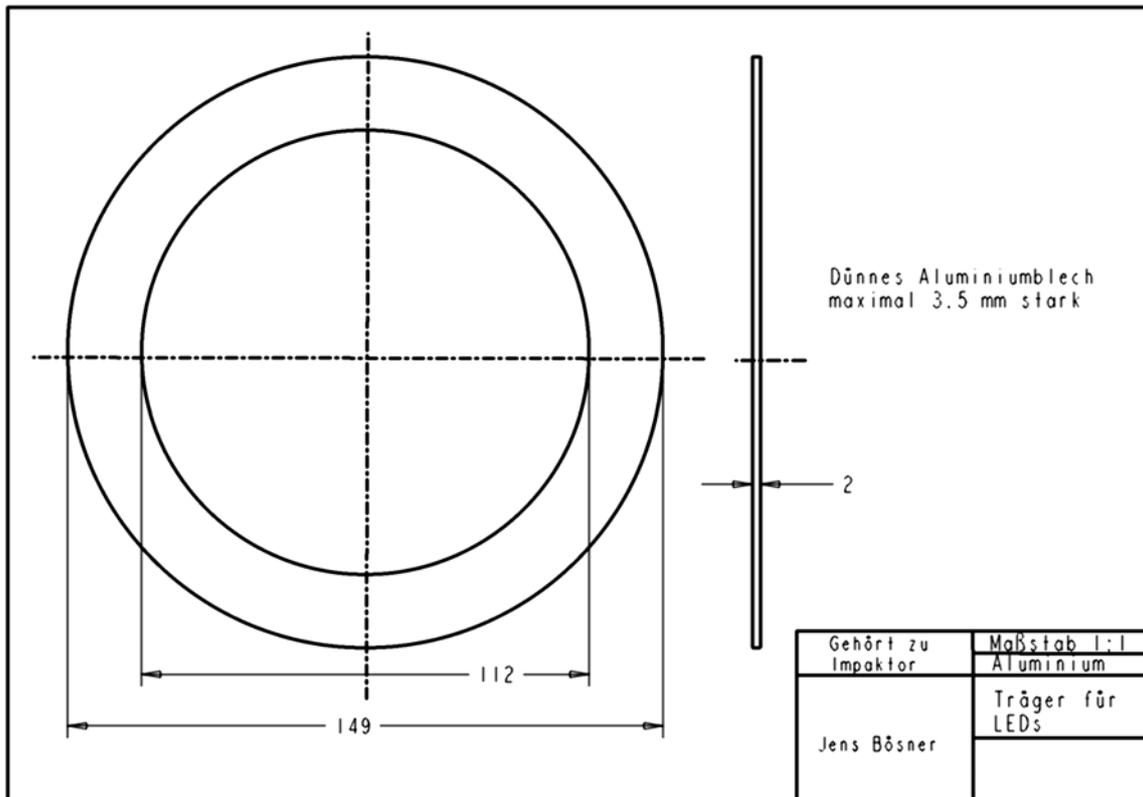


Abb. 53: Impaktor I: Trägerplatte für die LEDs

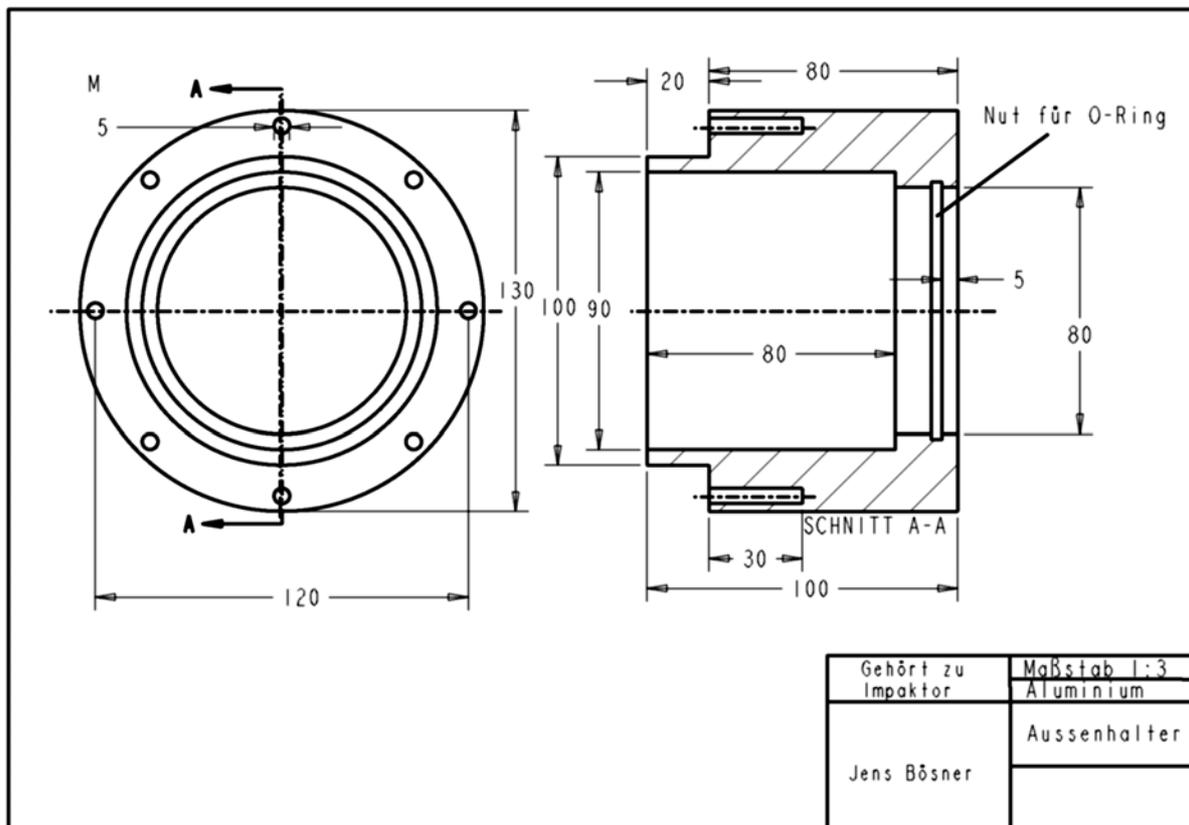


