

Förderkennzeichen: 01RC0181, 01RC0182, 01RC0183, 01RC0184, 01RC0185,
01RC0186

Zuwendungsempfänger: Universität Duisburg-Essen (UNI), Eta Kunststofftechnologie GmbH (ETA), Windmüller und Hölscher KG (W&H), Reifenhäuser GmbH & Co Maschinenfabrik (Reif), Kobusch Sengewald GmbH & Co. KG (Seng), Rheinische Kunststoffwerke AG (RKW)

BMBF-Förderschwerpunkt: Integrierter Umweltschutz in der Kunststoff- und Kautschukindustrie

Vorhabenbezeichnung: "Entwicklung von produktionsintegrierten Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltbelastungen bei der Blasfolienextrusion"

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2002 - 28.02.2005

Verlängert bis : 30.06.2005

Bericht erstellt: 22.12.2005

A B S C H L U S S B E R I C H T

über den Stand der Arbeiten am 30.06.2005

von

Prof. Dr. Ing. J. Wortberg, Dipl. Ing. H. Niemeier, Dipl. Ing. C. Groß; Universität Duisburg

Dr. Ing. R. Michels; Eta Kunststofftechnologie GmbH

Dr. Ing. C. Herschbach, Dipl.-Ing. B. Moorkamp; Windmüller und Hölscher KG

Dr. Ing. F. Pöhler, Dr. Ing. J. Spirgatis; Reifenhäuser GmbH & Co Maschinenfabrik

Dipl. Ing. R. Schweinitz, Dipl. Ing. D. Kaase; Kobusch Sengewald GmbH & Co. KG

F. Busmann, Dr. S. Forster; Rheinische Kunststoffwerke A

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Ziele	1
1.1	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen.....	2
1.2	Planung, Ablauf und bisherige Arbeiten der Antragsteller	3
1.3	Stand der Wissenschaft und Technik	12
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	19
2.	Auswertung historischer Produktionsdaten	20
3.	Prozessführung bei Spülprozessen	26
3.1	Vorbereitungen	26
3.2	Ausarbeitung von Vergleichsstandards	28
3.3	Erfassung von Ist-Zuständen der Spülprozesse und -vorschriften	29
3.4	Einfluss der Prozessführung auf den Spülvorgang.....	31
3.4.1	Einfluss des Massedurchsatzes	32
3.4.2	Einfluss der Verarbeitungstemperatur.....	39
3.5	Einfluss von Spülmedien auf den Spülvorgang	41
3.6	Einfluss des Pigmentbatches auf den Farbwechsel	43
3.6.1	Versuchsschwerpunkte zum Einfluss des Farbmasterbatch auf den Spülprozess	46
3.6.2	Versuche zum Einfluss der Pigmentgröße	48
3.6.2.1	Versuche mit anorganischen Pigmenten	49
3.6.2.2	Vergleich zweier Farbrüße	52
3.6.2.3	Vergleichende Versuchsergänzungen.....	53
3.6.2.4	Versuche mit organischen Pigmenten	55
3.6.2.5	Zusammenfassung und Auswertung	57
3.6.3	Einfluss von Dispergiermitteln auf den Spülprozess	60
3.7	Erprobung der optimierten Spülprozesse in der Produktion	62
4.	Durchführung und Auswertung von Extrusionsversuchen	68
4.1	Konstruktion eines Versuchswerkzeuges	69
4.1.1	Aufbau des Versuchsstandes	70
4.1.2	Versuchsdurchführung	71
4.2	Farb-Masterbatches	72
4.3	Verwendete Pigmente	73
4.3.1	Ultramarinblau (Pigmentblau 29)	73
4.3.2	Kupfer-Phthalocyanine Pigment (Pigmentblau 15)	74
4.3.3	Untersuchung des Spülverhaltens von Farb-Masterbatchen	74
4.3.4	Versuchsauswertung	77
4.4	Untersuchungen zur Verweilzeitcharakteristik von Extrusionswerkzeugen	80
4.5	Werkzeugbeschichtungen	87
4.5.1	Anforderungen an eine Beschichtung	88
4.5.2	Beschichtungstypen	91
4.6	Spülverhalten verschieden beschichteter Werkzeuge	95

4.7	Oberflächenenergie und Adhäsion	97
4.7.1	Kontaktwinkelmessung mittels der Sessile Drop Methode.....	106
4.7.2	Einfluss der Probenvorbereitung auf den Kontaktwinkel	106
4.7.3	Einfluss des Tropfenvolumens auf den Kontaktwinkel	107
4.7.4	Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Oberflächenenergie.....	110
4.7.5	Messung der Oberflächenenergie verschieden beschichteter Metalloberflächen.....	111
4.8	Anbackversuche	117
4.9	Untersuchung ausgewählter Oberflächenbeschichtungen an einer Blasfolienanlage unter Produktionsbedingungen.....	119
4.9.1	Parameter der Blasfolienanlage	119
4.9.2	Versuchsdurchführung	120
4.9.3	Eingesetzte Rohstoffe	121
4.9.4	Eingesetzte Oberflächenbeschichtungen	122
4.9.5	V Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Blaskopfbeschichtungen	123
4.9.6	Bewertung der Ergebnisse	128
5.	Einfluss verschiedener Fließkanalgeometrien auf das Spülverhalten von Extrusionswerkzeugen	130
5.1	T-Verteiler.....	131
5.2	90°-Umlenkung.....	134
5.2.1	Optimierung einer 90° Umlenkung mit ovalem Querschnitt....	140
5.2.2	Automatisierte numerische Optimierung einer 90°- Umlenkung	145
5.2.3	Durchführung der Optimierung.....	148
5.2.4	Optimierungsergebnisse	151
5.2.5	Experimentelle Untersuchungen	157
5.3	Beschichtungsmodul.....	160
5.3.1	Motivation.....	160
5.3.2	Konzept.....	160
5.3.3	Umsetzung des Konzeptes	161
5.3.4	Versuchsdurchführung	163
5.3.5	Ergebnis der Auswertung	164
5.3.6	Konzeptbewertung und Ausblick	166
5.4	Abschöpfmodule	167
5.4.1	Praktische Erprobung.....	168
5.4.2	Ausblick.....	172
5.5	Schmelzeumschichter.....	172
5.6	Extrusionswerkzeuge mit spülzeitoptimierten Fließkanalgeometrien	174
5.6.1	Spülzeitoptimiertes 1-Schicht-Blasfolienwerkzeug	175
5.6.2	Spülzeitoptimiertes Dünnschichtpaket für ein 6-Schicht- Werkzeug	177
5.7	Erprobung einer spülzeitoptimierten Werkzeuggeometrie an einem Mehrschicht-Blaskopf	180

6. Alternative Steuer- und Regelungskonzepte für Anfahr- und Produktwechselfvorgänge	181
6.1 Analyse vorhandener Steuerungskonzepte.....	181
6.2 Bewertung der Prozessfähigkeit der Anlagen.....	184
6.3 Entwicklung von Strategien und Konzepten für schnelle Anfahr- und Produktwechselfvorgänge	184
6.4 Umsetzung der entwickelten Konzepte	185
6.5 Vergleichsversuche mit dem automatischen Spülprogramm.....	188
7. Zusammenfassung	191
8. Literaturverzeichnis	194
9. Veröffentlichungen und Patentanmeldungen.....	197
10. Anhang	199

1. Einleitung und Ziele

Zunehmende Produktkomplexität in Verbindung mit kleiner werdenden Fertigungslosgrößen erfordern technologische Lösungen zur Verbesserung des Ressourcen- und Energieverbrauchs in der Extrusionstechnik. Ziel des Vorhabens war deshalb die Reduzierung von Umweltbelastungen bei der Blasfolienextrusion durch Verminderung der Abfälle bei Produktwechseln und durch Verkürzung der Produktwechselzeiten. Im Vordergrund stand die Entwicklung von produktionsintegrierten Maßnahmen zur Beschleunigung und Optimierung der Produktwechsel.

Zum Erreichen des beschriebenen Gesamtziels wurden folgende Teilziele verfolgt:

- Abfallminderung bei Produktwechseln durch verbesserte Prozessführung bei Spülvorgängen und optimierten Einsatz von Spülmedien.
- Abfallminderung bei Produktionswechseln seitens der Anlagentechnik durch engere Verweilzeitspektren in den schmelzeführenden Anlagenteilen. Verbesserungen durch Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen sowie der Geometrieoptimierung der Schmelzkanäle.
- Alternative Steuer- und Regelungskonzepte für schnellere Anfahr- und Produktwechselvorgänge.
- Analyse ausgewählter rohstoffseitiger Einflussfaktoren zur Schaffung einer erweiterten Verständnisbasis.

Zum Erreichen der definierten Zielsetzungen ist eine ganzheitliche Betrachtung der Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Roh- und Zusatzstoffen, der Anlagentechnik und der Prozessführung erforderlich. Durch die Einbeziehung der Verarbeiter sowie der Anlagen- und Rohstoffhersteller in das vorliegende Verbundprojekt sollen Synergieeffekte gefördert werden.

Grundlage für die Untersuchungen sind die aktuellen Produktionsprozesse bei den beteiligten Folienherstellern und der heutige Stand der Anlagentechnik in der Blasfolienextrusion. Es sollen Prozesse und Anlagenbestandteile mit Verbesserungspotenzial aufgedeckt und im Einzelnen optimiert werden. Diese Verbesserungen werden in der laufenden Produktion eingesetzt und im Vergleich zu einer vorangegangenen Ist-Zustands-Analyse bewertet.

1.1 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

In der Bundesrepublik Deutschland wurden 1997 insgesamt etwa 9 Mio. t Kunststoffe verarbeitet. Hierbei entfielen von den etwa 3,2 Mio. t Kunststoffabfällen ca. 897 kt auf die Kunststoffverarbeiter. Von diesen Abfällen wurden rund 93% verwertet und 7% beseitigt.

Ziel des vorliegenden Antrags ist es, durch Nutzung des innovativen technologischen Potenzials des produktionsintegrierten Umweltschutzes (PIUS) das Abfallaufkommen im Bereich der Blasfolienextrusion zu reduzieren.

Erreicht werden soll dies durch prozess- und maschinentechnische Verbesserungen zur Verkürzung der für den Produktwechsel benötigten Zeit, wodurch gleichzeitig das Abfallaufkommen reduziert wird. Zur Verminderung der Umweltbelastungen sollen vor allem produktionsintegrierte Maßnahmen Verwendung finden. Durch eine Verbesserung der Prozesstechnik im Bereich der Anlagensteuerung und der Werkzeugtechnik soll das Abfallaufkommen vermindert werden, was gleichzeitig die Ressourcenproduktivität erhöht. Des Weiteren sorgen Maßnahmen zur Verbesserung der Prozessführung bei Spülvorgängen ebenfalls für eine Beschleunigung des Produktwechsels. Nicht zuletzt trägt auch die Aufstellung einer Ökobilanz zur Bewertung der Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf die umwelttechnischen Verbesserungen bei. Sie kann außerdem weitere Optimierungspotenziale aufdecken, die unter anderem auch eine Verbesserung der Energieeffizienz bei der Blasfolienextrusion ermöglichen.

Durch die Umsetzung der Projektziele wird unter anderem auch die Wettbewerbsfähigkeit der am Projekt beteiligten Unternehmen gefördert. Während die Folienhersteller aufgrund der beschleunigten Produktwechsel und den damit verbundenen Einsparungen ihre Anlagenproduktivität steigern können, wird bei den Anlagenherstellern durch die technische Weiterentwicklung ihrer Produkte deren Marktposition gestärkt. Diese Verbesserungen in der Produktions- und Anlagentechnik bringen zunächst ökonomische Vorteile für die beteiligten Partner. Letztendlich wird durch eine Verkürzung der Produktwechsel jedoch auch ganz eindeutig eine Reduzierung der Umweltbelastung (Energieverbrauch, Kunststoffabfälle) erreicht. Angesichts der gesamten Recyclingproblematik bleibt nicht zu vergessen, dass auch durch Sortierung und Verwertung von Abfällen Energieressourcen verbraucht werden. Daher gilt auch in der Produktion, dass die Vermeidung von Abfall ökonomisch und ökologisch sinnvoller ist als dessen Verwertung.

Die erwarteten Ergebnisse lassen sich sehr gut auf andere wichtige Verarbeitungsprozesse wie die Flachfolienextrusion oder das Extrusionsblasformen übertragen, sodass mit diesem Verbundprojekt insgesamt ein sehr breites Anwendungsfeld erschlossen wird.

Nicht zu vernachlässigen ist der Aspekt, dass durch dieses Verbundprojekt die enge Kooperation von Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft mit der Wissenschaft gefördert

wird. Die zu lösenden Problemstellungen kommen direkt aus der kunststoffverarbeitenden Industrie und kommen dieser auch wiederum unmittelbar zugute.

1.2 Planung, Ablauf und bisherige Arbeiten der Antragsteller

Projektpartner:

Koordination: Universität Duisburg-Essen (Uni)

Anlagenhersteller: Reifenhäuser GmbH & Co. (Reif) Windmüller & Hölscher (W&H)
ETA Kunststofftechnologie GmbH (ETA)

Verarbeiter: Sengewald Verpackungen GmbH & Co. KG (Seng), Rheinische Kunststoffwerke RKW, (ehem. BP Chemicals PlasTec)

Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen (ehemaliger Bereich der Kunststoffmaschinen des IK², Institut für Kunststoffmaschinen und Kunststofftechnik der Universität Essen)

Im Zuge der Stärkung des Maschinenbaus an der Universität Duisburg verlagerte der Lehrstuhl Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen des IK² (Institut für Kunststofftechnik und Kunststoffmaschinen) der Universität Essen seinen Sitz am 1. Januar 2000 an die Universität Duisburg und wird im Folgenden als "Uni" abgekürzt. Es handelt sich hierbei lediglich um die Änderung des Namens und des Sitzes. Deshalb beziehen sich die Darstellungen auf die bisherigen Arbeiten des Antragstellers an der Universität Essen.

Die Uni beschäftigt sich intensiv mit den Themen der Hochleistungs-Einschneckenextrusion, der Auslegung von Extrusionswerkzeugen, der Blasformtechnik, dem Prozessmanagement und der Trocknungstechnik. Die Herstellung von Schlauchfolien ist am Lehrstuhl in den vergangenen Jahren vor allem mit dem Fokus auf die Folienkühlung betrachtet worden. In diesem Bereich wurden bisher zwei DFG-geförderte Forschungsprojekte bearbeitet, sowie ein aktuelles Forschungsprojekt genehmigt.

Zudem verfügt die Uni aus vielen Industrieprojekten heraus über umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Prozessanalyse und -optimierung bei den unterschiedlichsten Verfahren der Kunststoffverarbeitung.

Des Weiteren ist eine eigene Schlauchfolienanlage, mit der grundlegende Versuche zur Mono- und Coextrusion durchgeführt werden können, Teil der umfangreichen Ausstattung

des Technikums der Uni, zu der darüber hinaus ebenfalls verschiedene Messverfahren zur Analyse von Rohstoff- und auch Folieneigenschaften gehören.

Rheinische Kunststoffwerke RKW Werk Nordhorn (ehemals BP Chemicals PlasTec GmbH)

Das Werk Nordhorn ist eines von fünf kunststoffverarbeitenden Werken der BP Chemicals PlasTec GmbH mit Sitz in Dietenheim. In dieser GmbH sind die deutschen Werke der „Plastic Fabrication Group“ (PFG) der BP Amoco Chemicals Ltd., London zusammengefasst, der die BP Chemicals PlasTec GmbH zu 100% gehört. Deren Mutter ist die BP Amoco Ltd. Innerhalb der PFG gehört das Werk Nordhorn zur Business Unit „Film and Nonwoven“, zusammen mit den Werken Wasserburg und – teilweise - Gronau (Amoco Deutschland GmbH, der andere Teil gehört zu „Fibers and Fabrics“).

Das Vorhaben wird ausschließlich vom Nordhorner Werk bearbeitet, die folgenden Angaben beziehen sich deshalb auf das Werk Nordhorn:

1979 noch unter dem Namen AOL Plastik GmbH aufgebaut, produziert das Werk heute ca. 20.000 t Folie jährlich, davon 16.000 t PE-Blasfolien und 4.000 t PP-Gießfolie. Die geblasenen Folien werden im wesentlichen aus Mischungen von LDPE, LLDPE und Additiven wie zum Beispiel Farbmasterbatches, UV-Absorber und –Stabilisatoren, Gleitmittel, Verarbeitungshilfsmittel usw. hergestellt.

Es werden die Produktparten „Hygiene/Medizin“ (HM) und „Industrieverpackung“ (IP) unterschieden. Auf den Blasfolienextrusionsanlagen werden etwa 5.000 t Windelfolie für den Hygienemarkt hergestellt, die nach der Extrusion in einem zweiten Arbeitsschritt auf Prägekalandern weiterverarbeitet werden. Ferner stellt Nordhorn als Blasfolien ca. 2.000 t Flachfolie jährlich für unterschiedliche industrielle Anwendungen her sowie 9.000 t Schrumpfschlauch, der zur Palettensicherung verwendet wird.

Das Werk hat keine eigene Entwicklungsabteilung und ist Teil eines engen Verbundes mit dem Schwesterwerk Wasserburg. Dort ist der Sitz der Geschäftsleitung, der Entwicklung und des Rohstoffeinkaufes. Das Werk ist zertifiziert nach DIN ISO 9001.

Beide Werke zusammengenommen haben bei der Industrieverpackung mit ca. 16.000 Jahrestonnen einen Marktanteil von ungefähr 5%. Bei der Windelfolie sind die beiden Werke gemeinsam Marktführer in Westeuropa.

Bereits vor Beginn des Verbundprojektes wurde jeder anfallende Abfall erfasst und nach einem System von Abfallschlüsseln der Ursache zugeordnet. Alle aufgenommen Daten werden elektronisch abgelegt (IBM AS 400). Es ist möglich, nach Maschine, Zeitraum, Ursache, Kunde, Auftrag, Schicht etc. zu sortieren bzw. entsprechende Abfragen zu starten. Eine gründliche Analyse sowie ein konsequentes Festsetzen und Verfolgen von Reduzierungsmaßnahmen fanden jedoch nicht oder nur in Ansätzen statt.

Die gesamte Abfallmenge der Nordhorner Blasfolienanlagen betrug im letzten Jahr 857 t. Davon ist ein ganz erheblicher Teil auf Auftragsumstellungen zurückzuführen, die mit etwa einem Drittel der Gesamtmenge die größte aller Einzelursachen darstellen. Dabei gibt es sehr große Unterschiede darin, wie viel Abfall verursacht wird, um eine Auftragsumstellung unter ansonsten gleichen Bedingungen durchzuführen. Im Einzelnen ist nicht immer zu erkennen, warum in einem Fall viel und im anderen Fall sehr viel weniger Abfall angefallen ist.

Auch wenn der Abfall zu 95% regranuliert und in der eigenen Produktion wieder verarbeitet werden kann, so verursacht er doch Kosten, indem er durch alle Verarbeitungsschritte die Leistung der Anlagen beeinträchtigt. Vereinfacht kann man mit 0,50 €/kg Abfall rechnen. Dabei verbraucht er außerdem Energie und andere Ressourcen wie zum Beispiel (Kühl-) Wasser.

Sengewald Verpackungen GmbH

Sengewald Verpackungen GmbH & Co. KG wurde 1958 durch Dr. Karl Heinz Sengewald am heutigen Standort Halle/Westfalen gegründet. Seit 1997 ist Sengewald Tochterunternehmen der weltweit operierenden Pactiv Organisation.

Das Unternehmen beschäftigt ca. 150 Mitarbeiter und hat einen Umsatz von über 50 Mio. Euro.

Das Unternehmen ist nach ISO 9001 zertifiziert und ISO EN 14001 Öko auditiert.

Schwerpunkte der Produktpalette sind die Verpackungen von Nahrungsmitteln, medizinischer und chemisch-technischer Produkte. Zur Produktpalette gehören:

- Monofolien
- Coex-Folien
- Verbundfolien
- Flachfolien
- Schlauchfolien
- Sperrschichtfolien
- Sterilfeste Folien
- Kochfeste Folien
- Medizinische Flüssigkeitsbeutel

ETA Kunststofftechnologie GmbH

Die Firma ETA Kunststofftechnologie GmbH wurde 1990 in Troisdorf gegründet und befindet sich bis heute vollständig im Besitz der Geschäftsführer und eines weiteren für die Firma tätigen Gesellschafters.

ETA entwickelt und liefert Einrichtungen für die kunststoffverarbeitende Industrie, in erster Linie für die Extrusion. Dies sind schwerpunktmäßig:

- Plastifizieraggregate (Zylinder und Schnecken) für Extruder und Spritzgießmaschinen
- Extrusionswerkzeuge, insbesondere für die Coextrusion mit mehreren (verschiedenartigen) Kunststoffen
- Sonderentwicklungen nach Kundenspezifikation.

Die meisten Projekte werden direkt mit kunststoffverarbeitenden Unternehmen abgewickelt. ETA-Plastifiziereinheiten und -werkzeuge werden dabei zur Modernisierung und Optimierung vorhandener Extrusionsanlagen eingesetzt; zur Erzielung höherer Durchsätze und besserer Produktqualitäten oder zur Herstellung neuer, oftmals besonders anspruchsvoller Produkte. In einigen Fällen bestehen langjährige Entwicklungspartnerschaften mit Verarbeitern, die wegen Ihrer speziellen Anforderungen (Exklusivität, Geheimhaltung) nicht mit den klassischen Maschinenherstellern zusammenarbeiten.

Die Stärke von ETA liegt in der großen Flexibilität bei der Umsetzung von speziellen Kundenanforderungen und in der ausgezeichneten technologischen Basis. Hierfür werden enge Kontakte zu Hochschul- und Forschungsinstituten gepflegt. In Deutschland und Europa besitzt ETA deshalb eine starke Stellung neben den großen Maschinenherstellern. In zunehmendem Maße werden weltweit Geschäfte getätigt. Schwerpunkte sind Indien, Japan und Nordamerika.

Die Mitarbeiter von ETA sind überwiegend hochqualifizierte Techniker und Ingenieure aus den Gebieten der Kunststoffverarbeitung und des Maschinenbaus.

Windmüller & Hölscher

Windmüller & Hölscher (W&H) mit Sitz in Lengerich/Westfalen ist ein traditionsreiches Maschinenbauunternehmen, mit mittlerweile 130jähriger Geschichte. W&H versteht sich als innovativer Partner für die Hersteller flexibler Verpackungen.

1869 von dem Kaufmann Gottfried Windmüller und dem Techniker Hermann Hölscher zunächst als Papierbeutelhersteller gegründet, entwickelte sich das Unternehmen im Lau-

fe der Jahre zu einem führenden, international tätigen Maschinenlieferanten für die Industrie flexibler Verpackungen. Der Übergang vom Papierbeutelhersteller zur Maschinenfabrik wurde 1913 vollzogen, als sich die Firmengründer entschlossen, die Papierbeutelherstellung aufzugeben und sich ausschließlich auf die Konstruktion von Maschinen zu konzentrieren.

Erste Erfolge wurden mit der sogenannten Spitztütenmaschine erzielt. Im Laufe der Jahre wurde das Maschinenprogramm kontinuierlich erweitert und umfasst heute:

- Folienextrusionsanlagen bis zu einer Folienbreite von 3,6 Metern
- Extrusionsbeschichtungsmaschinen
- Flexo-, Tiefdruck- und Veredelungsmaschinen
- Sack-, Beutel- und Tragetaschenmaschinen
- Verpackungsmaschinen
- Anlagen für die Verarbeitung von Kunststoffgeweben

Windmüller & Hölscher ist ein Systemanbieter, was in dem Motto "Alles aus einer Hand" zum Ausdruck kommt. Dieses Motto beinhaltet die Fähigkeit, komplette Produktionslinien (vom Granulat oder der Papierrolle bis zur fertigen Verpackung) aus eigener Konstruktion anbieten zu können. Auf dem Gebiet der Folienextrusion zählt W&H weltweit zu den technologisch führenden Unternehmen. Dies wird beispielsweise dokumentiert durch die patentierte Foliendickenregelung OPTIFIL P, die auf dem Gebiet der Blasfolienextrusion mit mittlerweile mehr als 400 weltweit verkauften Systemen nicht nur technologisch, sondern auch stückzahlmäßig Maßstäbe gesetzt und die extrudierte Folie auf ein deutlich verbessertes Qualitätsniveau gebracht hat.

Die Produktpalette geht hin bis zur schlüsselfertigen Installation eines kompletten Verpackungsmittelwerks auf der grünen Wiese. Konsequenterweise wird an der Weiterentwicklung und Verbesserung des Maschinenangebotes gearbeitet. Zahlreiche Patente belegen die Innovationskraft der W&H-Ingenieure. Patente im Bereich der Oberflächenbeschichtung von Extrusionswerkzeugen, dem Gegenstand des beantragten Projektes, existieren nicht. Ziel der W&H-Entwicklungen ist, den Kunden zeitgemäße Konstruktionen mit optimalem Nutzen anbieten zu können und so zu einer hohen Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der W&H-Anlagen im Produktionsalltag der Kunden beizutragen. Dies wird nicht zuletzt durch die Installation eines Qualitätsmanagementsystems dokumentiert, das im September 1994 nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert und 1997 durch die erfolgreiche Absolvierung des Wiederholungsaudits bestätigt wurde.

Reifenhäuser GmbH & Co Maschinenfabrik

Die Reifenhäuser GmbH blickt heute mit Stolz auf eine langjährige Tradition im Kunststoffmaschinenbau mit dem Schwerpunkt in der Extrusionstechnik zurück. Seit der Gründung des Unternehmens 1911 konnte auf der Basis innovativer Konzepte und Lösungsansätze sowie der Fähigkeit, Ideen marktgerecht umzusetzen, stets eine positive Unternehmensentwicklung realisiert werden. 2002 beschäftigte Reifenhäuser ca. 1000 Mitarbeiter und ist auf der Basis zahlreicher Tochterunternehmen und Niederlassungen weltweit vertreten.

Schwerpunkte der Unternehmenstätigkeit bilden die Entwicklung und Fertigung von Maschinen und Anlagen zur formgebenden Verarbeitung von Kunststoffen. Darüber hinaus wird auch die entsprechend notwendige Prozessperipherie angeboten, sodass Reifenhäuser heute einer der führenden Systemanbieter im Bereich der kunststoffverarbeitenden Maschinen und Anlagen ist.

Einen wesentlichen Beitrag zur heutigen Unternehmensposition stellen die konsequente Entwicklung neuer Technologien sowie die Verbesserung und Weiterentwicklung bestehender Produktionsverfahren sowohl im Bereich der Extrusionsanlagen für Foliensysteme als auch im Bereich der Fertigungsanlagen für Spinn- und Melt-Blown-Vliese dar.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes befasst sich die FA. Reifenhäuser zum einen mit der Auslegung und Fertigung von Baugruppen eines neukonzipierten Coextrusions-Blaskopfes. Damit soll eine Reduzierung der Spülzeiten und des Rohstoffverbrauches ermöglicht werden. Ebenso sollen durch die Entwicklung eines Steuer- und Regelungskonzeptes die Umstellzeiten bei Produktwechseln rationalisiert und verkürzt werden.

Neben dem umfassenden Know-how spielen hier insbesondere auch die verfügbaren Kapazitäten im Technikumsmaßstab sowie die umfangreichen Erfahrungen im notwendigen Scale-up in den Produktionsmaßstab eine entscheidende Rolle für den Gesamterfolg des Vorhabens.

Es wurden Untersuchungen in den verschiedenen Bereichen (**Arbeitspakete**) mit folgender Struktur durchgeführt:

AP	Arbeitsinhalt	Firma
1	Auswertung alter Produktionsdaten	
1.1	Identifizierung potenzialträchtiger Produkte und Anlagen	BP, Seng., Uni
AP	Arbeitsinhalt	Firma
2	Prozessführung bei Spülprozessen	
2.1	Anpassung der verfügbaren Versuchsanlage im Technikum der Uni.	Uni
2.2	Konstruktion /Bau einer Apparatur zur Bewertung von Spülprozessen.	Uni
2.3	Entwicklung eines Vergleichsstandards für Spülvorgänge.	Uni
2.4	Schaffung der Voraussetzungen zur Messung von Prozessgrößen und Qualitätsmerkmalen.	BP, Seng. Uni
2.5	Erfassung der Ist-Zustände (Prozessparameter, Qualitätsmerkmale). Analyse der Spülprozesse und -vorschriften	BP, Seng. Uni
2.6	Untersuchung von Spülprozessen im Technikum der Uni	
2.6.1	Untersuchungen zum Einfluss der Prozessführung auf Spülvorgänge.	Uni
2.6.2	Untersuchungen zum Einfluss der Materialien (Farbpigmente, Additive, Haftvermittler, Barrierewerkstoffe etc.) auf Spülvorgänge.	Uni
2.6.3	Untersuchungen zum Einfluss der Spülmedien auf Spülvorgänge.	Uni
2.6.4	Auswertung der Ergebnisse und Optimierung der Spülprozesse.	Uni
2.7	Erprobung der optimierten Spülprozesse in der Produktion.	BP, Seng., Uni
2.8	Vergleich der optimierten Prozesse mit den ursprünglichen Prozessdaten und Bewertung der erzielten Ergebnisse.	Uni
2.9	Formulierung allgemeiner Vorschriften für Spülvorgänge.	Uni
3	Verbesserung der Verweilzeitspektren	
3.1	Entwicklung und Bau eines Basis-Modulwerkzeugs für grundlegende Versuche zu den Einflussgrößen auf die Verweilzeitspektren.	Uni
3.2	Erfassung der Ist-Zustände und Analyse der Einflussgrößen auf die Verweilzeitspektren von Schlauchfolienanlagen.	W&H, Reif., Uni
3.3	Untersuchung von Oberflächen und Beschichtungen	
3.3.1	Auswahl/Recherche geeigneter Beschichtungswerkstoffe und -verfahren.	Uni
3.3.2	Oberflächenbehandlung bzw. Beschichtung von Probekörpern und einfachen Strömungswerkzeugen.	Uni

3.3.3	Analyse zur Charakterisierung der Eigenschaften der beschichteten Probekörper und Bauteile.	Uni
3.3.4	Versuche mit den beschichteten Modulwerkzeugen im Technikum der Uni.	Uni
3.3.5	Zusammenfassung und Bewertung des Einsatzes von Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen zur Einengung der Verweilzeitspektren.	Uni
3.3.6	Konstruktion/Bau eines beschichteten Folienwerkzeugs bzw. Werkzeugteils.	W&H, Reif.
AP	Arbeitsinhalt	Firma
3.3.7	Analyse zur Charakterisierung der Eigenschaften des beschichteten Folienwerkzeugs.	W&H, Reif., Uni
3.3.8	Versuche mit dem Werkzeug aus 3.3.6 im Technikum des Anlagenherstellers.	W&H, Reif., Uni
3.3.9	Neubeschichtung des Werkzeugs aus 3.3.6-3.3.8	W&H
3.3.10	Analyse zur Charakterisierung der Eigenschaften des beschichteten Folienwerkzeugs.	W&H, Uni
3.3.11	Versuche mit dem neu beschichteten Werkzeug aus 3.3.6 im Technikum des Anlagenherstellers.	W&H, Uni
3.3.12	Bewertung der Möglichkeiten zur Einengung der Verweilzeitspektren durch Beschichtungsmaßnahmen	Uni
3.4	Untersuchung der Einflüsse von Fließkanalgeometrien	
3.4.1	Simulation der Strömungsmechanik von Kunststoffschmelzen in unterschiedlichen Fließkanalgeometrien mithilfe der CFD.	Uni
3.4.2	Konstruktion/Bau verschiedener Module mit unterschiedlicher Fließkanalgeometrie.	Reif., ETA, Uni
3.4.3	Versuche mit dem Modulwerkzeug aus 3.1 bzw. 3.4.2 im Technikum der Uni.	Uni
3.4.4	Zusammenfassung und Bewertung der Möglichkeiten, durch Veränderungen der Fließkanalgeometrie Verweilzeitspektren einzuengen.	Uni
3.4.5	Konstruktion/Bau von Folienwerkzeugen oder Werkzeugteilen für Versuche im Technikum der Uni bzw. der Anlagenhersteller.	Reif., ETA, Uni
3.4.6	Versuche mit dem Werkzeugen aus 3.4.5 im Technikum der Uni bzw. der Anlagenhersteller.	ETA, Uni
3.4.7	Bewertung der Möglichkeiten zur Einengung der Verweilzeitspektren durch Geometrieoptimierungen.	Uni
3.5	Zusammenführung und Umsetzung der Ergebnisse zu Oberflächen / Beschichtungen und Fließkanalgeometrien	
3.5.1	Konstruktion/Bau von Folienwerkzeugen oder Werkzeugteilen auf Grundlage der in 3 gesammelten Ergebnisse.	Reif., ETA
3.5.2	Versuche in der Produktion bzw. im Technikum der Anlagenhersteller mit den Werkzeugen aus 3.5.1.	Reif., ETA, Uni

3.5.3	Zusammenfassung und Bewertung der Möglichkeiten zur Einengung der Verweilzeitspektren über Oberflächen und Geometrien.	Uni
AP	Arbeitsinhalt	Firma
4	Alternative Steuer- und Regelungskonzepte für Anfah- und Produktwechselforgänge	
4.1	Analyse der in den Produktionsanlagen implementierten Steuer-/Regelungskonzepte (Durchsatz, Dosierung, Liegebreite, Dickenprofil, Temperatur etc.).	BP, Seng., Reif., Uni
4.2	Bewertung der Prozessfähigkeit der Anlagen.	BP, Seng., Uni
4.3	Entwicklung von Strategien und alternativen Steuer-/Regelkonzepten für betriebssichere und schnelle Anfah- und Produktwechselforgänge.	Uni
4.4	Umsetzung der entwickelten Konzepte an einer Folienblasanlage. Versuche mit verbesserter Anlagensteuerung/-regelung.	Reif., Uni
4.5	Vergleich der "alten" und "neuen" Steuer-/Regelungskonzepte anhand der aufgezeichneten Prozessdaten. Bewertung der vorgenommenen Verbesserungen.	Reif., Uni
5	Koordination und Gesamtaufbereitung	
5.1	Koordination und Management des Gesamtprojektes.	Uni
5.2	Ökologische/wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen (Ökobilanz/Amortisationszeit).	BP, Seng., Uni
5.3	Darstellung und Aufbereitung der Ergebnisse.	Uni

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Abfälle bei der Kunststoffverarbeitung

In der Bundesrepublik Deutschland, als einem der größten Kunststoffproduzenten der Welt, wurden 1997 etwa 11,85 Mio. t Kunststoffe produziert und etwa 9 Mio. t verarbeitet. Mehr als 60% aller verarbeiteten Kunststoffe entfallen auf die Thermoplaste.

Aus einer im Auftrage des Verbandes der Kunststoffherstellenden Industrie (VKE) erarbeiteten Studie "Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 1997" der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, Großostheim, geht hervor, dass 1997 bei einem Verarbeitungsvolumen von 9.037kt insgesamt etwa 3,2 Mio. t Kunststoffabfälle anfielen, von denen ca. 1,85 Mio. t verwertet und 1,39 Mio. t beseitigt wurden.

Von der gesamten Abfallmenge entfallen ca. 897 kt (27,7%) auf die Kunststoffverarbeiter, bei einer Verwertungsquote von 93%. Dies bedeutet, dass "nur" ca. 7% (62,4 kt) der bei den Verarbeitern anfallenden Kunststoffabfälle beseitigt werden müssen [Fer98, Wol92, Wol95a]. Diese Daten sind mit Sicherheit sehr allgemeiner Natur und lassen keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Verarbeitungsverfahren zu. Sie verdeutlichen jedoch sehr gut, dass bereits in der Kunststoffverarbeitung eine beträchtliche Menge an Produktionsabfällen entsteht. Durch die sehr gute Verwertungsquote bei den Verarbeitern von 93% kann zwar ein Großteil des Rohstoffes wiederverwertet werden, die Umwelt wird jedoch immer noch durch den Energieaufwand beim Recycling belastet.

Sollte es im Rahmen dieses Projekts gelingen, diesen Produktionsabfall zu verringern, so entstünden hier sowohl aufseiten der Abfallbeseitigung als auch der Energieeffizienz wesentliche Verbesserungen. Zusammenfassend ausgedrückt ist die Abfallvermeidung ökologisch sinnvoller als Entsorgung oder Wiederverwertung.

Folienprodukte

Kunststoffe sind nach Papier und Glas die wichtigsten Verpackungsmaterialien. In Deutschland werden dafür jährlich rund 2 Mio. t Kunststoffe verarbeitet. Etwa 65% sind thermoplastische Polyolefine, davon 80% Polyethylen (PE) und 20% Polypropylen (PP). Die Herstellung von Folien mit dem Folienblasverfahren nimmt in der kunststoffverarbeitenden Industrie sowohl mengen- als auch umsatzmäßig betrachtet einen großen Stellenwert ein. Nach einer Studie des VKI hatten Kunststofffolien (<1mm incl. Beschichtung) einen Anteil von 48% am gesamten Kunststoffverbrauch der Verpackungsindustrie Westeuropas 1998 [Wol97].

Das Produktspektrum der Blasfolien ist sehr breit gefächert und reicht von der einschichtigen Abdeckfolie bis hin zu mehrschichtig extrudierten Verpackungsfolien für die Lebensmittelindustrie oder den medizintechnischen Bereich. Die typischen Materialien, die bei der Blasfolienextrusion verarbeitet werden, sind PE-LD, PE-LLD, PE-HD, PA, PP, PMMA, PVC und PS.



Abbildung 1-1 Anwendungen von Kunststofffolien im Bereich der Lebensmittel- und Medizintechnik

Im Zuge weiter steigender Kundenanforderungen bezüglich der Produkteigenschaften ist ein deutlicher Trend zu immer komplexer werdenden Produkten erkennbar. So werden z.B. von einer optimalen Verpackungsfolie für Lebensmittel, Eigenschaften wie Aroma- und Mediendichtigkeit, Kälte- und Hitzebeständigkeit, hohe Durchstoß- und Reißfestigkeit, Fettbeständigkeit oder kontrollierte Wasserdampf- bzw. Gasdurchlässigkeit gefordert (s. Abbildung 1-1). Diese vielschichtigen Produkteigenschaften lassen sich meist nur durch die Coextrusion verschiedener Materialien einstellen, was eine aufwendigere Produktions- und Anlagentechnik notwendig macht (s. Abbildung 1-2).

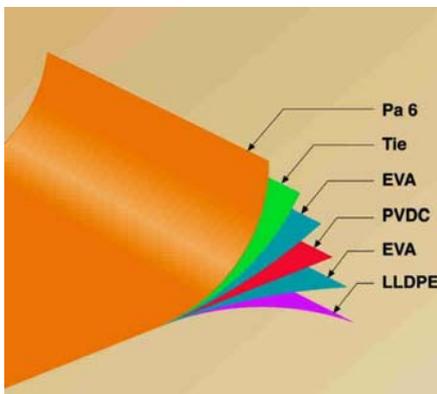


Abbildung 1-2 Beispiel für einen sieben-schichtigen Aufbau eines Folienverbundes (Quelle: Brampton Engineering)

Neben der Coextrusion werden jedoch auch große Mengen von Monofolien hergestellt, die in anderen Bereichen der Verpackungstechnik wie z.B. für Stretch- und Schrumpfolien oder Schwertsackfolien verwendet werden. Über den Einsatz der Blasfolie bei den verschiedenen Verpackungen hinaus existieren ebenfalls Anwendungen in den Bereichen der Agrar- und Bautechnik, die jedoch von ihrem Gesamtvolumen an verarbeitetem Kunststoff als gering einzuschätzen sind.

Folienproduktion

Hinsichtlich der verschiedenen Kunststoffverarbeitungsverfahren, die für die Produktion von Folien existieren, beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen, entsprechend den vorgeschlagenen Projektinhalten, ausschließlich auf die Blasfolienextrusion.

Produktionsumstellungen

Obwohl es sich bei der Blasfolienextrusion bei dem überwiegenden Teil der Anwendungen um Massenartikel handelt, werden die einzelnen Losgrößen aufgrund des immer breiteren Produktspektrums zunehmend geringer. Dies führt zu häufigeren Produktwechseln an den Anlagen. In den Ausschussstatistiken nimmt die Rubrik "Rohstoffwechsel" die Spitzenstellung vor verschiedenen anderen Qualitätsmängeln ein (s. Abbildung 1-3).

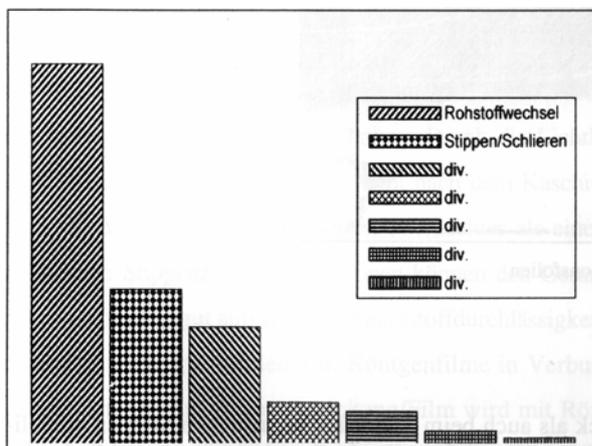


Abbildung 1-3 Qualitative Ausschuss-Statistik bei der Folienextrusion (Quelle: Wichmann, VDI-Tagung, 1999)

Im Hinblick auf die Vermeidung von Abfällen muss der Begriff Produktwechsel in die folgenden zwei Bereiche aufgeteilt werden. Zum einen kann eine Produktumstellung hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften einer Folie, wie der Liegebreite oder der Dicke bzw. ihres Metergewichtes erfolgen, wobei die extrudierte Schmelze keiner Veränderung unterliegt. Zum anderen werden Umstellungen durchgeführt, in denen die Schmelzerezepturen hinsichtlich der zu verarbeitenden Matrixmaterialien, Masterbatches oder Additi-

ven, wie z.B. Gleitmittel, geändert werden. Die rein geometrische Veränderung der Produkte wird heute durch die vorhandene Automatisierungstechnik in ausreichend schneller Form gewährleistet, sodass in diesem Bereich relativ wenig Abfall erzeugt wird. Die Rezepturänderungen benötigen hingegen ein Vielfaches an Umstellzeit und sind damit als der Hauptverursacher von Abfällen bei der Produktionsumstellung anzusehen.

Ein Grund für diesen Sachverhalt ist sicherlich in der eingesetzten Maschinenteknik zu sehen, sodass eine minimale Spülzeit seitens der Anlage vorgegeben ist, zumal bei der Produktion von Blasfolien ein Wechselvorgang im überwiegenden Fall unter Erhaltung der Folienblase durchgeführt wird. Hieraus ergibt sich zwar der Vorteil den anfallenden Abfall auf Rollen vorliegen zu haben, jedoch wird gleichzeitig durch die vorhandene Folienkühlung der maximale Durchsatz begrenzt. Daneben existiert jedoch der große Problembereich des Spülvorganges an sich. Die heute bekannten Spülvorschriften, die zum Teil von den Rohstoffherstellern in den verfahrenstechnischen Hinweisen gegeben werden oder als empirisches Wissen bei dem Bedienungspersonal vorhanden sind, basieren in den seltensten Fällen auf dem grundlegenden Verständnis der ablaufenden Vorgänge.

Die komplexen, meist wechselseitigen Einflüsse von spülendem und zu entfernendem Material aufeinander, die Einflüsse verschiedener Pigmentgrößen oder auch die Wechselwirkung von zu spülendem Material mit verschiedenen Kombinationen von Spülmedien und/oder Prozessparametern, sind für den Bereich, der in der Blasfolienextrusion typischerweise eingesetzten Materialien, nicht grundlegend untersucht.