Abb. 54: Impaktor I: Außenring der Düsenhalterung

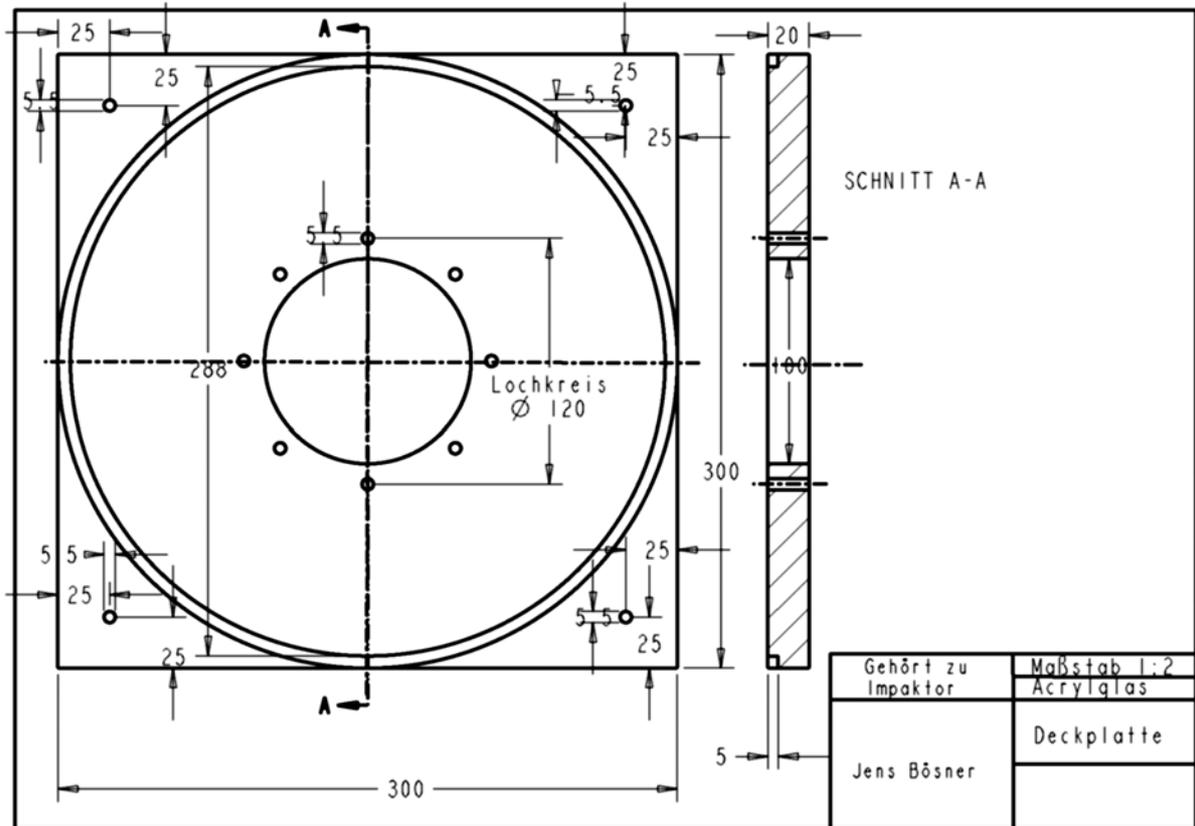


Abb. 55: Impaktor I: Deckplatte

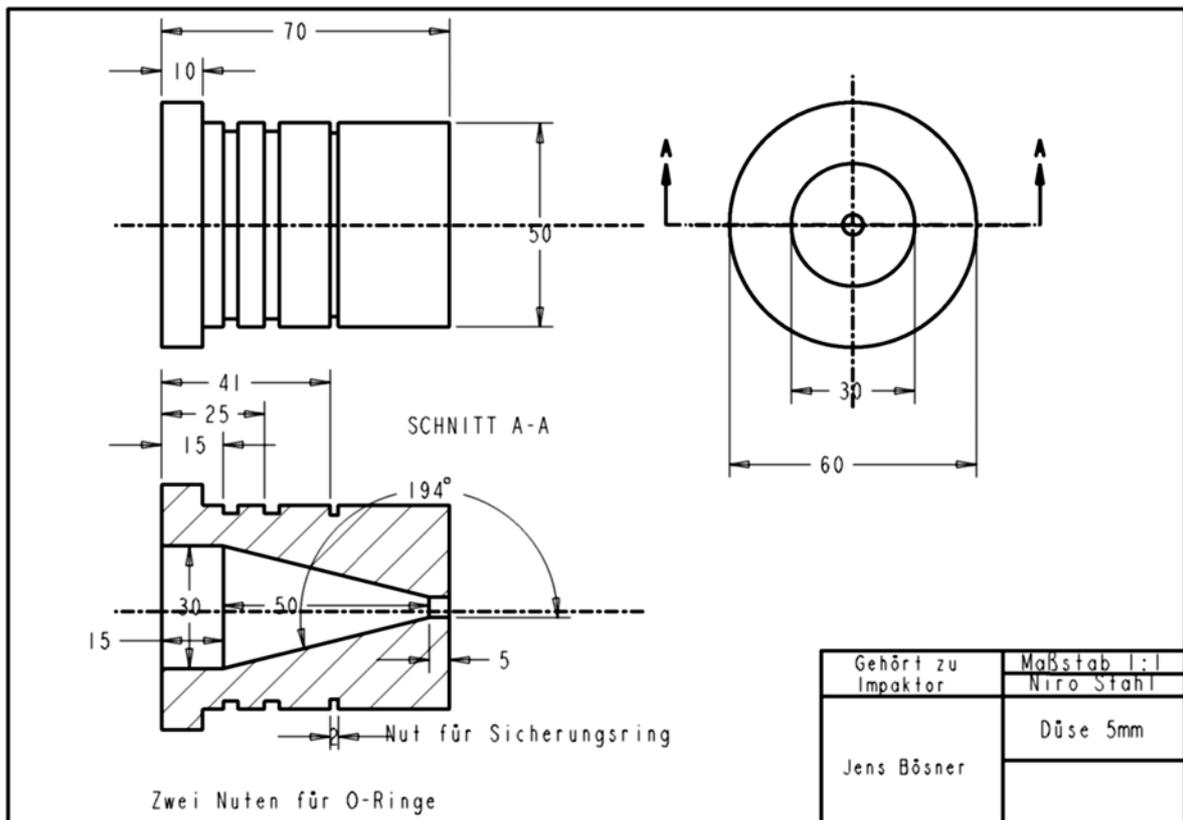


Abb. 56: Impaktor I: Düse mit kegelförmigem Einlauf

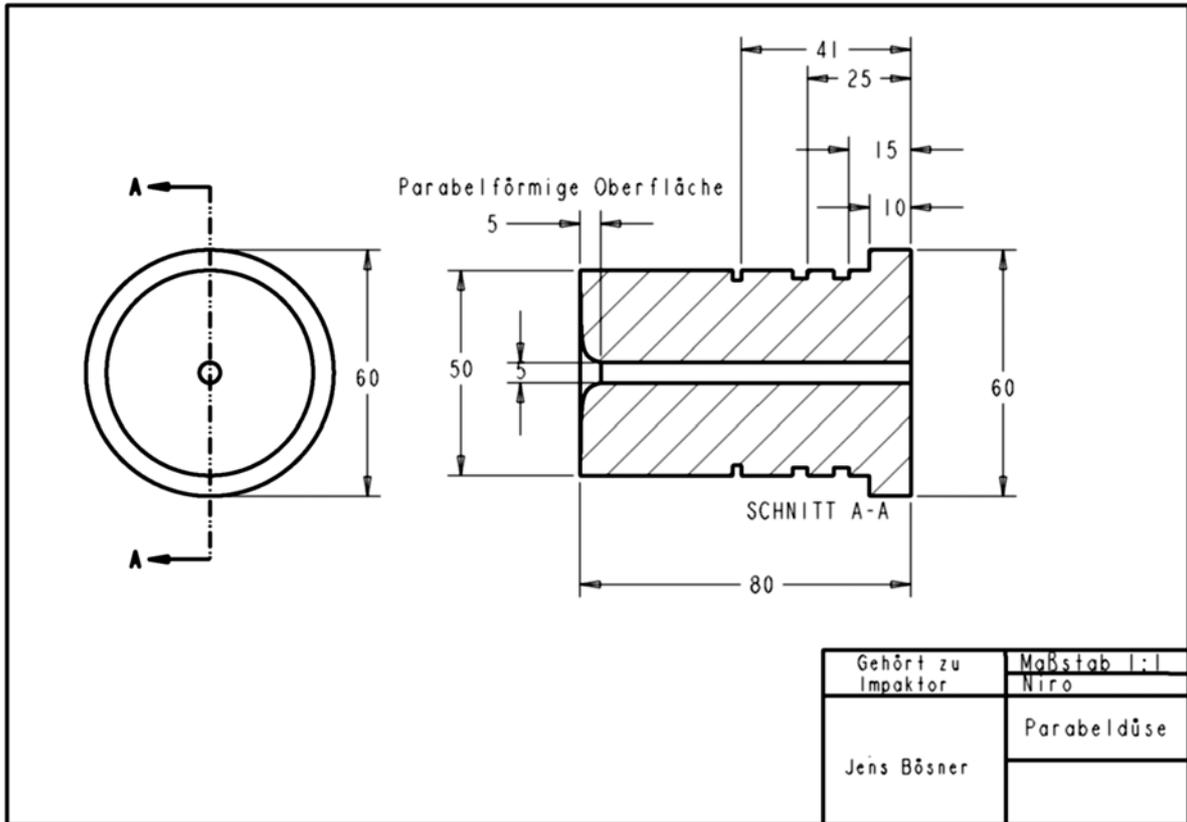


Abb. 57: Impaktor I: Düse mit parabelförmigem Auslauf