Als ein Anhaltspunkt für das Potenzial, welches allein in diesem Bereich genutzt werden könnte, ist das von verschiedenen Herstellern oft beschriebene Phänomen, dass zwischen verschiedenen Schichten in einem Betrieb zum Teil deutlich unterschiedliche Spülergebnisse erzielt werden.

Abfallverwertung

Reststoffe und Verunreinigungen sind für die Blasfolien noch sehr viel kritischer als für andere extrudierte Produkte. Aufgrund der geringen Foliendicke und den mitunter sogar transparenten Folieneigenschaften fallen Fehler bei den Blasfolien besonders schnell auf, bzw. beeinflussen die Eigenschaften des Produktes besonders stark. Die Rückführung von coextrudierten Barrierefolien schließt sich z.B., entweder wegen der Vernetzungsgefahr oder auch wegen der sehr unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen der einzelnen Materialien, an. Ebenfalls problematisch sind bereits weiterverarbeitete bedruckte Produkte.

Die Verarbeitung von geeigneten Produktionsrückständen ist im Wesentlichen über zwei Arten möglich. Zum einen werden die anfallenden Abfälle als Streifen direkt dem Extruder

zugeführt zum anderen erfolgt die Wiederverarbeitung als Regranulat, was einen vorge-schalteten Plastifizier- und Granuliertvorgang erfordert. In Europa hat sich die Verarbei-tung von Regranulat als Standard durchgesetzt, da die direkte Rückführung Extruder mit glatter Einzugszone notwendig macht, die in den vergangenen Jahren jedoch immer mehr durch Nutbuchsenkonzepte verdrängt wurden. Darüber hinaus ist der Einsatz von Granu-laten meist betriebssicherer durchzuführen, sodass der zusätzliche energetische Aufwand dieser Lösung in Kauf genommen wird [Wo78, Fer97].

Anlagentechnik

Im Folgenden wird der Stand der Technik bei der Blasfolienextrusion vor dem Hintergrund der Abfallminderung durch verbesserte Produktwechsel und Energieeffizienz dargestellt. Hieraus ergeben sich Einschränkungen der betrachteten Anlagentechnik auf die Bereiche der Schmelze führenden Systeme und die Steuer- und Regelungstechnik.

Verweilzeitspektren

Die für eine Produktionsumstellung mit einem Materialwechsel notwendige Spülzeit ist im Wesentlichen von dem Verweilzeitspektrum in der verwendeten Anlage abhängig. In den Bereichen des Systems, die durch eine reine Druckströmung charakterisiert sind, wie z.B. Siebwechsler, Schmelzeleitung und Extrusionswerkzeug, ergibt sich dieses Spektrum an Verweilzeiten der Kunststoffschmelze aufgrund der vorliegenden laminaren Strömungs-geschwindigkeitsprofile (vgl. Abbildung 1-4).

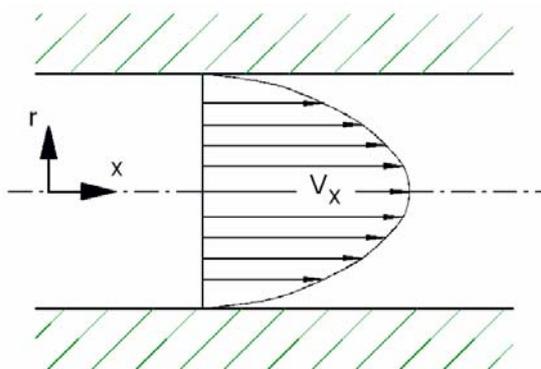


Abbildung 1-4 Geschwindigkeitsprofil einer ausgebildeten laminaren Rohrströmung

In dieser vereinfachten Darstellung wird deutlich, dass die in Wandnähe fließenden Fluid-teilchen, aufgrund der Wandhaftung bzw. des geringen Wandgleitens bei einigen Stoffen, eine wesentlich geringere Geschwindigkeit aufweisen, als die übrigen Schmelzevolumen in der Kanalmitte. Hieraus ergibt sich bei einer gegebenen Fließlänge direkt eine längere Verweilzeit. Dieser Zusammenhang gilt für alle Oberflächen des schmelzeführenden Sys-tems.

Die in heutigen Systemen gemessenen Verhältnisse von der kürzesten bis zur längsten Verweilzeit von ungefähr 1:200 sind jedoch als Hinweis darauf zu bewerten, dass neben dem oben beschriebenen Effekt noch weitere Einflüsse wirksam sind, die im Bereich der Fließkanalgeometrie zu suchen sind. Aus Erfahrungen in der Produktion ist bekannt, dass es zum Teil deutliche Unterschiede im Verweilzeitverhalten zwischen verschiedenen Werkzeugkonzepten gibt oder auch durch den Einsatz von Statikmischern erzielt werden können. Eine genaue und systematische Untersuchung zu diesen Themen lag jedoch vor Beginn des Verbundprojektes nicht vor. Aus diesem Grund, wie der Tatsache, dass Extrusionswerkzeuge fast immer für einen bestimmten Einsatzbereich ausgelegt werden, fällt ein absoluter Vergleich zwischen Konstruktionen mit konzentrischen Wendelverteilern oder in Stack-Die Ausführung schwer, sodass keine allgemein gültige Aussage über die vielen am Markt befindlichen Systeme mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen getroffen werden kann. Bei allen Neuentwicklungen in diesem Bereich wird jedoch versucht, das Schmelzevolumen im Werkzeug klein und die Fließwege möglichst kurz zu halten, um eine bessere Beherrschung der Verweilzeiten zu erzielen.

Das Verweilzeitverhalten von Extrudern hingegen wurde bereits in einigen Untersuchungen auch vor dem Hintergrund der Mischgüte bearbeitet [Wo86, Wo96a, Wo95].

Im Bereich der Beeinflussung der Grenzfläche zwischen Schmelze und Fließkanalwand existieren verschiedene Möglichkeiten. Hierzu zählen auch Oberflächenbeschichtungen, wie z.B. Hartchromschichten, die heute im Bereich der Extrusionstechnik als Standard zu bezeichnen sind.

In den letzten Jahren sind jedoch noch weitere Beschichtungen, wie z.B. die Diamond-Like-Carbon (DLC), die über das Beschichtungsverfahren mit spezifischen Eigenschaften hergestellt werden können, entwickelt worden. Aus diesem Grund existieren auf diesem Gebiet noch keine umfassenden, grundlegenden Untersuchungen in Verbindung zur Kunststoffverarbeitung, in der die große Bandbreite an zu verarbeitenden Materialien berücksichtigt wurde.

Steuer- und Regelungstechnik

Die Automatisierung von Blasfolienanlagen schreitet ständig fort. Nach heutigem Stand der Technik werden in einem Steuerungssystem alle Komponenten einer Blasfolienextrusionsanlage zu einer Bedieneinheit zusammengefasst. Dies umfasst alle Steuer- und Regelaufgaben im Bereich des Extruders und des Werkzeuges, wie z.B. Durchsatz- und Temperaturregelung ebenso wie die Beeinflussung des Produktes mit Hilfe von Liegebreiten-, Bahnlage- und Dickenprofilregelung.

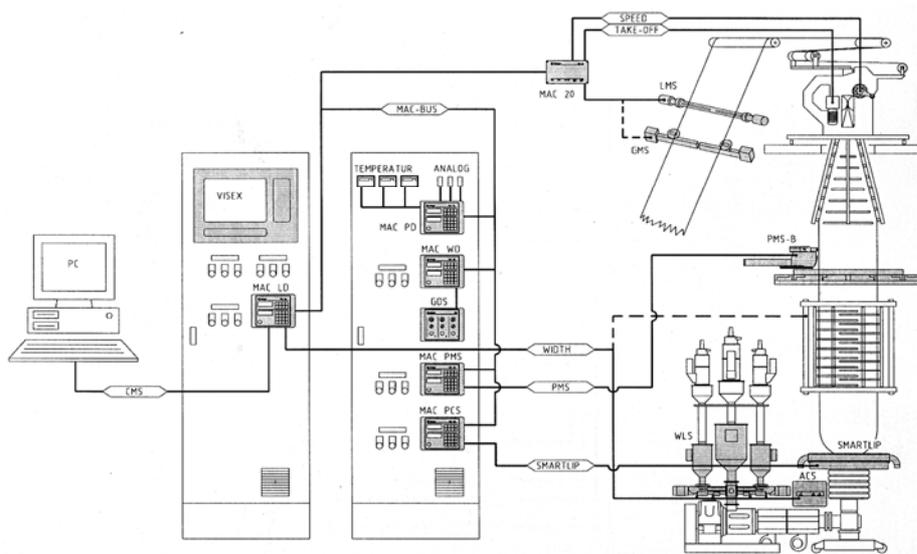


Abbildung 1-5 Automatisierungskonzept an einer Blasfolienextrusionsanlage (Quelle: Octagon Process Technology GmbH)

Hierzu wird im Wesentlichen der Weg der dezentralen Intelligenz und der zentralen Visualisierung beschrieben, indem über BUS-Systeme Daten zwischen den Anlagenkomponenten und der zentralen Leitstelle ausgetauscht werden. Die Implementierung der produktbezogenen Daten in ein Gesamtkonzept ermöglicht darüber hinaus auch die Archivierung von Produktions- und Qualitätsdaten und erlaubt die einfache Überprüfung der laufenden Produktion durch verschiedene Tools wie z.B. der Trenddarstellung. Zur Lösung der Aufgabe, diese große Menge an Daten und Funktionen in übersichtlicher, für den Anwender beherrschbarer Form darzustellen, bedienen sich fast alle Hersteller mittlerweile windowsbasierter PC-Systeme, welche prinzipiell gegenüber externen Anwendungen, wie z.B. CAQ-Systemen, offener gestaltet sind, was den flexiblen Umgang mit der Anlage bzw. den Messdaten fördert [Wal97, Wol95b].

Das Ziel der Entwicklung solcher Automatisierungskonzepte besteht darin, eine gleichmäßige Produktion von qualitativ hochwertigen, komplexen Folienprodukten mit homogenen Produkteigenschaften zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind die verschiedenen Funktionen im Wesentlichen auf die Steuerung und Regelung der eigentlichen Produktion ausgerichtet. Im Bereich der Produktwechsel gibt es jedoch derzeit keine funktionale Unterstützung für den Anwender durch die Steuerung. Die Leistungen der am Markt verfügbaren Produkte beschränken sich in diesem Bereich auf die Verwaltung von Rezepturen oder Parametern für Stellgrößen, die die reproduzierbare Herstellung eines Produktes sicherstellen sollen. Die Verwaltung oder Vorgabe von Spülparametern bzw. Spülprozeduren ist derzeit nicht möglich [Wo96].

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund der vielschichtigen Möglichkeiten, durch produktionsintegrierte Maßnahmen die Abfälle bei Produktwechseln zu mindern, ist mit allen o.g. Partnern ein Verbundprojekt durchgeführt worden. Die Koordination der verschiedenen Teiluntersuchungen und des gezielten Informationsaustausches übernahm mit allseitiger Zustimmung die Universität Duisburg-Essen. Die Zusammenarbeit untereinander ist aus der folgenden Abbildung und aus der Projektplanung zu entnehmen.

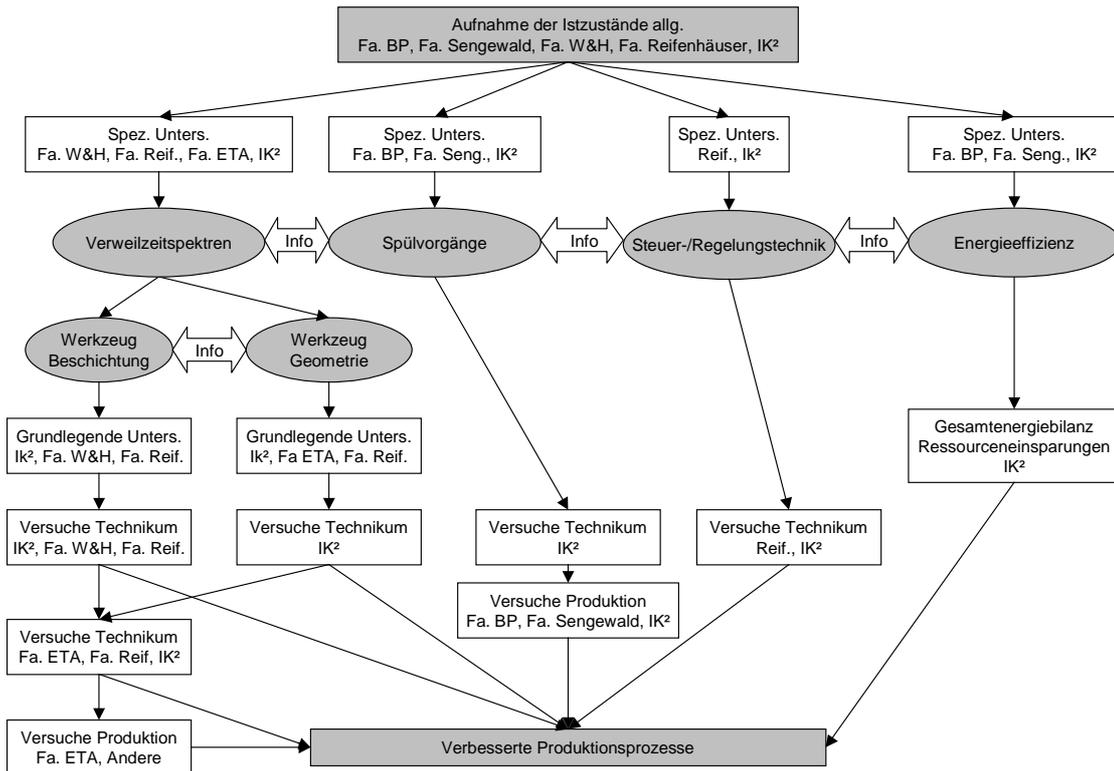


Abbildung 1-6 Vernetzung der Projektpartner

Die Zusammenarbeit mit Dritten erfolgt im Wesentlichen durch Aufträge im Bereich der Lohnfertigung, Analyse und Beschichtung. Hierbei sind keine Kooperationen eingegangen worden, die eine weitergehende Vereinbarung notwendig gemacht hätten.

2. Auswertung historischer Produktionsdaten

Zu Beginn des Projektes wurden in Zusammenarbeit von Universität, Sengewald und RKW (ehemals BP) historische Produktionsdaten aufgearbeitet und ausgewertet. Das Ziel der Auswertung war, die Produktwechsel und die Produktionsanlagen zu identifizieren, die ein hohes Optimierungspotenzial aufweisen. Das heißt, es wurden im ersten Schritt jeweils die Produkte identifiziert, die aufgrund der historischen Daten die höchste Ausschussquote beim Produktwechsel besaßen. Im zweiten Schritt wurde dann aufgrund der Produktauswahl bei der Firma Sengewald eine Mehrschichtblasfolienanlage für die Praxisversuche ausgewählt, bei der speziell der Spülvorgang des Barrierematerials EVOH auf andere Materialien im Vordergrund stand. Bei der Firma RKW wurden Produkte ausgewählt, die einerseits Farbzusätze enthalten und andererseits Additivzusätze. Diese Produkte sind im Auswertzeitraum mit ausreichender Häufigkeit produziert worden und liefen hauptsächlich auf einer Anlage. Diese Anlage ist als Referenzanlage ausgewählt worden. Die Produkte können über das Jahr gesehen auch auf anderen Anlagen produziert werden, eignen sich also auch für einen Vergleich von Anlagen untereinander. Zudem wurde auf dieser Anlage relativ häufig ein Farbwechsel mit einem Blau-Pigment gemacht, dass in der Praxis besonders große Probleme und ein hohes Ausschussaufkommen verursacht.

Die Produktionsdaten wurden zudem allgemein im Hinblick auf die generellen Ausschussursachen in Blasfolienproduktionsbetrieben ausgewertet.

Alle Auswertungen der Produktionsausschussaufkommen bestätigten die dem Projekt zugrunde liegenden Untersuchungen von *Wichmann 1999* (siehe Stand der Technik), dass die Auftragsumstellung mit Abstand größter Verursacher von Produktionsabfällen ist.

Werden die Abfallmengen der Folienproduktion nach Ihren Ursachen getrennt aufgeführt, wird deutlich, dass vor allem durch die Auftragsumstellung die größten Abfallmengen entstehen. Im untersuchten Zeitraum von einem Jahr waren dies ca. 28 % des gesamten anfallenden Produktionsausschusses. Die weiteren Ursachen sind hier mit den Buchstaben b bis j bezeichnet. Zu ihnen zählen die typischen Fehler, die in der Blasfolienproduktion auftreten, wie Stippen oder Löcher, Breitenfehler, Falzverläufe, Wickelfehler u.a.. Die Auswertung bestätigt damit die Ergebnisse von [Wic99].

Aufkommen von Produktionsausschuss in % nach Ursachen

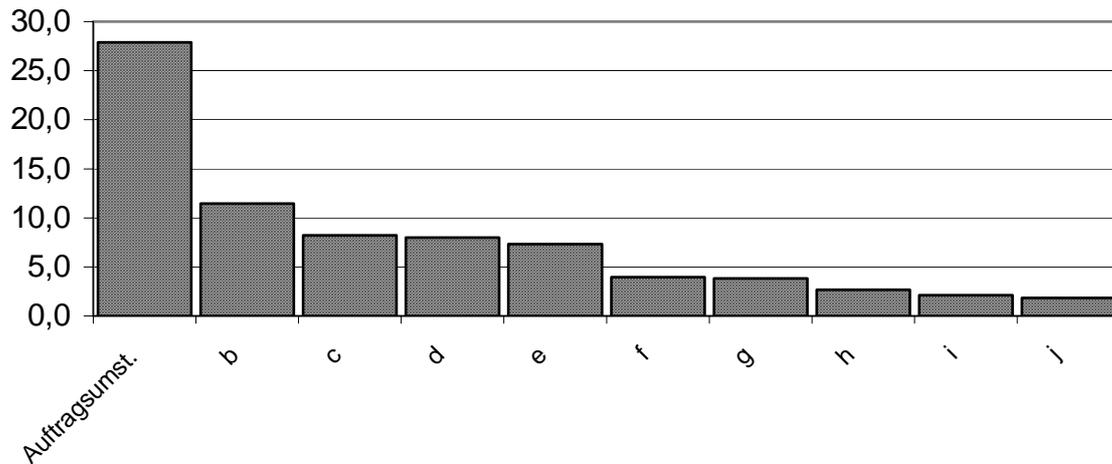


Abbildung 2-1 Relatives Abfallaufkommen getrennt nach Ursachen

Anhand der Produktionsdaten einer ausgewählten Anlage wurden die Produktwechsel genauer analysiert. Insgesamt wurden auf der Anlage in einem betrachteten Zeitraum ca. 150 Produktwechsel durchgeführt. Die dabei entstehende Abfallmenge betrug im Durchschnitt ca. 150 kg pro Produktwechsel. Die tatsächlichen Werte bewegen sich im Bereich von 28 bis 406 kg. Im folgenden Diagramm sind die Anzahl der Produktwechsel nach der Abfallmenge aufgetragen.

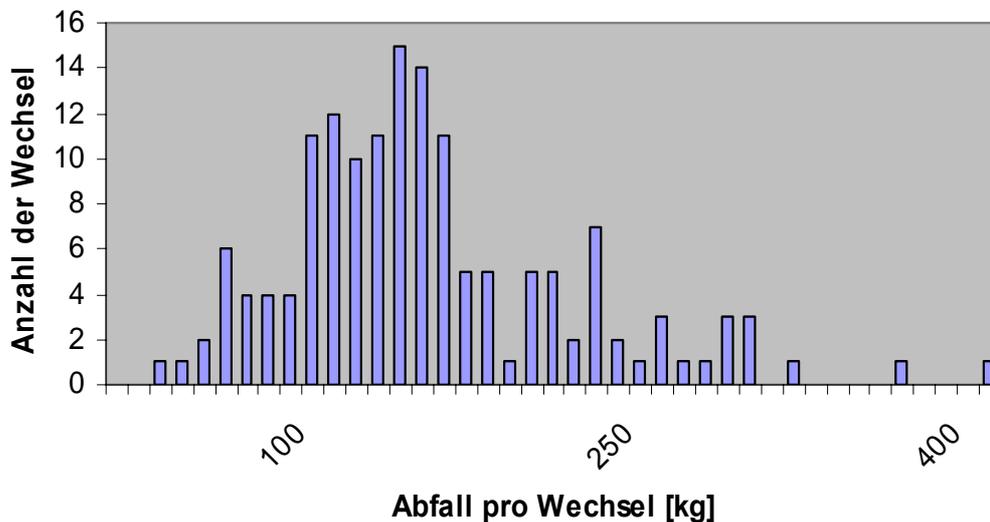


Abbildung 2-2 Verteilung der Produktwechselabfälle

Der größte Teil der Produktwechsel verursacht hierbei offensichtlich Abfallmengen zwischen 90 und 150 kg. Auffällig ist jedoch, dass die Anzahl der Produktwechsel zu den größeren Abfallmengen hin langsamer sinkt als zu den kleineren Abfallmengen. Vor allem gibt es eine Reihe einzelner Werte, die mit mehr als 250 kg die durchschnittliche Abfallmenge deutlich überschreiten.

In ähnlicher Weise wurde auch von der Fa. Kobusch-Sengewald das Produktionsabfallaufkommen an ausgewählten Coexblasfolienanlagen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hauptanteil des Produktionsabfalls durch Rüstvorgänge und dem damit verbundenen Materialwechsel entsteht.

Im Detail wurden dafür zwei Blasfolienanlagen untersucht:

- 3-Lagen Coex-Anlage zur Herstellung von PE Coexverbundfolien (E31)
- 5-Lagen Coex-Blasfolienanlage zur Herstellung von Sperrschichtfolien (E51)

In einer weiteren Analyse wurde die Entwicklung der Produktionsabfälle von Projektbeginn an kontinuierlich bis zum Projektende fortgeführt.

Die 3-Lagen Coex-Anlage zeigt hier eine konstante positive Entwicklung der Produktionsabfälle (Abbildung 2-3). Die 5-Lagen Coex-Anlage dagegen zeigt starke Schwankungen (Abbildung 2-4).

Abfall Extrusion E31

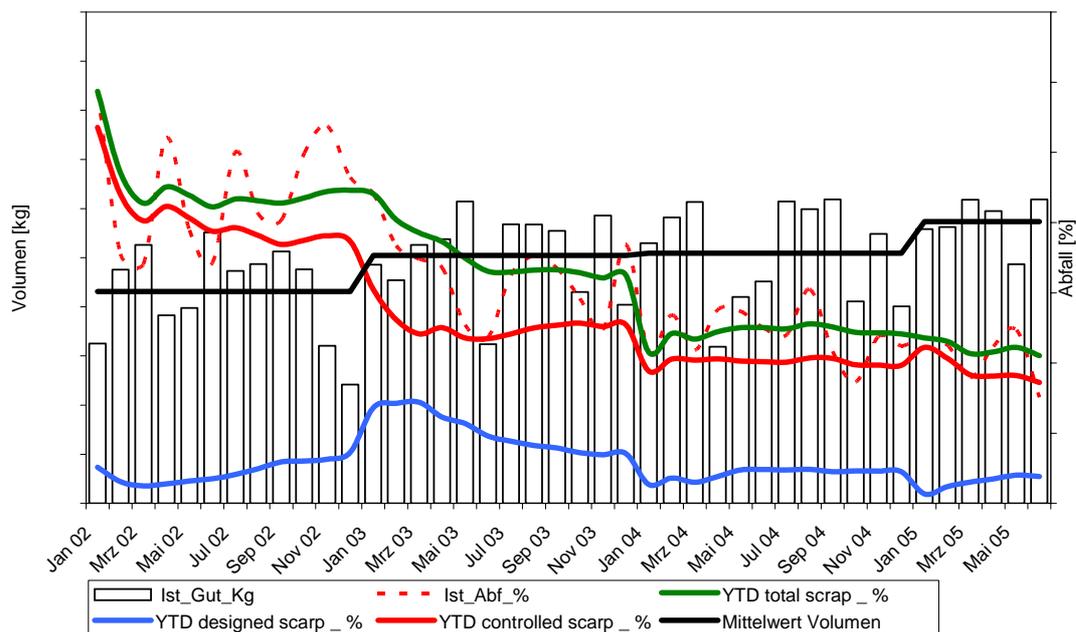


Abbildung 2-3 Abfallentwicklung 3-Lagen Coextrusion

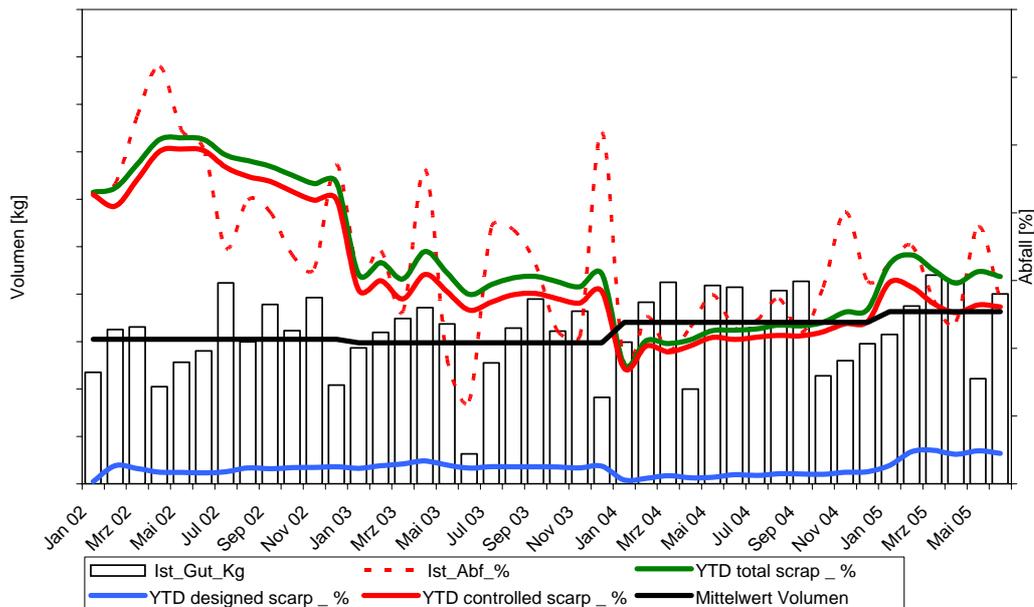


Abbildung 2-4 Abfallentwicklung 5-Lagen Coextrusion

Aufgrund der Entwicklung dieser Kennzahlen wurde für den weiteren Projektverlauf die 5-Lagen Coex-Anlage ausgewählt. Durch die flexiblen Produktionsmöglichkeiten und dem damit verbundenen breiten Produktportfolio der 5-Schicht-Anlage ist hier die Anzahl der Produktwechsel sehr hoch. Der Spülaufwand bei Produktwechseln ist demnach auch hier einer der entscheidenden Wirtschaftlichkeitsfaktoren.

Bei der Auswahl der Produkte als Referenzprodukte für die im Projekt geplanten Untersuchungen wurde der Fokus auf Produkte gelegt, die in einer Schicht ein kritisches Material wie z.B. EVOH enthalten. EVOH ist bei der Verarbeitung und beim Spülen aufgrund der thermischen Instabilität sehr anfällig für lange Verweilzeiten und damit auch ein Material mit langen Spülzeiten, in denen mit hohem Materialaufwand die vernetzten und verbrannten Polymere aus dem System entfernt werden müssen.

Zur Beurteilung einer wirtschaftlichen und ökonomischen Produktion sind im Wesentlichen folgende Daten interessant:

Belegung der Anlage (Produktportfolio):

Es werden folgende Produktgruppen auf der Anlage produziert (Datenbasis 2003):

- 68 % Sperrschichtverbunde (PE/EVOH/PE)
- 17 % Coexfolien aus PE, Ionomeren, EVA Copolymeren
- 5 % PA Coexfolien
- 10% sonstige PE Coexverbunde

Anhand dieser Aufstellung ist klar ersichtlich, das 2/3 der Produktionsplanung mit den o.g. kritischen Materialien belegt ist, die einen hohen Spülaufwand zur Folge haben.

Rüstzeiten und Abfallwerte der Anlage

In der folgenden Übersicht sind die relevanten Produktionskennzahlen der vergangenen drei Jahre aufgeführt:

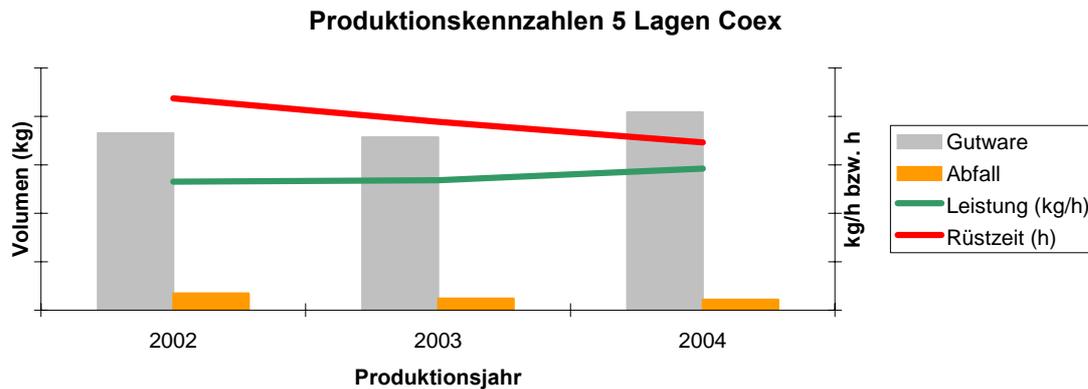


Abbildung 2-5 Produktionskennzahlen der vergangenen drei Jahre (Seng.)

Der Abfall kann dabei in folgende Bereiche unterteilt werden:

Tabelle 2-1 Unterteilung des anfallenden Abfalls

Abfallaufteilung E51 (2003)	
(% des gesamten Materialeinsatzes)	
Säumerabfall (designed scrap)	0,5%
Materialwechsel	3,3%
Wechsel Produktgeometrie	1,4%
Produktionsstörungen	0,5%
Extrudersiebwechsel	0,5%
Gesamtabfall	6,2%

An der oben stehenden Auswertung ist ersichtlich, dass allein 50% des erzeugten Abfalls durch Materialwechsel verursacht werden. Der Großteil des Abfalls wird extern weiterverwertet (Recyclat oder thermische Verwertung).

Losgrößen und Kampagnen der Produktionsaufträge

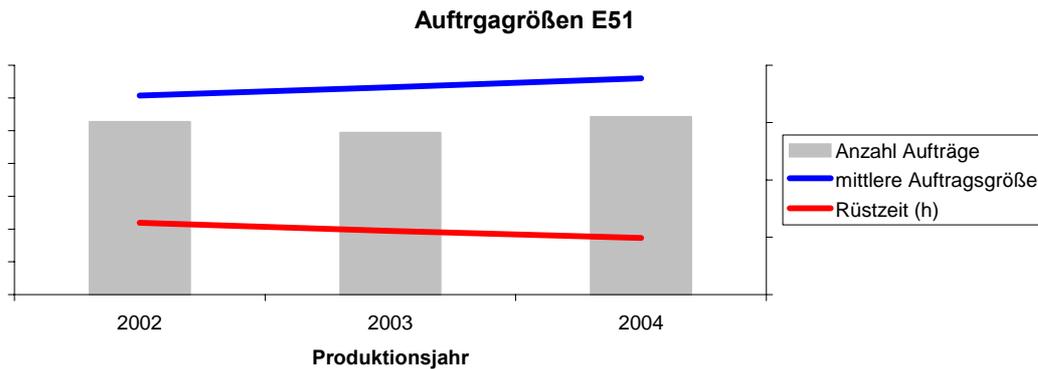


Abbildung 2-6 Häufigkeit der Produktwechsel in den vergangenen drei Jahren

Wie die Abbildung 2-6 zeigt, stieg die mittlere Auftragsgröße in den vergangenen Jahren proportional zu dem Produktionsvolumen an. In den kommenden Jahren wird jedoch, bei gleichbleibenden Volumen, eine sinkende Auftragsgröße erwartet, die sich durch die Minimierung des Umlaufbestandes an Halbfertigware und den Trend zu immer kürzeren Lieferzeiten begründet. Eine Standardisierung der Produkte kann diesem Trend voraussichtlich nicht entgegenwirken, was somit eine Erhöhung der Rüstvorgänge zur Folge haben wird.

3. Prozessführung bei Spülprozessen

3.1 Vorbereitungen

Das Arbeitspaket 2 untergliedert sich vorwiegend in drei Bereiche. Der erste Bereich befasst sich dabei mit dem Aufbau eines Versuchsstandes.

Die im Technikum der Universität vorhandene Blasfolienanlage ist zu diesem Zweck mit erweitertem Equipment ausgestattet worden. Eine der Hauptkomponenten der Erweiterung war eine Mehrfachgravimetrie, mit der die Durchführung der Versuche bei verschiedenen Rohstoffrezepturen reproduktiv und realitätsnah erfolgte. Die zweite Hauptkomponente der Erweiterung stellte die Messtechnik dar. Die Versuchsrelevanten abgreifbaren Prozessparameter, wie Temperaturen, Drehzahlen, Massedruck, etc. wurden separat auf einen Messrechner gelegt, mit dem die Daten aufgezeichnet und visualisiert wurden. Zudem wurde ein Zeitsignal integriert, mit dem die späteren Farbmesswerte mit den Versuchsparametern synchronisiert werden konnten.

Das beschaffte Messgerät der Fa. Dewetron schrieb so die Prozessdaten an der Technikumsanlage der Universität bei jedem Versuch mit, die im Laufe der Versuche auf die relevanten und aussagefähigen Parameter eingegrenzt wurden.

Diese Voraussetzungen für die Messung der Prozessgrößen wurde im Vorfeld der Versuche nicht nur im Technikum der Universität, sondern auch bei den Projektpartnern Sengewald und RKW durchgeführt. Bei der Firma Sengewald konnte an der ausgewählten Versuchsanlage bei der Prozessdatenerfassung ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden. Bei der Firma RKW wurde aufgrund der etwas älteren Technik neben der Prozessdatenerfassung auch eine Protokollarisierungsroutine für die beteiligten Mitarbeiter implementiert, um eine ausreichend genaue Synchronisation der Prozessführung mit dem Folienwickel zu erreichen.

Im zweiten Bereich des Arbeitspaketes 2 wurden parallel zur Anpassung der Anlagen ein Vergleichsstandard und eine Auswertemethode für den Spülvorgang entwickelt.

Zur Bewertung der Spülprozesse sind eine Reihe verschiedener Versuche auf PE-LD Basis gefahren worden. Bei den Versuchen wurden unterschiedliche Farbwechsel gefahren, die im Anschluss mit Farbmessgeräten zweier Firmen vermessen wurden. Beide Geräte arbeiteten in den Grenzbereichen jedoch nicht zufrieden stellend, obwohl es High-Endgeräte waren. Die Problematik der Geräte liegt darin, dass sie einen unteren Grenzbereich für den Nachweis eines Indikators in der Folie haben. Das heißt, wenn die Farbmessgeräte an einer einzelnen doppelt übereinander gelegten Folienbahn keinen farblichen Unterschied mehr zu einer farblosen Probe anzeigten, konnte auf dem Folienwickel

durch die vielfach übereinander gelegte Folie noch deutlich ein Farbstich mit bloßem Auge erkannt werden. Aus diesem Grund sind weitere Indikatoren und Messverfahren zum Test ausgewählt worden. Dabei handelte es sich um ein Verfahren aus dem Bereich der Infrarotspektroskopie, die sich durch den genutzten Wellenlängenbereich unterscheiden.

Erste Ergebnisse zeigten, dass im mittleren Infrarotbereich verschiedene Kunststoffe und Additive erkannt und bewertet werden konnten. Ausführlichere Messungen mit der NIR und MIR (nah und mittlere Infrarotspektroskopie) ergaben aber auch hier, dass die Empfindlichkeit nicht ausreichend hoch ist. Sowohl an der einzelnen Bahn, als auch an mehreren übereinander liegenden, werden keine zuverlässigen Messergebnisse bei niedrigen Farbkonzentrationen erreicht.

Da die Messmethoden der Infrarotspektroskopie auf die Transparenz der Folien für Infrarotstrahlung angewiesen waren, waren die hier messbaren Foliendicken ebenfalls auf ca. 200 µm begrenzt. Es trat bereits in viele Wellenlängenbereichen eine vollständige Absorption auf, sodass kein charakteristisches Spektrum mehr aufgezeichnet werden konnte. Bei geringer werdenden Konzentrationen der normalerweise im Infrarotspektrum gut nachweisbaren Additive und organischen Farbpigmenten verschwanden beim Unterschreiten einer gewissen Mindestkonzentration die charakteristischen Peaks im Transmissions- und Reflexionsspektrum. Aber auch hier konnte mit bloßem Auge und beim Übereinanderlegen der Folienproben noch deutlich ein Farbstich im Vergleich zu einer farblosen Probe gesehen werden.

Des Weiteren wurde der Einsatz von UV/Vis-Geräten getestet, die jedoch im Vergleich zur Farbmessung schlechtere Ergebnisse lieferten.

Es wurden außerdem Versuche mit fluoreszierenden Pigmenten durchgeführt, die in kleinerer Konzentration mithilfe der Fluoreszenzspektroskopie nachweisbar und visuell mit UV-Licht sichtbar gemacht werden können. Da die verwendeten Farbstoffe jedoch im Vergleich zu anderen Farbpigmenten mit einer Größe von $> 10 \mu\text{m}$ einen unrealistischen Vergleich boten und die Verteilungen in der Folie ebenfalls unregelmäßig war, wurde diese Methode nicht weiterverfolgt.

Aufgrund der Versuche und der guten Kontrollmöglichkeit der Messungen mit bloßem Auge auf dem Folienwickel wurde die Farbmessung als Messmethode für die Spülprozesse ausgewählt. Als Indikatoren für die Erfassung der Ist-Zustände an den verschiedenen Versuchsfolienanlagen der beteiligten Projektpartner wurde ein erfahrungsgemäß schwer zu spülendes Kupfer-Phthalocyaninblau-Pigment gewählt.

Als zweites Messverfahren, sowohl zur zusätzlichen Kontrolle der Farbmessung, als auch zur Messung nicht sichtbarer Additive wie EVOH wurde die Infrarotspektroskopie ausgewählt.

Die ausgewählten und beschafften Messgeräte für die Indikatoren des Produktwechsels wurden nicht in die Anlagen integriert. Als Farbmessgerät wurde das Handfarbmessgerät Color-Guide Sphere Spin $d/8^\circ$ der Fa. Byk Gardner verwendet. Die infrarotspektroskopischen Messungen wurden mit dem Labor-IR-Spektroskop IRPrestige-21 der Firma Shimadzu durchgeführt. Es verfügt über eine Einfach- und eine Mehrfach-ATR-Einheit, mit denen sich Additive vor allem in den Randschichten der Folien nachweisen lassen.

3.2 Ausarbeitung von Vergleichsstandards

Für den direkten Vergleich unterschiedlicher Versuche, vor allem der Ist-Zustände mit den späteren Versuchsreihen, wurden möglichst identische Produkteigenschaften (Breite, Dicke, Abzugsgeschwindigkeit etc.) eingestellt. Vom Folienwickel wurden dann nach bestimmten Zeiten, in der Regel nach fünf bis sechs Metern Proben entnommen. Diese Proben konnten bei gleicher Stärke und Breite untereinander verglichen werden. Die aus dem Farbwechsel stammenden Proben werden doppelt übereinander gelegt und gegen einen weißen Hintergrund aus mehreren Lagen Papier vermessen. Die Messwerte werden im CIE- $L^*a^*b^*$ -System erfasst. Das angewandte CIELAB-System wurde aus dem Munsell-System abgeleitet und von der Commission Internationale de l'Eclairage, abgekürzt CIE, genormt und eingeführt. Die drei Raumkoordinaten ergeben sich mit a^* (als Rot-Grün-Achse), b^* (als Gelb-Blau-Achse), und L^* (als Helligkeitsachse) und werden mithilfe der Normalfarbwerte und einem bestimmten funktionellen Zusammenhang berechnet. Abbildung 3-1 stellt die Raumkoordinaten grafisch dar.

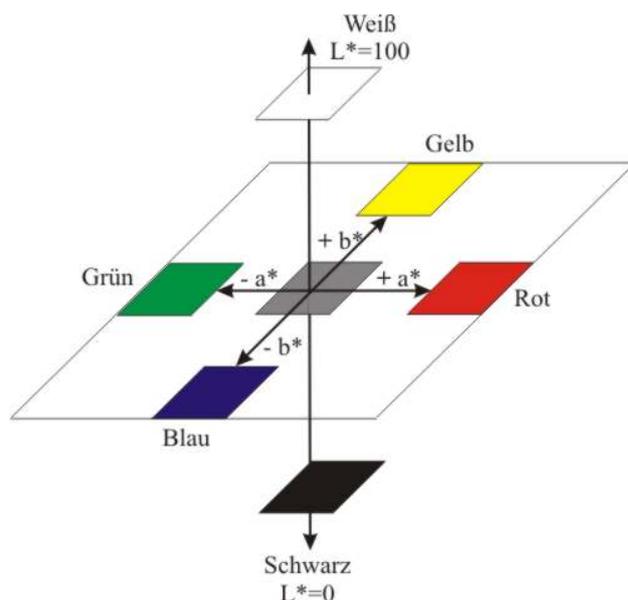


Abbildung 3-1 CIE $L^* a^* b^*$ - System [18]

Das Color-Guide Sphere Spin $d/8^\circ$ der Fa. Byk Gardner zeichnet die Reflexionskurven des Objektes in einem Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm auf. Das menschliche Auge kann Wellenlängen zwischen 380 nm und 750 nm erkennen.

Zum objektiven Vergleich der Proben wurden die ausgewählten Messverfahren verwendet. Beim subjektiven Vergleich zweier Proben durch den visuellen Vergleich müssen stets dieselben konstanten Lichtverhältnisse herrschen. Für den Vergleich der Spülvorgänge bei unterschiedlichen Geometrien, Materialien, Durchsätzen und Beschichtungen (AP 3) wurde ebenfalls die Farbmessung verwendet. Hierbei wurden jedoch Stränge mit Durchmessern von 20 mm extrudiert, diese bis auf ca. 10 mm flach gedrückt und anschließend farbtechnisch vermessen. Aufgrund der größeren Probendicke (die Proben sind nicht durchsichtig: opak) stellt sich bei dieser Anwendung das Problem der Dicken-schwankungen nicht.

Nach Entwicklung des Vergleichsstandards wurden an allen Versuchsanlagen der Projektpartner Sengewald, RKW, Reifenhäuser, W&H und im Technikum der Universität Versuche zu Erfassung der Ist-Zustände durchgeführt, mit denen die späteren Versuche verglichen werden konnten. Für die Erfassung der Ist-Zustände im Monofolienbereich sind in der Universität verschiedene Versuche mit folgenden Farbpigmenten gefahren worden:

- Farbstoff Ultramarinblau, anorganisch, Pigmentgröße 1-1,5 μm ;
- Farbstoff Cu-phthalozyanin, organisch, Pigmentgröße 0,1 μm ;
- Farbstoff Kohlenstoff-schwarz, anorganisch, verschiedene Pigmentgrößen.

Allein diese Farbstoffe bei gleichen Prozessparametern haben ein sehr unterschiedliches Spülverhalten. Die hier zugrunde liegenden Einflussfaktoren waren ein Teil der Analysen aus AP 2.6. In unregelmäßigen Abständen wurden die Grundversuche wiederholt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Diese Ist-Zustände sind der Vergleichsmaß für alle Versuche des Arbeitspaketes 2.6. In den Darstellungen der Versuchsergebnisse finden sich demzufolge die Farbmessungskurven der Ist-Zustände jeweils als Vergleich.