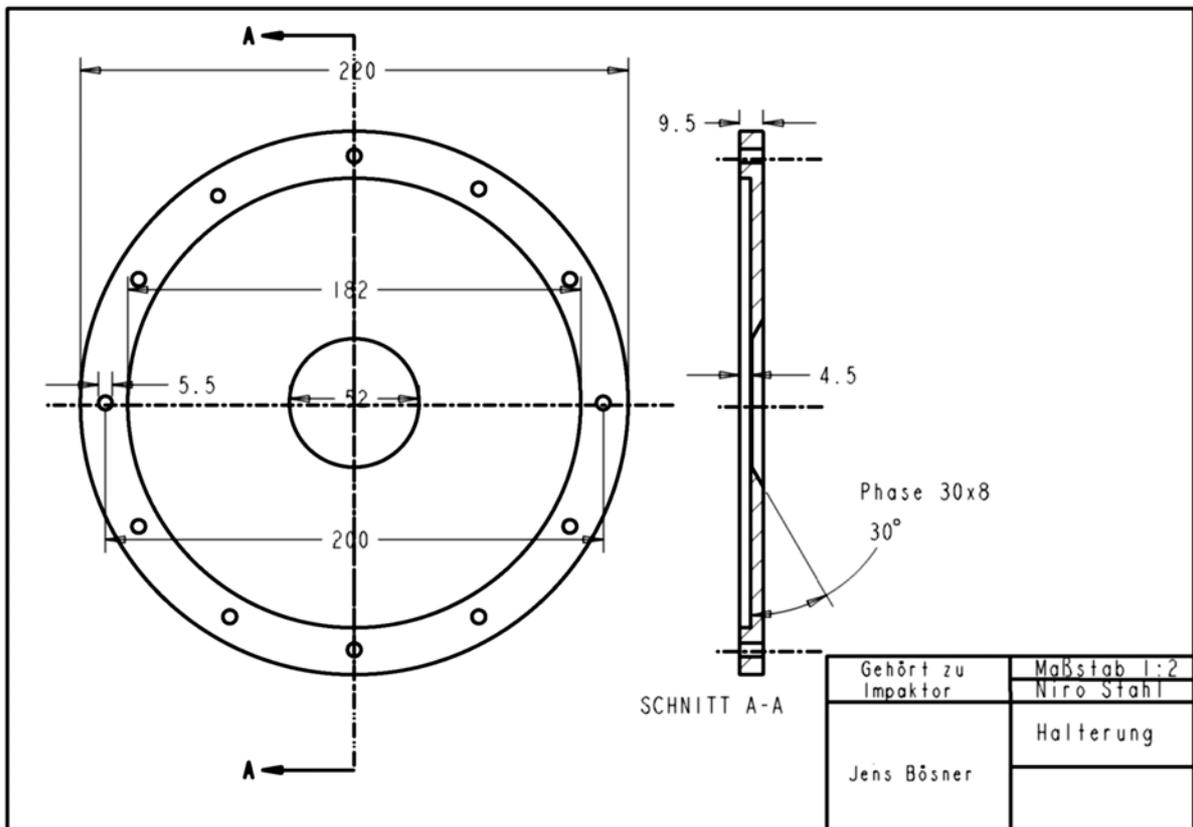


Abb. 58: Impaktor I: Niederhalter für die Glasscheibe

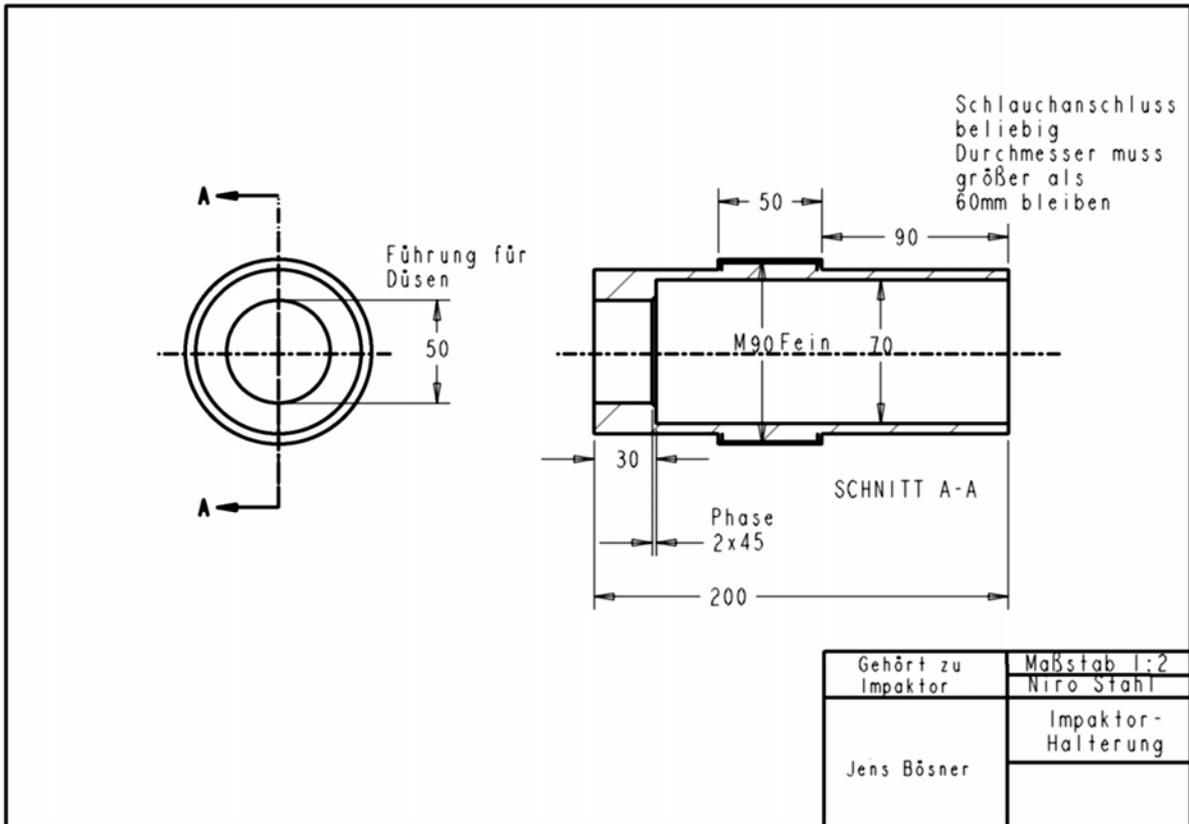


Abb. 59: Impaktor I: Düsenhalterung mit Höhenverstellung

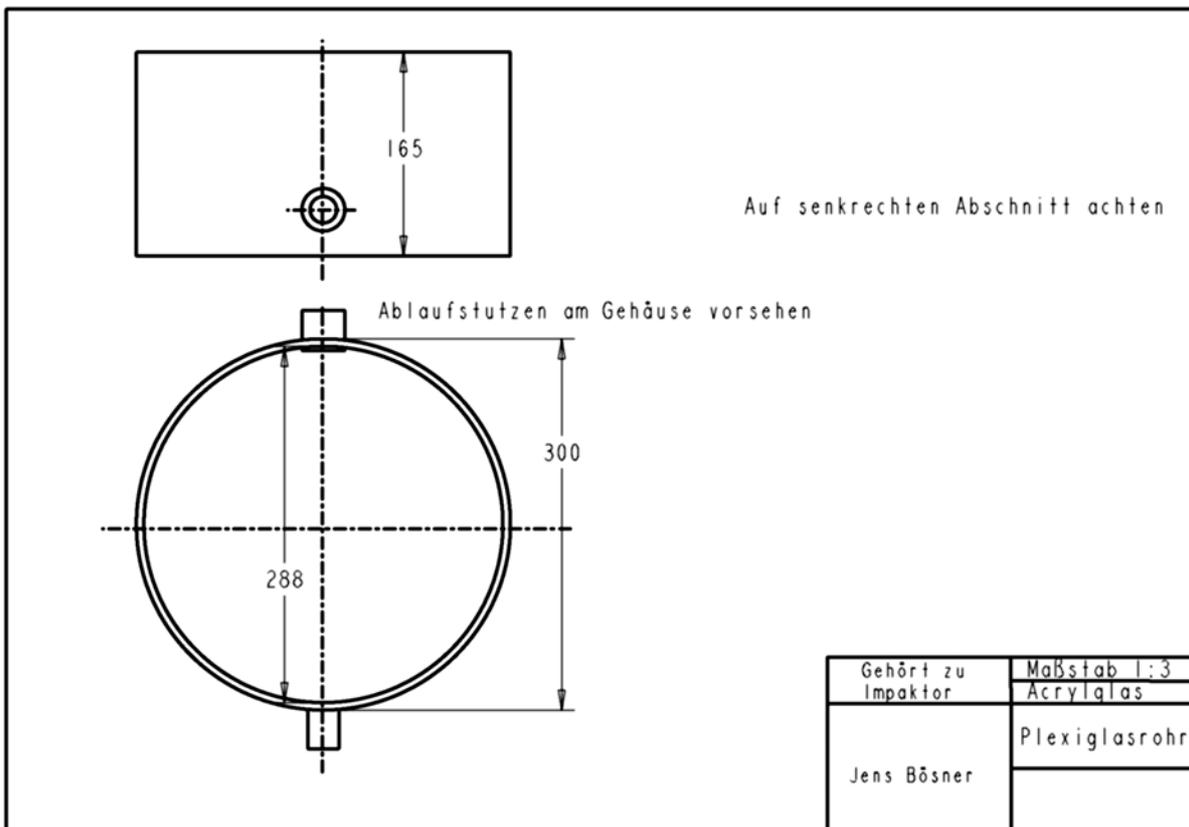


Abb. 60: Impaktor I: Mantel des Impaktorbehälters