3.3 Erfassung von Ist-Zuständen der Spülprozesse und -vorschriften

Die Spülprozesse sind im Wesentlichen abhängig von:

- Rohstoffen
- Geometrie der Schmelze führenden Bauteile (Schnecken, Blaskopf)
- Prozessparameter (Temp. Durchsatz, Massedruck)

Im Detail wird in Abhängigkeit des zu spülenden Produktes in Verbindung mit den Eigenschaften des nachfolgenden Produktes ein Spülprozess oder Ablauf ausgewählt. In der folgenden Grafik ist eine mögliche Folge von Polymeren aufgestellt, die nacheinander in den Extrudern und Werkzeugen gefahren werden.

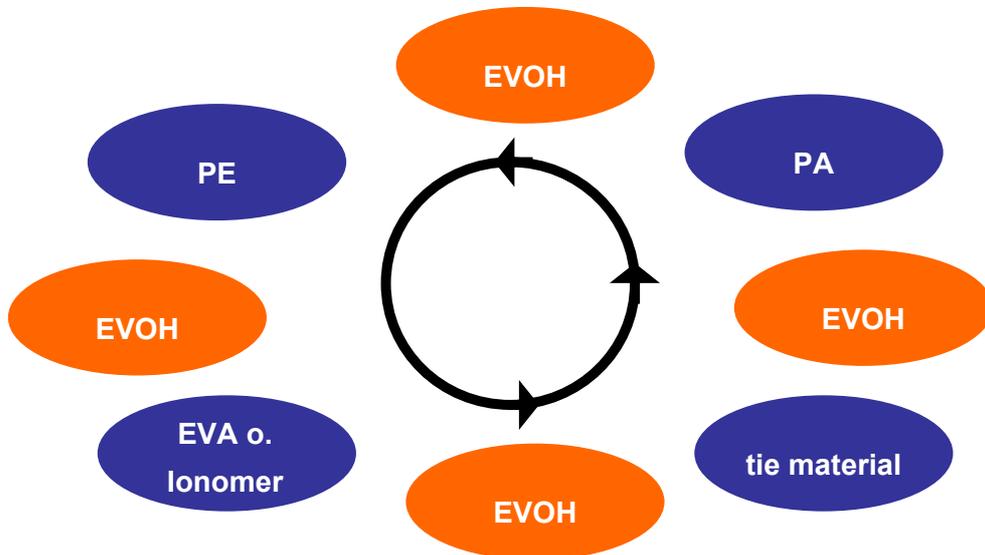


Abbildung 3-2 Produktionszyklus verschiedener Polymere

Besonders kritisch erweisen sich Polymere, die bei langer Verweilzeit in Verbindung mit hohen Temperaturen zu verbrennen oder zu vernetzen beginnen. Besonders betroffen sind dabei die Randbereiche der schmelzeführenden Geometrien an den Werkzeugwandungen, da hier die Fließgeschwindigkeit sehr gering und die Verweilzeit sehr hoch ist.

Ein besonders kritisches Polymer ist dabei das Ethylen Vinyl Alkohol Copolymer (EVOH). Dies zeigt sich an folgenden Merkmalen des Polymers:

- Hohe Affinität zu Metalloberflächen der Extruder und Werkzeuge
- EVOH kann sich aufgrund der verschiedenartigen chemischen Struktur nicht mit unpolaren Materialien wie z.B. Polyolefine vermischen
- EVOH hat dafür eine hohe Affinität zu polaren Materialien wie z.B.:
Polyamid (PA), Anhydrid modifizierte Haftvermittler, Vinylacetat Copolymere (EVA), Ionomere (Zink o. Natrium Inseln)

Zwischen den Materialwechseln werden in Abhängigkeit von den speziellen Eigenschaften der Polymere verschiedene Spülprozesse durchgeführt, bei denen folgende Faktoren zu kontrollieren sind:

- Vorgehensweise der Anlagenbediener
- Abfolge der einzelnen Prozesssequenzen
- Die Wahl der richtigen Spülmaterialien

Für das Beispiel des EVOH ist in der Vergangenheit folgende Vorgehensweise durchgeführt worden.

Das EVOH wurde bei gleichbleibenden Temperaturen mit einem Standard PE (LLD oder LD) solange aus den Schmelze führenden Bauteilen herausgespült, bis keine Stippen mehr (transparent o. braun) in der Folie sichtbar waren. Hierbei ist der Spülprozess in erster Linie abhängig von:

- Durchsatz der Spülmaterialien
- Laufzeit des EVOH im Vorauftrag

Anhand der Folie ist es nicht möglich zu erkennen, ob die EVOH-Lage vollständig gespült ist oder nicht. Da es hierfür auch keine maschinellen Messverfahren gibt, sind das Ende eines Spülvorgangs und der Übergang zur Gutware dadurch abgegrenzt, dass keine „Schlieren“ oder „Stippen“ mehr in der Coexstruktur zu sehen sind. Diese Schlieren und Stippen entstehen aus den oben beschriebenen Unverträglichkeiten des EVOH's mit anderen Polymeren. Die Beurteilung wird durch den entsprechenden Maschinenführer an der Anlage durchgeführt. In der Vergangenheit waren die dafür benötigten Rüstzeiten und Abfälle sehr stark schwankend und nicht reproduzierbar.

3.4 Einfluss der Prozessführung auf den Spülvorgang

Im Einzelnen wurden mit der ausgewählten Kombination aus Basismaterial (DOW LD-PE150) und einem Schwarzpigment Versuche mit einer Erhöhung bzw. Verringerung der Werkzeug- und Extrudertemperaturen sowie einer Massedurchsatzsteigerung bzw. -verringern durchgeführt.

Ziel der Versuchsreihe war es, zu klären, ob mithilfe einer optimierten Prozessführung der beiden Variablen eine Verringerung der Spülzeit sowie der Ausschussmenge erreicht werden kann.

Die Verwendung eines Schwarzpigmentes hat den Vorteil, dass nur der L*-Wert der Farbmessung, also die Helligkeit gegenüber dem weißen Hintergrund ausgewertet werden muss.

Anstatt eines Spülvorgangs mit durchgehend konstanten Anlagenparametern wurden mit Beginn des Spülvorgangs verschiedene „Spülprogramme“ gefahren.

3.4.1 Einfluss des Massedurchsatzes

Die in Abbildung 3-3 dargestellten Versuchsvorgaben zur Variation des Massedurchsatzes beginnen zu dem Zeitpunkt, an dem das festgelegte Füllstandsniveau der Farbmischung über der Einfüllzone des Extruders erreicht ist und mit dem Einfüllen des farblosen Granulats der Spülvorgang laut Definition beginnt.

Die Spülprogramme dauern jeweils 30 Minuten. Dabei wird zum einen der eingestellte Massedurchsatz von 25 kg/h um 10 kg für 30 min gesenkt, zum anderen um 10 kg/h auf 35 kg/h erhöht. In weiteren Versuchen wird der Massedurchsatz zwischen diesen beiden Versuchsextremen variiert. Die Auswertung der Versuche geschieht im Vergleich zu einem Versuch, bei dem der Spülvorgang bei konstant gehaltenem Massedurchsatz von 25 kg/h durchgeführt wurde.

Mit der Veränderung des Massedurchsatzes veränderte sich zwangsläufig auch die Foliendicke, da die Abzugsgeschwindigkeit von 6 m/s nicht angepasst wurde. Diese Dickenänderung hat ggf. Auswirkungen auf die Farbmesswerte, die in der späteren Auswertung zu berücksichtigen sind. Nach 30 min. jedoch, wenn der Massedurchsatz wieder auf 25 kg/h eingestellt wird, sind auch die Foliendicke und damit die Farbwerte wiederum vergleichbar.

Variation des Massedurchsatzes

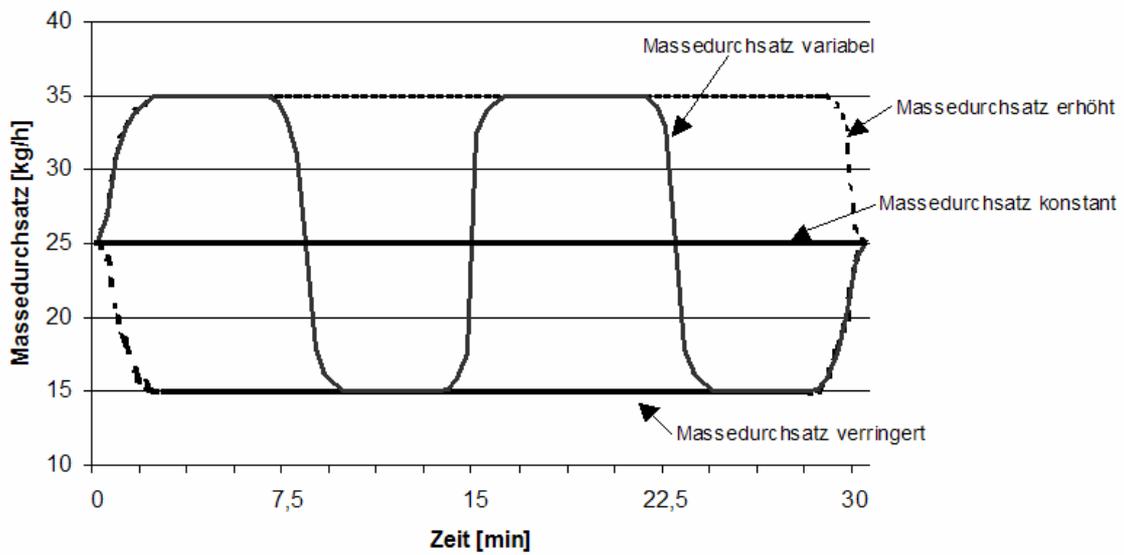


Abbildung 3-3 Versuchsplan zur Variation des Massedurchsatzes

Die folgende Grafik (Abbildung 3-4) zeigt einen Auszug der Messdatenaufzeichnung, von während der Versuche aufgezeichneten tatsächlichen Drehzahlwerten, durch die der Massedurchsatz gesteuert wird.

Variation des Massedurchsatzes

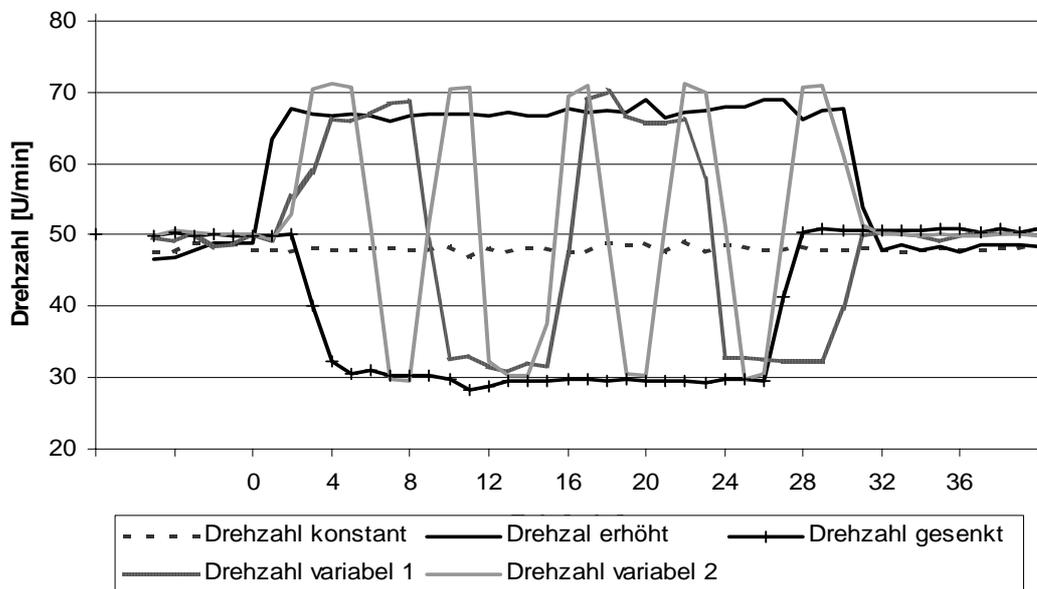


Abbildung 3-4 Messdatenaufzeichnung der Drehzahlen

Die Auswertung der Versuche erfolgte wie beschrieben durch die Farbmessung. Durch die Verwendung eines Schwarzpigments als Indikator ist im Folgenden nur der Helligkeitswert L^* dargestellt.

In Abbildung 3-5 sind die drei Farbwertkurven der Versuche mit konstantem, konstant erhöhtem und konstant verringertem Massedurchsatz über der Folienlänge aufgetragen.

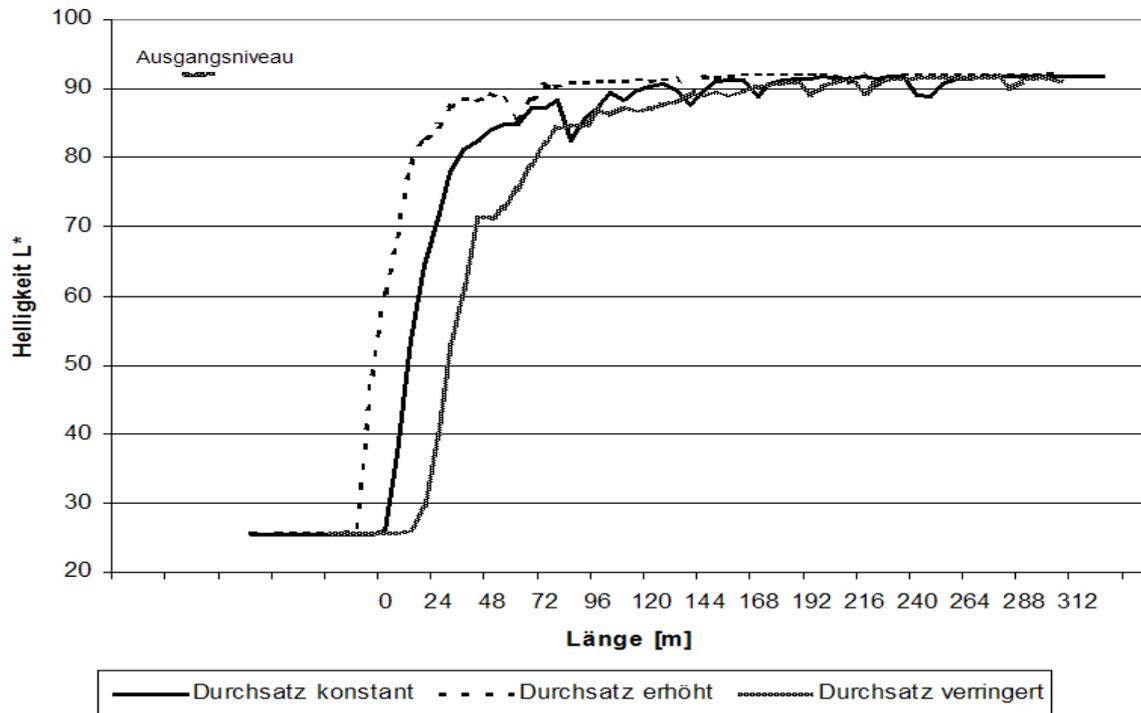


Abbildung 3-5 Einfluss des Massedurchsatzes auf das Spülverhalten

Die unterschiedlichen Anfänge der Steigung der Kurven erklärt sich daraus, dass bei verringertem Massedurchsatz der Spüleffekt entsprechend verspätet, bei erhöhtem Massedurchsatz entsprechend früher messbar ist. Dementsprechend zeigt der Vergleich zwischen den beiden Extremen (durchgehend erhöhtem oder verringertem) und dem konstant gehaltenen Massedurchsatz das erwartete Ergebnis einer erheblich kürzeren Spülzeit bei erhöhtem Massedurchsatz. Die Auswertung der Spüldauer erfolgte bezüglich des Erreichens eines 99,5%-Niveaus eines farblosen Ausgangsniveaus von ca. 92. Das heißt, dass der L*-Farbmesswert, der zuerst einen Wert von $92 \times 0,995 = 91,54$ erreicht, den Wert der Folienlänge liefert, der zum Vergleich der Versuche herangezogen wird. Bei konstant gehaltenem Massedurchsatz wird das 99,5%-Niveau nach 192 m erreicht. Bei erhöhtem Massedurchsatz wird das Niveau bereits nach 162 m und bei verringertem Massedurchsatz erst nach 228 m erreicht.

Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 3-6 eine vergrößerte Darstellung der Helligkeitsachse von 80-92,5 mit eingezeichnetem 99,5%-Niveau.

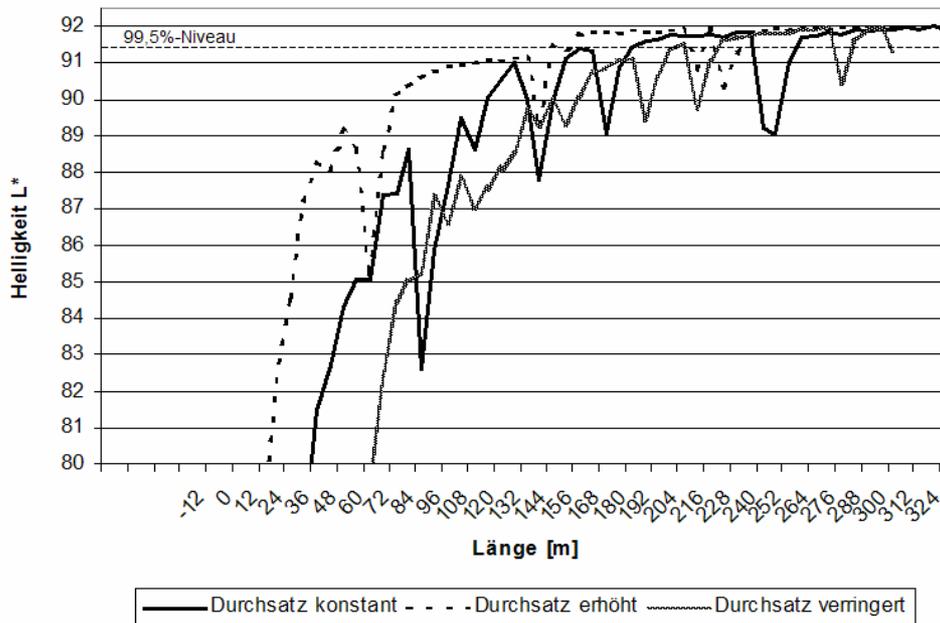


Abbildung 3-6 Einfluss des Massedurchsatzes auf das Spülverhalten, Zoom

Jede Durchsatzveränderung dauerte 30 min., was 180 Folienmetern entspricht. Im Anschluss an die 30 min. wurde der Massedurchsatz wieder auf das ursprüngliche Niveau eingestellt, sodass sich auch die Foliendicke wieder bei 100 µm einstellte.

Vergleich man die bei den Spülvorgängen anfallenden Ausschussmengen bis zum 99,5%-Niveau der drei Versuche, so zeigt sich, dass das Spülergebnis bezüglich der Ausschussmenge bei verringertem Massedurchsatz mit 10,83 kg am besten ist, jedoch wird auch die meiste Zeit benötigt (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 Ausschuss bei verschiedenen Massedurchsätzen bis zum 99,5%-Niveau

Versuch	Ausschussmenge [kg]	Spülzeit [min]
Verringerter Massedurchsatz	10,83 kg	38 min
Konstanter Massedurchsatz	13,33 kg	32 min
Erhöhter Massedurchsatz	15,75 kg	27 min

Die ermittelte Ausschussmenge beim Versuch mit erhöhtem Massedurchsatz und der kürzesten Spülzeit von nur 27 min. beträgt 15,75 kg.

Die Versuche bestätigen die allgemeinen Aussagen, dass man mit erhöhtem Massedurchsatz zwar Spülzeit einsparen kann, der produzierte Ausschuss hingegen überpro-

portional ansteigt. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse muss jedoch Folgendes berücksichtigt werden: durch den erhöhten Massedurchsatz und gleichbleibender Abzugsgeschwindigkeit ist die Folie im Verhältnis dicker als die des Referenzversuches und verfälscht damit bei der Farbmessung das Ergebnis ins dunklere. Trotz der größeren Dicke erreicht der Versuch das 99,5%-Niveau früher. Bei konstant gehaltener Dicke und damit vergleichbaren Farbwerten würde die angegebene Ausschussmenge bis zum Erreichen des Niveaus geringer sein. Ähnlich ist der Sachverhalt bei verringertem Massedurchsatz und der damit dünneren Folie. Der Versuch erreicht, trotz der dünneren Folie das Niveau erst nach den 30 min. und damit erst im Bereich der wieder vergleichbaren Foliendicke.

Die Abzugsgeschwindigkeit wurde bei diesen Versuchen nicht angepasst, da bei allen Versuchen innerhalb eine einheitliche Vorgehensweise und Auswertemethode beibehalten werden sollte. Insofern führen die Werte hier zu einer qualitativ vergleichbaren Aussage, die quantitativ bei anderer Versuchsdurchführung noch deutlicher ausfallen würde.

Ergänzende Versuche sollten im Weiteren im Vergleich zum erhöhten Massedurchsatz zeigen, ob bei gutem Spülergebnis und kurzer Spülzeit durch Variation des Massedurchsatzes der Spülausschuss verringert werden kann.

Dazu wurden weitere Spülprogramme gefahren, bei denen, wie an zwei Beispielen in Abbildung 3-4 zu sehen ist, die Drehzahl innerhalb der 30 Minuten variiert wurde. Dabei zeigte sich, dass eine anfängliche Erhöhung des Durchsatzes stets die besseren Ergebnisse brachte, im Vergleich zu einer anfänglichen Verringerung und der damit einhergehenden Verzögerung des Spüleffektes. Im weiteren Verlauf werden daher zwei Versuche mit anfänglicher Erhöhung und anschließender 4-facher bzw. 9-facher Drehzahländerung innerhalb der 30 min. des Spülprogramms beschrieben.

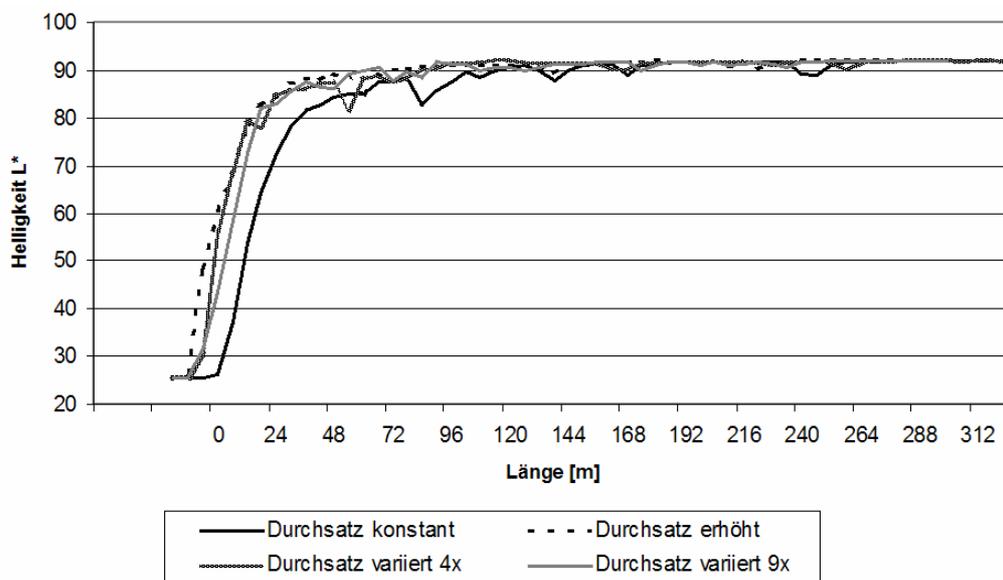


Abbildung 3-7 Einfluss der Durchsatzvariationen im Vergleich

Abbildung 3-7 zeigt, dass die beiden Farbkurven des variierten Durchsatzes ähnlich der Farbkurve des erhöhten Durchsatzes verläuft. In der folgenden Zoomdarstellung (Abbildung 3-8) scheinen beide Farbkurven ebenfalls ein besseres Spülverhalten abzubilden, als mit konstantem Massedurchsatz.

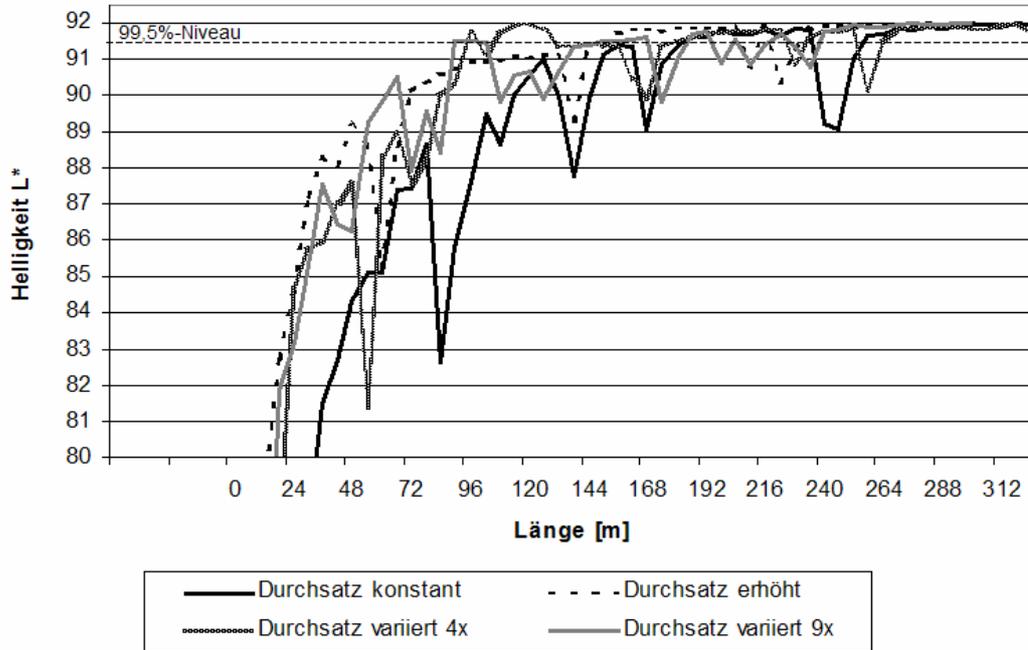


Abbildung 3-8 Einfluss der Durchsatzvariationen im Vergleich, Zoom

Ausgehend vom 99,5%-Niveau ergibt sich aufgrund der Messwerte folgende Tabelle 3-2:

Tabelle 3-2 Vergleich der Ausschussmengen und der Spülzeiten bezüglich des 99,5%-Niveaus

Versuch	Ausschussmenge [kg]	Spülzeit [min]
Verringerter Massedurchsatz	10,83 kg	38 min
Konstanter Massedurchsatz	13,33 kg	32 min
Variabler Massedurchsatz (4x)	7,08 kg	17 min
Variabler Massedurchsatz (9x)	11,66 kg	28 min
Erhöhter Massedurchsatz	15,75 kg	27 min

Sowohl die Versuche mit 4-facher als auch mit 9-facher Änderung des Durchsatzes erreichen das 99,5%-Niveau mit deutlich weniger Spülausschuss früher, als im Vergleich zum gleichbleibenden Massedurchsatz.

Aber auch hier werden die Ergebnisse erheblich durch die Foliendickenschwankungen verfälscht. Nach 17 min. ist beim 4x-Versuch eine Dünnstelle aufgrund des gesenkten Massedurchsatzes erreicht und ist somit nicht mit den Ausgangsversuchen vergleichbar. Beim 9x-Versuch ist eine solche Stelle gerade nach 28 min erreicht und verfälscht die Ergebnisse ebenfalls. Um dennoch eine qualitative Aussage zu machen, wird in der folgenden Tabelle jeweils der Helligkeitwert nach 192 m oder 32 min verglichen, wo alle Versuche wieder eine vergleichbare Foliendicke aufweisen.

Tabelle 3-3 Vergleich der Ausschussmengen und der Helligkeitwerte nach 32 Minuten

Versuch	Helligkeitwert L*	Ausschussmenge [kg]
Verringerter Massedurchsatz	89,38	8,33 kg
Konstanter Massedurchsatz	91,61	13,33 kg
Variabler Massedurchsatz (4x)	91,61	13,33 kg
Variabler Massedurchsatz (9x)	91,72	13,66 kg
Erhöhter Massedurchsatz	91,84	18,33 kg

Parallel zu den Versuchen mit den Massedurchsatzvariationen wurde eine Spülvorschrift verfasst, die in der Praxis auf der Referenz-Monofolienanlage der RKW an den ausgewählten Produkten auf ihre Wirkungsweise hin getestet wurde (AP2.7). Dabei wurden die im Labor untersuchten Auswirkungen auf den Spülprozess in Bezug auf die Zeiteinsparung durch erhöhten Massedurchsatz in den Praxisversuchen bestätigt.

Zur Erprobung der optimierten Vorgehensweisen wurden bei der Fa. RKW neben der ausgewählten Referenzanlage auch weitere Anlagen einbezogen. So konnten weitere Parameter und Ergebnisse in die Untersuchung mit einfließen.

Nach jedem Farbwechsel wurde versucht, die Spülvorschrift weiter an den Praxisbetrieb anzupassen und neue Erkenntnisse in die folgenden Versuche miteinfließen zu lassen. Die Praxisversuche haben gezeigt, dass hier eine Variation des Massedurchsatzes nur im Einzelfall zu einer leichten Verbesserung der Spülzeiten sowie einer gleichzeitigen Verminderung des Spülausschusses, im Vergleich zu konstant erhöhtem Massedurchsatz führt. Die Ableitung einer generellen Spülvorschrift, welche sich auf andere Anlagen übertragen lässt, kann aufgrund der Ergebnisse jedoch nicht vorgenommen werden. Dazu sind die einzelnen individuellen Einflussgrößen und Konfigurationen verschiedener Anlagen und deren Auswirkungen noch zu wenig untersucht.

Bei den sich in der Produktion ergebenden Gelegenheiten werden demnach auch nach Projektende nach dem bisher durchgeführten Versuchsablauf die Auswirkungen weiterer ausgesuchter Aspekte und Eingriffsmöglichkeiten untersucht werden.

Vergleich und Bewertung der Optimierung im Vergleich zum Ursprungszustand

Ein Vergleich der Wirkung der Spülvorschrift erfolgte nach jedem Versuch und zeigte, dass eine manuelle Reinigung der Anlage, wie sie bei einigen Produkten in der Vergangenheit notwendig war, auch in Zukunft allein durch optimierte Prozessführung nicht vermieden werden kann. Jedoch kann die Gesamtzeit der Vorspülung bis zur manuellen Reinigung verkürzt werden und der bis dahin anfallende Ausschuss verringert werden.

3.4.2 Einfluss der Verarbeitungstemperatur

Die bei der Variation der Schmelzetemperaturen zugrunde liegende Hypothese bezieht sich auf eine spezielle Beeinflussung der Schmelze durch Viskositätsveränderungen, um die Bedingungen in den Randschichten so zu gestalten, dass der Spüleffekt verbessert wird. Durch die Erhöhung der Temperaturen wird die Schmelze flüssiger, bei einer Senkung zäher. Beides verändert die Schubspannungs- und Scherkraftverhältnisse. Eine flüssigere Schmelze kann in den Randschichten aufgrund der niedrigeren notwendigen Schubspannungen besser spülbar sein. Eine zähere kann aufgrund der höheren vorhandenen Scherkräfte in Wandnähe ein besseres Spülergebnis erreichen. Zu beiden möglichen Effekten liegen keine grundlegenden Untersuchungen vor, aus denen Empfehlungen für die Praxis abgeleitet werden können. Der Einfluss der Viskositätsveränderung konnte vor Beginn der Versuchsreihe nicht abgeschätzt werden, da sich beide möglichen Effekte gegenseitig aufheben können.

In der unternehmerischen Praxis ist es wie schon beschrieben am einfachsten, einen Produktwechsel mit Spülvorgang bei laufendem Prozess und Beibehaltung der Folienblase durchzuführen. Einige Empfehlungen beinhalten zum Spülen ein zäheres Material zu benutzen, wie es auch in Kapitel 3.5 bezüglich der Spülhilfsmittel beschrieben wurde. Dabei wird die unterschiedliche Viskosität bei der gleichen Temperatur ausgenutzt. Die hier getroffene Annahme basiert darauf, dass mit niedrigviskosem Material hochviskoses besser zu spülen ist. Vergleichbar ist der Vorgang mit dem Spülen eines Wasser gefüllten Rohres beispielsweise mit Honig. Der umgekehrte Fall gestaltet sich vor allem in Wandnähe schwieriger. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auch das Spülhilfsmittel größtenteils wieder aus der Anlage entfernt werden muss. Durch die Variation der Temperaturen lässt sich ebenfalls die Viskosität ändern und könnte dadurch positiven Einfluss auf die Spülzeit und die Menge des Ausschusses haben.

Zur Untersuchung der Temperaturvariation wurde, angelehnt an die Massedurchsatzvariation, ebenfalls eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der während des Spülvorganges die Temperaturen von Extruder, Schmelzeleitungen und Werkzeug um jeweils 20°C gesenkt bzw. erhöht wurden. Abbildung 3-9 zeigt die durch die Messdatenaufzeichnung mitgeschriebenen Schmelzetemperaturen bei den Grundversuchen mit erhöhter, konstanter und verringerter Temperatur.

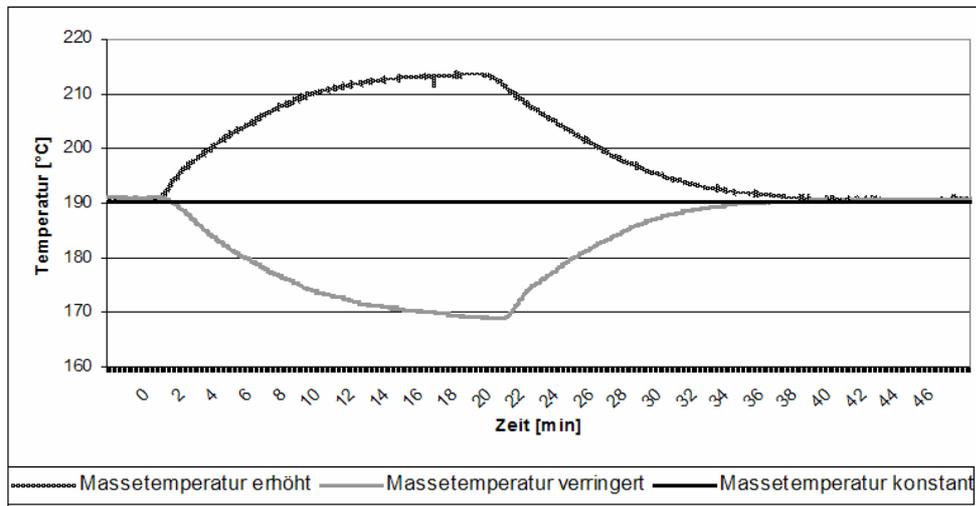


Abbildung 3-9 Versuchsplan zur Variation der Temperatur

Schon bei der Durchführung der drei Versuche wurde deutlich, dass die Temperaturführung zur Unterstützung des Spülvorgangs viel zu träge ist, um eine Mehrfachvariation wie bei den Massedurchsatzversuchen zu erreichen. Die Auswertung der Farbmessungen wird, da auch hier das Schwarzpigment als Indikator verwendet wurde, ebenfalls ausschließlich anhand der Helligkeit (L^* -Wert) dargestellt. Abbildung 3-10 zeigt beim Vergleich aller drei Versuche keine deutlichen nennenswerten Unterschiede zwischen den Kurven.

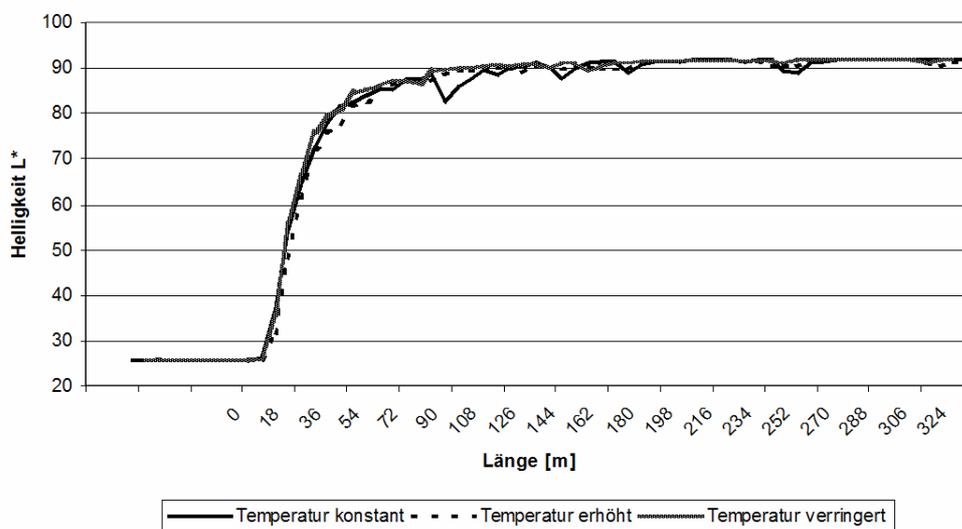


Abbildung 3-10 Einfluss der Temperaturveränderung auf das Spülverhalten

Diesen Sachverhalt zeigt auch die Zoomdarstellung und die Auswertung der Messwerte im Hinblick auf das 99,5%-Niveau des Ausgangswertes einer Helligkeit von 92. Alle drei Versuche erreichen das 99,5%-Niveau bei der Folienprobe nach 192 Metern.

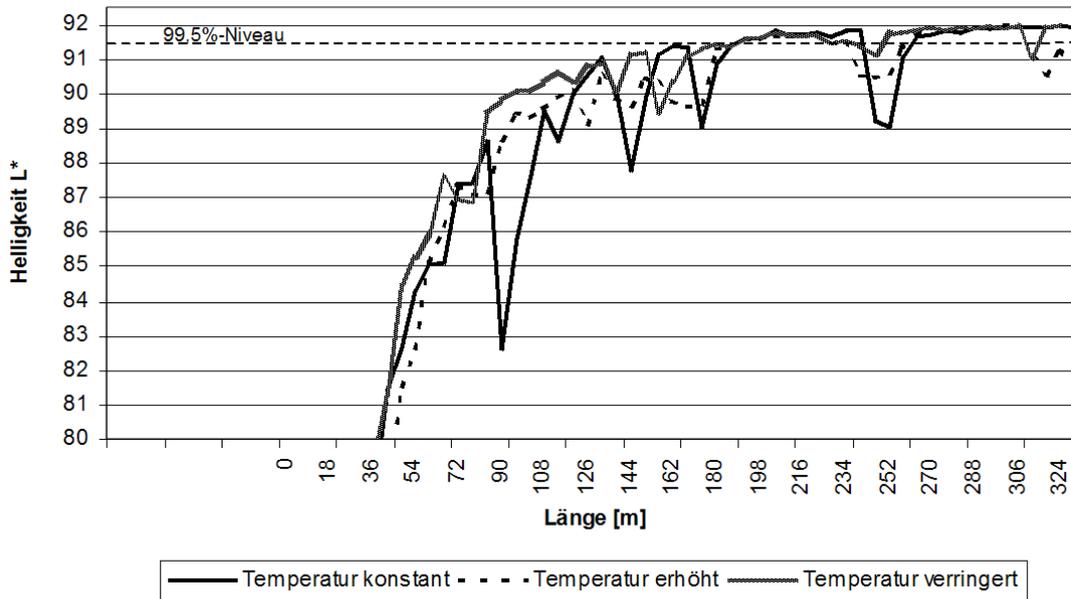


Abbildung 3-11 Einfluss der Temperaturveränderung auf das Spülverhalten, Zoom

Demnach konnte in den Versuchen kein Einfluss der Temperatur auf das Spülverhalten festgestellt werden. Eine Fortführung der Versuchsreihe mit mehrfacher Variation der Temperatur wurde aus Gründen der schon erwähnten sehr hohen Trägheit der Temperaturänderungen nicht weiter verfolgt. Zudem stellt bei der Senkung der Temperaturen auch der maximal zulässige Schmelzedruck in den Anlagen einen begrenzenden Faktor dar. Eine Temperaturverringerng erhöht den Druck und kann somit nicht beliebig weit erfolgen. Da aus den Versuchen aber keine Verbesserungsmöglichkeiten für den Spülprozess durch Temperaturänderungen abgeleitet werden konnten, wurde von Empfehlungen für die Praxis abgesehen.

3.5 Einfluss von Spülmedien auf den Spülvorgang

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sind eine Reihe von am Markt erhältlichen Spülmedien getestet worden. Daneben ist ein HD-PE als Spülmedium getestet worden.

Die Reinigungsmechanismen der in Form von Granulaten angebotenen Reinigungshilfsmitteln basieren sowohl auf mechanisch als auch auf chemisch reinigenden Komponenten. Kombinationen von beidem kommen häufig vor.

Für die mechanische Reinigung werden abrasive Partikel wie Titandioxid, Carbonat oder Siliziumoxid eingesetzt. Die kleinen, harten Teilchen sollen eine bessere Reinigung im

Wandbereich erreichen. Bei häufiger Anwendung können jedoch die Oberflächen der Werkzeuge angegriffen und somit die Lebensdauer dieser verringert werden.

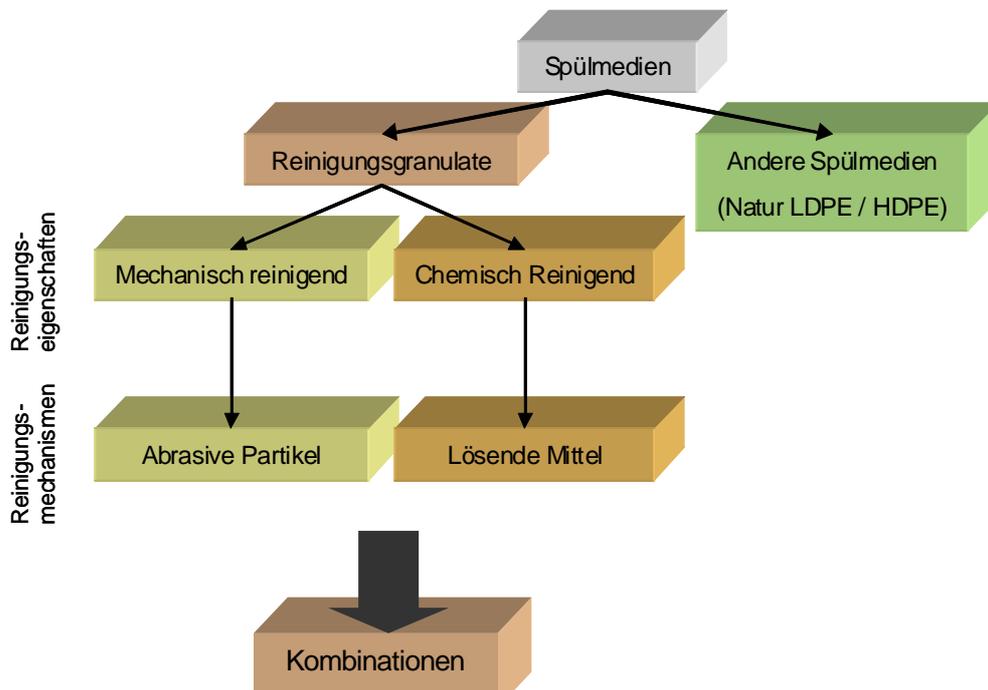


Abbildung 3-13 Einteilung der Spülhilfsmittel

Die Reinigungsmechanismen des chemischen Reinigens sind schwer zu bewerten, da es vom Hersteller keine Angaben zu den Inhaltsstoffen gibt. Bekannt ist jedoch, dass es sich in den meisten Fällen um Hydrolyse- oder Oxidationsvorgänge handelt. Für einen erfolgreichen chemischen Lösungsprozess muss der Wirkstoff allerdings eine längere Zeit in der Geometrie verweilen und einwirken, was die wichtige Beibehaltung der Folienblase erschwert.