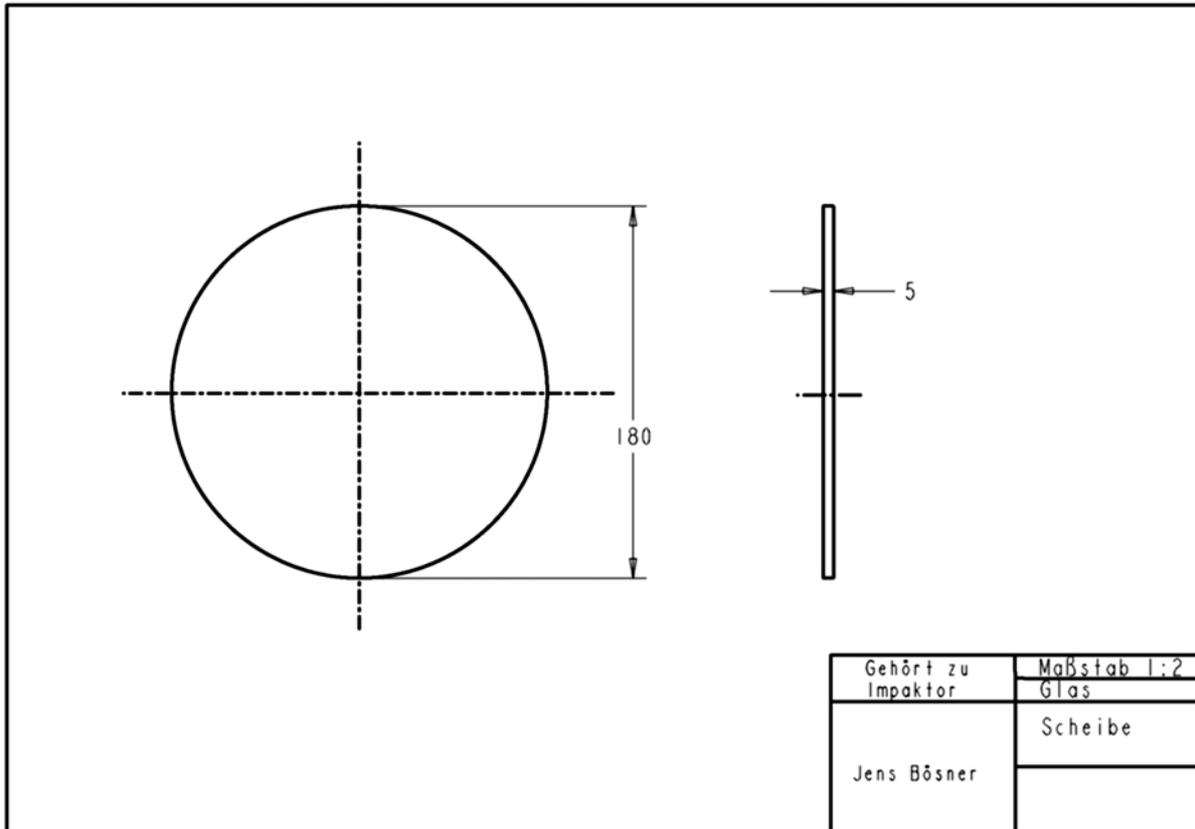


Abb. 61: Impaktor I: Gläsernes Messfenster

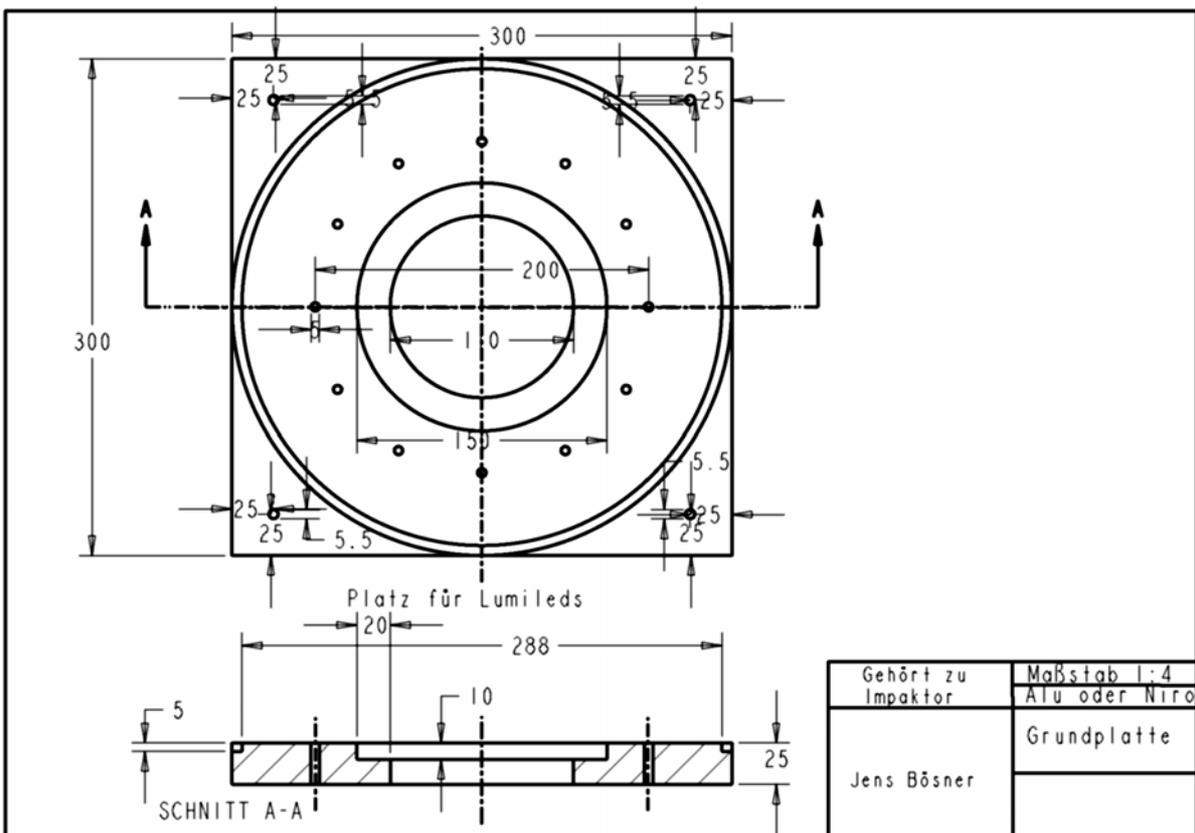


Abb. 62: Impaktor I: Trägerplatte für Impaktormontage

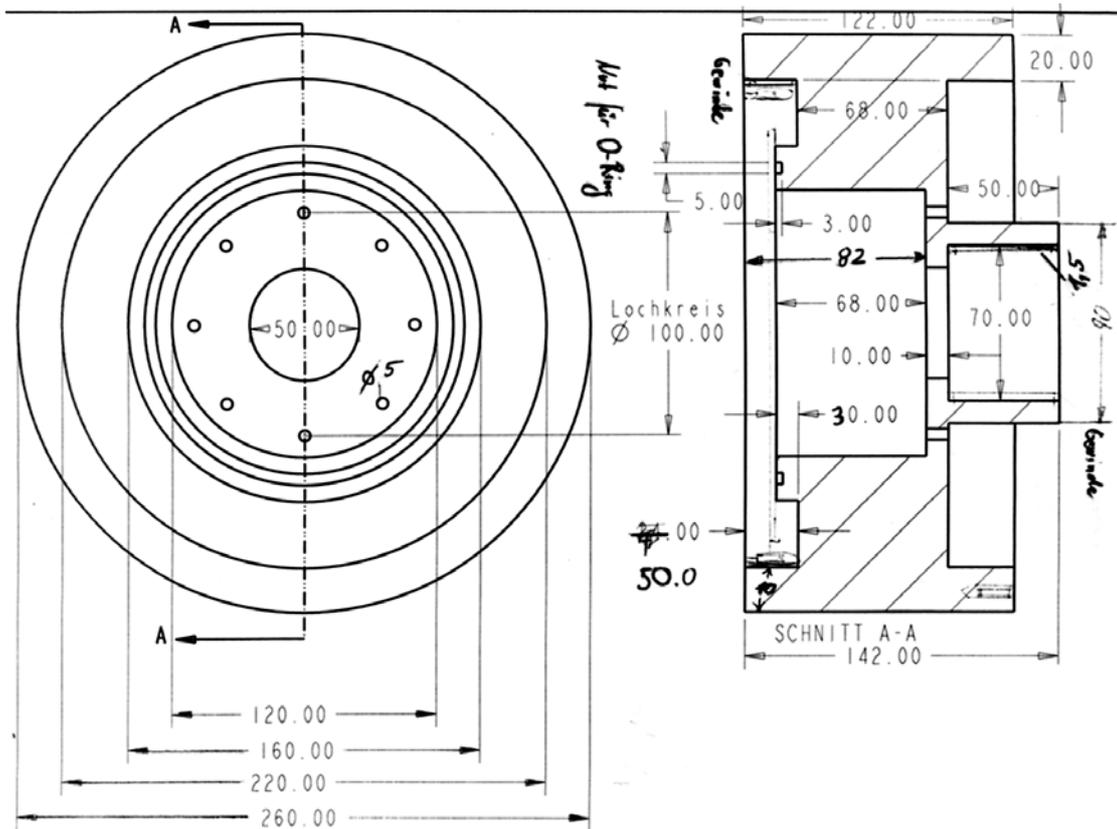


Abb. 63: Impaktor II: Basiseinheit mit Düsenhalter und