Der Einsatz von Spülmedien, insbesondere von Reinigungsgranulaten, gehört vor allem aufgrund bislang fehlender Erfahrungen noch nicht zu den bevorzugten Methoden der Verarbeiter. Die Vor- und Nachteile der bisher am Markt erhältlichen Reinigungsgranulate sind zu wenig erforscht, sodass diese eher in Einzelfällen Anwendung finden. Zum jetzigen Zeitpunkt werden Reinigungsgranulate in der Blasfolienextrusion vorwiegend dann eingesetzt, wenn beabsichtigt ist, die Anlage herunterzufahren und über längere Zeit darin Schmelze verweilt oder abkühlt. Die Vorteile der Reinigungsgranulate liegen in diesen Fällen in ihrer guten thermischen Stabilität während langer Verweilzeiten. Ihre Nachteile liegen jedoch darin, dass auch das Reinigungsmittel vor der Gutproduktion wieder herausgespült werden muss.

Innerhalb der Arbeit wurde daher eine Versuchsreihe mit am Markt erhältlichen Spülmedien gefahren, deren Ergebnisse hier nur kurz zusammengefasst werden. Für die Versuche wurden verschiedene am Markt erhältliche Reinigungsgranulate ausgewählt, die me-

chanische und chemische Reinigungseigenschaften aufweisen und die nach Herstellerangaben für Blasfolienanlagen in Frage kommen. Die meisten Hersteller geben zu ihrem Granulat eine Spülvorschrift oder Anwendungsempfehlung bei, die z.B. Mengenangaben für die Anwendung (pur oder als Mischung), Angaben zu den Parametereinstellungen, wie Verarbeitungstemperaturen oder Schneckendrehzahlen und Angaben zum Verfahren, darunter die Einwirkzeiten enthalten.

Bei allen Versuchen war die Spülzeit des Farbindikators letztendlich geringer als bei herkömmlichem Weiterfahren der Anlage mit PE-LD. Die Wirkung wurde mithilfe der Farbmessung an einem Farbwechsel von Blau auf farblos gemessen. Zwar hatten die Spülhilfsmittel eine messbare Wirkung, jedoch sind sie weit davon entfernt, eine befriedigende Lösung darzustellen. Hinzu kommt, dass auch das Spülhilfsmittel häufig bis zur erneuten Gut-Produktion wieder herausgespült werden muss, was bei den Versuchen jedoch nicht berücksichtigt wurde. Vom jetzigen Standpunkt aus gesehen, hat sich allerdings keines der Spülhilfsmittel, als auch keine der beschriebenen Spülmethode als zufrieden stellend erwiesen.

Alle Versuche wurden jeweils durch projektbegleitende Recherche, beispielsweise auf der Kunststoffmesse K2004, ergänzt.

3.6 Einfluss des Pigmentbatches auf den Farbwechsel

Vorversuche

Um das Phänomen zu bestätigen, dass ähnliche Rezepturen mit unterschiedlichen Farb-Masterbatches zum Teil gravierende Unterschiede im Spülverhalten haben, wurden Vorversuche auf der Versuchsanlage durchgeführt. In den Vorversuchen wurde als einzige Variable das Farbbatch ausgetauscht. Die Versuche wurden jedoch nicht mit dem später verwendeten Monowerkzeug sondern mit einem 3-Schicht-Wendelverteiler durchgeführt. Als Grundrohstoff wurde einheitlich das LDPE Dow PE150L verwendet.

Zwei der vier in den Vorversuchen verwendeten Pigmentbatches wurden nach Angaben von Produktionsbetrieben ausgewählt. Zum einen ein Kupferphthalocyanin-Pigmentbatch (*Blau1o*), das als besonders schwer zu spülen gilt. Zum anderen ein Ultramarinpigmentbatch (*Blau2a*), das relativ leicht zu spülen ist. Von den beiden weiteren Versuchsbatchen ist das schwarze Rußpigmentbatch *Schwarz1a* aufgrund der Einfachheit im CIE-Lab-System gewählt worden. Bei Schwarz muss nur die Helligkeitsachse L^* zum Vergleich betrachtet werden. Das rote Pigmentbatch *Rot1a* wurde aufgrund der verhältnismäßig großen durchschnittlichen Pigmentgröße ausgewählt.

Tabelle 3-4 Pigmente und Ausschussmenge

Farbe	Pigment	Durchschn. Pigmentgröße (ca.)	Dispergiermittel [%]
Blau1o	Kupfer-Phthalocyanin	0,10 µm	ca. 20
Blau2a	Ultramarin	1,20 µm	< 1
Schwarz1a	Ruß	0,06 µm	< 1
Rot1a	Fe3O - Eisenoxid	4,00 µm	< 5

Zu den Versuchen wurde jeweils eine Farbkurve mit dem Handfarbmessgerät ermittelt, die den Spülvorgang von der eingefärbten Folie zur farblosen Folie darstellt. Die Farbmessung der Proben ergab die in dargestellten Messkurven über der Folienlänge. Es wurde jeweils der dominante Farbwert und der Helligkeitswert eingetragen. Der dominante Farbwert ist bei Rot- und Grün-Pigmenten der a*-Wert, bei Blau- und Gelb-Pigmenten der b*-Wert. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der auf der a*-Achse im CIE-Lab System im positiven Bereich abgetragene Rotwert in den negativen Bereich gespiegelt. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit mit den auf der b*-Achse im negativen Bereich abgetragene Blau-Werte möglich.

Im oberen Bereich der Abbildung 3-14 ist der L*-Wert, also der Helligkeitswert der Farbproben aufgezeichnet. Hier ist auch die Kurve des Schwarzpigmentes dargestellt, das a*- oder b*-Werte von null besitzt.

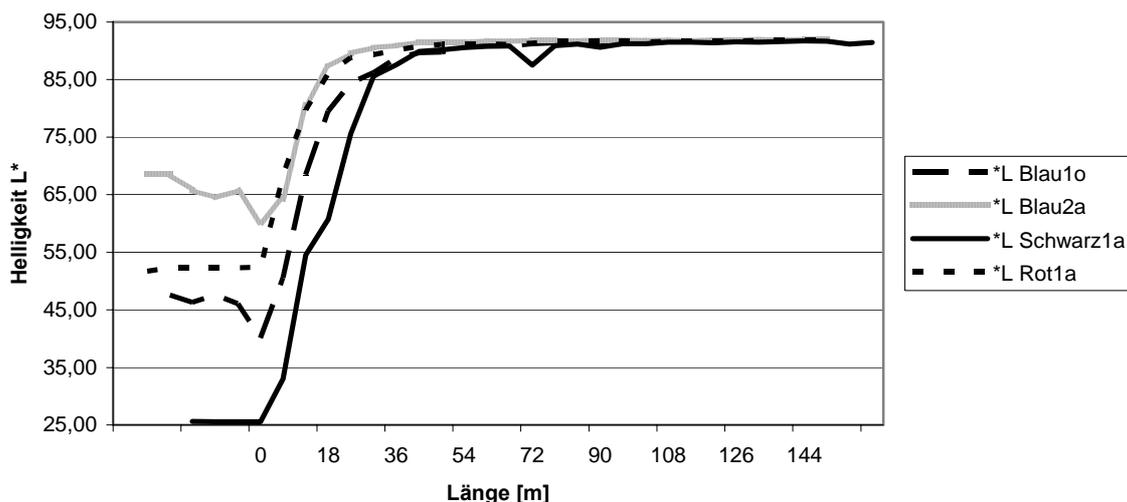


Abbildung 3-14 Farbkurven der Vorversuche mit einem 3-Schichtwerkzeug

Die Ausgangsprobe vor dem Einfärben hatte Farbwerte auf den a* und b* Achsen von null. Der Helligkeitswert L* doppelt gemessen vor einem weißen Papier lag bei 92. Dem-

zufolge sollten die gemessenen Werte nach dem Spülvorgang ebenfalls wieder bei 92 bzw. bei den Farbwerten bei null liegen. Bei Beginn des Spülvorgangs ist natürlich noch eingefärbtes Material im Extruder, in der Schmelzeleitung und im Werkzeug. Das führt dazu, dass zu Beginn der Kurve für sieben Minuten oder 42 m noch kein Spülverhalten gemessen werden kann. Dies ist die Zeit, die das Polymer braucht, um bei dem eingestellten Massedurchsatz von der festgelegten Referenzstelle oberhalb der Einfüllöffnung bis zum Düsenaustritt zu gelangen. Die Zeit wurde im Vorfeld ebenfalls mit Hilfe von Farbpigmenten ermittelt. Daher ist in Abbildung 3.14 auf der x-Achse der Nullpunkt auf den Beginn der Spülvorgang verschoben worden.

In der folgenden Tabelle 3-5 sind ebenfalls die in den Versuchen, bei denen bei gleichen Bedingungen nur das Pigment variiert wurde, ermittelten Ausschussmengen aufgrund der Länge des Folienschlauches während des Spülvorgangs aufgeführt.

Im Einzelnen zeigt die Abbildung 3-14 in der unteren Hälfte die Farbkurven b^* für Blau und a^* negativ für Rot. Die Auswertung besagt, dass die Kurve von *Rot1a* den Abstand von 0,46 zu einem Ausgangswert von null nach 60 Metern unterschreitet. *Blau2a* benötigte schon ca. 90 Metern und der Versuch von *Blau1o* wurde nach 30 min. abgebrochen. Innerhalb dieser Zeit hatte er nicht das Niveau erreicht. Zur Reinigung der Anlage wurde nach der halben Stunde mit deutlich erhöhtem Massedurchsatz sauber gefahren. Es dauerte jedoch noch eine weitere Stunde, bis der Folienwickel keinen deutlich sichtbaren Farbstich mehr enthielt.

Das im oberen Teil der Abbildung bei den Helligkeitswerten L^* zusätzlich eingetragene *Schwarz1a* erreichte erst nach 146 Metern das 99,5%-Niveau einer farblosen Folienprobe und zeigte auf dem Wickel dennoch noch einen leicht grauen Farbstich.

Tabelle 3-5 Pigmente und Ausschussmenge

Farbe	Pigment	Durchschnittl. Pigmentgröße (ca.)	Dispergiermittel [%]	Ausschussmenge [m]	Ausschussmenge [kg]
Blau1o	Kupfer-Phthalocyanin	0,22 μm	ca. 20	>146	>10,14
Blau2a	Ultramarin	1,20 μm	< 1	90	6,25
Schwarz1a	Ruß	0,06 μm	< 1	146	10,14
Rot1a	Fe3O-Eisenoxid	4,00 μm	< 5	60	4,17

Damit bestätigen die Ergebnisse der Farbmessung (Tabelle 3-5) die Aussagen aus den Folienbetrieben. Die Spülzeiten bei Verwendung verschiedener Pigmentbatches variieren deutlich.

Im Anschluss an die Vorversuche wurden innerhalb dieser Arbeit Thesen bezüglich der Einflussfaktoren durch das Pigmentbatch aufgestellt, die anschließend in Versuchsreihen näher analysiert wurden.

3.6.1 Versuchsschwerpunkte zum Einfluss des Farbmasterbatch auf den Spülprozess

Da bei den Versuchen nur das Farbbatch variiert wurde, werden die anlagenseitigen Einflussfaktoren, wie Spülverhalten des Extruders, Fließlänge, Werkzeuggeometrie Oberflächenbeschichtungen und Oberflächenrauigkeit etc. als konstant angenommen.

Daraus abgeleitet wird zudem angenommen, dass die durch das Farbbatch eingebrachten Variablen für das unterschiedliche Spülverhalten verantwortlich sind. Im Folgenden werden die im Hauptfokus der Untersuchung stehenden Einflussgrößen wie unterschiedliche Pigmentart, -chemie und -größe, unterschiedliche Batchzusammensetzung und Bestandteile und die dazu aufgestellten Thesen erläutert.

Pigmentgröße

In den Vorversuchen zeigte sich eine Korrelation der Pigmentgröße mit den Ausschussmengen (siehe Tabelle 3-5). Dabei verringerte sich mit zunehmender Pigmentgröße der Spülaufwand. Damit wird die Pigmentgröße als ein Einflussfaktor angenommen und in weiteren Versuchsreihen analysiert.

Die dahinter stehende erste These beinhaltet Überlegungen zum Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die wandnah fließende Strömung und die, in der Schmelze befindlichen Pigmente mit Größen z.T. sehr viel kleiner oder größer als die Oberflächenrauigkeit. Kleinere Pigmente könnten in den Strömungstotzonen der Oberflächenrauigkeit sehr lange verweilen. Größere Pigmente passen nicht in die Rauheitstäler und sind ständig einer höheren Schubkraft der Strömung ausgesetzt, sodass sie schneller (strömungs-) mechanisch zu spülen sind. Es könnte damit ein deutlicher noch detailliert zu überprüfender Zusammenhang zwischen Oberflächenrauigkeit, Pigmentgröße und Spülverhalten vorhanden sein.

Auch ohne den Einfluss der Oberflächenrauigkeit werden schon aufgrund des Strömungsprofils große Pigmente in wandnahen Bereich besser abtransportiert und feine wandnähere Pigmente langsamer bewegt. Die These stützt sich demnach hauptsächlich auf mechanische Wechselwirkung zwischen Oberfläche, Strömung und Pigment. In diese These fallen auch die Einflüsse, die durch die Pigment- oder Agglomeratform eingehen, die in dieser Arbeit jedoch nicht weiter vertieft werden. In weiteren Untersuchungen kann dieser Aspekt jedoch tiefergehend behandelt werden.

Sowohl die Schmelzeleitung als auch das Werkzeug wurde ursprünglich mit der Spezifikation einer polierten Oberfläche mit der Rauheit $R_z = 0,1 \mu\text{m}$ in Betrieb genommen. Der normale Betrieb, das Nutzen von abrasiven Reinigungsmitteln und vor allem das mecha-

nische Reinigen der Versuchswerkzeuge im Laborbetrieb nehmen jedoch Einfluss auf die Oberflächengüte. Die durch Messungen ermittelte Oberflächenrauigkeiten der Werkzeugteile nach einer Pyrolysereinigung weist daher einen mittleren Ra-Wert von ca. $0,05 \mu\text{m}$ oder $R_z = 0,25$ auf.

In Abbildung 3-15 wird der Zusammenhang qualitativ dargestellt. Das sich in Wandnähe ausbildende idealisierte Strömungsfeld wird von den unregelmäßig auftretenden Erhebungen der Rauheit gestört. Insofern kann in unmittelbarer Wandnähe nicht mehr von einem idealen laminaren Strömungsfeld ausgegangen werden.

Wie genau sich die Strömungsverhältnisse in Wandnähe ausbilden, kann an dieser Stelle nicht genau gesagt werden. Es wird hier aber davon ausgegangen, dass die Rauheit ein Strömungshindernis ist und für die sich in dem Bereich bewegenden Teilchen mechanische Hindernisse darstellen kann. So können sich hinter und vor Erhebungen Strömungstotzonen ausbilden. Betrachtet man mit der Schmelze fließende Teilchen, so kann davon ausgegangen werden, dass kleine Partikel, die in die Oberflächentäler getragen werden, der direkten Schmelzeströmung oberhalb der Spitzen nicht mehr ausgesetzt sind. Sie bewegen sich dann mit den Sekundärströmungen innerhalb der Täler. Je nach Strömungsverhältnissen kann das zu Ansammlungen oder Aufwachsungen von Teilchen kommen, die nur selten eine ideale Kugelform, sondern vielmehr unregelmäßige Körper mit der Neigung zur Agglomeration darstellen.

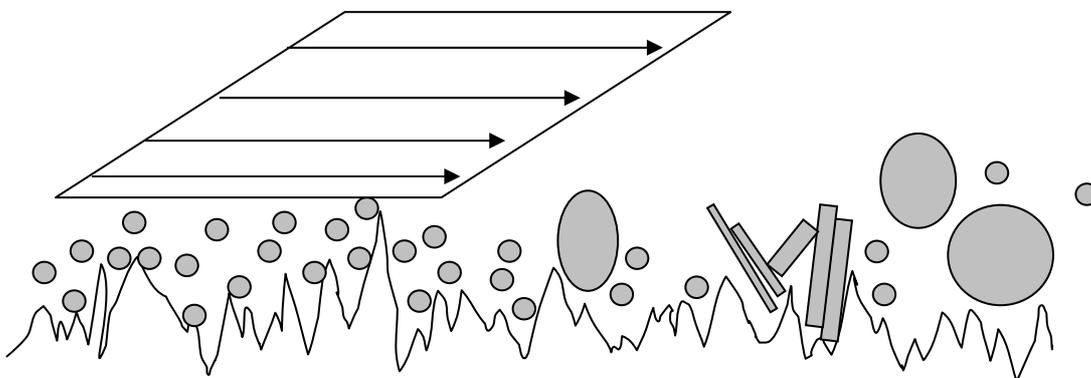


Abbildung 3-15 Pigmente in Wandnähe; Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und Pigmentgröße

Pigmente, die größer als die Rauheit sind, behalten eher Kontakt zur Hauptströmung und unterliegen damit immer einer höheren Zug und Schubwirkung. Zudem bieten die mechanischen Gegebenheiten bei größeren Pigmenten nicht die Möglichkeiten der Festsetzung in der Oberfläche. Größere Pigmente neigen zudem weniger zur Agglomeration. Kleine Teilchen sind laut dieser These demnach schwerer zu spülen und damit verantwortlich für lange Spülzeiten.

Da jede Pigmentgrößenverteilung Anteile kleinerer und größerer Teilchen hat, kann über den $D_{50\%}$ -Wert zu den problematischen Fraktionen nur indirekt eine Aussage gemacht werden. Innerhalb dieser Arbeit wird jedoch im Einzelfall auch die Verteilkurve hinzugezogen. Auf die Einflüsse der Pigmentform wird innerhalb dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Die Teilchenform wird als einheitlich angenommen und nicht weiter unterteilt. Je nach Teilchenform (z.B. plättchenförmig oder stäbchenförmig) kann dies jedoch einen zusätzlichen Einflussfaktor darstellen. Die Vorversuche lassen jedoch vermuten, dass auch in Bezug auf den in der Regel angegebenen $D_{50\%}$ -Wert ein Zusammenhang zwischen Größe und der Spüldauer beschrieben werden kann.

Chemische Herkunft der Pigmente

Die chemische Herkunft der Pigmente lässt sich, wie eingangs beschrieben, in anorganisch und organisch unterteilen. Eine weitere Unterteilung innerhalb dieser Gruppen kann auf vielfältige Weise erfolgen, wird aber innerhalb dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Der allgemeinen Meinung folgend, dass sich anorganische Pigmentbatches leichter spülen lassen, wird es innerhalb der Versuche zwar keine speziellen Versuchsreihen zu dieser Thematik geben, jedoch werden die einzelnen Versuche beiden Gruppen gegenübergestellt. Kommt es dabei zu signifikanten Unterschieden im Spülverhalten, so können diese im Zusammenhang mit generellen Unterschieden zwischen organischen und anorganischen Pigmenten interpretiert werden.

Dispergiermittel

Farbmasterbatchrezepturen beinhalten im Allgemeinen die Komponenten Polymer, Pigmentpulver und z.T. notwendige Dispergiermittel. Da bei verschiedenen feinen und in der Hauptsache organischen Pigmenten ein Dispergiermittel notwendig ist, um die Neigung zur Agglomeration zu unterbinden, wird dies ebenfalls als ein Einflussfaktor klassifiziert und in einer Versuchsreihe behandelt.

Dispergiermittel können wie Gleitmittel wirken und damit auch Einfluss auf die langsam strömenden Randschichten nehmen. Die Auswirkungen eines Dispergiermittelzusatzes auf das Spülverhalten sind jedoch sehr schwer vorher zu sagen. Eine Versuchsreihe soll es ermöglichen den Einfluss abzuschätzen.

3.6.2 Versuche zum Einfluss der Pigmentgröße

Zum Einfluss der Pigmentgröße wurden im ersten Schritt Versuchsreihen gefahren, bei denen Farbbatche ausgewählt wurden, die sich möglichst in ihrer Zusammensetzung der

Grundmatrix, des Anteils und der Art des Pigmentes und des Dispergiermittels gleichen, um die Anzahl der Einflussfaktoren so weit wie möglich zu begrenzen. Dazu boten sich vor allem zwei Rußbatche (Schwarz1a, Schwarz2a) und drei Eisenoxid-Rotbatche (Rot2a, Rot3a, Rot4a) an, die sich jeweils nur darin unterscheiden, dass die mittlere Pigmentgröße unterschiedlich ist. Diese Pigmentbatches sind den Anorganischen zuzuordnen, zu denen dann im Weiteren die Versuchsreihen mit verschiedenen anderen Pigmentbatchen anderer Größenkategorien und Pigmentbatchen organischer Herkunft ergänzt wurden.

3.6.2.1 Versuche mit anorganischen Pigmenten

Vergleich von drei anorganischen Eisenoxid-Rotpigmenten:

Die erste Versuchsserie beinhaltet den Vergleich von drei Monopigmentbatchen mit anorganischen Eisenoxid-Pigmenten, deren mittlere Größe nach Herstellerangaben 0,25 µm (Rot2a), 0,34 µm (Rot3a) und 0,59 µm (Rot4a) betragen.

Abbildung 3-17 stellt den Verlauf des Spülprozesse an Hand der Messwertkurven der Helligkeit L* graphisch dar.

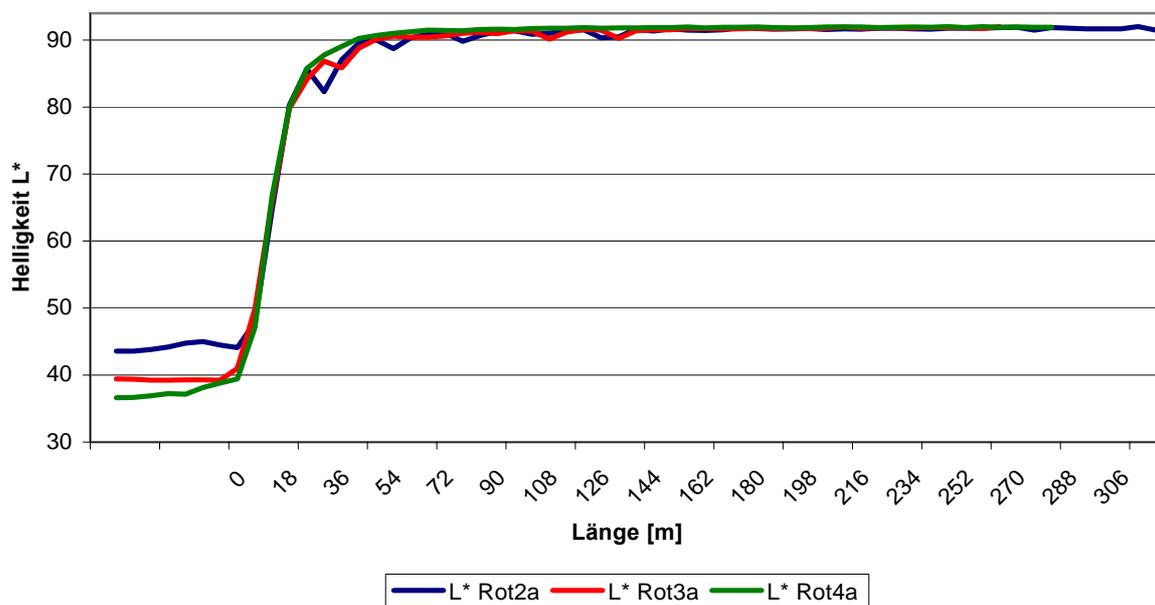


Abbildung 3-17 Helligkeitskurven Rot2a, Rot3a, Rot4a

Die Darstellung zeigt, dass die Kurven trotz der unterschiedlichen Anfangshelligkeit der drei Batche im Anstieg sehr nahe beieinander liegen. Ab einer Helligkeit von ca. 80 kommt es zu Unterschieden im weiteren Kurvenverlauf, wie die Zoomdarstellung (Abbildung 3-18) verdeutlicht. Obwohl vom niedrigsten Helligkeitswert gestartet, verläuft die Kurve von Rot4a, dem größten Pigment im Endbereich durchgehend oberhalb der anderen beiden Kurven. Zudem fällt auf, dass die Kurven der anderen beiden Batche

Rot2a und Rot3a immer wieder Einbrüche zeigen. Dabei sind die Unregelmäßigkeiten des kleinsten Pigments Rot2a häufiger und deutlicher und treten auch nach 250 m immer noch auf. Auf dem Folienwickel sind diese Einbrüche als Farbringe auf der Spiegelseite zu sehen.

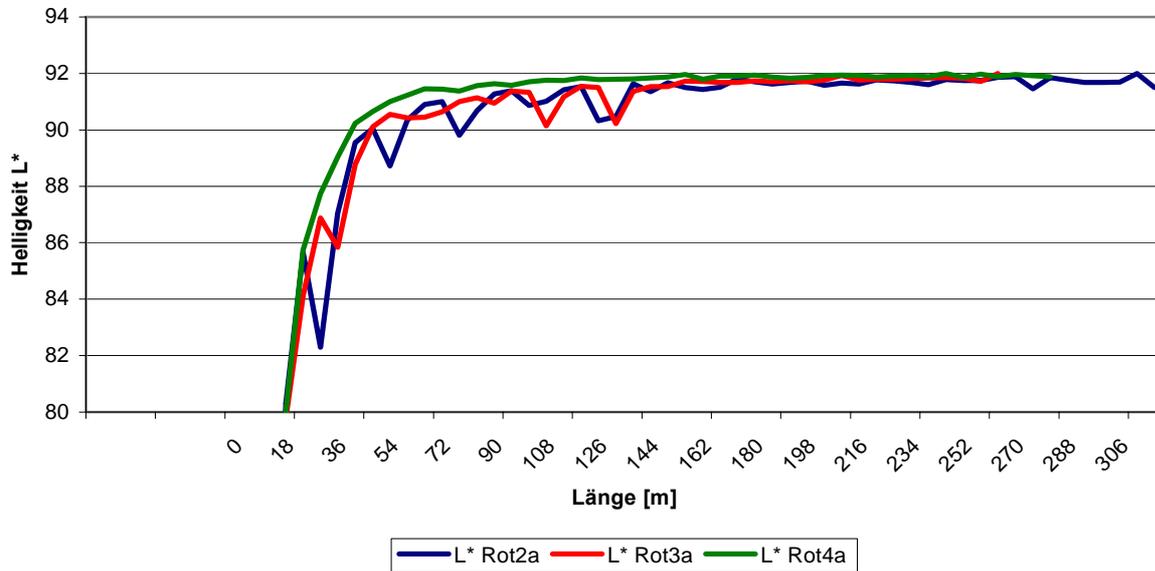


Abbildung 3-18 Helligkeitswerte Rot 110, Rot 130, Rot 160 Zoom

Ein ähnliches Bild zeigt die Darstellung der Kurven des dominanten Farbwertes Rot. Rotwerte werden im Allgemeinen auf der a*-Achse im positiven Bereich abgetragen (vgl. Kap. 2.9), in Abbildung 3-19 sind sie jedoch ins Negative gespiegelt, um eine durchgehend einheitliche Darstellungsweise und eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Farben zu haben.

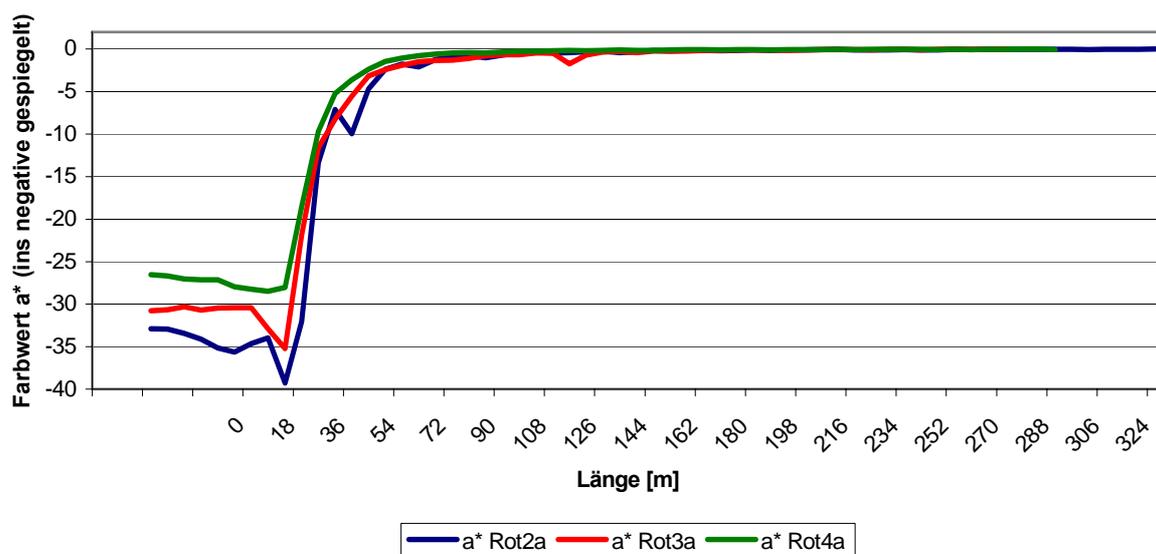


Abbildung 3-19 Messwertkurven der a*-Werte ins negative gespiegelt; Rot2a, Rot3a, Rot4a

Die Abbildung zeigt, dass sich auch hier der Versuch mit dem Batch Rot4a am schnellsten dem Ausgangsniveau von Null einer farblosen Probe nähert.

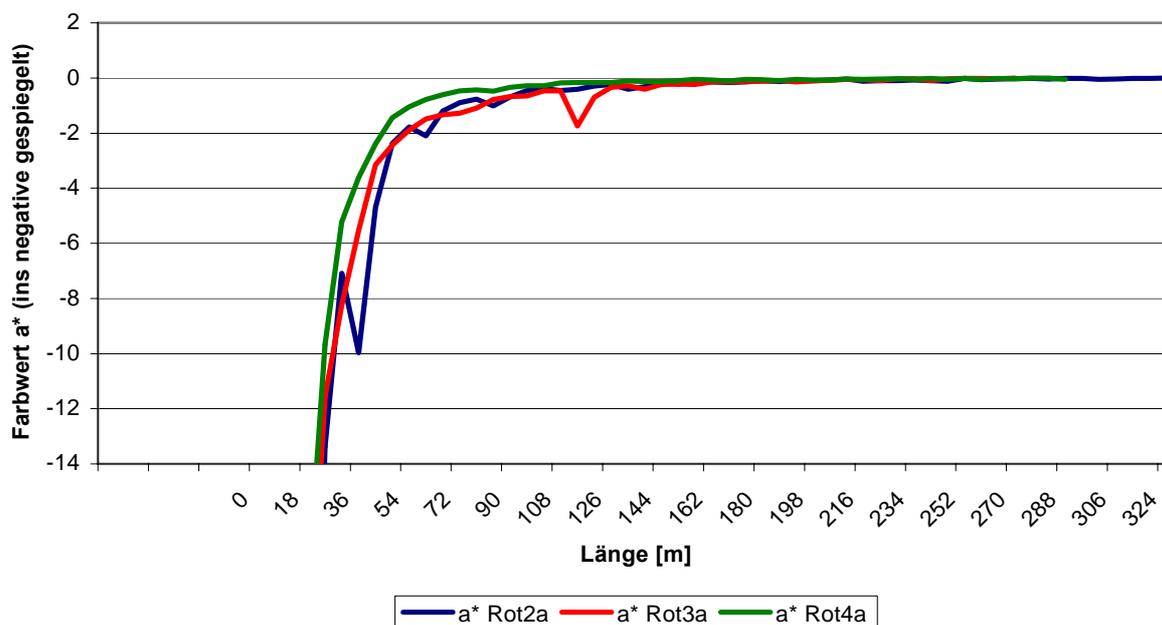


Abbildung 3-20 Messwertkurven der a*-Werte ins negative gespiegelt (Zoom); Rot2a, Rot3a, Rot4a

In der Zoomdarstellung (Abbildung 3-20) wird dies durch die vergrößerte Darstellung noch deutlicher. Grafisch kann auch hier zwischen den beiden Anderen kaum ein Unterschied festgestellt werden.

Die aus den Wertetabellen (siehe Anhang) mittels der Bewertungsmethode des 99,5%-Niveaus eines Ausgangshelligkeitswertes von 92 ermittelten Folienlängen sind in Tabelle 3-6 aufgeführt.

Tabelle 3-6 Auswertung der L*-Werte (oben) und a*-Werte (unten)

Pigment	Mittlere Pigmentgröße [µm]	Spüllänge [m]
Rot2a L*	0,25	144
Rot3a L*	0,34	126
Rot4a L*	0,59	90
Rot2a a*	0,25	96
Rot3a a*	0,34	126
Rot4a a*	0,59	78

Hier zeigt sich, dass bei den Helligkeitswerten die Reihenfolge entsprechend der mittleren angegebenen Pigmentgröße eingehalten wird. Das Batch mit den größten Partikeln erreicht mit 90 m deutlich schneller als die anderen das Bewertungsniveau. Die Bewertung

anhand des a^* -Wertes zeigt ebenfalls, dass *Rot4a* das beste Spülverhalten hat. Jedoch sind hier die beiden anderen in ihrer Reihenfolge vertauscht.

Die Gründe hierfür liegen in den einzelnen Verteilungen der drei Pigmente. Der Vergleich der Verteilkurven zeigte, dass das Pigment *Rot4a* eine Streubreite von 0,15 bis 2 μm hat. Es gibt demnach keine Pigmente kleiner als 0,15 μm . Bei den beiden anderen Verteilungen hingegen ist die Streubreite deutlich anders. *Rot2a* reicht in etwa von 0,05 bis 1,4 μm und bei *Rot3a* ebenfalls von 0,05 bis 1,4 μm . Den Verteilkurven zufolge haben beide Pigmente erhebliche Anteile von Teilchen kleiner als 0,1 μm , wobei der Anteil hier bei leicht *Rot2a* größer ist. Da die Verteilungen im Bereich der kleinen Anteile sehr ähnlich sind und nach der aufgestellten Theorie gerade die Anteile kleiner Teilchen den Spülvorgang bestimmen, kann die Ähnlichkeit der Spülkurven damit erklärt werden.

3.6.2.2 Vergleich zweier Farbrüße

In dieser Versuchsreihe werden wie bei den Rot-Pigmenten zwei nahezu gleiche Farbbatche verwendet, die sich jedoch in der mittleren Partikelgröße unterscheiden. *Schwarz1a* hat eine angegebene mittlere Pigmentgröße von 0,06 μm , *Schwarz2a* ist feiner mit einer angegebenen Größe von 0,02 μm . Da es sich hier um Schwarzpigmente handelt, werden nur die Helligkeitswerte ausgewertet.

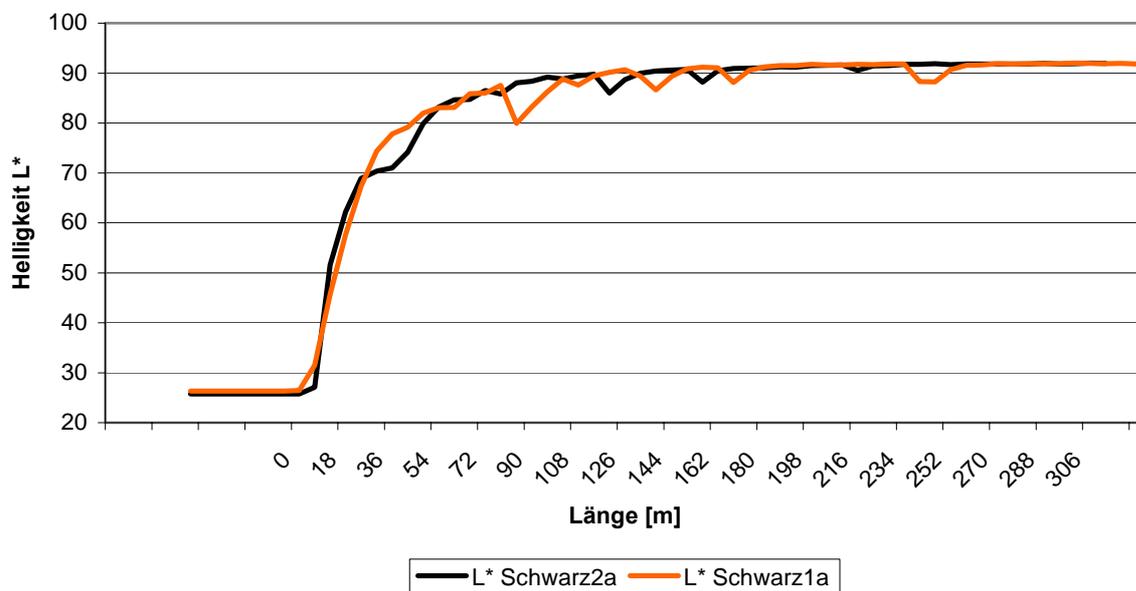


Abbildung 3-21 Vergleich der Schwarzpigmente Schwarz1a und Schwarz2a

Die grafische Darstellung zeigt bei den beiden sehr feinen Rußpigmenten keinen auswertbaren Unterschied. Auch die Auswertung der Messwerte zeigt keine signifikante Differenz bezüglich des Erreichens des 99,5%-Niveaus (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7 Spüldauer Schwarz1a und Schwarz2a

Pigment	Pigmentgröße [μm]	Spüldauer [Anz. Proben]
Schwarz1a	0,06	198
Schwarz2a	0,02	204

Die Differenz von sechs Metern entspricht nur einer Probe und wird hier nicht als signifikant angesehen. Die Gründe liegen in der sehr geringen Differenz der mittleren Pigmentgrößen von 0,04 μm . Eine so geringe Differenz kann auch in den nahezu identischen Verteilkurven nicht mehr als signifikant angesehen werden.

Im Vergleich zu den vorher beschriebenen Versuchen mit den Eisenoxid-Pigmenten benötigen beide Schwarz-Pigmente erheblich länger sind aber auch erheblich feiner.

3.6.2.3 Vergleichende Versuchsergänzungen

Im Weiteren wurden die Versuche auf verschiedene anorganische Pigmentbatche ausgeweitet, um weitere Größenbereiche abdecken zu können. Alle Versuche wurden bezüglich des 99,5%-Niveaus des Ausgangswertes ausgewertet.

Dabei ergeben sich die folgenden, nach der mittleren Pigmentgröße, geordneten Werte:

Tabelle 3-8 Spüllänge auf der Basis der L*-Werte der anorganischen Versuchsreihe

Batch	Mittlere Pigmentgröße [μm]	Spüllänge [m] (L*-Wert)	Spüllänge [m] (Farb-Wert)
Schwarz2a	0,02	204	204
Schwarz1a	0,06	198	198
Rot2a	0,25	150	96
Rot3a	0,34	126	126
Rot4a	0,59	90	78
Blau4a	1,11	96	72
Blau2a	1,2	66	78
Blau3a	2	72	60
Rot1a	4	78	78

Die grafische Auswertung dieser Tabelle ist im Abb. 4.8 dargestellt.

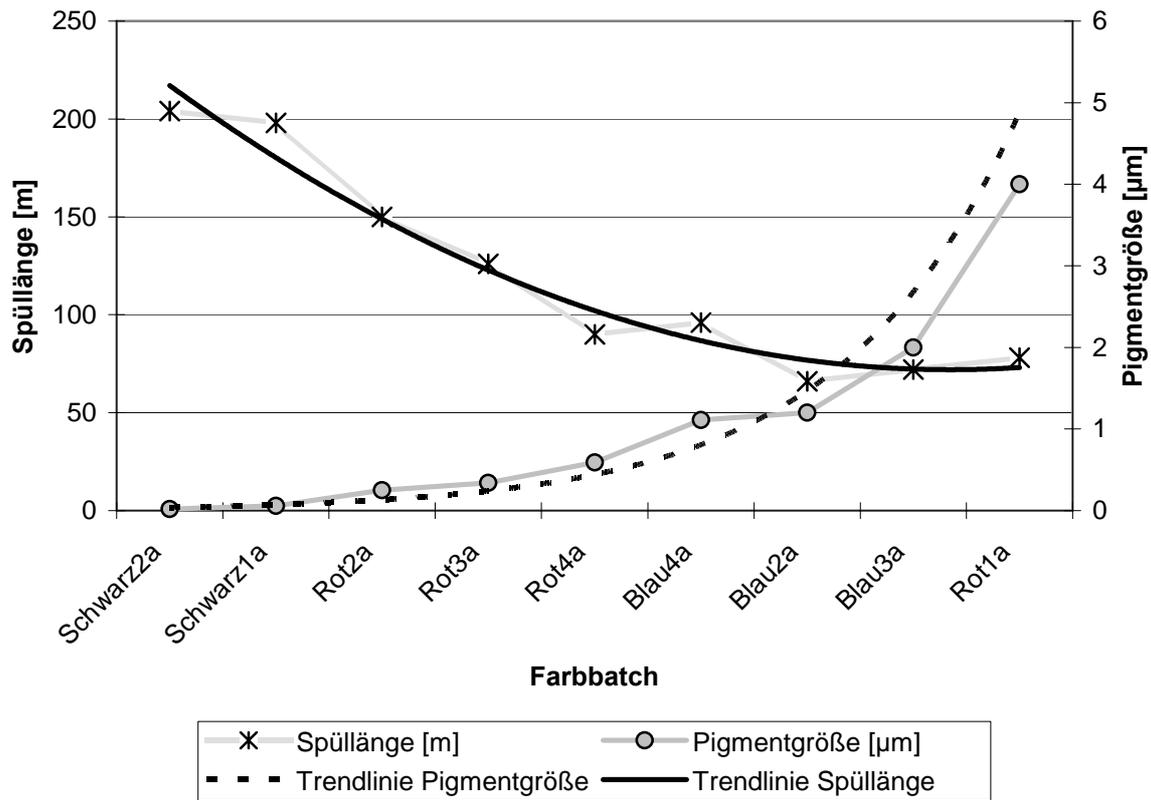


Abbildung 3-22 Gesamtvergleich der anorganischen Pigmentbathe auf L*-Basis

Die Grafik zeigt die ermittelten Folienlängen des Spülausschusses bis zum 99,5 %-Niveau aufgetragen im Zusammenhang mit der mittleren angegebenen Pigmentgröße. Zu beiden sind ebenfalls Trendlinien eingetragen. Die Auswertung zeigt dabei einen deutlichen Zusammenhang zwischen der angegebenen Pigmentgröße und der Spüldauer. Je kleiner die mittlere Pigmentgröße, desto höher der Spülaufwand. Zudem bilden die einzelnen Pigmentgrößen zwischen 0,02 µm und 4 µm den Großteil des verfügbaren und wirtschaftlich wichtigen Größenspektrums der anorganischen Pigmente nahezu vollständig ab, so dass hier von einem signifikanten Zusammenhang über alle Größenbereiche ausgegangen werden kann. Die Auswertung der auf Basis der dominanten Farbwerte ermittelten Spülausschusslänge (Abbildung 3-23) bestätigt die Auswertung. Auch hier zeigt sich, da es sich um dieselben Versuche handelt, deutlich der Zusammenhang zwischen größer werdender Pigmentgröße und verringerter Spüllänge.

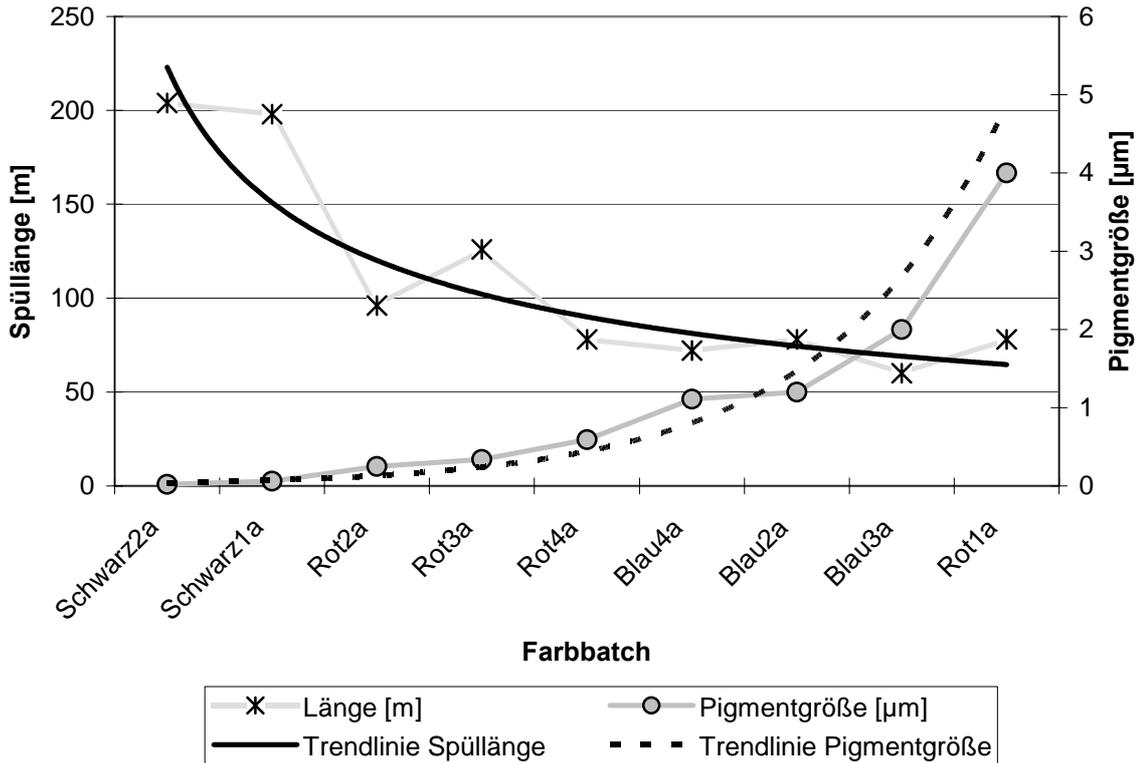


Abbildung 3-23 Gesamtvergleich der anorganischen Pigmentbatche auf Farbwert-Basis

Die beiden Schwarzpigmente sind in dieser Darstellung auf Basis ihres dominanten Farbwertes, des Helligkeitswertes ausgewertet worden, wohingegen Blau- und Rot-Pigmente jeweils anhand der Blau- b^* -Werte bzw. Rot- a^* -Werte ausgewertet wurden.

3.6.2.4 Versuche mit organischen Pigmenten

Bei den Versuchsreihen mit organischen Pigmenten wird im Vergleich zu den anorganischen Pigmenten ein Größenbereich von 0,05 bis 16,9 µm abgedeckt. Dabei ist die Angabe von 16,9 µm bei *Rot5o* genauer zu betrachten und zu relativieren.

Der hier angegebene $D_{50\%}$ -Wert der Summenverteilung liegt zwar bei 16,9 µm, die Verteilkurve zeigt aber keine normale Verteilung, sondern einen starken Ausläufer im Bereich von 0,8 bis 4 µm. Aus der in der These bereits genannten Vermutung, dass die feinen Pigmentanteile die Spüldauer bestimmen, kann hier besser ein Wert von ca. 2 µm zum Vergleich herangezogen werden. Damit ist das Pigment immer noch das Größte im Vergleich.

Wie bei den anorganischen wurden auch hier alle Versuche bezüglich des 99,5%-Niveaus des Ausgangswertes ausgewertet und nach Pigmentgröße angeordnet. Die L*-Werte und Farbwerte sind in Tabelle 3-9 und grafisch in Abbildung 3-24 zusammengefasst.

Tabelle 3-9 Wertetabelle der organischen Versuchsreihe

Batch	Mittlere Pigmentgröße [μm]	Spüllänge [m] L*-Wert	Spüllänge [m] Farb-Wert
Blau6o	0,05	180	144
Rot8o	0,15	162	204
Grün1o	0,2	102	138
Blau1o	0,22	150	144
Blau5o	0,44	120	150
Rot7o	0,92	90	120
Rot5o	2 (16,9)	96	120

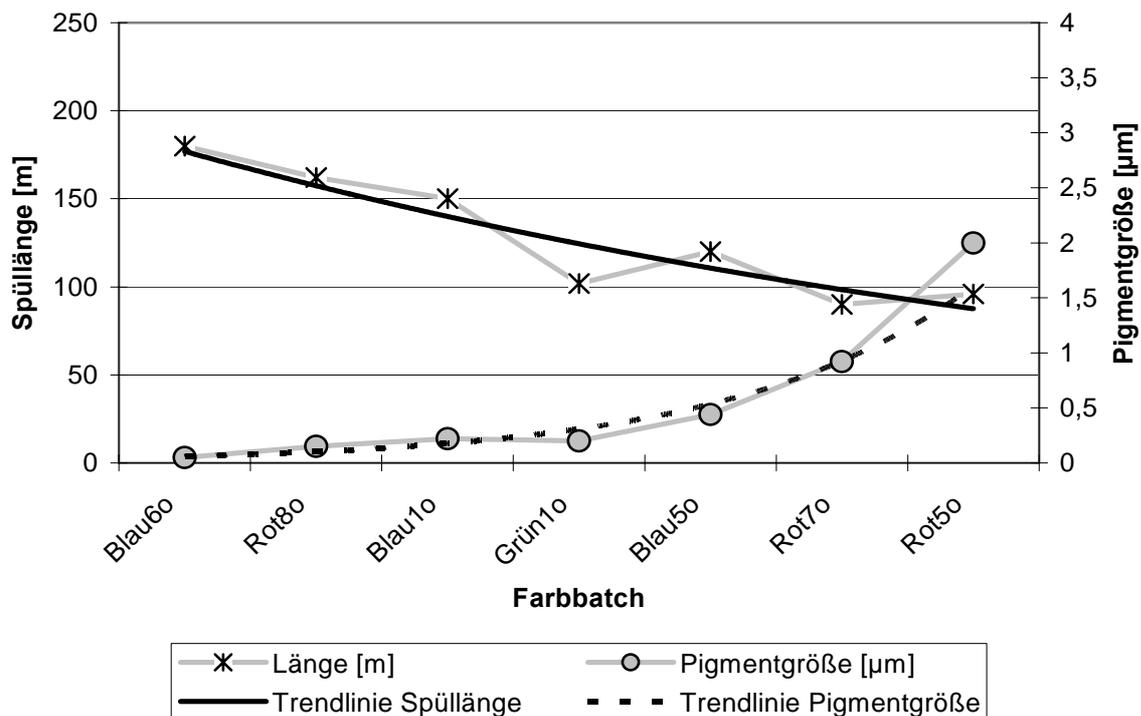


Abbildung 3-24 Zusammenhang zwischen Pigmentgröße und Spüldauer, organische Pigmente, L-Wert

Auch die Versuchsreihe mit organischen Pigmenten verschiedener Größenbereiche zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Pigmentgröße und der mit steigender Größe kürzer werdenden Spüldauer.

3.6.2.5 Zusammenfassung und Auswertung

In der Gesamtdarstellung der ermittelten Spüllängen auf Helligkeitsbasis aller verwendeten organischen und anorganischen Monopigmentbathe fügen sich die Organischen in ihrem Größenbereich sehr gut in die Reihen der Anorganischen ein.

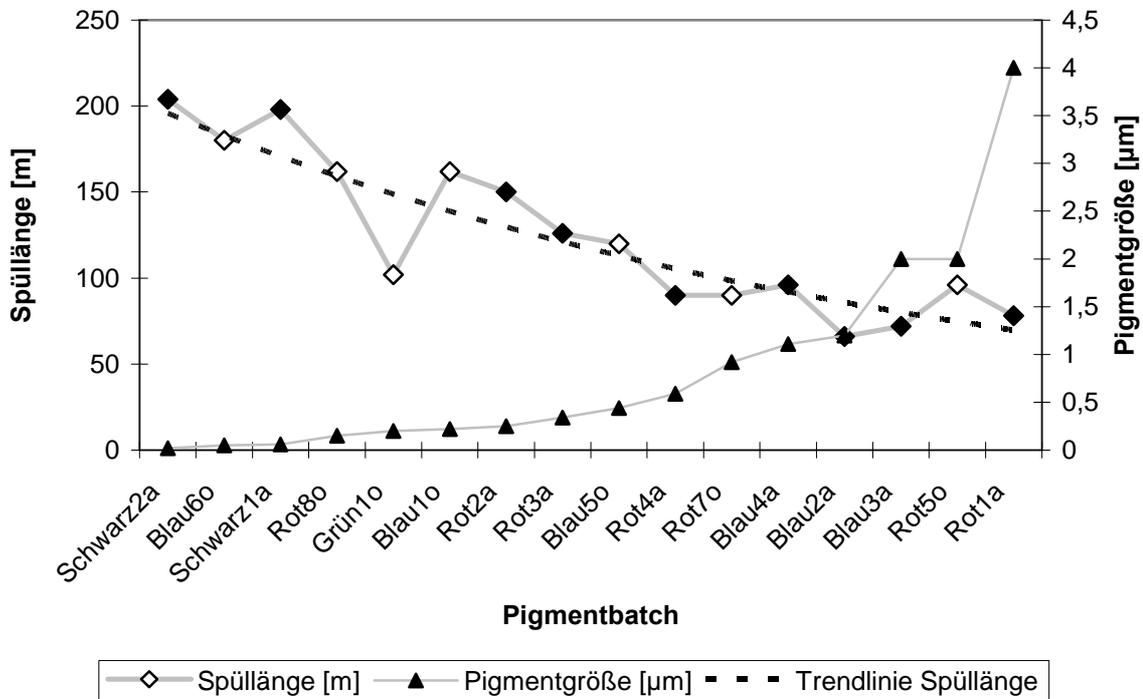


Abbildung 3-25 Zusammenfassende Darstellung aller verwendeten Pigmentbathe

Die Grafik zeigt die Spüllänge aufgetragen in [m] im Vergleich zur mittleren Pigmentgröße. Dabei sind die schwarz gefüllten Rauten den anorganischen und die weiß gefüllten den organischen Pigmenten zugeordnet.

In dieser zusammengefassten Darstellung wird die Abhängigkeit der Spüldauer von der mittleren angegebenen Pigmentgröße deutlich. Dabei ist zu beachten, dass im Einzelfall auch die individuelle Verteilung der Pigmente und vor allem die Anteile besonders kleiner Teilchengrößen von Bedeutung sind, wie die oben genannten Beispiele zeigten.

Damit ist aus praktischer Sicht die anfängliche Theorie bestätigt. Weitere Untersuchungen sollten an dieser Stelle ansetzen und über die theoretische Modellbildung und Simulation der mechanischen und strömungstechnischen Vorgänge von Teilchen in der Schmelze im Zusammenhang mit einer rauen Oberfläche die Ansätze theoretisch bestätigen.

Als Empfehlung für die Praxis ist aus den Ergebnissen abzuleiten, dass bereits in der Masterbatchentwicklung die Spülfähigkeit der verwendeten Pigmente berücksichtigt werden sollte. Dies ist bisher nicht der Fall.

Nach den Ergebnissen sollten Batche, die den benötigten Farbton liefern eine mittlere Pigmentgröße von möglichst $> 0,5 \mu\text{m}$ aufweisen und der Anteil der kleineren Teilchen sollte so gering wie möglich sein und die Kleinsten nicht kleiner als $0,1 \mu\text{m}$ sein.

Bei den Empfehlungen sind die vielfältigen Einflüsse der Pigmentstruktur und Größe auf den Farbton nicht berücksichtigt, aber als Allgemeinempfehlungen zur Berücksichtigung bei der Produktentwicklung können sie dennoch angegeben werden.

Bezüglich der anfänglich ebenfalls aufgestellten These, dass organische Pigmentbatche sich in der Regel schwerer spülen lassen als Anorganische, kann hier keine Signifikanz beschrieben werden, die andere Größen als die Pigmentgröße berücksichtigt. Im Allgemeinen sind organische Pigmente im Durchschnitt kleiner als die Anorganischen und haben dadurch eine entsprechend längere Spülzeit. Das vermittelt den Eindruck, dass organische Pigmente schwerer zu spülen sind.

Um die Theorie bezüglich der bisherigen Ergebnisse zu bestätigen wurden Versuche mit Pigmentmischungen gemacht. Dazu wurden so genannte Multipigmentbatche ausprobiert, die aus verschiedenen Pigmenten bestehen. Die Zusammensetzung kann dabei sowohl aus Anorganischen und Organischen bestehen und aus Pigmenten unterschiedlicher Größen.

Solche Batche müssten, sofern die aus den Ergebnissen zu folgernden Schlüsse richtig sind, ein unterschiedliches Spülverhalten für die verschiedenen Bestandteile des Batches haben. Dabei müssten sich die größeren Pigmentanteile schneller spülen lassen als die kleineren. Wenn beide Fraktionen des Gemisches eine unterschiedliche Farbe haben, dann sollte es durch die unterschiedlichen Spüleigenschaften zu einer Verschiebung des Farbtons in Richtung der Farbe der feinen Anteile kommen.

Die in Frage kommenden Mischungen sollten aus zwei Farben bestehen, die auf verschiedenen Farbachsen liegen. Dabei bieten sich Mischungen an, die im Gesamtfarbton Orange oder Violett sind.

Für den hier dargestellten Versuch wurde ein Orangebatch gewählt, das aus größeren Rotpigmenten mit einer mittleren Größe zwischen $0,6$ und $2 \mu\text{m}$ und sehr viel kleineren Gelbpigmenten mit einer mittleren Größe von $<0,2 \mu\text{m}$ besteht.

Der durchgeführte Spülversuch brachte das in Abbildung 3-26 dargestellte Ergebnis. Der Rotwert nimmt anfänglich sehr schnell ab, von ca. 35 auf 10. In der nächsten Probe (Sample 15) ist bereits kein Rotwert mehr messbar, der anfängliche Gelbwert von ca. 60 liegt aber noch bei 38. Damit wird auch die optische Beobachtung am Folienwickel bestätigt. Gegen Ende des Spülversuchs wies der Wickel im Vergleich zum Anfangsorange einen Gelbstich auf.

Im Vergleich hierzu ist ein Violettpigment *Violett1o*, das ebenfalls zweiachsig darstellbar ist getestet worden. Die Darstellung (Abbildung 3-27) zeigt einen kontinuierlichen gleichmäßigen Abfall beider Farbwerte Rot und Blau. Damit bestätigen diese Versuche ebenfalls die angenommenen Thesen und die vorherigen Ergebnisse.

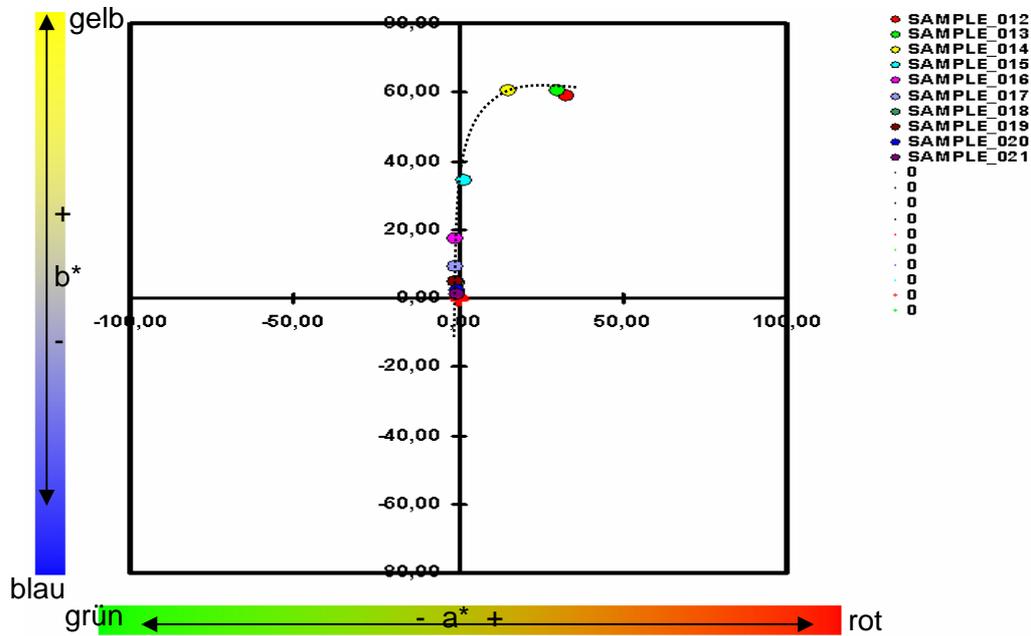


Abbildung 3-26 Farbwerte einer Pigmentmischung, Orange1m

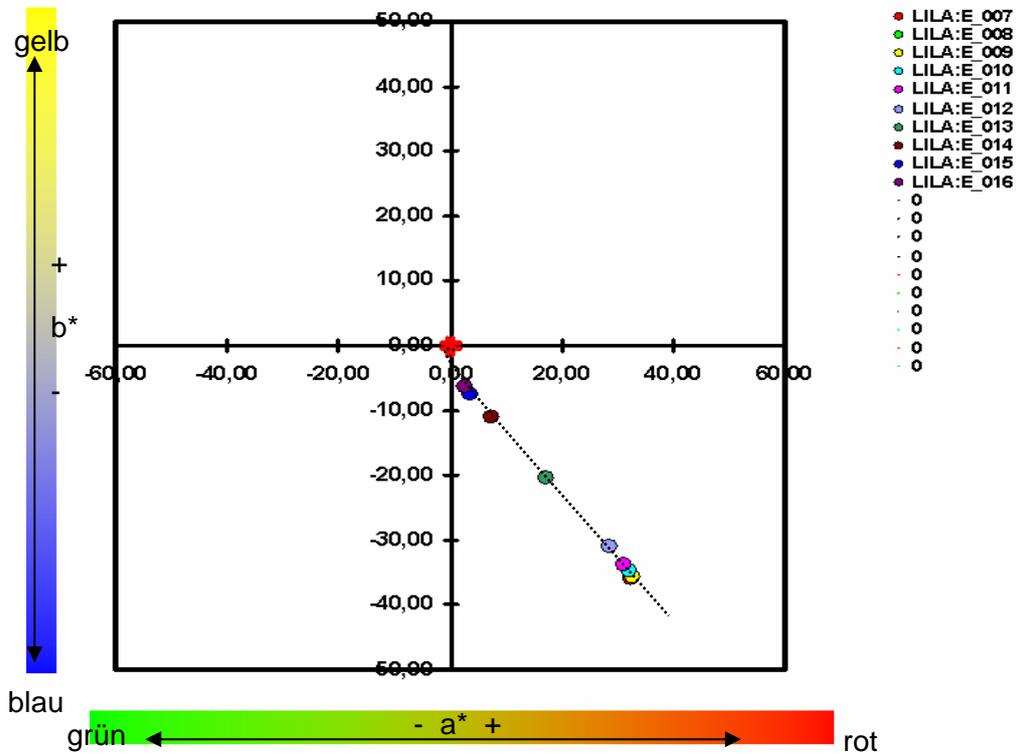


Abbildung 3-27 Farbwerte eines Monopigmentes, Violett1o

3.6.3 Einfluss von Dispergiemitteln auf den Spülprozess

Außer der Polymermatrix und dem Pigmentpulver sind häufig bei sehr feinen und damit zur Agglomeration neigenden Pigmenten Dispergiemittel notwendig, um eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen und eine Reagglomeration zu vermeiden. Diese Dispergiemittel sind zumeist wachsartige Zusätze und können in den Strömungsrandschichten wie Gleitmittel wirken. Dadurch kann beim Spülvorgang der dispergiemittelhaltigen pigmentierten Schmelze, wie auch beim Spülen von verschiedenen viskosen Rohstoffen, das Verweilzeitprofil vor allem im Randbereich vom laminaren Strömungsprofil abweichen.

Die Grundlage für die Versuchsreihe zum Einfluss von Dispergiemittel dient ein schwarzes Rußpigmentbatch, das im Ursprungszustand neben ca. 50% Rußpigmenten einer mittleren Partikelgröße von 0,06 µm in der Polymermatrix weniger als 1% Verarbeitungshilfsmittel in Form von Dispergiemittel enthält. Bei einer Zugabe von 600 gr. zu 19,4 kg PE beim Spülversuch entspricht dies weniger als 6 gr. auf 20 kg Versuchsmaterial. Der Spülversuch mit unverändertem Batch dient als Referenzversuch. In dieser Versuchsreihe wurde in zwei weiteren Versuchen der Anteil an Dispergiemittel erhöht. Dazu wurde ein speziell compoundiertes Masterbatch ohne Farbpigmente, aber mit einem Dispergiemittelanteil von 40% im gleichen Verhältnis zudosiert wie das schwarze Farbatch. Das entspricht einem reinen Dispergiemittelanteil von 240 gr. auf 20kg und damit einem Gesamtanteil von 1,2%.

In einem weiteren Versuch wurde der Dispergiemittelzusatz verdoppelt, um den Einfluss unterschiedlicher Anteile zu überprüfen.

Alle Versuche dieser Reihe wurden mit gleichen Anlagenparametern gefahren und im Anschluss wie gewohnt bezüglich des 99,5% Niveaus eines Ausgangszustandes des Heligkeitswertes von 92 ausgewertet (Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10 Messwerte zum Einfluss von Dispergiemittel

Batch	Spüllänge [m]
Schwarz	198
Schwarz +D.	168
Schwarz +2D.	156

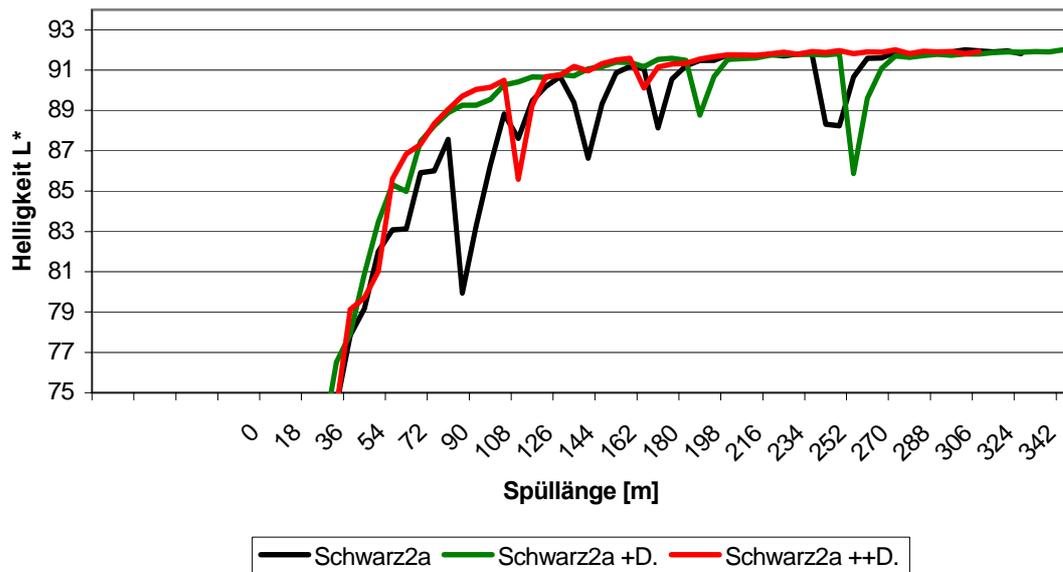


Abbildung 3-28 Messwertkurven mit unterschiedlichen Dispergiermittelanteilen

Die grafische Darstellung zeigt, dass beide Versuche mit erhöhtem Dispergiermittelanteil (+D und +2D) oberhalb des Referenzversuches liegen und damit den Ausgangszustand schneller erreichen.

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass Dispergiermittelanteile in den Farbbatches den Spülprozess beeinflussen können. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen eine Verbesserung des Spülergebnisses.

Durch die Verdopplung des Dispergiermittelzusatzes ändert sich am Kurvenverlauf und am Spülverhalten kaum etwas und die Kurven sind fast deckungsgleich. Da die eigentliche Wirkung des Dispergiermittels in Abhängigkeit zur Konzentration steht, scheint bereits bei einem Gesamtanteil von unter 1,2% eine Sättigung einzutreten, ab der die Wirkung nicht mehr gesteigert wird.

3.7 Erprobung der optimierten Spülprozesse in der Produktion

Unter dem Arbeitspunkt 2.7 wurden verschiedene Spülverfahren und Methoden in Abhängigkeit der zuvor beschriebenen Aspekte erarbeitet. Dafür wurden Informationen von verschiedenen Rohstoffhersteller eingeholt und berücksichtigt:

Tabelle 3-11 Übersicht verschiedener Spülprozesse

Prozess	Laufzeit EVOH in Voraufträge	Rohstoffe als Spülmedium	Durchsatz Extruder mit EVOH	Temperaturen (Extruder + Blaskopf)
A1	min. 120 Std.	PE LD	wechselnd	konstant
A2	min. 120 Std.	PE LD	gleichbleibend	konstant
B1	min. 120 Std.	PE LLD Typ 1	wechselnd	konstant
B2	min. 120 Std.	PE LLD Typ 1	wechselnd	Temp. gesenkt
C1	min. 120 Std.	PE LLD Typ 2	wechselnd	konstant
D1	min. 120 Std.	Reinigungs-compound A	wechselnd	konstant
E1	min. 120 Std.	Reinigungs-compound B	wechselnd	konstant
E2	Min. 120 Std.	Reinigungs-compound B + LLD PE	wechselnd	konstant

Die Beurteilung der Folienqualität ist durch einen Teamleiter der Extrusion durchgeführt worden. Aufgrund der erforderlichen Mindestlaufzeiten des EVOH vor dem Wechsel wurde aus Zeitgründen jeder Prozess nur einmal abgefahren.

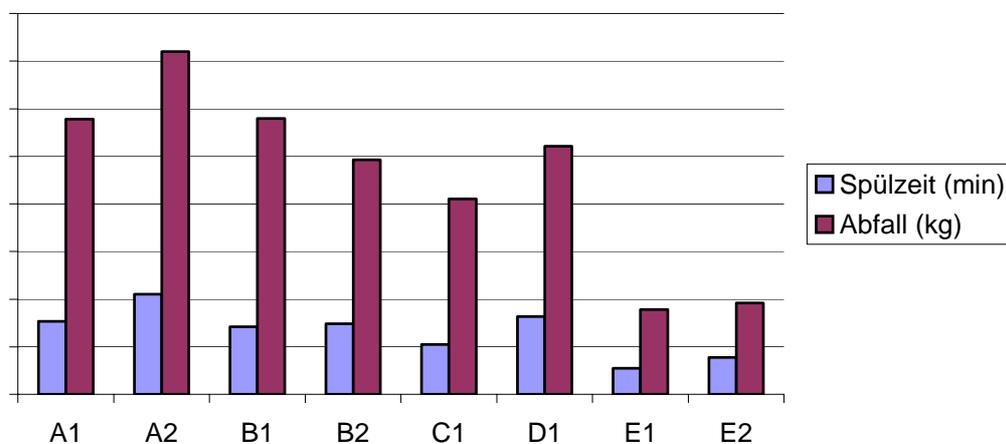


Abbildung 3-29 Ergebnisse der Spülversuche

Wie die Abbildung 3-29 zeigt, liefern die Prozesse E1 und E2 die besten Ergebnisse hinsichtlich der Spülzeit und des damit verbundenen Abfalls. Die in den Prozessen E1 + E2 verwendeten Spülmateriale wurden in den nachfolgenden Produktionskampagnen wiederholt und verfeinert. Die Ergebnisse sind reproduzierbar.

Prozessvorschrift

Das ausgewählte Spülmedium in Verbindung mit wechselnden Massedurchsätzen (von Durchsatz 0 für ca. 5 Min. bis hin zu max. Durchsatz), zeigt eine nochmalige Verbesserung der Ergebnisse, woraus eine Verfahrensanweisung formuliert wurde. Die Temperaturänderung während dieses Prozesses hängt lediglich mit den eingesetzten Rohstoffen zusammen.

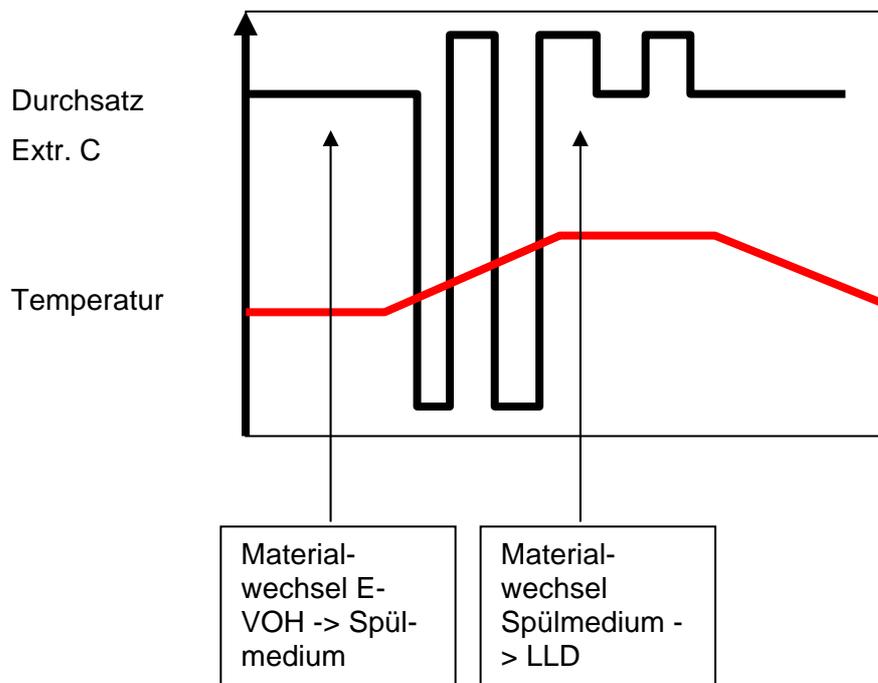


Abbildung 3-30 Schema der Spülvorschrift

Der erarbeitete Spülvorgang wurde in der laufenden Produktion kontinuierlich eingesetzt und weiter verfeinert. Die nachfolgende Grafik zeigt die Auswirkung auf den Rüstzeitabfall.

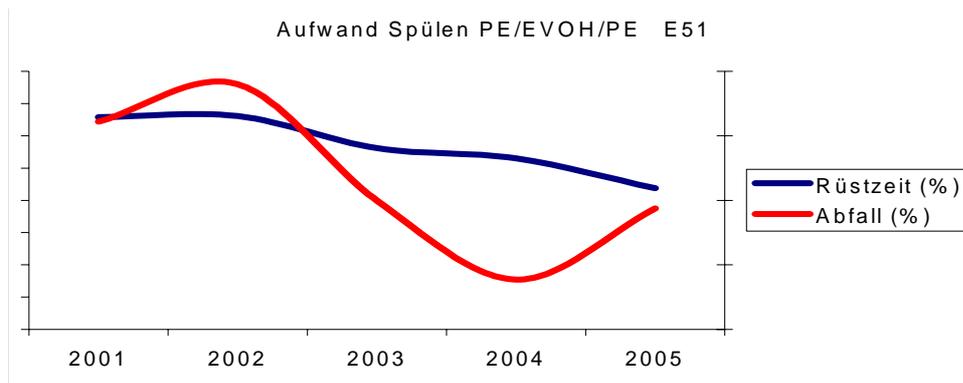


Abbildung 3-31 Einfluss der erarbeiteten Spülvorschrift auf den Rüstabfall

In Abbildung 3-31 ist zunächst ein kontinuierlicher Trend der sinkenden Abfallquote und Rüstzeit zu erkennen. Der Anstieg der Abfallquote im Jahr 2005 hingegen zeigt eine negative Entwicklung der Spülprozesse. Die Ursache ist eine Verschlechterung des Werkzeugzustandes. In einigen Lagen des Wendelverteilerwerkzeugs sind die Anhaftungen von verbrannten Polymeren und Funktionsstoffen so extrem, dass nicht nur die Folienqualität negativ beeinflusst wird, sondern auch die Spülvorgänge und die damit verbundenen Abfälle.



Die Ablagerungen befinden sich nur in den Lagen, wo Funktionspolymere wie z.B. Haftvermittler, Ionomere oder EVA Copolymere mit einem hohen VA Anteil gefahren werden.

In Kanälen, in dem die EVOH Schmelze strömt, sind keine Verbrennungen vorhanden.

Abbildung 3-32 5 Lagen Blaskopf nach Demontage

Die Bildung der Ablagerungen wird wahrscheinlich durch hohe Verweilzeit thermisch instabiler Materialien oder durch eine Wechselwirkung zweier unverträglicher Materialien beim Produktübergang gefördert. Deshalb wurde eine Projekterweiterung im Zusammenhang mit AP2.7 durchgeführt. Ziel ist eine grundlegende Untersuchung der Beeinflussung der Ablagerungsbildung durch die Verwendung von Fluorelastomeren als Verarbeitungshilfsmittel, wodurch langfristig die Standzeit der Werkzeuge erhöht werden soll. Dazu ist ein Langzeitversuch geplant, in dem die Extruder und Werkzeugkanäle, in denen die als kritisch beurteilten Polymere verwendet werden, anteilmäßig mit einem handelsüblichen Polymer Processing Aid (PPA) ausgerüstet werden. Der Einsatz von PPA's erzeugt ein kontinuierliches Coating der Metallwandungen durch niedrig polare Fluorpolymere. Die

Fließgeschwindigkeit der Polymere an den Wandungen wird erhöht und die Verweilzeit theoretisch verringert. In Abbildung 3-33 ist die Funktion dieser Verarbeitungshilfsmittel schematisch dargestellt.

Der Einsatz von PPA's wird heute zur Vermeidung von Düsenablagerungen durch Migration von niedrigmolekularen Stoffen in der Schmelze und zur Vermeidung von Fließirritationen am Austritt der Schmelze am Düsenpalt eingesetzt. Dafür werden lediglich die äußeren oder auch inneren Lagen eines Coexverbundes ausgerüstet.

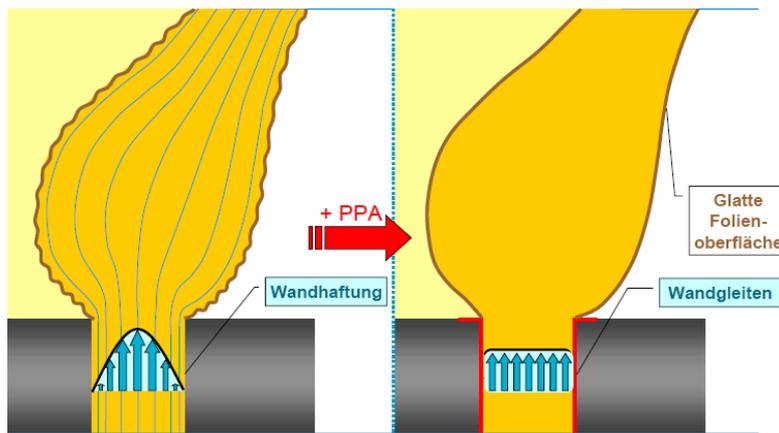


Abbildung 3-33 Schematische Darstellung der Funktionsweise eines PPA (Quelle: Basell PE & PP Folienseminar Juni 2003)

Durch das Zufügen von PPAs in den mittleren Lagen soll speziell in den Werkzeugkanälen das Abgleiten der Polymere erleichtert und damit die Verweilzeiten der Schmelze an den Wandungen verkürzt werden.

Bisher liegen keine Erfahrungen hinsichtlich der Wechselwirkungen und Verträglichkeiten der PPA's mit den Funktionsgruppen der Haftvermittler, Ionomeren und EVA Copolymeren vor.

Im ersten Schritt wurden deshalb folgende Fragestellungen untersucht:

- a) Ist das Migrationsverhalten der PPAs bei Polymeren mit polaren Gruppen identisch wie bei Polyolefinen?
- b) Werden die Eigenschaften der Folien durch die PPAs beeinflusst?

Im Detail sind Grundsatzversuche mit Ionomeren und Anhydrid modifizierten Polyolefinen in 5-Schicht-Coexverbunden geplant. Insbesondere sollen die Auswirkungen auf die Grenzflächen der einzelnen Schichten von Coexfolien analysiert werden. Hierfür wurden in der letzten Projektphase Versuche auf externen Anlagen bei Rohstofflieferanten und

Hochschulen durchgeführt. Dabei wurden die Standardstrukturen mit den entspr. Funktionspolymeren eingerichtet und nach längerer Laufzeit ein Masterbatch mit PPA in die kritischen Lagen zugesetzt. Die Dosierung wurde dabei hoch genug gewählt, um die Migration der PPAs an die Werkzeugwandungen und auch in die Grenzflächen des Folienverbundes sicherzustellen.

Derzeitig vorliegende Ergebnisse:

Ohne auf die genaue Struktur der einzelnen Verbunde eingehen zu müssen, wurden grundsätzlich folgende Erkenntnisse festgestellt:

- Die Wirkungsweise der PPA's, in Verbindung mit Ionomeren und anhydried modifizierten Haftvermittlern, kann durch einen Massedruckabfall im Extruder nach der Zudosierung festgestellt werden. Diese war bei den durchgeführten Versuchen mit allen untersuchten Polymeren festzustellen und auch bei einer Wiederholung zu reproduzieren. Somit scheint die Wirkungsweise von Fluorelastomeren bei den o.g. Polymeren mit der Wirkungsweise in Standardpolyolefinen vergleichbar zu sein.
- Des Weiteren wurden folgende Untersuchungen an den produzierten Coexverbundfolien mit PPAs im Vergleich zu den „nicht ausgerüsteten“ Folien durchgeführt:
 1. Mechanische Eigenschaften des Gesamtverbundes (Festigkeit, Dehnung, Schlagzähigkeit)
 2. Verbundhaftung der einzelnen Lagen zueinander
 3. Optische Eigenschaften der Folien

Hier liegen zum Projektende noch nicht alle Messergebnisse vor. Tendenziell ist aber bei den schon durchgeführten Untersuchungen festzustellen, dass die Ausrüstung der Folien keine signifikante Änderung der untersuchten Eigenschaften zur Folge hat.

Sobald die Grundsatzuntersuchungen abgeschlossen und ausgewertet sind, ist als nächster Schritt ein Langzeitversuch auf einer Produktionsanlage geplant. Dieser Versuch wird mit einem gereinigten und überholten Werkzeug gestartet. Während der nachfolgenden Produktionsphase wird eine Lage kontinuierlich mit PPAs ausgerüstet. Nach ca. 18 Monaten Produktionszeit soll das Werkzeug wieder demontiert und die Ablagerungsbildung der einzelnen Lagen untersucht werden.

Bei positivem Ergebnis kann auf Basis der Untersuchungen eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt und die Modifikation aller Rezepturen und Anlagen durchgeführt werden.

4. Durchführung und Auswertung von Extrusionsversuchen

Werkzeugmodifikationen sowie Extrusionsversuche an Blasfolienanlagen im Produktionsmaßstab sind, wenn auch dringend erforderlich, jedoch sehr aufwendig und teuer. Um diesen Aufwand so weit wie möglich zu begrenzen, galt es zunächst einen geeigneten Versuchsaufbau für das Technikum in der Uni zu entwickeln.

In der Kunststoffverarbeitung ist es gängige Praxis, die Verweilzeitcharakteristik eines extrudierten Materials anhand eines Farbwechsels zu bewerten. Hierbei wird der Rohstoff zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. von schwarz auf weiß, gewechselt und anschließend die Zeiten gemessen, ab der das erste weiße Polymer aus dem Werkzeug austritt und an der die letzten sichtbaren Überreste des schwarz eingefärbten Polymers ausgespült worden sind. Die so bestimmte maximale und minimale Verweilzeit kennzeichnen jedoch immer die gesamte Anlage, d.h. die Verweilzeiten im Extruder, im Siebwechsler, in der Schmelzeleitung und im Blaskopf überlagern sich. Da sich das Projekt aber ganz bewusst nur auf die Vorgänge im Werkzeug beschränkte, wurde der nachfolgend beschriebene Versuchsaufbau ausgearbeitet. Mit diesem lassen sich gleichermaßen die Einflüsse der Strömungskanalgeometrien und der Oberflächenbeschichtungen, als auch der Rohstoffe und Prozessparameter auf den Spülprozess untersuchen.

Ein Blasfolienwerkzeug besteht in Summe aus vielen verschiedenen Strömungsgeometrien wie z. B. Umlenkungen und Aufteilungen. Jede dieser Geometrien hat wiederum ihre ganz eigene Verweilzeitcharakteristik. Je nachdem, wie diese einzelnen Geometrien im Werkzeug miteinander verknüpft sind, ergibt sich das Gesamt-Verweilzeitspektrum des Blasfolienwerkzeugs. Ziel der Arbeit war es somit nicht, ein Extrusionswerkzeug als Gesamtheit zu optimieren, sondern die einzelnen Fließkanalgeometrien in Hinblick auf ihr Verweilzeitspektrum und dessen Optimierung zu betrachten. Hierzu wurden Modulwerkzeuge konstruiert, die sich sehr gut im Labormaßstab untersuchen lassen. Dabei wurden die Werkzeug- und Extrudergrößen ($D = 50\text{mm}$) aber so gewählt, dass sie nicht zu sehr vom Produktionsmaßstab abweichen.

Während in der Praxis die Verweilzeiten rein visuell bestimmt werden, kam dies für die angestrebten wissenschaftlichen Untersuchungen alleine aus Gründen der Reproduzierbarkeit nicht in Frage. Es wurde sehr viel Wert darauf gelegt, einen Materialwechsel "messbar" zu machen. Gerade die langen "Verweilzeitschwänze", d.h. der Nachweis der allerletzten Farbreste, ist messtechnisch sehr anspruchsvoll. Wegen ihres relativ hohen Auflösungsvermögens wurde letztendlich die Spektralphotometrie gewählt, mit allen nachfolgend beschriebenen Konsequenzen für den Versuchsaufbau.

4.1 Konstruktion eines Versuchswerkzeuges

Die grundlegenden Untersuchungen zum Einfluss des Durchsatzes, des Polymertyps und der Werkzeugbeschichtung auf das Spülverhalten wurden an einem geraden Strömungskanal mit Kreisquerschnitt durchgeführt. Der Strömungskanal hatte eine Fließlänge von $L = 200$ mm und einen Durchmesser von $D = 20$ mm. Das gesamte, in Abbildung 4-1 dargestellte Werkzeug war zweiteilig ausgeführt und ließ sich in der Mitte teilen. Beide Halbschalen waren mit zwei Zentrierstiften gegeneinander fixiert und mit acht Schrauben verschraubt. Der Werkzeugkörper sowie die beiden Schraubflansche konnten mittels Heizbänder, die jeweils über einen eigenen Temperaturfühler verfügten, sehr genau temperiert werden. Der Vorteil der Teilbarkeit lag darin, dass die gesamte Fließkanaloberfläche für alle gängigen Beschichtungstechniken, also auch die so genannten "Line of Sight Verfahren", zugänglich war. Abbildung 4-2 zeigt ein geöffnetes Werkzeug mit erkalteter Polymerschmelze.

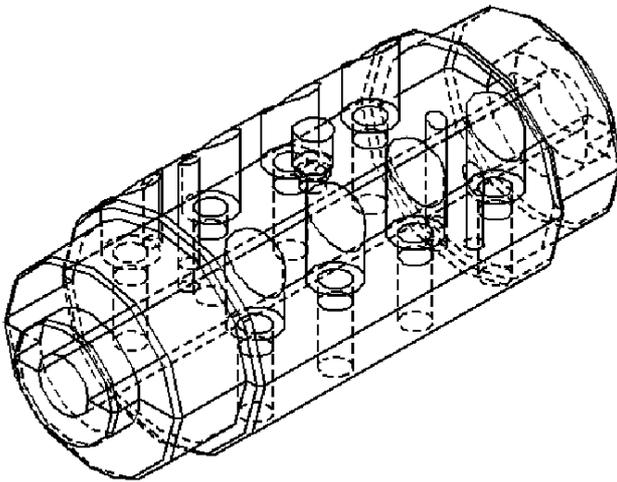


Abbildung 4-1 Isometrische Darstellung des Versuchswerkzeugs (2-Schalen-Zylinder)



Abbildung 4-2 Geöffneter 2-Schalen-Zylinder mit erkaltetem Extrudat

Der Durchmesser des Fließkanals wurde so gewählt, dass sich im Hinblick auf die Durchsatzcharakteristik des Extruders ein möglichst breites und für die Blasfolienextrusion relevantes Wandschergeschwindigkeits-Spektrum abdecken ließ.