Aufnahme für Messfenster

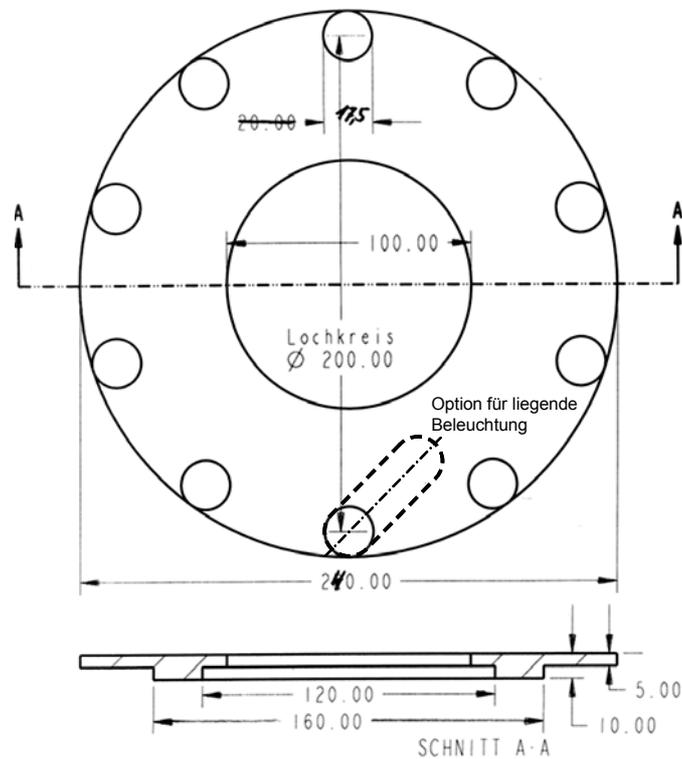


Abb. 64: Impaktor II: Halterung für Messfenster mit Öffnungen für Beleuchtung