4.1.1 Aufbau des Versuchsstandes

Die Verweilzeitcharakteristik einer Blasfolienanlage setzt sich aus den Charakteristiken aller einzelnen schmelzeführenden Anlagenkomponenten wie Extruder, Siebwechsler, Schmelzleitungen und dem eigentlichen Blasfolienwerkzeug zusammen. Ziel der experimentellen Untersuchungen war es jedoch, möglichst nur das Spülverhalten des eigentlichen Extrusionswerkzeuges zu bestimmen, und nicht das der gesamten Anlage. Um in den Farbwechselversuchen das Verweilzeitspektrum des Extruders auszublenden, wurde zwischen Extruder und Extrusionswerkzeug ein so genannter Bypass eingebaut. Dieser ist vom Prinzip her ein 2-Wege-Ventil, wie es z. B. in der Extrusion von Kabelummantelungen eingesetzt wird. Der verwendete Bypass mit 20 mm Fließkanaldurchmesser ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Das gesamte Bauteil wird über Heizbänder und -platten beheizt und verfügt über zwei Bohrungen für jeweils einen Druck- und Temperatursensor.

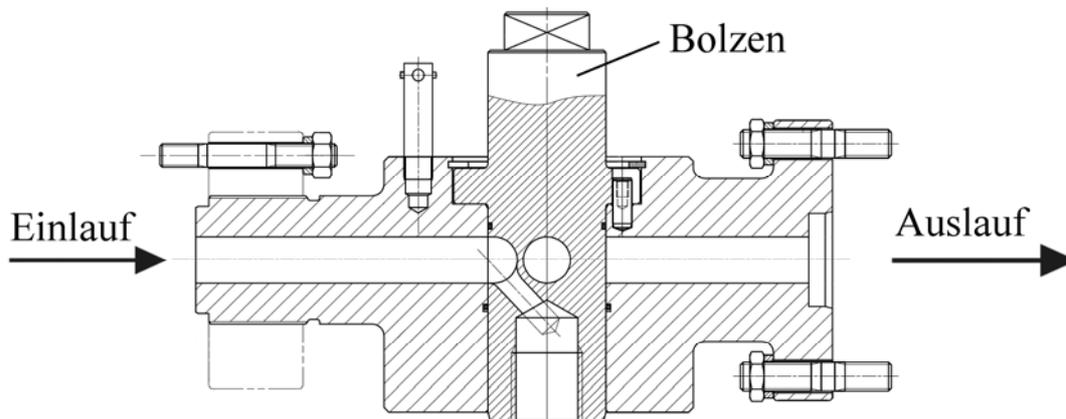


Abbildung 4-3 Bypass. Hersteller: ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf

Durch Drehung des senkrechten Bolzens in der Mitte des Moduls um 90° kann zwischen zwei Fließwegen umgeschaltet werden. Im geöffneten Zustand fließt die Schmelze geradeaus durch die 20 mm Bohrung des Bolzens hindurch und in das nachfolgende Versuchswerkzeug. Wird der Bypass durch eine 90° -Drehung des Bolzens geschlossen, wie es in Abbildung 4-3 zu sehen ist, fließt die Schmelze durch eine zweite Bohrung in den Bolzen hinein und am unteren Ende des Bolzens wieder heraus. Die gesamte Versuchsanordnung mit Extruder, Bypass und Werkzeug ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

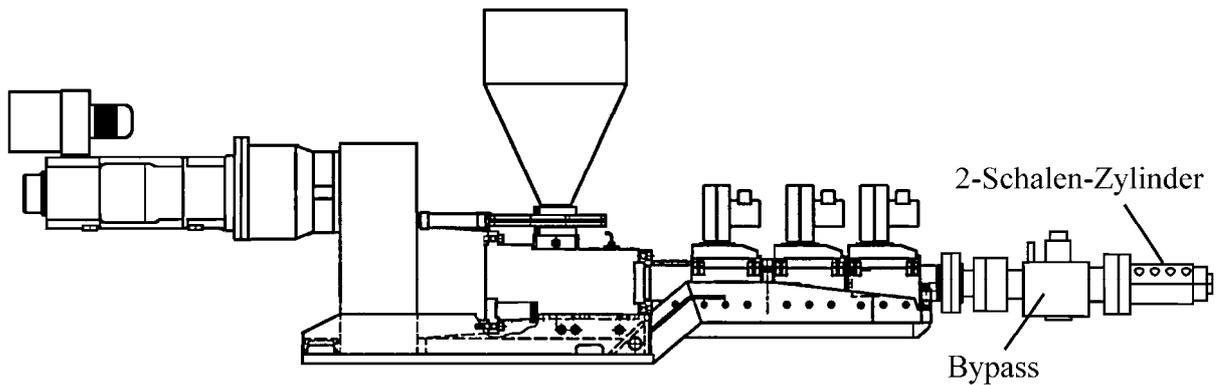


Abbildung 4-4 Versuchsanlage: Extruder mit Bypass und 2-Schalen-Zylinder

Die technischen Daten des Extruders können dem Anhang entnommen werden. Die Geometriemodule wurden genau wie die 2-Schalen-Zylinder an den Bypass angeflanscht. Die Versuchsdurchführung war identisch.

4.1.2 Versuchsdurchführung

Die Spülversuche wurden mit unterschiedlichen Polymeren bei jeweils verschiedenen Massedurchsätzen durchgeführt. Um jedoch für jedes untersuchte Polymer bei unterschiedlichen Massedurchsätzen eine einheitliche Massetemperatur zu gewährleisten, wurden in aufwendigen Vorversuchen für alle Thermoplaste und alle Massedurchsätze die dazu notwendigen Einstellungen der Heizzonen des Extruders experimentell ermittelt. Die verwendeten Materialien (Materialkennwerte siehe Anhang) wurden durchgängig, d.h. bei allen Versuchen und Durchsätzen, bei den in Tabelle 4-1 angegebenen Massetemperaturen verarbeitet.

Tabelle 4-1 Massetemperaturen für die verarbeiteten Polymere

Polymertyp	PE 150 (PE-LD)	LD 185 BW (PE-LD)	NG 5056 E (PE-LLD)	GM 9255 F2 (PE-HD)
Massetemperatur [°C]	190	170	210	215

Die Temperaturen wurden in Anlehnung an die Empfehlungen der Rohstoffhersteller sowie in Abstimmung mit den Partnern des BMBF-Projekts festgelegt. Damit wurde im Rahmen sämtlicher durchgeführter Untersuchungen der Einfluss der Massetemperatur auf das Spülverhalten von Extrusionswerkzeugen konsequent außer Betracht gelassen. Zu bemerken ist noch, dass bei der Verarbeitung des PE-HD die Dissipation im Extruder bzw. die Heizleistung der Temperierzonen nicht ausreichten, um bei einer Massetempere-

tur von 215°C Durchsätze größer 65 kg/h zu fahren. Die Durchführung der Versuche geschah ansonsten für alle Versuche einheitlich.

Zunächst wurde der Extruder bei voreingestellten Solltemperaturen für die Heizzonen so lange mit konstantem Massedurchsatz betrieben, bis die Schmelztemperatur einen stationären Wert erreicht hatte. Dann wurden 15 kg, mit 2 Masseprozent Farb-Masterbatch eingefärbtes Polymer in den Extruder eingefahren. Dabei war der Bypass in Hauptdurchflussrichtung geöffnet, d.h., das eingefärbte Polymer floss vom Extruder durch den Bypass und dann in das jeweilige angeflanschte Werkzeug. Die 15 kg reichten aus, um den gesamten Strömungskanal (Extruder, Bypass und Werkzeug) komplett mit dem eingefärbten Polymer zu spülen. Anschließend wurde der Bypass geschlossen, d.h., die Schmelze floss nun nicht mehr durch das Werkzeug, sondern durch das Bolzeninnere direkt aus dem Bypass heraus. Der Extruder wurde nun so lange mit dem nicht eingefärbten Material gespült, bis das aus dem Bolzen austretende Polymer wieder vollkommen farblos (visuell beurteilt) war. Während dieses Spülvorgangs des Extruders "stand" die eingefärbte Schmelze mehrere Minuten im Werkzeug, was Abbaumechanismen mit Sicherheit begünstigt. War der Extruder vollständig gespült, wurde der Bypass wieder geöffnet und der eigentliche Spülversuch begann. Dabei trifft die transparente Schmelze direkt am Eintrittsquerschnitt des Bolzens auf das eingefärbte Polymer und schiebt dieses nach und nach aus dem Bolzen, dem hinteren Teil des Bypasses sowie aus dem Extrusionswerkzeug heraus. Der so extrudierte, runde Schmelzestrang wurde in regelmäßigen Zeitabständen abgestochen und während der Abkühlung zwischen zwei Glasplatten gepresst. Dies war erforderlich, um für die nachfolgende Farbmessung eine möglichst ebene Extrudatoberfläche zu erhalten – an gekrümmten Oberflächen funktioniert die Spektralphotometrie aufgrund eintretenden Streulichts nicht zuverlässig.

4.2 Farb-Masterbatches

Das Einfärben von Thermoplasten mittels so genannter Farb-Masterbatches ist bei der Extrusion heutzutage gängige Praxis. Die Batches liegen meist in Granulatform vor und werden dem Extruder zu einem bestimmten Masse-Prozentsatz über eine Nebenkomponekte der gravimetrischen Dosierung zudosiert. Farb-Masterbatches bestehen aus einer Trägermatrix, den Pigmenten und weiteren Additiven wie z. B. Dispergiermitteln. Das Basismaterial ist auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt, also z. B. ein PE für die Einfärbung von PE-Typen. Die Pigmentkonzentration ist stark vom Pigmenttyp abhängig, ebenso wie der prozentuale Anteil an Dispergiermitteln. Der Begriff "Pigment" ist an einen bestimmten Teilchengrößenbereich (ca. 0,01 bis 1 µm) gebunden, der von Produkt zu

Produkt unterschiedlich und bei der Herstellung in gewissen Grenzen beeinflussbar ist [Gä83, Her95].

4.3 Verwendete Pigmente

Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden zur Bestimmung der Verweilzeitcharakteristik der Extrusionswerkzeuge zwei verschiedene, blaue Farb-Masterbatches verwendet, die sich signifikant anhand des verwendeten Pigmenttyps unterscheiden. Auf der einen Seite wurde ein Masterbatch mit einem anorganischen Blaupigment (Ultramarinblau) verwendet, das sich i. Allg. sehr gut aus Extrusionswerkzeugen herauspülen lässt. Auf der anderen Seite wurde ein Masterbatch mit einem organischen Blaupigment (Kupfer-Phthalocyanin) eingesetzt, das sich im Vergleich zu dem anorganischen Farbstoff in sämtlichen Spülversuchen, sowohl in Produktionsanlagen als auch im Technikum des Instituts, nur sehr schlecht aus den Werkzeugen herauspülen ließ. In Tabelle 10-1 sind die wichtigsten Materialkennwerte der beiden Farb-Batches im Vergleich dargestellt.

4.3.1 Ultramarinblau (Pigmentblau 29)

Ultramarinblau [Gä83, Mü03] ist das am häufigsten verwendete anorganische Blaupigment. Es ist, wie alle anorganische Buntpigmente, generell in Kunststoffen unlöslich und leicht in die Polymerschmelze zu dispergieren.

Allgemein ist das rheologische Verhalten der anorganischen Farbpigmente sehr gut und unter vergleichbaren Bedingungen besser als das organische Pigment [Her95]. Es können alle Kunststoffe damit eingefärbt werden. Im Gegensatz zu vielen anderen (organischen) Blaupigmenten wirkt sich dieser Typ in teilkristallinen Kunststoffen nicht verstärkend auf die Kristallisation aus.

Das anorganische Pigment ist ein Natrium-Aluminium-Silikat mit polysulfidartig gebundenem Schwefel im Gitter. In Abhängigkeit von Zusammensetzung und Teilchengröße können unterschiedliche Farbtöne hergestellt werden. Beim Pigmentblau 29 handelt es sich um ein eher rötliches Ultramarinblau. Die Pigmente sind hart und können im Extrusionswerkzeug Abrasion verursachen. Trotz ihrer guten Wärme-, Licht- und Wetterbeständigkeit sind normale Typen dieses sulfidischen Pigments nur gering säurebeständig, da Schwefelwasserstoff eine schwache Säure ist. Einige Typen können gar unter dem Einfluss von Luftsauerstoff oxidieren, Sulfate bilden und sich farblich verändern.

4.3.2 Kupfer-Phthalocyanine Pigment (Pigmentblau 15)

Phthalocyanine Pigmente gehören zur Gruppe der polyzyklischen organischen Pigmente. Diese werden aus mehreren kondensierten aromatischen und/oder heterozyklischen Ringsystemen hergestellt. Die vielen unterschiedlichen Farben sind das Ergebnis einer Variation des Ringsystems in Kombination mit einer großen Anzahl an verschiedenen Substituenten. Die exakte Farbe sowie einige weitere Eigenschaften hängen von der Kristallmodifikation und/oder Isomerie ab [Mü03]. Das nicht substituierte blaue Kupfer-Phthalocyanine Pigment (Pigmentblau 15) ist polymorph und hat ein leicht grünstichiges Blau. Es sind fünf kristalline Modifikationen bekannt, von denen die β -Modifikation die höchste thermodynamische Stabilität aufweist [Mü03]. Zu weiteren chemischen Einzelheiten sowie zur Herstellung dieses Pigmenttyps sei auf [Her95] verwiesen.

Mit Kupfer-Phthalocyanine [Gä83, Her95, Mü03] Blaupigmenten kann nahezu jeder Kunststoff eingefärbt werden. Sie verfügen über eine gute chemische (jedoch nicht säurebeständig) und thermische Beständigkeit, haben aber aufgrund ihrer sehr geringen Größe (organische Farbpigmente sind i. Allg. um ein Vielfaches kleiner als anorganische) eine relativ große spezifische Oberfläche.

Im Gegensatz zu anorganischen Pigmenten ist die Dispergierbarkeit von organischen Pigmenten allgemein sehr schlecht [Mü03]. Diese neigen dazu, Agglomerate zu bilden, eine Eigenschaft, die mit zunehmender Pigmentkonzentration an Wahrscheinlichkeit und Ausprägung zunimmt. Die Scherkräfte in den Extrudern reichen meist nicht aus, um die Pigmentagglomerate zu zerteilen [Her95]. Daher sind die Verwendung eines effektiven Dispergiermittels sowie eine ausreichende Scherung während der Herstellung des Masterbatches unbedingt notwendig.

Wie viele organische Pigmente auch kann das "normale" Pigmentblau 15 bei bestimmten Polyolefintypen, besonders bei PE-HD, zu einer verstärkten Kristallisation führen. Die sehr feinen organischen Pigmente wirken bei solchen teilkristallinen Kunststoffen nukleierend, das heißt, sie begünstigen ein Kristallwachstum und damit die Schwindung beim Erstarren der Polymerschmelze [Her95]. Eine Beschichtung der Pigmente mit einer Schicht Wachs kann dies vermeiden. Natürlich nur so lange, wie die Wachsschicht während der Verarbeitung nicht beschädigt wird. Viele organische Pigmente haben eine polare Oberfläche, wenn sie nicht von Herstellerseite zwecks besserer Dispergierung mit einer speziellen Schicht überzogen wurden.

4.3.3 Untersuchung des Spülverhaltens von Farb-Masterbatches

Wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, haben die Farb-Masterbatches keinen gravierenden Einfluss auf die verfahrenstechnischen Parameter. Signifikant unter-

scheiden sich das anorganische und das organische Farb-Masterbatch jedoch in ihrem Spülverhalten. In allen im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Spülversuchen, sowohl im Technikum der Universität als auch an Produktionsanlagen (Blasfolie Fa. Reifenhäuser, W&H), wurde bei dem organischen Farb-Batch mindestens die 3-fache Menge an Material benötigt, um die gesamte Anlage zu spülen, als bei dem anorganischen Batch. Obwohl dieses Phänomen allgemein bekannt ist, gibt es hierzu bislang leider keine umfassende Erklärung.

Die extrem langen Spülzeiten (teilweise mehr als 2 Stunden) wirken sich bei den heutzutage üblichen, häufigen Materialwechseln aus ökonomischer Sicht sehr negativ auf die Produktion aus. Kann der bei einem Materialwechsel produzierte Ausschuss im Falle einer Mono-Anlage noch meist problemlos regeneriert werden, so entsteht bei der Coextrusion Abfall, der meist nicht einmal mehr recycelt werden kann.

Die geringen Restkonzentrationen des organischen Blaupigments gegen Ende eines Materialwechsels lassen sich in einer einlagigen Folie sowohl messtechnisch als auch mit bloßem Auge kaum noch erkennen. Am Spiegel des Folienwickels wird das unterschiedliche Spülverhalten der beiden Pigmente jedoch deutlich sichtbar. In Abbildung 4-5 sind hierzu zwei Folienwickel von der Seite dargestellt. Es handelt sich hierbei um zwei von den Verfahrensparametern her identische Spülversuche, die sich einzig in dem verwendeten Masterbatch unterscheiden.

Das unterschiedliche Spülverhalten der beiden Pigmentierungen wird in Kapitel 4.3.3 anhand von Versuchsergebnissen noch weiter verdeutlicht. Im Folgenden sollen noch einige interessante Beobachtungen dargestellt werden, die bei der Verarbeitung der Batches gemacht wurden.

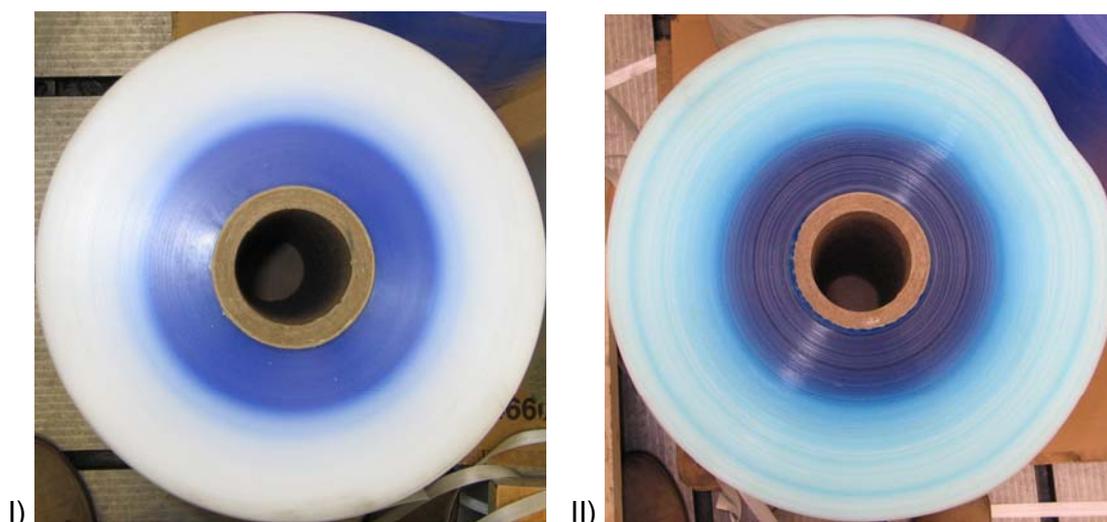


Abbildung 4-5 Folienpiegel mit einem Farbwechsel von PE-LD mit 2 % Farb-Masterbatch zu 100 % PE-LD: I) Anorganisches Masterbatch II) Organisches Masterbatch

Nach der Verarbeitung des organischen Farb-Batches ließ sich auf den Oberflächen von Extrusionsschnecken vielfach ein blauer Belag erkennen, wie er in Abbildung 4-6 zu sehen ist. Die Schicht lässt sich zwar mit einem harten Gegenstand problemlos abkratzen, die Schubspannungen an der Schneckenoberfläche reichen aber anscheinend nicht aus, um diese Schicht zu entfernen.

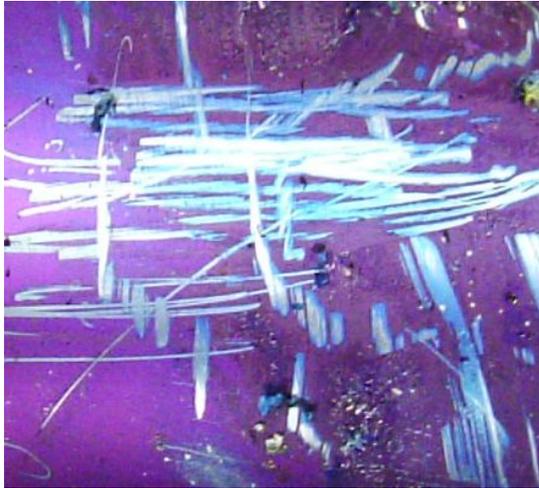


Abbildung 4-6 Blauer Belag auf der Oberfläche einer nicht gereinigten Extrusionsschnecke [Gr04b]

Auch nach der mechanischen Entfernung des Belags bleiben auf bzw. in der Schneckenoberfläche blaue Farbpigmente zurück, wie aus Abbildung 4-7 zu ersehen ist. Es wird vermutet [Gr04b], dass die sehr kleinen organischen Blaupigmente in den Vertiefungen der mikroskopisch rauen Oberfläche sitzen und von dort nur sehr schwer (strömungs-)mechanisch zu entfernen sind.



Abbildung 4-7 In der Oberflächenstruktur einer mechanisch gereinigten Extrusionsschnecke eingelagerte Überreste eines blauen Farbpigmentes [Gr04b]

Ein ganz ähnliches Phänomen konnte auch bei Spülversuchen mit den beschichteten 2-Schalen-Modulen (siehe Kapitel 4.6) beobachtet werden. Am Ende jedes Spülversuchs

mit PE-HD waren auf der Oberfläche des extrudierten Stranges selbst mit bloßem Auge (das in diesem Bereich des Farbspektrums i. Allg. empfindlicher als die Spektralphotometrie ist) keine Blaupigmente mehr zu erkennen. Daraufhin wurde das Modul abgebaut und erkalten gelassen. Beim Erkalten schwindet das PE-HD sehr stark, löst sich von den Wänden des Werkzeugs ab und lässt sich sehr leicht aus dem Werkzeug entnehmen. Obwohl der Spülvorgang vollständig abgeschlossen schien, waren auf der Oberfläche des erkalteten PE-Stranges sehr deutlich blaue Farbpigmente zu erkennen. Die Folgerung hieraus ist, dass das PE beim Schwindungsprozess die Farbpigmente aus den Vertiefungen der rauen Oberfläche herauslöst.

Bei der Dosierung des organischen Masterbatches konnte beobachtet werden, dass sich dieses sehr stark statisch auflud. Dies führte dazu, dass die Körner an den Wänden der Granulatzuführung zum Extruder klebten und von dort nur sehr schlecht zu entfernen waren. Aus diesem Grund gelangten bei den Spülversuchen trotz langer Spülzeiten immer wieder einzelne Granulatkörner des Batches in das System und führten zu einer kurzfristigen Einfärbung der Schmelze.

4.3.4 Versuchsauswertung

Die Bewertung des Spülverlaufs und der maximalen Verweilzeit erfolgte über eine Farbmessung. Sowohl zur Farbmessung an den Kunststoffsträngen als auch an den Folienproben, die in Produktionsversuchen hergestellt wurden, wurde ein bereits beschriebenes portables Spektralphotometer verwendet.

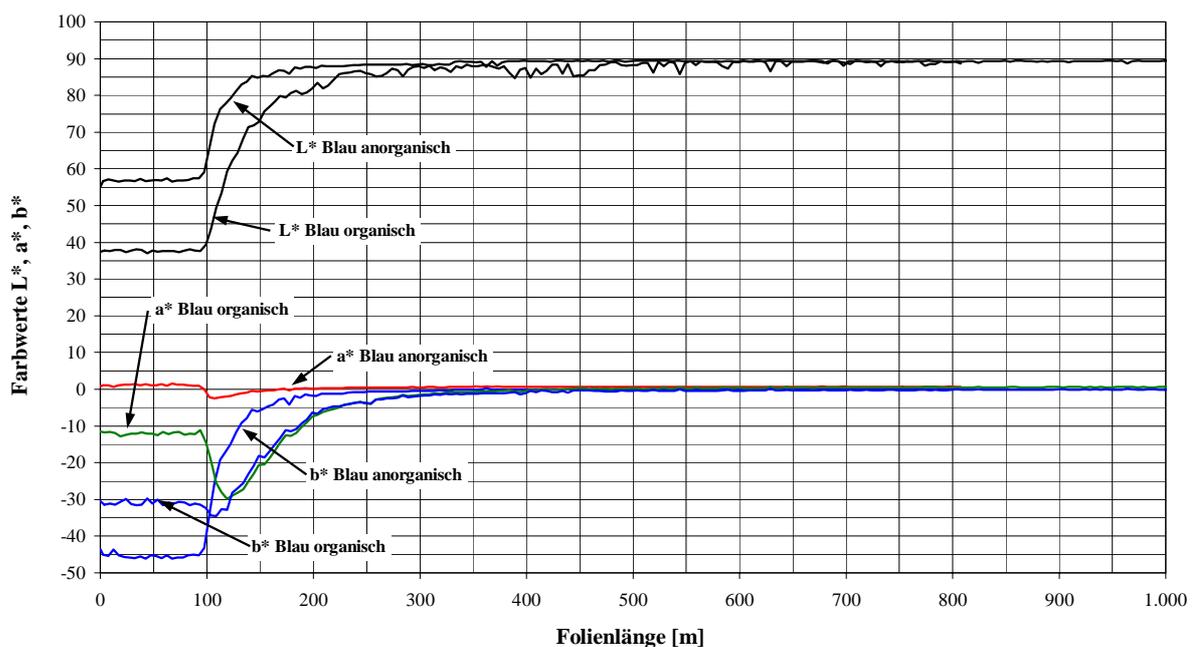


Abbildung 4-8 Farbwechsel PE-LD anorgan. + organ. an einer Mono-Blasfolienanlage

In Abbildung 4-8 sind beispielhaft die Farbkurven für zwei Farbwechsel an einer Produktions-Blasfolienanlage der Fa. Reifenhäuser dargestellt. Beide Versuche wurden mit einem PE-LD bei gleichen Verfahrensparametern durchgeführt, die Einfärbung erfolgte jedoch mit den beiden bekannten blauen Farb-Masterbatches.

Im Verlauf der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass bei einem Farbwechsel von Blau nach Transparent der b^* -Wert alleine bessere Informationen über die vorhandene Restkonzentration an blauen Farbpigmenten liefert, als z. B. der bei industriellen Farbmessungen überwiegend betrachtete Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen Probe und Standard:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Gl.4.1})$$

An gekrümmten Oberflächen ist die Farbmessung mit dem Spektralphotometer prinzipiell ungünstig, da durch den Spalt zwischen der gekrümmten Probenoberfläche und der planen Auflage des Messgeräts undefiniert Licht von der Seite einstrahlen kann und die Messergebnisse verfälscht. Daher wurden die runden bzw. ovalen extrudierten Stränge direkt nach der Extrusion zwischen zwei ebenen Flächen gepresst, um eine möglichst plane Oberfläche für die Farbmessung zu erhalten.

Das Ziel der Versuchsauswertung bestand darin, die Farbwerte über der während eines Spülvorgangs extrudierten Materialmenge aufzutragen. Hierzu wurden alle Stränge gewogen und längs der Extrusionsrichtung in gleichmäßige Längenabschnitte eingeteilt. Durch Division des Gesamtgewichtes durch die Gesamtlänge konnte für jeden Strang das Gewicht der Probe pro Längenabschnitt berechnet werden. Dieses Verfahren setzt allerdings voraus, dass der Strang über die gesamte Länge einen konstanten Querschnitt aufweist. Da die Stränge jedoch am Anfang und Ende einen anderen Querschnitt als in der Mitte besaßen, entstand bei dieser Methodik ein marginaler Fehler. Dieser wurde jedoch von Strang zu Strang durch die Addition des Gesamtgewichtes des vorherigen Stranges auf den nächsten Strang korrigiert und dadurch nicht auf die weiteren Stränge übertragen. Somit konnte eine genaue Zuordnung der Farbwerte zu der dazugehörigen Spülmasse vorgenommen werden.

Zwecks Eliminierung von verfahrens- und messtechnisch bedingten Streuungen wurden die so ermittelten Farbverlaufskurven vor der weiteren Auswertung durch eine stetige mathematische Funktion approximiert. Die besten Ergebnisse (Bestimmtheitsgrad $R^2 > 0,98$) wurden mit einem Exponentialansatz zweiter Ordnung in folgender Form erzielt:

$$f(x) = a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx} \quad (\text{Gl.4.2})$$

Für den b^* -Wert (-Blau/+Gelb) nimmt die Gleichung 4.2 folgende Form an:

$$b^*(Masse) = a_{b^*} \cdot e^{b_{b^*} \cdot Masse} + c_{b^*} \cdot e^{d_{b^*} \cdot Masse} \quad (\text{Gl.4.3})$$

Abbildung 4-9 gibt einen Eindruck über die unvermeidbare Streuung der Farbwerte sowie die qualitative Übereinstimmung der Regressionskurven mit den gemessenen Werten. Wie aus Abbildung 4-8 zu ersehen ist, sinken (werden also negativer) die Farbkurven der a^* - und b^* -Werte zu Versuchsbeginn zunächst ab, um sich dann exponentiell dem End-Farbwert anzunähern. Eine mathematische Approximierung dieses anfänglichen Verlaufs erschien im Hinblick auf die nachfolgende Auswertung nicht sinnvoll, sodass erst die Abschnitte mit einem kontinuierlichen Anstieg der Farbwerte ausgewertet wurden. Die anfängliche Zunahme des Blauanteils (d.h. der Betrag des negativen b^* wird größer) ist vor dem Hintergrund zu bewerten, dass das *CIELAB*-System einen Farbton als Summe von drei Farbvektoren darstellt, die im Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung von Farbdifferenzen immer gemeinsam betrachtet werden müssen.

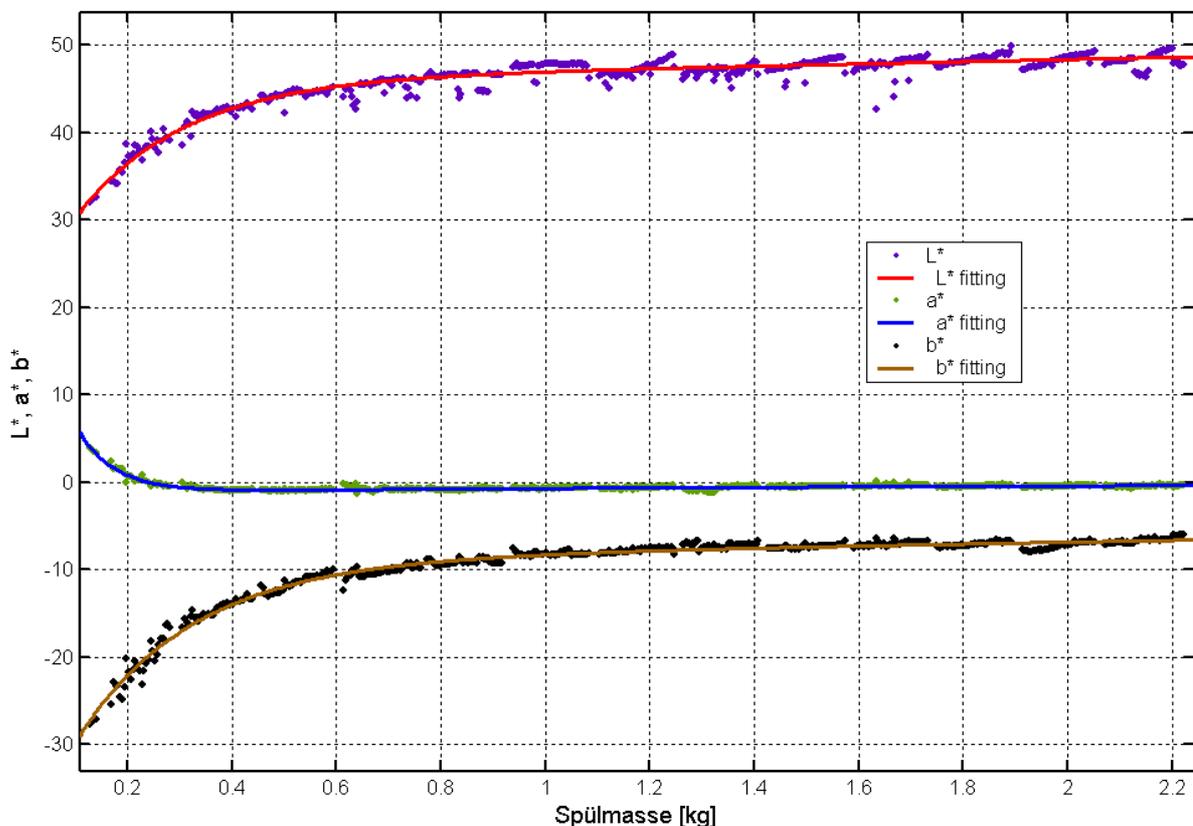


Abbildung 4-9 Fittings der Farbverlaufskurven L^* , a^* und b^* eines Spülversuchs

Ein Vergleich der unterschiedlichen Versuche, d.h. Spüleigenschaften, rein auf Basis der Koeffizienten der mathematischen Funktion ist so nicht möglich. Daher wurde für die einzelnen Versuche auf Basis der Funktion die Masse errechnet, bei der ein bestimmter Prozentsatz der Differenz von Anfangs- zu Endfarbwert erreicht ist. Unter der Voraussetzung, dass die Farbwerte zu Versuchsbeginn und –ende für jeden Polymertyp von Versuch zu Versuch identisch waren, lassen sich die $X\%$ -Masse-Werte wie folgt berechnen:

$$X \% \text{ Masse } (b^*) = \text{Masse } (b^*_{\text{Anfang}} + X \% \cdot (b^*_{\text{Ende}} - b^*_{\text{Anfang}})) \quad (\text{Gl.4.4})$$

Für die Spülstufen 75 %, 85 % und 95 % stellt sich die Auswertung wie in Abbildung 4-10 dar. Über die Spülmassen bei $b^*75\%$, $b^*85\%$ und $b^*95\%$ ist dann ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Versuche möglich.

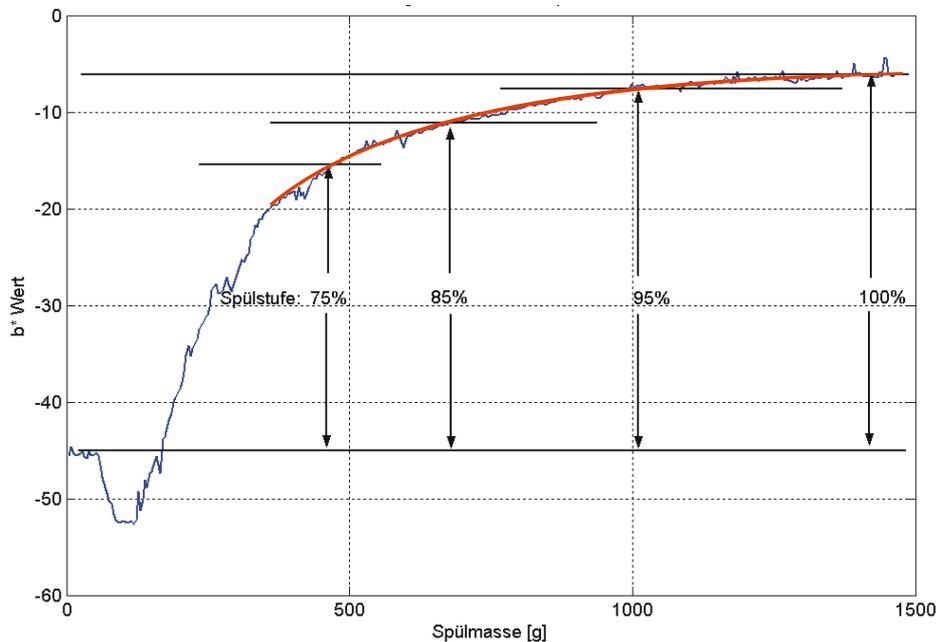


Abbildung 4-10 Bewertung eines Spülversuchs

4.4 Untersuchungen zur Verweilzeitcharakteristik von Extrusionswerkzeugen

Niedrige Wandschergeschwindigkeit bzw. –schubspannungen implizieren ein langsames Fließen der Polymerschmelze in der Nähe der Werkzeugwand [Vla]. Um schnelle Material- und Farbwechsel zu gewährleisten, versuchen Techniker daher die Kanäle von Blasfolienwerkzeugen so auszulegen, dass eine minimale Wandschergeschwindigkeit (z. B. 10 1/s [Vla]) an keiner Stelle unterschritten wird. Diese Forderung schließt die Vermeidung von Totzonen, in denen die Polymerschmelze stagniert, mit ein. Höhere Wandschubspannungen sollen angeblich die Kanäle besser “putzen“. Die minimale Schergeschwindigkeit darf aber wiederum nicht so hoch sein, dass der Gesamtdruckverlust und die Dissipation zu stark ansteigen.

Die nachfolgend dargestellten Versuche sollen in diesem Zusammenhang die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Wandschubspannung und Spülverhalten untersuchen [Gor04].

Einfluss des Massedurchsatzes auf das Spülverhalten:

Eine interessante, grundlegende Frage ist, welchen Einfluss der Massedurchsatz auf das Spülverhalten einer Extrusionsanlage hat. Anders ausgedrückt: Braucht man bei niedrigen Durchsätzen mehr Material, um ein Extrusionswerkzeug vollständig zu spülen, als bei höheren Durchsätzen? Überdies ist neben der zum Spülen benötigten Menge an Polymer auch die eigentliche Spülzeit ein wesentlicher, wirtschaftlicher Faktor in der Produktion: Je schneller der Spülvorgang vonstatten geht, umso besser!

Grundlegend untersucht wurde dieser Zusammenhang an dem zuvor vorgestellten 2-Schalen-Modul unter Anwendung der bereits beschriebenen Versuchssystematik. Sämtliche Extrusionsversuche wurden mit PE 150 (PE-LD) bei 190°C unter Verwendung sowohl des anorganischen als auch des organischen Farb-Masterbatches bei Durchsätzen von 3,5, 27, 51 und 75 kg/h durchgeführt.

Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Aufgetragen sind dort die Verläufe der b^* -Farbwerte über der Spülmasse, jedoch immer direkt die gemäß Abbildung 4-9 approximierten Kurvenverläufe und nicht die einzelnen Farbmesswerte. Außerdem geben die Fittings die Kurvenverläufe bei Gewichten unter 0,2 kg nicht korrekt wieder (siehe Kapitel 4.3.4).

Im Rahmen der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Versuchssystematik konnte, bis auf eine Ausnahme, im untersuchten Schubspannungsbereich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Massedurchsatz und der benötigten Spülmasse festgestellt werden. Einzig bei einem Durchsatz von 3,5 kg/h stellte sich bei beiden Pigmentierungen ein signifikant anderes Spülverhalten ein. Dieses Verhalten ist vermutlich jedoch nicht im Durchsatz als solchen begründet, sondern in der mit einem extrem niedrigen Durchsatz einhergehenden, sehr langen Verweilzeit der Schmelze im System. Hierdurch werden thermische und oxidative Abbaumechanismen begünstigt, die sich dann z. B. in einer Veränderung der Farbwerte ausdrücken. Thermisch bedingte Abbauprozesse führen, wie allgemein bekannt, bei vielen Typen zu einer gelblichen Verfärbung des Polymers, dem so genannten Yellowing. Nun liegen die Gelbwerte den Blauwerten auf der b^* -Skala genau gegenüber, nämlich im positiven Bereich (siehe Abbildung 3-1). Dieses bedeutet für die in Abbildung 4-11 dargestellten Versuche, dass eine Vergilbung des Polymers die gesamte b^* -Farbkurve in Richtung Gelb, also in den positiven Bereich, verschiebt. Daher liegt auch der b^* -Endwert bei einem Massedurchsatz von 3,5 kg/h um ca. 1 % höher als der b^* -Endwert aller anderen Durchsätze. Aus diesem Grund wurden bei allen anderen durchgeführten Versuchen derart niedrige Durchsätze möglichst vermieden.

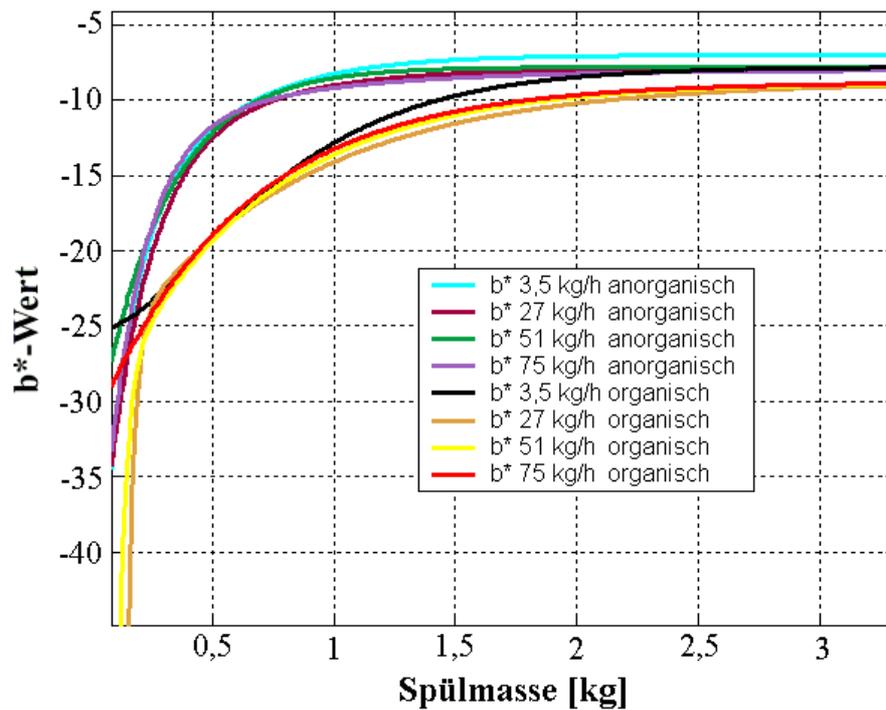


Abbildung 4-11 Einfluss des Massedurchsatzes auf das Spülverhalten

Zusammenfassend müsste die direkte Schlussfolgerung aus dieser Untersuchung also lauten: Aus wirtschaftlichen Gründen beim Spülen einer Anlage mit dem Durchsatz möglichst hoch gehen, um Zeit zu sparen. Diese allseits bekannte Philosophie wird also durch diese Untersuchung auch weiterhin gestützt.

Zusammenhang zwischen Polymertyp und Spülverhalten

Genauso interessant wie die Verknüpfung von Durchsatz und Spülverhalten ist der grundlegende Zusammenhang zwischen dem Polymertyp und der für einen Spülvorgang benötigten Materialmenge. Hierzu wurden wiederum Spülversuche nach der gleichen Systematik wie die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Versuche durchgeführt. Die drei verwendeten Polymertypen waren ein PE-LD von *ExxonMobil Chemical* (LD 185 BW), ein PE-LLD von *Dow* (NG 5056 E) und ein PE-HD von *Basell* (GM 9255 F2) (Materialdaten siehe Tabelle 10-2). Bei allen drei Polyolefinen handelt es sich um typische Blasfolienmaterialien ohne Gleitmittel etc., die bei charakteristischen, jeweils verschiedenen Verarbeitungstemperaturen (siehe Tabelle 4-1) und Durchsätzen von 5, 27 und 51 kg/h untersucht wurden.

Sämtliche Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4-2 in Form der in Abbildung 4-10 erläuterten Massewerte bei den 75, 85 und 95 %-Spülstufen dargestellt.

Tabelle 4-2 Auf Basis der Farbwerte b^* ermittelte Massewerte für unterschiedliche Polyolefine

	LD 185 BW (PE-LD) @ 170°C			
	anorganisch		organisch	
	27 kg/h	51 kg/h	27 kg/h	51 kg/h
Masse [kg] bei $b^*75\%$	0,594	0,581	2,046	1,583
Masse [kg] bei $b^*85\%$	0,766	0,826	2,455	2,021
Masse [kg] bei $b^*95\%$	1,184	1,538	2,939	2,883
	NG 5056 E (PE-LLD) @ 210°C			
	anorganisch		organisch	
	27 kg/h	51 kg/h	27 kg/h	51 kg/h
Masse [kg] bei $b^*75\%$	0,498	0,532	1,788	1,618
Masse [kg] bei $b^*85\%$	0,684	0,688	2,265	2,066
Masse [kg] bei $b^*95\%$	1,097	1,050	3,070	2,816
	GM 9255 F2 (PE-HD) @ 215°C			
	anorganisch		organisch	
	27 kg/h	51 kg/h	27 kg/h	51 kg/h
Masse [kg] bei $b^*75\%$	0,459	0,443	1,728	1,801
Masse [kg] bei $b^*85\%$	0,610	0,577	2,063	2,228
Masse [kg] bei $b^*95\%$	0,999	0,966	2,742	2,983

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss natürlich berücksichtigt werden, dass alle drei Polymere bei unterschiedlichen Temperaturen verarbeitet wurden. Da es sich hierbei aber um typische Verarbeitungstemperaturen handelt, wie sie in der Folienproduktion auch anzutreffen sind, ist der Vergleich durchaus zulässig.

Abbildung 4-12 zeigt in grafischer Darstellung anhand des aussagekräftigsten Massewertes, dem $b^*95\%$ -Massewert, den Vergleich der PE-Typen für die jeweilige Farb-Batch-Type.

Wie bereits Abbildung 4-12 zu entnehmen war, lässt sich das organische Farb-Batch unabhängig vom Polymertyp sehr viel schlechter herauspülen als das anorganische Batch. Während es bei dem anorganischen Batch so aussieht, als wenn sich das PE-HD am besten und das PE-LD am schlechtesten spülen lässt, ist dieser Trend bei Verwendung

des organischen Batches nicht mehr zu erkennen. Auch beim Zusammenhang zwischen Durchsatz und Spülverhalten ist keine eindeutige Abhängigkeit zu erkennen.

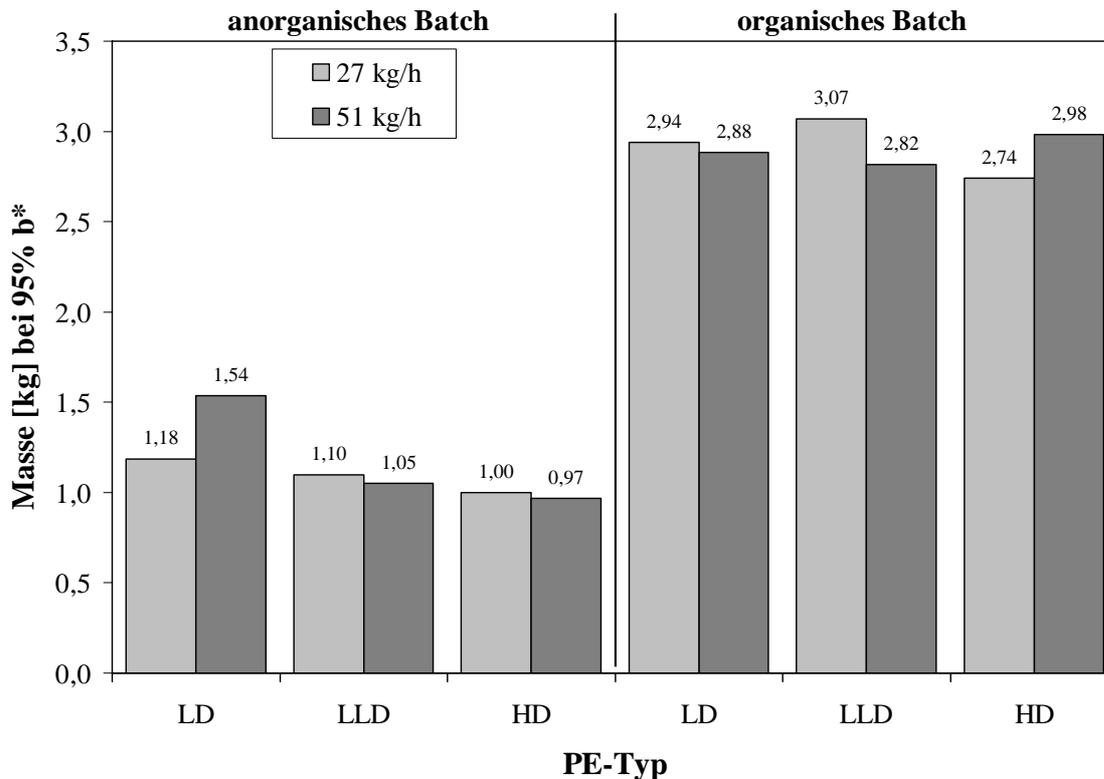


Abbildung 4-12 Vergleich der $b^*95\%$ -Massewerte für verschiedene Materialien, Durchsätze und Farb-Batches

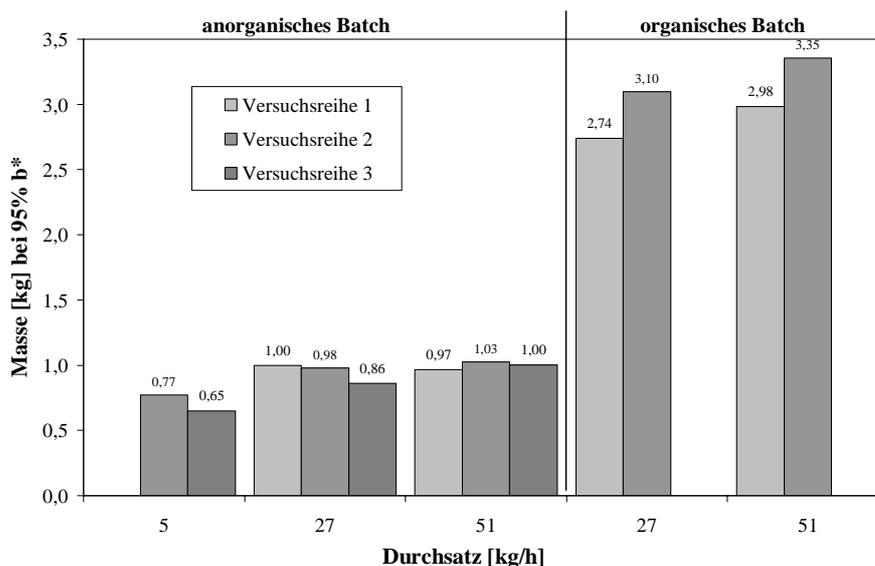
Den Schubspannungen nach müsste sich das PE-HD eigentlich am besten und das PE-LD am schlechtesten herauspülen lassen. Während ein derartiger Trend beim organischen Batch nicht zu erkennen ist, stellt beim anorganischen Farb-Batch einzig der Massewert von PE-LD bei 51 kg/h einen Ausreißer dar.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss natürlich auch die Frage nach der Reproduzierbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse gestellt werden. Aus diesem Grund wurden mit dem PE-HD mehrere Reproduktionsversuche gefahren, deren Ergebnisse in Tabelle 4-3 aufgelistet sind. Dabei entspricht Versuchsreihe 1 den bereits in Tabelle 4-2 dargestellten Werten für PE-HD.

Tabelle 4-3 Auf Basis der Farbwerte b^* ermittelte Massewerte für PE-HD bei unterschiedlichen Massedurchsätzen

GM 9255 F2 (PE-HD) @ 215°C					
anorganisch			organisch		
5 kg/h	27 kg/h	51 kg/h	27 kg/h	51 kg/h	
Versuchsreihe 1					
Masse [kg] bei $b^*75\%$		0,459	0,443	1,728	1,801
Masse [kg] bei $b^*85\%$		0,610	0,577	2,063	2,228
Masse [kg] bei $b^*95\%$		0,999	0,966	2,742	2,983
Versuchsreihe 2					
Masse [kg] bei $b^*75\%$	0,417	0,420	0,492	1,760	1,890
Masse [kg] bei $b^*85\%$	0,524	0,552	0,630	2,182	2,364
Masse [kg] bei $b^*95\%$	0,771	0,977	1,025	3,095	3,354
Versuchsreihe 3					
Masse [kg] bei $b^*75\%$	0,339	0,431	0,462		
Masse [kg] bei $b^*85\%$	0,427	0,553	0,650		
Masse [kg] bei $b^*95\%$	0,649	0,861	1,003		

In Abbildung 4-13 sind die in Tabelle 4-3 dargestellten Werte übersichtlich dargestellt. Beim anorganischen Batch beträgt die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Masse bei 5 kg/h 15,8 %, bei 27 kg/h 13,8 % und bei 51 kg/h lediglich 5,8 %. Beim organischen Batch beträgt die Differenz in beiden Versuchsreihen je ca. 11 %. D.h., eine typische Reproduzierbarkeit bei der verwendeten Versuchssystematik liegt bei $\pm 8\%$.

**Abbildung 4-13 Vergleich der $b^*95\%$ -Massewerte für verschiedene Materialien, Durchsätze und Farb-Batches**

Randschichten und Spülverhalten

In den vorhergehenden Versuchen wurde das Spülverhalten eines geraden Rohres integral anhand von Massewerten zum Erreichen definierter Spülzustände bewertet. Der Vorteil des teilbaren Werkzeugs besteht darin, dass es zu jedem beliebigen Zeitpunkt während eines Spülvorgangs geöffnet werden kann und so ein Einblick in die Verteilung der blauen und transparenten Schmelzeschichten möglich ist.

Die experimentelle Vorgehensweise bei diesen Versuchen mit dem 2-Schalen-Zylinder sah wie folgt aus: Zunächst wurde der Versuch genau wie zuvor beschrieben durchgeführt. Der eigentliche Spülvorgang wurde dann jedoch nach einer experimentell ermittelten Spülzeit mittendrin durch Schließen des Bypasses abgebrochen. Die Abbruchzeiten wurden in Vorversuchen so bestimmt, dass noch eine ausreichend dicke, blaue Randschicht zur Auswertung vorhanden war (nach ca. 30 % der Gesamtspülzeit).

Das gesamte Werkzeug wurde daraufhin demontiert und abgekühlt. Nach Öffnung des 2-Schalen-Zylinders konnte die erstarrte, in den Randschichten noch blau eingefärbte Schmelze in der Regel rückstandsfrei aus dem Werkzeug entnommen werden. Anschließend wurden die Polymerstäbe längs in der Mitte durchtrennt und die Dicke der Randschicht in axialer Richtung mittels eines optischen Messsystems (Optomess A250, siehe Anhang) vermessen. Aufgrund der gegenüber den anderen PE-Typen stärkeren Opazität und des dadurch bedingten besseren Kontrastes ließ sich die optische Vermessung der Randschicht an Proben aus PE-HD am besten durchführen. So weit dies beurteilt werden konnte, wiesen die Proben aus PE-LD und -LLD jedoch qualitativ gleiche Verläufe der Randschichten auf.

Die Auswertung der Randschichten des geraden Strömungskanal ergab, dass die Dicke der noch nicht gespülten blauen Randschicht vom Einlass an über die Rohrlänge kontinuierlich bis zum Austritt ansteigt. Ausgehend vom Modell einer laminaren (Schichten-) Strömung lässt sich dies folgendermaßen erklären: Wenn man Wandgleiteteffekte außer acht lässt, stellt sich zwischen Kanalwand und Rohrmitte je nach Ausprägung der Strukturviskosität der Polymerschmelze ein bestimmtes radiales Geschwindigkeitsprofil ein. Hierbei ist die Verweilzeit eines Schmelzevolumens im Rohr direkt proportional zur Rohrlänge und umgekehrt proportional zu der, von der radialen Position abhängigen, Strömungsgeschwindigkeit. Wird nun also ein Rohr wie in der Versuchsanordnung beschrieben gespült, ist die Dicke der verbleibenden Randschicht am Eintritt zu jedem Zeitpunkt dünner als in Richtung des Austritts. Der sich einstellende nichtlineare, axiale Schichtdickenverlauf ist zu Beginn der Spülzeit sehr stark ausgeprägt und lässt sich mit fortschreitender Zeit immer schlechter messtechnisch erfassen.

Nun handelt es sich bei einem Kreisrohr natürlich um die denkbar einfachste Strömungskanalgeometrie. Aber gerade deswegen eignet sich diese Kontur, um grundlegende Effekte zu untersuchen. Betrachtet man die Gesamtgeometrie eines Wendelverteilerwerkzeugs, so lassen sich je nach Typ oft eine Vielzahl an 90° -Umlenkungen und T-Verteiler finden. So enthält z. B. das in Abbildung 4-14 dargestellte Radial-Wendelverteilerwerkzeug bei "nur" vier Wendeln in Summe drei T-Verteiler, sechs 90° -Umlenkungen und sogar zwei 180° -Umlenkungen, die als eine direkte Hintereinanderschaltung zweier 90° -Umlenkungen betrachtet werden können. Daher sollen diese beiden grundlegenden Strömungskanalgeometrien in den beiden folgenden Abschnitten 5 und 5.2 bezüglich ihres Spülverhaltens genauer untersucht werden [Gor04].

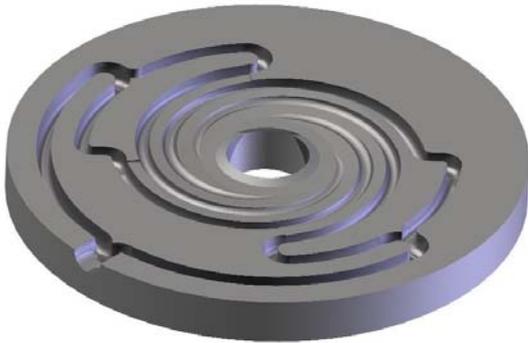


Abbildung 4-14 Volumenmodell der Scheibe eines Radial-Verteilersystems inkl. horizontaler Vorverteilung [Compuplast]

4.5 Werkzeugbeschichtungen

Das strömungsmechanische Verhalten eines Extrusionswerkzeugs hängt nach heutigem Kenntnisstand direkt von der Haftung zwischen Polymerschmelze und Werkzeugwand ab. Diese wird wiederum maßgeblich durch die Art der Werkzeugoberfläche beeinflusst. Eine Verringerung der Wandhaftung, ganz egal auf welchen physikalischen, chemischen oder mechanischen Mechanismen diese begründet ist, führt theoretisch zu einer Reduzierung des Druckverlustes, einer Reduzierung von Ablagerungen sowie zu einer Einengung des Verweilzeitspektrums. So weisen z. B. Untersuchungen der Fa. ENGEL [Bal03, Göt00] darauf hin, dass mit einem speziellen Hartmetall beschichtete Schnecken bei der Verarbeitung von PC und PP die Haftung zwischen Polymerschmelze und Schneckenoberfläche verringern und so zu kürzeren Materialwechsellern und einer Reduzierung der Ablagerungsneigung führen.

Ziel dieses Teils der Arbeit ist die Suche nach Beschichtungen für Blasfolienwerkzeuge, die deren Verweilzeitverhalten verbessern und so über verkürzte Spülzeiten die Wirtschaftlichkeit einer Folienproduktion zu steigern in der Lage sind.

4.5.1 Anforderungen an eine Beschichtung

Während heutzutage z. B. moderne PVD- oder CVD-Beschichtungen bei Spritzgießwerkzeugen zur Erhöhung der Standzeit oder Verbesserung der Entformbarkeit schon fast zum Stand der Technik gehören, werden derartige Schichten bei Extrusionsschnecken mittlerweile häufig, bei Blasfolienwerkzeugen eher seltener eingesetzt. Zu den Standards bei den Folienwerkzeugen zählen nach wie vor der Einsatz von Chromstählen, die Hartverchromung oder das chemische Vernickeln.

Eine Beschichtung für ein Blasfolienwerkzeug, in der Regel ein axiales oder radiales Wendelverteilersystem (siehe Abbildung 4-15), muss folgende Anforderungen erfüllen bzw. Eigenschaften aufweisen:



Abbildung 4-15 Beispiel eines Wendelverteilers

Aufbringen der Beschichtung

Zunächst einmal muss sichergestellt sein, dass die Beschichtung überhaupt auf der gesamten Fließkanaloberfläche aufgebracht werden kann. Mit vielen Beschichtungstechniken ist die gleichmäßige Beschichtung von senkrechten Wänden, Hinterschnitten oder tiefen Löchern gar nicht oder nur mit extrem großem Aufwand möglich. Beim Einsatz von vergüteten Werkzeugstählen ist darauf zu achten, dass die Beschichtungstemperatur unterhalb der Anlasstemperatur liegt. Bei Blasfolienwerkzeugen handelt es sich sehr oft um relativ große Bauteile. Dies erfordert auch entsprechend große Kammern (PVD-Verfahren) bzw. Bäder.

Untergrund

Es muss eine gute und dauerhafte Haftung zwischen Beschichtung und Untergrund, d.h. der stählernen Oberfläche des Werkzeugs, sichergestellt sein. Lokale Schichtabplatzungen gefährden u. U. die Funktion der gesamten Beschichtung. Überdies muss der Werkzeugstahl von seiner Oberflächenfestigkeit und Härte her in der Lage sein, die oft extrem harten, spröden und sehr dünnen Beschichtungen zu tragen (Stützeffekt, Eierschaleneffekt) [Kay02].

Härte und Abrasion

Auch wenn die Härte der Beschichtung bei der Folienherstellung längst nicht so wichtig ist wie z. B. bei der Extrusion von glasfasergefüllten Thermoplasten, ist auch hier eine gewisse Mindesthärte erforderlich. Bei den für ein Blasfolienwerkzeug geforderten Standzeiten von mehreren Jahren kann u. U. auch schon der durch die teilweise sehr hohe Härte von kleinen Teilchen wie Farbpigmenten (z. B. das häufig verwendete Farbpigment TiO_2) oder Füllstoffen verursachte abrasive Verschleiß zum Tragen kommen [Kay02, Mau00].

Je nach Produktion und Typ werden Blasfolienwerkzeuge in regelmäßigen Intervallen (u. U. über ein Jahr) demontiert und mechanisch oder thermisch gereinigt. Fakt ist, dass diese Reinigung z. T. nicht fachgerecht durchgeführt wird und Beschädigungen der meist hochglanzpolierten Werkzeugoberflächen in Form von Kratzern und Riefen die Folge sind. Daher sollte die Beschichtung eine gewisse Mindesthärte aufweisen, um derartige Beschädigungen zu reduzieren.

Oberflächengüte

Blasfolienwerkzeuge werden überwiegend mit polierter bis hochglanzpolierter Oberflächengüte ausgeliefert. Um diese Oberflächengüten auch mit Beschichtung sicherstellen zu können, muss die Beschichtung die Oberflächengüte eines polierten Untergrundes abbilden oder sogar verbessern können und/oder gut polierbar sein. Der Forderung nach guter Polierbarkeit steht oft der Wunsch nach einer gewissen Härte der Beschichtung entgegen.

Bei Hartstoffbeschichtungen führen Metalleinschlüsse oder Wachstumsfehler häufig zu einer Aufrauung der Oberfläche. Daher sollten diese nach dem Beschichten immer gegläntzt (abgezogen, poliert) werden.

Schichtdicke

Die Dicke der Beschichtung sollte gleichmäßig und reproduzierbar sein. Je nach Beschichtungstechnik und Erfahrung des Beschichters kann es z. B. an scharfen Kanten zu Auftragungen, aber auch zu einer verringerten Schichtdicke kommen. Die Schichtdicken müssen bei den sehr genauen Pass- und Spaltmaßen berücksichtigt werden. U. U. ist ein Nachschleifen von Passflächen erforderlich.

Ablagerungen

Eine Beschichtung soll Ablagerungen und Brenner reduzieren, wenn nicht sogar vermeiden. Da die Ablagerungsmechanismen sehr komplex sind, stark von den verarbeiteten Polymeren und Additiven abhängen und zudem extrem zeitabhängig sind, gibt es zum Einfluss von Oberflächenbeschichtungen auf die Ablagerungsbildung bei Blasfolienwerkzeugen bislang kaum wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse. Bei der Verarbeitung von Hart-PVC (PVC-S) wurde hingegen bei unlegierten Werkzeugstählen eine tendenziell höhere Ablagerungsneigung registriert als bei Chrom- und Vanadium-legierten Stählen [Me81].

Anhaftung der Schmelze

Im Sinne der vorgestellten Untersuchungen soll die Beschichtung natürlich auch die Adhäsion zwischen Polymerschmelze und Werkzeugwand reduzieren, um so das Verweilzeitverhalten zu verbessern.

Kosten

Selbstverständlich spielt auch der Preis einer Beschichtung eine wesentliche Rolle. Letztendlich hängt es vom Kunden ab, ob er gewillt ist, den Mehrwert einer Spezialbeschichtung zu bezahlen.

Korrosion

Ein weiteres u. U. wichtiges Kriterium für eine Oberflächenbeschichtung ist ihr Korrosionsschutz. Dass Korrosion bei der Verarbeitung von PVC ein wichtiges Problem ist, ist hinlänglich bekannt. Aber auch bei der Extrusion anderer Rohstoffe wie z. B. Fluorpolymeren kann die Korrosion im Hinblick auf die Standzeit der Extrusionswerkzeuge einen großen Einfluss haben. Auch bei einigen Standardpolymeren können geringe Mengen chlorhaltiger Katalysatorrückstände u. U. zu Korrosionsproblemen führen. Da hochkorrosions-

beständige Stähle i. Allg. sehr teuer sind, stellen Beschichtungen eine interessante Alternative dar. Die Beschichtung sollte auf der einen Seite gegenüber dem korrosiven Medium beständig sein, auf der anderen Seite aber auch möglichst dicht, um den darunterliegenden Stahl vollständig zu schützen. Gerade die Dichtigkeit der Beschichtung ist ein wichtiger Faktor, den nicht alle in der Extrusionstechnik eingesetzten Beschichtungstypen gleichermaßen erfüllen können.

4.5.2 Beschichtungstypen

Nachfolgend wird der Großteil der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Beschichtungstypen kurz beschrieben. Wie bereits einleitend erwähnt, wurden die dargestellten Untersuchungsergebnisse im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundforschungsprojektes erarbeitet. Aus Geheimhaltungsgründen werden fünf der untersuchten, neuartigen Beschichtungstypen nicht explizit genannt, sondern mit Beschichtungstyp "A" bis "E" bezeichnet. Das Kernziel dieser Arbeit, die Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise, bleibt von dieser Verfahrensweise jedoch unberührt.

Der Vollständigkeit halber werden auch PTFE- und *Sicon*[®]-Beschichtungen erläutert. Diese Schichten sind zwar hinsichtlich ihrer sehr geringen Adhäsionsneigung sehr interessant, aus technischer Sicht jedoch für Blasfolienwerkzeuge ungeeignet (Standfestigkeit, Beschichtungstechnik).

Chemisch-Nickel

Chemisch-Nickel (NiP) verfügt im Vergleich zu Hartchrom über eine geringere Härte (48 HRC), verursacht dafür aber keinen Kantenaufbau und besitzt keine Mikrorisse [Hen01]. Da die Beschichtung ein chemisch reaktiver Prozess ist, wird es planparallel abgeschieden und dringt auch entsprechend gut in Löcher ein.

Chemisch-Nickel wird aus einer wässrigen Lösung bei max. 90°C ohne äußere Stromquelle chemisch-reduktiv abgeschieden. Hierbei werden die in der wässrigen Prozesslösung vorliegenden Nickelionen zu Nickelmetall reduziert. Chemische Reaktionspartner und Lieferanten der hierzu notwendigen Elektronen sind die in Lösung befindlichen Hypophosphit-Ionen, die im Verlaufe der Reaktion selbst zu Orthophosphit oxidiert werden und für den Phosphorgehalt (3-14 %) der abgeschiedenen Schicht verantwortlich sind.

Chemisch-Nickel-Beschichtungen sind auch als Dispersionsschichten mit fein verteilten PTFE- oder Borit-Partikeln erhältlich. Durch die Partikel bildet sich eine Art Gleitschicht aus, die zu verminderten Gleitreibungskoeffizienten führt. Derartige Beschichtungen ha-

ben sich unter bestimmten Bedingungen z. B. beim Spritzgießen zur Verbesserung der Entformbarkeit bewährt.

Chromstahl

Chromstähle wie der in dieser Arbeit verwendete Stahl 1.2316 werden in der Kunststoffverarbeitung oft als Alternative zu beschichteten Werkzeugstählen verwendet. Sie verfügen über eine gute Festigkeit und Härte und lassen sich sehr gut polieren. Chromstähle bilden durch selektive Korrosion eine passive Chromoxid-Schicht aus, die zu einem guten Korrosionsschutz führt. Auf der anderen Seite können diese Passivschichten aber die Neigung zu Belagbildung erhöhen [Bal03].

CrC

Bei der Beschichtung Chromcarbid (CrC) handelt es sich um eine Chrom Keramik, ähnlich wie CrN, jedoch mit einer verbesserten Korrosionsbeständigkeit [Hen01]. Sie wird mittels der PVD-Beschichtungstechnik aufgebracht und zeichnet sich durch eine geringe Benetzbarkeit und eine gute chemische Stabilität aus. Die kovalente Bindungsart zeigt geringe Wechselwirkungen zu den meisten polaren Kunststoffen.

CrN

Bei starker korrosiver Beanspruchung und auch bei adhäsivem Verschleiß (Belagbildung) wird dem silbergrauen Chromnitrid (CrN) oft der Vorzug vor TiN gegeben. CrN hat eine dichtere und geschlosseneren Struktur als TiN und verzögert dadurch den Korrosionsangriff. Überdies sind derartige Schichten trotz ihrer hohen Härte von 1.200-2.400 HV relativ elastisch und lassen sich sehr gut polieren. CrN ist bis ca. 700°C einsetzbar.

Hartchrom

Eine Hartverchromung bietet eine gute Oberflächenhärte (68-70 *HRC*), ist relativ preiswert, bis 400°C gegen statische Temperaturbelastungen beständig und wird bei Blasfolienwerkzeugen häufig zum Schutz vor Verschleiß und Korrosion eingesetzt. Wie bei allen elektrolytischen (galvanischen) Beschichtungsverfahren ist die Qualität jedoch sehr stark von der Ausführung der Elektrode abhängig [Hen01]. Da die Hartverchromung ein "Line-of-sight"-Verfahren ist, dringt es auch nicht tief in etwaige Löcher ein. Verfahrensbedingt entsteht an den Kanten ein Aufbau der Beschichtung. Bei der Aufbringung kommt es innerhalb der Chromschicht zu Spannungen, die stets zu Mikrorissen führen, was bei korro-

sivem Angriff ungünstig ist. Hier kann eine zusätzliche, geschlossene Beschichtung (z. B. Nickel oder Heißchrom) als Untergrund weiterhelfen.

PEEK

Poly-Ether-Ether-Keton (PEEK) ist ein linearer, aromatischer und teilkristalliner Hochleistungskunststoff, ist bis ca. 300°C mechanisch beständig und wurde erstmals 1978 auf dem Markt eingeführt.

Als Beschichtung z. B. auf Metallen können dichte und optisch einwandfreie Schichten von 0,2 bis 2 mm Dicke aufgebracht werden. Zur Steigerung der Haftfestigkeit ist der Haftgrund mechanisch vorzubehandeln (aufrauen). Gute Ergebnisse wurden mit der elektrostatischen Pulverbeschichtung mittels Sprühpistole erreicht, es sind aber auch Pulver-Nassbeschichtungen möglich. Zur Erreichung einer gesteigerten Festigkeit (Kristallisationsgrad) und Reduzierung der Eigenspannungen werden PEEK-Beschichtungen nach dem eigentlichen Beschichten i. Allg. noch einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen (getempert).

In Extrusionsversuchen [Sei02] mit PE-LLD mit einer Düse aus PEEK wurde festgestellt, dass die niederenergetische Oberfläche bei Schergeschwindigkeiten von 115 1/s im Gegensatz zu einer Stahldüse zu Wandgleiten führt. Das Schubspannungsniveau war sogar noch geringer als bei einer Düse aus PTFE, bei der ebenso Wandgleiten beobachtet wurde.

PTFE

Die Oberflächenenergie von Polytetrafluorethylen (PTFE), auch unter den Handelsnamen *Teflon*[®], *Hostaflon*[®] oder *Algoflon*[®] bekannt, weist so gut wie keine polaren Anteile auf und zählt zu den Schichten mit der niedrigsten bekannten Oberflächenenergie. Dadurch entfällt auch im Kontakt mit anderen Substanzen der polare Wechselwirkungsanteil, was zu besonders niedrigen Adhäsionskräften führt.

Eigene als auch auswärtige [Hatz95] Extrusionsversuche bestätigen, dass mit *Teflon*[®] beschichtete Extrusionswerkzeuge einen deutlich verringerten Druckabfall aufweisen. Weiter konnten eine Verstärkung des Wandgleitens sowie eine deutliche Erhöhung der Wandschubspannungen, bei denen Extrudatverformungen auftreten, nachgewiesen werden.

Auf Versuche mit PTFE wurde in dieser Arbeit ganz bewusst verzichtet, da es als Beschichtungsmaterial für Blasfolienwerkzeuge wegen seiner geringen Standfestigkeit nicht geeignet ist. Unklar ist in diesem Zusammenhang noch, ob es nicht, ähnlich wie bei Fluor-

relastomeren (PPA) vielleicht gerade der kontinuierliche Abbau der PTFE-Beschichtung ist, der zu den beschriebenen Effekten führt.

Sicon®

Bei *Sicon®* (a-C:H:Si:O) handelt es sich um eine am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig entwickelte DLC-Schicht, bei der durch den Einbau von Silizium in das DLC-Netzwerk die Oberflächenenergie ganz gezielt reduziert werden konnte [Hie01]. *Sicon®*-Schichten sind hydrophob und kombinieren teflonähnliches Adhäsionsverhalten mit einer hohen Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß und sind bis 150°C temperaturfest. Die Abscheidung der Dünnschicht (~ 0,1-10 µm) erfolgt z. B. mit der plasmaaktivierten chemischen Gasphasenabscheidung (PACVD). Anwendung findet *Sicon®* bislang z. B. zur Beschichtung von Messköpfen zur Inline-Foliendickenmessung an Blasfolienanlagen [Hie01].

TiAlN

Titanaluminiumnitrid (TiAlN) bietet wegen seiner höherer Oberflächenhärte (94 *HRC*, 2.500-3.000 *HV*) einen verbesserten Schutz gegen abrasiven Verschleiß als CrN oder TiN. Die Schicht weist eine schwarze Farbe auf und ist, wie auch die anderen Hartstoffbeschichtungen, chemisch inert und sehr temperaturstabil.

TiN

Die Beschichtung Titanitrid (TiN) mit der typischen goldenen Farbe ist die wohl am meisten genutzte und bekannteste PVD-Beschichtung und hat sich mittlerweile zu einer Allroundschicht für den Verschleißschutz von Werkzeugen in der Kunststoffverarbeitung etabliert. So wird sie z. B. zur Verbesserung der Fließ- und Entformungseigenschaften der Kunststoffe in Spritzgießwerkzeugen eingesetzt. Die Oberflächenhärte liegt bei 85 *HRC*. Im PVD-Verfahren können Schichtdicken unter 8 µm erreicht werden. TiN verfügt, wie auch die andere Hartstoffbeschichtungen CrN, CrC und AlTiN, aufgrund seines hohen kovalenten Bindungsanteils über eine relativ reaktionsträge Oberfläche mit geringerer Polarisierbarkeit und hat sich zur Vermeidung von Belägen seit vielen Jahren in der PVC-Verarbeitung bewährt [Kay02, Mau00]. Wegen der porösen keramischen Verengungen können sie jedoch zu Korrosionsproblemen führen [Hen01].

4.6 Spülverhalten verschieden beschichteter Werkzeuge

Wie in den vorherigen Kapiteln sowie im folgenden Kapitel 4.7 dargelegt, sollten sich Fließkanalbeschichtungen mit niedriger Oberflächenenergie theoretisch positiv auf das Spülverhalten eines Extrusionswerkzeugs auswirken. Um dies zu untersuchen, wurden 10 Stück der in Kapitel 4.1 dargestellten 2-Schalen-Zylinder gefertigt und mit unterschiedlichen, in Kapitel 4.5 vorgestellten Beschichtungen versehen. Zwecks Untersuchung des Spülverhaltens wurden mit den so beschichteten Werkzeugen Spülversuche durchgeführt, die in Durchführung und Auswertung identisch mit den in Kapitel 4.4 beschriebenen Versuchen waren. Alle Versuche erfolgten mit dem PE-HD bei einer Temperatur von 215°C und einem Durchsatz von 27,3 kg/h. In Abbildung 4-16 sind die Versuchsergebnisse bei Einfärbung mit dem anorganischen Masterbatch in Form der Massen dargestellt, die benötigt wurden, um 75, 85, 95, 97, 98 und 99 % der Differenz des Blauwertes b^* zwischen Anfangs- und Endwert zu erreichen. Die Werte liegen allgemein sehr dicht beieinander und korrelieren so schlecht mit den Oberflächenenergien der Beschichtungen, dass keinerlei Zusammenhang erkennbar ist.

Analog sind in Abbildung 4-17 die Versuchsergebnisse für die Einfärbung mit dem organischen Masterbatch dargestellt. Das beste Spülergebnis wird hier mit der Beschichtung A erreicht, welche unter allen Beschichtungen die niedrigste gesamte sowie polare Oberflächenenergie aufweist (siehe Kapitel 4.6).

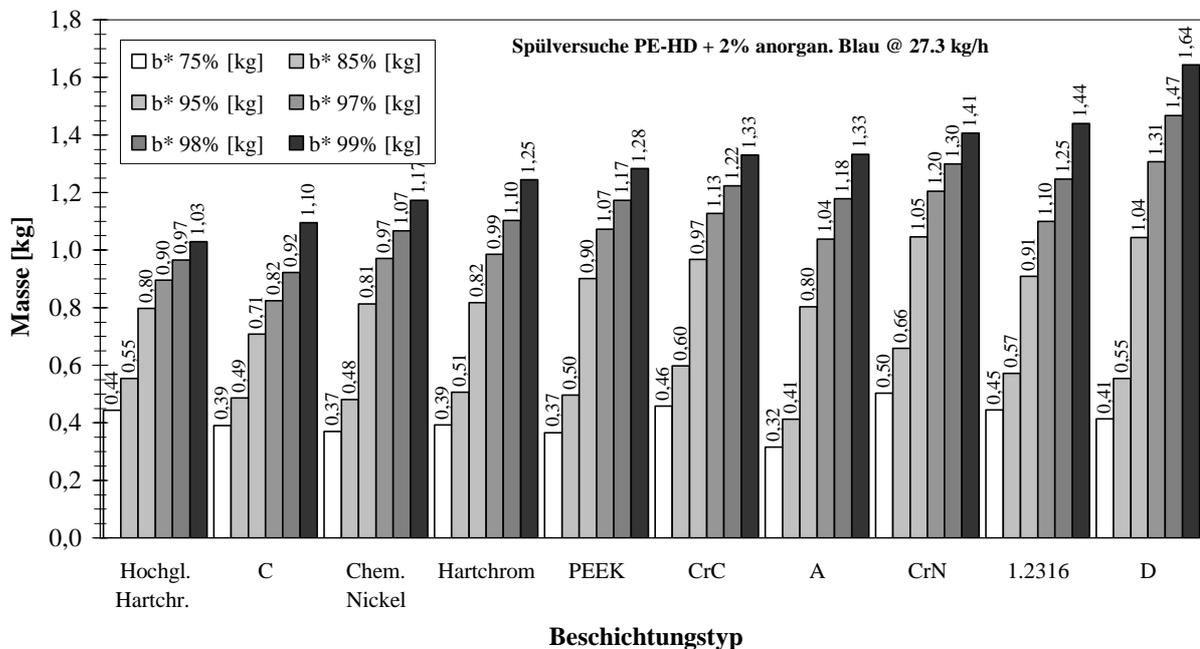


Abbildung 4-16 Spülversuche mit verschiedenen Beschichtungen bei Verwendung des anorganischen Farb-Batches (PE-HD, 215°C, 27,3 kg/h)

Hieraus könnte man schlussfolgern, dass bei dem organischen Farb-Batch ein niedriger disperser Anteil der Oberflächenenergie zu einem guten Spülergebnis führt. Dem widerspricht aber das Verhalten der PEEK-Beschichtung, die von allen Beschichtungen über die höchste disperse Oberflächenenergie verfügt, jedoch das zweitbeste Spülergebnis erreicht. Ansonsten kann über alle Beschichtungstypen hinweg keine Korrelation zwischen den Oberflächenenergien und dem Spülverhalten festgestellt werden.

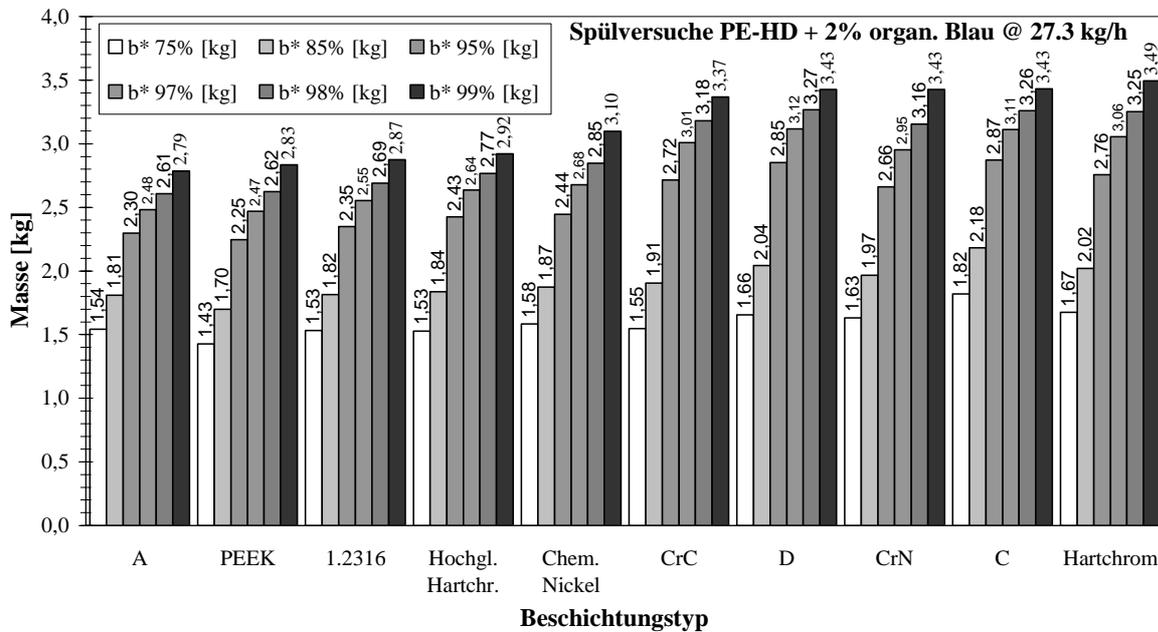


Abbildung 4-17 Spülversuche mit verschiedenen Beschichtungen bei Verwendung des organischen Farb-Batches (PE-HD, 215°C, 27,3 kg/h)

Auch mit den Rauwerten R_a und R_z (siehe Tabelle 10-3) kann so gut wie keine Korrelation (Korrelationskoeffizient $\rho < 0,04$) der Spülmassen des anorganischen Masterbatches festgestellt werden. Bei den Spülversuchen mit dem organischen Batch korreliert der $b^*75\%$ -Wert zu $\rho < -0,511$ mit R_a und zu $\rho < -0,446$ mit R_z . Dies liegt aber alleine daran, dass die PEEK-Beschichtung mit $R_a = 0,549 \mu\text{m}$ den mit Abstand größten Mittenrauwert aufweist und beim $b^*75\%$ -Wert mit 1,43 kg die geringste Spülmasse von allen Beschichtungen erreicht. Alle anderen Beschichtungen liegen im Bereich von ca. $R_a = 0,1 - 0,01 \mu\text{m}$.

Auch eine multiple Regressionsrechnung mit den dispersen und polaren Oberflächenenergien sowie der Rautiefe R_z als unabhängige Variablen und den Massen $b^*95\%$ als abhängige Daten führte bei beiden Masterbatches mit einem multiplen Korrelationskoeffizienten von 0,19 (Abweichungen bis zu 24 %) zu keinem aussagekräftigen mathematischen Modell.

Ein Einfluss der verschiedenen Beschichtungen auf den Druckverlust mittels des im Bypass montierten Druckaufnehmers mit hoher Genauigkeit (siehe Anhang) konnte bei den untersuchten Durchsätzen nicht nachgewiesen werden.

Die dargestellten Ergebnisse könnten durch die chemisch-physikalischen Wechselwirkungen in der Grenzschicht Polymer-Beschichtungswerkstoff erklärt werden. Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse von Reaktionsschichten, adsorbierten Schichten und Verunreinigungen auf die Energie von hochenergetischen Oberflächen beschrieben und in [Gro05] auch nachgewiesen. Bei einem neu beschichteten Extrusionswerkzeug ist davon auszugehen, dass sich bei den hohen Werkzeugtemperaturen und im direkten Kontakt mit der Polymerschmelze sehr schnell Reaktionsschichten wie z. B. Oxide bilden. Diese Schichten sind nach der Demontage von Extrusionswerkzeugen fast immer zu erkennen und lassen sich nur rein mechanisch mit mehr oder weniger großem Aufwand entfernen. Letztendlich könnte also die Grenzschicht zwischen Werkzeug und Polymerschmelze nicht durch die physikalischen Eigenschaften der eigentlichen (reinen) Werkzeugbeschichtungen, sondern durch die wie auch immer geartete Reaktionsschicht bestimmt werden. Auch in anderen Untersuchungen [Sei02] mit z. B. thermoplastischen Werkzeugbeschichtungen wird davon berichtet, dass die anfänglich positiven Einflüsse der Beschichtungen auf das strömungsmechanische Verhalten sich mit der Zeit egalisieren.

4.7 Oberflächenenergie und Adhäsion

An der Oberfläche einer Volumenphase wirken die zwischenmolekularen Kräfte nicht in alle Raumrichtungen in gleicher Größe, was dazu führt, dass sich Atome und Moleküle an der Substratoberfläche in einem energiereicheren Zustand (Oberflächenenergie) befinden. Mit den noch vorhandenen Restkräften werden Moleküle aus der angrenzenden Gas- oder Flüssigkeitsphase angezogen. Ihre Anbindung erfolgt dann durch chemische oder physikalische Wechselwirkungskräfte und Bindungen. Dieser, in Abbildung 4-18 verdeutlichte Mechanismus, bildet die allgemeine Grundlage der Adhäsion.

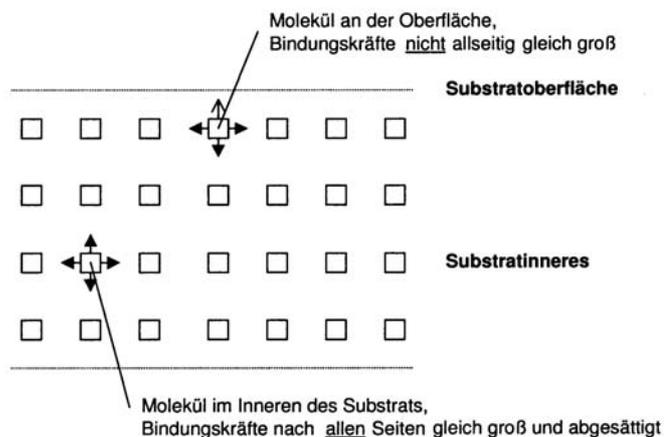


Abbildung 4-18 Bindungskräfte im Inneren und an der Oberfläche eines Substrates [Bi83]

Die Natur dieser Bindungskräfte beruht auf den verschiedenen Arten der chemischen Bindung sowie auf den zwischenmolekularen Kräften infolge der Wechselwirkungen zwischen Atomen und/oder Molekülen. Die für die Adhäsion wichtigsten Bindungskräfte sind die kovalente Bindung, die Ionenbindung, Dipolkräfte, Wasserstoffbrückenbindung, Induktionskräfte und Dispersionskräfte. Neben diesen chemischen und physikalischen Bindungsarten können auch rein mechanische Kräfte zur Adhäsion beitragen. Abbildung 4-19 gibt einen schematischen Überblick über die mögliche Bindungsarten zwischen Substrat und Adhäsionspartner.

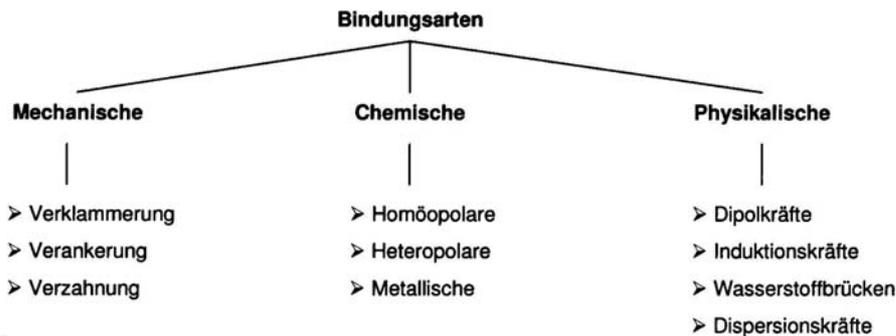


Abbildung 4-19 Mögliche Bindungsarten zwischen Substrat und Adhäsionspartner [Hab97]

Als Oberflächenspannung wird die an einer flüssigen oder festen Oberfläche wirkende Spannung bezeichnet, die bestrebt ist, die Oberfläche zu minimieren. Die energetisch günstigste Form einer Oberfläche in Bezug auf ein gegebenes Volumen ist i. Allg. eine Kugel, was vor allem bei Flüssigkeiten sichtbar ist [Hab97].

Die Oberflächenspannung entsteht aus einem Ungleichgewicht von Wechselwirkungskräften einzelner Atome oder Moleküle zueinander. Betrachtet man die Grenzfläche eines Körpers zu einem Medium, so herrschen zu beiden Seiten der Grenzfläche unterschiedliche Kräfteinflüsse. Im Fall der im Inneren des Mediums befindlichen Atome und Moleküle sind die Kraftwirkungen hingegen allseitig gleich. Als Resultierende aller zwischen den Teilchen vorhandenen Kräfte wirkt auf die an der Oberfläche liegenden Teilchen stets eine in das Innere gerichtete Kraft F (Abbildung 4-20).

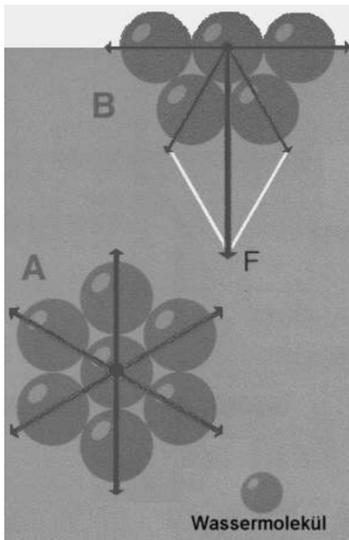


Abbildung 4-20 Kräfte diagramm zur Oberflächenspannung von Wasser [Si04]

Das Verhältnis der viskosen Kräfte zu den Kräften durch Oberflächenspannung wird durch die *Capillary-Zahl* (Ca) beschrieben. Dieser dimensionslose Parameter ist folgendermaßen definiert:

$$Ca = \frac{\eta \cdot U}{\gamma} \quad (\text{Gl.4.5})$$

U ist die charakteristische Geschwindigkeit der Strömung und γ die Oberflächenspannung. Eine große *Capillary-Zahl* ist ein Indiz dafür, dass die Kräfte der Oberflächenspannung im Verhältnis zu den viskosen Kräften klein sind. Solche Zustände herrschen bei der Polymerextrusion oder der Strömung von organischen Flüssigkeiten vor. Somit ist die Oberflächenspannung bei Strömungsvorgängen von Polymerschmelzen generell von keiner besonderen Relevanz. Sie hat jedoch allgemein einen geringen Einfluss auf die Schwellrate beim Extrudatschwellen.

Adhäsion

Die Adhäsion, d.h. die Kraft, die zwei Substrate über ihre gemeinsame Grenzfläche hinweg zusammenhält, lässt sich heute mit zahlreichen Theorien beschreiben. Leider ist es bis heute noch nicht gelungen, aufgrund der Komplexität aller zusammenwirkenden Einflussfaktoren diese Vorgänge auch quantitativ zu beschreiben. Jedes Stoffsystem weist entsprechend seinem atomaren und molekularen Aufbau an der Oberfläche andere zwischenmolekulare Wechselwirkungen auf, womit auch die Adhäsion unterschiedlich groß ist.

Folgende Adhäsionsarten können unterschieden werden:

- Mechanische Adhäsion,
- Autoadhäsion,
- Spezifische Adhäsion,
- Oberflächenaktivierung,
- Zwischenmolekulare Bindungen,
- Chemische Bindungen,
- Mikromorphologie der Oberfläche,
- Physisorption,
- Chemisorption,
- Polarisierungstheorie,
- Thermodynamische Adhäsionstheorie.

Auch für das System Polymerschmelze/Werkzeugoberfläche haben die in der Grenzfläche wirksamen Haft- bzw. Adhäsionskräfte einen wesentlichen Einfluss auf die wandnah strömenden Schmelzeschichten. Die Größe der Adhäsionskräfte ist dabei von den Werten der Oberflächenenergien der in Kontakt befindlichen Materialien abhängig.

Bei der Betrachtung des Systems Polymerschmelze/Werkzeugoberfläche nehmen die chemischen Wechselwirkungen unter den zuvor genannten Adhäsionsmechanismen eine ganz besondere Rolle ein. Bei Temperaturen über 180°C sind zwischen den Polymeren bzw. ihren Zusatzstoffen u. U. chemische Wechselwirkungen mit den Werkzeugoberflächen zu erwarten.

Young-Gleichung

An der gemeinsamen Grenzfläche zwischen einer flüssigen Phase (liquid), einem Festkörper (solid) und der umgebenden Gasphase (vapour) bildet sich in Abhängigkeit von der stattfindenden Benetzung ein charakteristischer Randwinkel Θ aus.

Prinzipiell führt eine gute Benetzung zu einem kleinen und eine schlechte Benetzung zu einem großen Randwinkel. Abbildung 4-21 zeigt hierzu schematisch die vektorielle Darstellung der Kräfte bzw. Energien an der Grenzfläche im Drei-Phasen-Punkt.

Den sich in der Grenzfläche einstellenden Gleichgewichtszustand beschreibt die *Young'sche* Gleichung:

$$\gamma_s - \pi_e = \gamma_l \cos \Theta + \gamma_{sl} \quad (\text{Gl.4.6})$$

Streng genommen gilt Gleichung 4.6 nur für ideal glatte, homogene und isotrope Oberflächen, wie sie in der Praxis jedoch allgemein nicht vorzufinden sind. Auch Rauigkeit und adsorbierte Fremdstoffe können zu nicht vernachlässigbaren Abweichungen führen. Diese Einschränkungen werden im weiteren Verlauf des Kapitels noch eingehender diskutiert.

Der so genannte "Spreitdruck" $\pi_e = \gamma_s - \gamma_{sv}$ ist Ausdruck für die Reduzierung der "wahren" Oberflächenenergie γ_s des Festkörpers durch die aus der umgebenden Gasphase an der Festkörperoberfläche adsorbierten Moleküle. Die meisten Ansätze gehen davon aus, dass diese Wechselwirkungen des Festkörpers mit der Gasphase (bzw. der Flüssigkeits-Dampfphase) vernachlässigbar klein sind. Auch im Vakuum gilt $\pi_e = 0$ und $\gamma_s = \gamma_{sv}$. Somit vereinfacht sich die *Young-Gleichung* 4.6) zu:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \Theta \quad (\text{Gl.4.7})$$

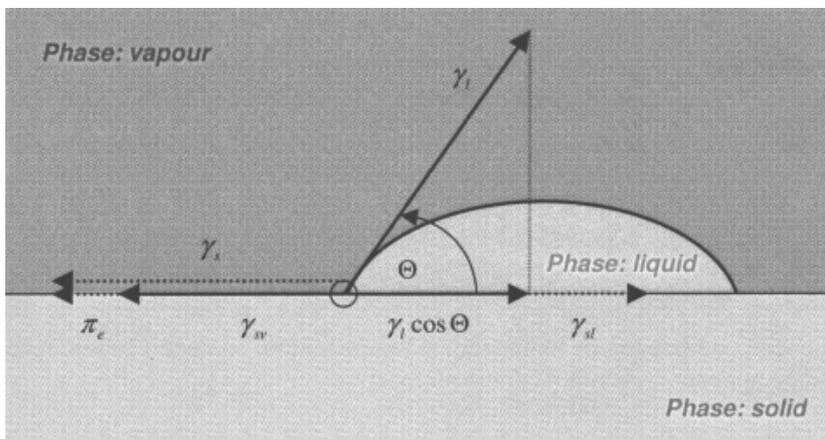


Abbildung 4-21 Randwinkel Θ am Punkt des Drei-Phasen-Gleichgewichts [GI04]

- γ_l = Oberflächenspannung der Flüssigphase
- γ_s = Oberflächenenergie des Substrats
- γ_{sl} = Grenzflächenenergie (Substrat/Flüssigkeit)
- γ_{sv} = Grenzflächenenergie (Substrat/Atmosphäre)
- Θ = Randwinkel in Abhängigkeit von der stattfindenden Benetzung
- π_e = Spreitdruck

Unter "realen" Bedingungen hängt der Spreitdruck jedoch u. U. doch vom vorliegenden Drei-Phasen-System ab und kann nur mit aufwendigen Adsorptionsmessungen bestimmt werden. So ist z. B. im Zusammenhang mit der Bestimmung der wahren Oberflächenenergie γ_s von hochenergetischen Metalloberflächen die Vernachlässigung des Spreitdrucks weiterhin strittig. Einige Autoren nahmen z. B. Abschätzungen von π_e vor, wobei angenommen wurde, dass der Spreitdruck, z. B. durch Wasserkondensat aus der

Luftfeuchtigkeit heraus, prinzipiell die Oberflächenenergie des Substrats beeinflusst [Schw96, Wu82]. Da sich die Differenz zwischen den Oberflächenenergieanteilen mit und ohne Vernachlässigung des Spreitdrucks π_e jedoch nur als eine Verschiebung in den absoluten Zahlenwerten herausstellte, wird im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten vergleichenden Untersuchung der Spreitdruck vernachlässigt. Grundsätzlich sind Absolutwerte bei Oberflächenenergien immer unter Beachtung der Messbedingungen zu betrachten.

Der Benetzungswinkel Θ ist ein Maß für die Benetzbarkeit von Substratoberflächen durch eine Flüssigkeit. Abbildung 4-22 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Benetzungswinkel und der Benetzung.

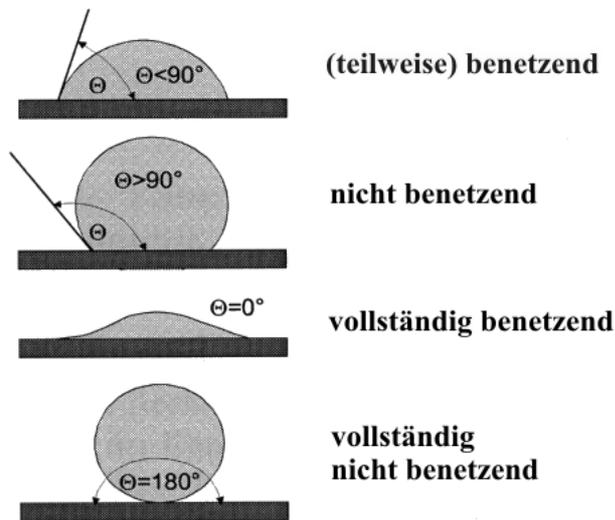


Abbildung 4-22 Charakteristische Kontaktwinkel [Nu]

Das Verfahren von Owens, Wendt, Rabel und Kaelble

Da die Grenzflächen- und Oberflächenenergien bei Polymer-Metall-Systemen in ihren Grundlagen auf den Kräften zwischen Atomen oder Molekülen beruhen, ist eine Unterscheidung im Hinblick auf die Ursachen dieser Kräfte bezüglich ggf. vorhandener Polaritäten vorzunehmen. Die Aufteilung der Oberflächenenergie in polare und disperse Anteile ist bei der Entwicklung von Beschichtungen jeglicher Art von großem Interesse. Sie erlaubt es, Benetzungsverhalten und Adhäsion mit der mittleren chemischen Zusammensetzung zu korrelieren und gezielt zu verändern.

Nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) lässt sich die Oberflächenspannung γ jeder Phase in einen polaren (Index p) und einen dispersen Anteil (Index d) aufspalten:

$$\gamma_l = \gamma_l^d + \gamma_l^p \quad (\text{Gl.4.8})$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (\text{Gl.4.9})$$

Gekreuzte Wechselwirkungen sind nicht existent, d.h. dass polar nur mit polar und dispers nur mit dispers in und über eine Phasengrenze hinaus wirken kann. Diese Feststellung besagt, dass nicht etwa die Oberflächenspannungen der Phasen als Ganzes miteinander in Wechselwirkung treten, sondern nur die zueinander kompatiblen Komponenten.

Die Wechselwirkungsenergie γ_a ist hierbei ein Maß für die in der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen wirksamen Adhäsionskraft sowie für die Benetzbarkeit beim Kontakt der beiden Materialien. Sie setzt sich additiv aus den jeweiligen polaren und dispersen Wechselwirkungsanteilen der in Kontakt befindlichen Materialien zusammen [Gri96]:

$$\gamma_a = 2\sqrt{\gamma_1^p \cdot \gamma_2^p} + 2\sqrt{\gamma_1^d \cdot \gamma_2^d} \quad (\text{Gl.4.10})$$

In Bezug auf Polymerschmelzen entstehen polare Makromoleküle nur dann, wenn die Ladungsschwerpunkte in den Molekülketten verschoben sind. Bei symmetrisch aufgebauten Polymeren wie dem Polyethylen liegen die Ladungsschwerpunkte in der Molekülachse. Sie sind infolgedessen unpolar [Mi99]. Haben die Kunststoffmoleküle jedoch polare Eigenschaften, wie z. B. Elastomere, können zwischen Kunststoff und einer polarisierbaren Werkzeugwand starke Adhäsionskräfte auftreten [Eul96].

Sind nur die Dispersionskräfte für die Wechselwirkung zwischen Polymerschmelze und Werkzeugwand verantwortlich, dann kann die Adhäsionsarbeit W_{adh} in guter Näherung nach [Isr85] wie folgt berechnet werden:

$$W_{adh} = 2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} \quad (\text{Gl.4.11})$$

Gleichung 4.11 gilt für Kohlenwasserstoffe, aber nicht für aromatische Moleküle oder wenn polare Medien oder Wasserstoffbrückenbindungen betroffen sind [Isr85].

Wenn das Auftreten von Wandgleiten tatsächlich mit dem Versagen der Adhäsion an der Werkzeugwand korreliert, dann wäre zu erwarten, dass die kritische Schubspannung für das Auftreten von Wandgleiten in Zusammenhang mit der Adhäsionsarbeit steht [Hatz93]. Genau dieser physikalische Zusammenhang konnte von *S. H. Anastasiadis* und *S. G. Hatzikiriakos* [An98] sowie *Larrazabal et. al.* [Lar04] in neueren Arbeiten bestätigt werden. Die Wissenschaftler fanden für unterschiedliche Düsenwerkstoffe bzw. –beschichtungen und die Polyolefine PE-HD, PE-LLD und PP einen linearen Zusammenhang zwischen der Adhäsionsarbeit W_{adh} und der kritischen Schubspannung τ_c für das Auftreten von Fließinstabilitäten. In [Lar04] ist dieser lineare Zusammenhang folgendermaßen formuliert:

$$\tau_c = 0,004 \cdot W_{adh} - 0,0131 \quad (\text{Gl.4.12})$$

Infolge der Unpolarität der verwendeten Thermoplaste sollte dieser Zusammenhang auf die unterschiedlichen Dispersionskräfte der untersuchten Düsenwerkstoffe und Polymer-

schmelzen zurückzuführen sein. Ein ähnlicher Zusammenhang, nämlich eine Zunahme der Wandgleitgeschwindigkeit mit abnehmender Adhäsionsarbeit, konnte von *Chen et. al.* [Che9] ermittelt werden. Überdies fanden die Forscher an einer Kapillare heraus, dass eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit der Werkzeugwand zu einem Anstieg der Wandgleitgeschwindigkeit führte. Dabei schienen die Faktoren Rauigkeit und Adhäsionsarbeit jedoch in Konkurrenz zueinander zu stehen.

Die Grenzflächenenergie γ_{sl} beträgt nach *Owens, Wendt*:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2 \left(\sqrt{\gamma_s^d \cdot \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \cdot \gamma_l^p} \right) \quad (\text{Gl.4.13})$$

Kombiniert mit der *Young'schen* Gleichung 4.6 lässt sich dieses Gleichungssystem mit Hilfe von Kontaktwinkeln zweier Flüssigkeiten mit bekanntem dispersen und polaren Anteil der Oberflächenspannung lösen.

Rabel kombinierte die Gleichungen 4.6 und 4.13 und ermöglichte so die Berechnung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenenergie mithilfe einer einzigen linearen Regression aus den Kontaktwinkeldaten verschiedener Flüssigkeiten.

$$\left(\sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p} \right) + \left(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} \right) = \frac{\gamma_l (1 + \cos \Theta)}{2} \quad (\text{Gl.4.14})$$

Hierzu dividierte er die Gleichung 4.14 durch $(\gamma_l^d)^{1/2}$, wodurch eine Geradengleichung der Form $y = m x + b$ entsteht:

$$\frac{(1 + \cos \Theta)}{2} \cdot \frac{\gamma_l}{\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_s^p} \cdot \frac{\sqrt{\gamma_l^p}}{\sqrt{\gamma_l^d}} \quad (\text{Gl.4.15})$$

mit:

$$y = \frac{(1 + \cos \Theta)}{2} \cdot \frac{\gamma_l}{\sqrt{\gamma_l^d}} \quad x = \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} \quad (\text{Gl.4.16})$$

$$m = \sqrt{\gamma_s^p} \quad b = \sqrt{\gamma_s^d}$$

In der Praxis unterscheiden sich die Ergebnisse bei der Verwendung unterschiedlicher Flüssigkeitspaare jedoch oft voneinander. Dies ist ein Indiz dafür, dass auch mit dem Ansatz nach OWRK eine korrekte, physikalische Beschreibung der Realität nicht möglich ist.

Umgebungseinflüsse auf die Adhäsion

Die theoretischen Betrachtungen der Adhäsion lassen sich in der Realität meist nur schwer mit Forschungsergebnissen aus der Praxis in Einklang bringen. Generell werden Oberflächen in zwei Typen eingeteilt: Hoch- und Niederenergetische. Hochenergetische Oberflächen sind z. B. Metalle, Metalloxide und andere anorganische Verbindungen wie

Oxide, Nitride, Keramiken, Saphire und Diamanten. Sie sind für gewöhnlich hart, feuerfest, haben eine hohe Dichte und eine Oberflächenenergie im Bereich von 200 - 5.000 mN/m. Niederenergetische Materialien wie z. B. organische Verbindungen, Polymere und Wasser sind gewöhnlich weich, leicht schmelzend und haben eine Oberflächenenergie unter 100 mN/m [Wu82].

Materialien mit niedriger Oberflächenenergie tendieren dazu, sehr stark von hochenergetischen Oberflächen absorbiert zu werden. Hierdurch wird die Oberflächenenergie des Gesamtsystems deutlich reduziert. Folglich tendiert eine Oberfläche mit hoher Oberflächenenergie, die einer normalen Umgebung ausgesetzt wird, dazu mit einem Film aus adsorbiertem Wasser oder organischen Verunreinigungen bedeckt zu werden [Ti04]. Daher haben alle hochenergetischen Oberflächen in gewöhnlicher Luft praktisch die gleiche Oberflächenenergie. So beträgt z. B. die Oberflächenenergie von Metall (Me) bei 95 % Luftfeuchtigkeit 36 – 37 mN/m und bei 0,6 % Luftfeuchtigkeit und 20°C 46 – 47 mN/m [Wu82]. Zusätzlich finden sich an Metalloberflächen in der Regel fest gebundene chemische Reaktionsschichten mit Dicken von ca. 1 – 10 nm, die wiederum von relativ losen Adsorptionsschichten und Verunreinigungen bedeckt sind. Ein derartiger Aufbau ist in Tabelle 4-4 schematisch dargestellt.

Tabelle 4-4 Schematischer Aufbau einer realen Oberfläche

Partikel	Staub, Abrieb, Salze	10 – 100 μm
Verunreinigungen	Staub, Fett, Öl	ca. 3 nm
Adsorbierte Schichten	KW, CO ₂ , H ₂ O	ca. 0,3 – 0,5 nm
Reaktionsschichten	Me-O, Me-O-H, Me-N	ca. 1-10 nm
Grundwerkstoff mit verändertem Gefüge	Me	bis zu 5 μm
Grundwerkstoff mit unverändertem Gefüge	Me	Rest

Als grobe Regel für Metalle gilt, dass deren Oberflächenenergie in mN/m in etwa ihrer Schmelztemperatur in °C entspricht. Diese empirische Abhängigkeit ist Ausdruck dafür, dass sowohl die Oberflächenenergie als auch der Schmelzpunkt unmittelbar mit der Stärke der atomaren Bindungskräfte verknüpft sind. Hiernach hat Eisen eine Oberflächenenergie von 1150 mN/m, womit dieses Material hervorragend benetzbar sein sollte. In der Praxis wird es aber in den wenigsten Fällen z. B. von Wasser benetzt, da die Metalloberfläche in der Regel von benetzungshemmenden Schichten maskiert ist [Fow64, Ti04].

4.7.1 Kontaktwinkelmessung mittels der Sessile Drop Methode

Zur Bestimmung der Oberflächenenergien der verschiedenen Beschichtungen wurden Kontaktwinkelmessungen mittels der Sessile Drop Methode und des zuvor dargestellten Verfahrens von *Owens, Wendt, Rabel* und *Kaelble* durchgeführt [Gro05].

Wie bereits in Abschnitt 4.7 beschrieben, werden bei diesem Verfahren Flüssigkeitstropfen auf eine Oberfläche abgelegt und der sich ausbildende Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Substrat vermessen. Diese Messungen wurden mittels eines kommerziellen optischen Kontaktwinkelmessgeräts vom Typ OCA 20 der Fa. *Dataphysics* durchgeführt (siehe Anhang). Die Dosierung der Testflüssigkeiten erfolgte durch ein elektronisches Spritzenmodul, die Probenkammer wurde mit Stickstoff gespült.

Verwendete Testflüssigkeiten

Zur Bestimmung der polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergie nach dem Analyseverfahren nach *Owens, Wendt* müssen mindestens zwei Testflüssigkeiten verwendet werden. Um die Zuverlässigkeit der Messungen zu erhöhen, wurden jedoch drei Flüssigkeiten eingesetzt. Bei den ausgewählten Flüssigkeiten handelte es sich um Wasser, Ethylenglycol und Diiodmethan. Diese drei Flüssigkeiten wurden aufgrund ihrer verschiedenen Oberflächenspannungen sowie ihrer ganz unterschiedlichen polaren und dispersen Anteile ausgewählt. Auf der Regressionsgeraden zur Bestimmung der polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergien liegen die Messwerte relativ weit auseinander und ermöglichen so eine bestmögliche Approximation der linearen Funktion. Die entsprechenden Materialdaten der Testflüssigkeiten können der Tabelle 10-4 im Anhang entnommen werden.

4.7.2 Einfluss der Probenvorbehandlung auf den Kontaktwinkel

Die Vorbehandlung bzw. Reinigung der Proben, die Größe des applizierten Tropfens und der Zeitraum zwischen Applikation und Kontaktwinkelmessung haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den gemessenen Kontaktwinkel. Daher werden diese Einflussfaktoren in den nachfolgenden Abschnitten kurz diskutiert.

Untersuchung des Einflusses der Probenvorbehandlung/Reinigung auf den Kontaktwinkel

Wie bereits in Abschnitt 4.7 dargestellt, bilden hochenergetische Oberflächen wie Metalle an ihren Oberflächen Schichten aus, die sich im Energiegehalt von reinen Metalloberflächen deutlich unterscheiden [Wu82]. Ziel der im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Kontaktwinkelmessungen war es jedoch nicht, die absoluten Oberflächenenergien hochreiner Metalloberflächen zu bestimmen, sondern vielmehr eine vergleichende

Untersuchung durchzuführen. Unter diesem Gesichtspunkt kommen der Reinigung der Beschichtungsproben und den Umgebungsbedingungen während der Messungen dennoch besondere Bedeutungen zu. Um die Messergebnisse untereinander vergleichen zu können, musste zunächst einer Reinigungsprozedur entwickelt werden, die mit vertretbarem Aufwand vergleichbare Ausgangsbedingungen für die Kontaktwinkelmessungen schafft.

Versuche mit unterschiedlichen Reinigungsmedien und –prozeduren bestätigen, dass die Reinigung der hochenergetischen Oberflächen einen beträchtlichen Einfluss auf den Kontaktwinkel hat. Dies wird auch durch andere wissenschaftliche Arbeiten [Hor80] bestätigt. Schlussendlich wurde folgende Prozedur als am besten geeignet erachtet:

Zunächst Reinigung für 1 Minute in Isopropanol unter Ultraschall. Anschließend Reinigung mittels Aceton, welches mit Zellstoff aufgetragen wird. Erneute Ultraschallreinigung mit Isopropanol. Trocknung der Proben für 30 Minuten bei ca. 160°C in einem Trockenschrank. Abkühlen der Proben bis auf Umgebungstemperatur unter Stickstoffatmosphäre.

4.7.3 Einfluss des Tropfenvolumens auf den Kontaktwinkel

Das Volumen eines Tropfens kann, abhängig vom Typ der Flüssigkeit, einen großen Einfluss auf den sich auf einer festen Oberfläche ausbildenden Kontaktwinkel haben. In [Ye88] wurde z. B. die Abhängigkeit des Kontaktwinkels verschiedener Flüssigkeiten auf PTFE in Abhängigkeit von der Umgebung untersucht. Während z. B. für Wasser der Kontaktwinkel mit zunehmendem Tropfendurchmesser zunächst ansteigt und erst ab einem Durchmesser von ca. 7,5 mm einen konstanten Kontaktwinkel von ca. 108° ausbildet, ist der Kontaktwinkel von n-Decan in einem Durchmesserbereich von 2 bis 13 mm vom Tropfenvolumen unabhängig. Allgemein weisen die meisten Flüssigkeiten eine dieser beiden charakteristischen Abhängigkeiten auf.

Für eine möglichst genaue und reproduzierbare Messung des Kontaktwinkels ist es wichtig, für die jeweilige Flüssigkeit einen Bereich der Tropfengröße zu finden, in dem der Kontaktwinkel unabhängig von der Tropfengröße ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass technisch bedingte (elektr. Dosierung) Streuungen des Tropfenvolumens sich nicht auf den Kontaktwinkel auswirken. Darüber hinaus lassen sich zu kleine Tropfen allgemein schlechter optisch vermessen, während sehr große Tropfen, abhängig von der Oberflächenspannung und Dichte der Flüssigkeit, sich oft schon von alleine (z. B. Diiodmethan) von der Dosierkanüle ablösen.

Für einen Wassertropfen auf einer Stahloberfläche konnte in eigenen Messungen der in Abbildung 4-23 dargestellte Zusammenhang zwischen dem Tropfenvolumen und dem Kontaktwinkel ermittelt werden:

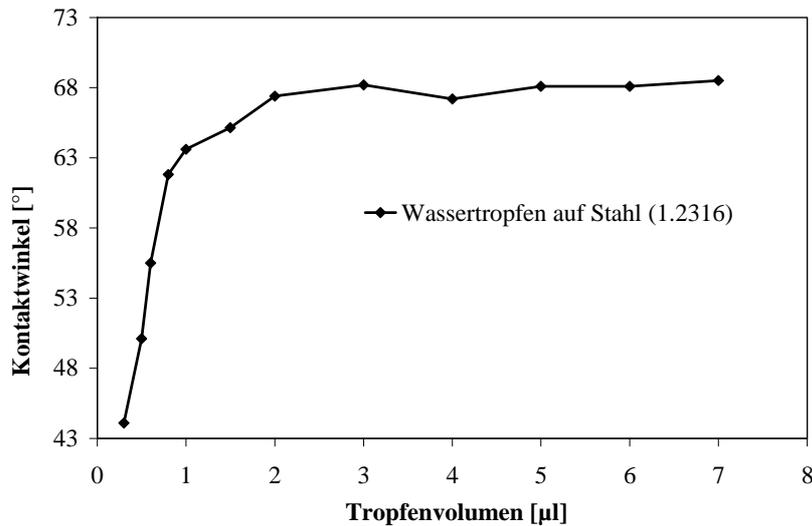


Abbildung 4-23 Kontaktwinkel von reinem Wasser auf Stahl (1.2316) in Abhängigkeit vom Tropfenvolumen

Für Ethylenglycol auf einer polierten Stahloberfläche konnten in einem Bereich des Tropfenvolumens von 2-6 μl keine systematischen Einflüsse des Volumens auf den Kontaktwinkel beobachtet werden.

Bei Diiodmethan wurde ein relativ untypisches Verhalten festgestellt, nämlich eine Abnahme des Kontaktwinkels mit zunehmendem Tropfenvolumen in einem Bereich von 2-6 μl auf unterschiedlichen Oberflächen. Bei Tropfenvolumina größer 6 μl löste sich der Tropfen durch die Schwerkraft i. Allg. von selbst von der Nadel. Dieses Verhalten kann durch die im Vergleich zu Wasser und Ethylenglycol etwa dreimal so große Dichte von Diiodmethan erklärt werden. Auf Basis dieser Beobachtungen wurde für Diiodmethan folgende Theorie zur Abhängigkeit des Kontaktwinkels vom Tropfenvolumen aufgestellt:

Bei der Benetzung einer Oberfläche mit Diiodmethan findet aufgrund der im Verhältnis zur relativ hohen Dichte geringen Oberflächenspannung bei der Applikation ein Abriss und freier Fall des Tropfens auf die Oberfläche statt. Diese kinematischen Einflüsse sind nicht reproduzierbar und beeinflussen bzw. verhindern ein natürliches Gleichgewicht des Tropfens auf der Substratoberfläche, welches sich nur dann einstellen kann, wenn der Tropfen ohne äußere Krafteinwirkung auf der Oberfläche abgesetzt wird.

Beim Fallen des Tropfens auf die Oberfläche bildet sich zunächst ein kleinerer Kontaktwinkel (größere benetzte Oberfläche) aus, der sich durch die Oberflächenspannung allein nicht mehr hin zu einem Gleichgewichtszustand vergrößern kann. Dieses Verhalten ist auf die bekannte Hysterese zwischen dem Vorrückwinkel und dem Rückzugswinkel zurückzuführen. Der Vorgang ist in Abbildung 4-24 anhand einer rauen Oberfläche bildhaft dargestellt.

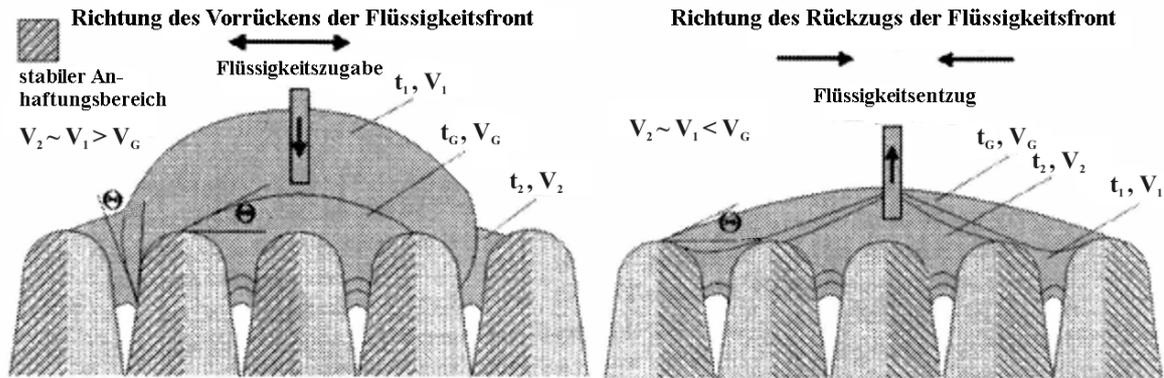


Abbildung 4-24 Kontaktwinkelhysterese zwischen dem Vor- und Rückzugswinkel [Pal01]

Wird das Volumen eines auf einer Oberfläche liegenden Tropfens vergrößert, so breitet sich dieser auf der Oberfläche unter einem Vorrückwinkel aus. Wird das Volumen hingegen verringert, z. B. durch die Entnahme einer Flüssigkeitsmenge mittels einer Kanüle in dem Tropfen, so erfolgt eine Verringerung der benetzten Oberfläche erst bei sehr geringen Rückzugswinkeln. Das bedeutet, dass ein viel größeres Flüssigkeitsvolumen für ein Endnetzen einer Fläche entnommen werden muss, als beim Benetzen hinzugefügt wurde. Ohne äußere Krafteinwirkung gleicht ein Tropfen mit einer durchschnittlichen Oberflächenspannung ein erzwungenes Benetzungsverhalten nicht vollkommen aus.

Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der Zeitdauer der Applikation bis zur Messung

Neben dem Tropfenvolumen hat auch die Zeit zwischen der Applikation des Tropfens und der eigentlichen Messung des Kontaktwinkels z. T. einen erheblichen Einfluss auf den Kontaktwinkel. Bei Wasser verringert sich bei Raumtemperatur z. B. der Kontaktwinkel alle 14 Sekunden um etwa 1° , was auf Verdunstung zurückzuführen ist. Die Oberflächenspannung reicht auch hier nicht aus, die benetzte Oberfläche im Sinne einer Erhaltung des Gleichgewichtszustandes zu verringern. Diiodmethan zeigt ein ähnliches Verhalten wie Wasser, allerdings dauert es hier rund 280 Sekunden, bis eine Abnahme des Kontaktwinkels um 1° erfolgt ist. Diese kann mit dem mit 181°C relativ hohen Siedepunkt von Diiodmethan erklärt werden.

Im Vergleich zu Wasser und Diiodmethan konnte bei Ethylenglycol keine lineare Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der Zeit beobachtet werden. Abhängig von der Substratoberfläche und dem Tropfenvolumen benötigt der Kontaktwinkel zwischen 20 und 50 s, bis er sich asymptotisch einem fortan konstanten Wert angenähert hat. Da auch der Siedepunkt von Ethylenglycol mit $197,6^\circ\text{C}$ relativ hoch liegt, kann dieser Effekt nicht durch Verdunstung erklärt werden. Er resultiert vermutlich aus den unterschiedlichen Zeiten, die zur Ausbildung eines physikalischen und thermodynamischen Gleichgewichts zwischen Flüssigkeit und Substrat erforderlich sind. Auf Basis der oben dargestellten Zusammenhänge wurden für die Messungen die in Tabelle 4-5 aufgelisteten Parameter festgelegt.

Tabelle 4-5 Zusammenfassung aller Parameter für die Kontaktwinkelmessung

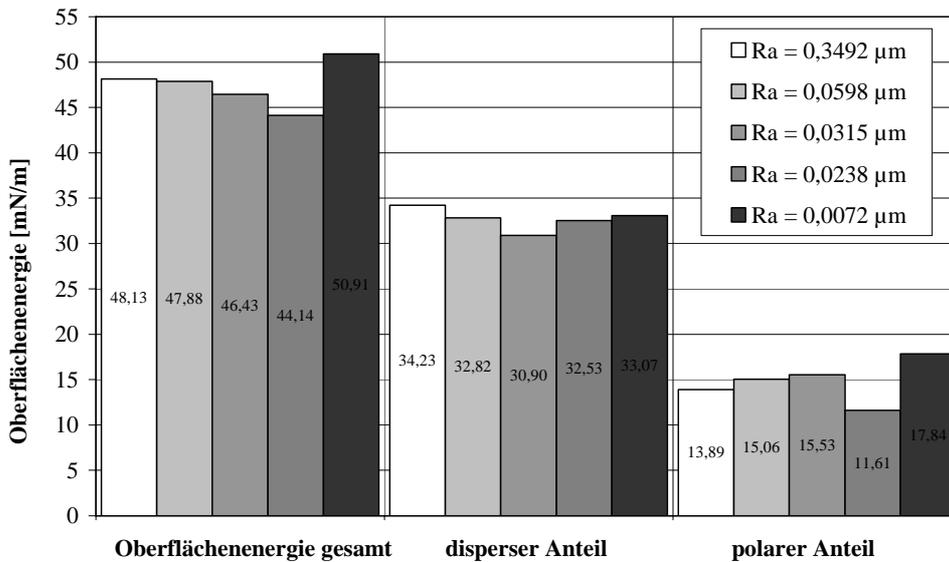
Testflüssigkeit	Reinigung	Tropfen- volumen	Zeitpunkt der Messung nach Ap- plikation
Wasser	Ultraschallreinigung 1 min vor und nach der Reinigung mit Aceton. Abschlie- ßend Reinigung im Ofen bei 160°C für 30 min. Abkühlen und Messen unter Stickstoffatmosphäre	3 µl	4 Sekunden
Diiodmethan		3 µl	Mittelwert aus Messwerten nach 15, 16, 17, 20, 21 und 22 Sekunden
Ethylenglycol		3 µl	Mittelwert aus 5 Werten nach dem Einlaufverhalten

4.7.4 Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Oberflächenenergie

Die Ergebnisse aus Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Kontaktwinkel bzw. auf die Oberflächenenergie erweisen sich in der Literatur oftmals als widersprüchlich [Se99]. Zudem konnten die auftretenden Phänomene häufig nicht eindeutig erklärt werden.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Arbeit eigene Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Oberflächenenergie durchgeführt. Hierzu wurden Kontaktwinkelmessungen gemäß Abschnitt 4.7.1 an Oberflächen aus dem Stahl 1.2316 mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten durchgeführt. Die verschiedenen Rauigkeiten wurden durch Schleifen (ohne Vorzugsrichtung) der Stahlproben auf Schleiftellern mit vier verschiedenen Körnungen erreicht. Eine fünfte Oberflächenrauigkeit wurde durch eine Hochglanzpolitur mit Diamantpaste eingestellt. Für alle fünf Rauigkeiten wurde ein und dieselbe Probe verwendet, um mögliche Differenzen der Oberflächenenergien zwischen verschiedenen Substraten auszuschließen. Zwischen den einzelnen Schleifstufen wurde die Probe gereinigt (Tabelle 4-5) und mit den drei verschiedenen Testflüssigkeiten benetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 4-25 dargestellt.

Ein Abfallen der Oberflächenenergie mit abnehmendem Mittenrauwert, wie er in Abbildung 4-25 für die fünf Schleifstufen zu erkennen ist, wurde in vielen Arbeiten beobachtet. Begründet wird dieses Verhalten mit dem unterschiedlichen Energiegehalt pro Fläche [Wen49]. Je rauer (mikroskopisch) eine benetzte Oberfläche ist, umso größer ist die tatsächlich wirksame technische Oberfläche.



**Abbildung 4-25 Oberflächenenergie (gesamt, polarer und disperser Anteil) einer Stahl-
fläche (1.2316) in Abhängigkeit vom Mittenrauwert R_a**

Die Messergebnisse der polierten Oberfläche ($R_a = 0,0072 \mu\text{m}$) weichen jedoch eindeutig von dieser Theorie ab. Es kann nur vermutet werden, dass durch die Politur bzw. die verwendeten Schleifmitteln und Zusätzen eine Veränderung der Probenoberfläche stattgefunden hat, die nicht durch den Reinigungsprozess beseitigt werden konnte. Neben der Theorie zur Energiedichte werden auch physikalische Effekte wie Kapillareffekte und mechanische Behinderung der Tropfenausbreitung durch Oberflächenstrukturen für die Abhängigkeit der Oberflächenenergie von der Rauigkeit verantwortlich gemacht. Ihre quantitative Erfassung ist bis heute jedoch nicht möglich, womit die Änderung des Adhäsionsvermögens aufgrund von Oberflächenstrukturen weiterhin Bestandteil aktueller Forschungsvorhaben ist. Mittenrauwerte von $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ haben einigen Untersuchungen zufolge keinen Einfluss mehr auf das Benetzungsverhalten bzw. auf das Adhäsionsvermögen [Se99].

4.7.5 Messung der Oberflächenenergie verschieden beschichteter Metalloberflächen

Die Applikation der Testflüssigkeiten wurde mit den erarbeiteten und beschriebenen Parametern in der Tabelle 4-5 durchgeführt. Dazu wurden möglichst viele Tropfen einer Flüssigkeit auf das jeweilige Substrat abgesetzt und die Kontaktwinkel nach den genannten Zeiten vermessen. Als Ergebnis wurden jeweils die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Tropfen herangezogen. Zuvor wurde hierzu festgestellt, dass die Verteilung der einzelnen Messwerte um den berechneten arithmetischen Mittelwert einer Normalverteilung entsprach. Alle Messwerte, die außerhalb der 1,96-fachen Standardabweichung lagen, wurden als Ausreißer betrachtet und aus der Berechnung des Mittelwertes heraus-

genommen. Zwischen dem Absetzen der Tropfen verschiedener Flüssigkeiten wurden die beschichteten Proben einer erneuten Reinigungsprozedur unterzogen, um Rückstände von Testflüssigkeiten zu vermeiden. Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen aller Proben sowie die Ergebnisse der Oberflächenenergieberechnungen sind in Tabelle 4-6 aufgelistet.

Tabelle 4-6 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen und berechnete Oberflächenenergien

	A	PEEK	CrC	TiAlN	B	C	D	Hochgl. Hartchrom
Kontaktwinkel Wasser [°]	91,0	100,3	80,9	80,2	79,0	78,6	74,0	76,9
Standardfehler [°]	0,2	0,8	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6
Kontaktwinkel Ethylenglycol [°]	75,5	47,6	54,1	53,0	49,7	48,0	50,2	48,6
Standardfehler [°]	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3
Kontaktwinkel Diiodmethane. [°]	78,7	0,0	46,1	47,0	48,6	45,6	44,5	42,9
Standardfehler [°]	0,2	0,0	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1
Oberflächenenergie [mN/m]	21,5	53,5	37,1	37,2	37,8	39,1	39,3	39,8
Standardfehler [%]	0,8	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4
dispenser Anteil [mN/m]	16,2	53,3	32,8	32,6	32,7	34,3	32,1	34,4
polarer Anteil [mN/m]	5,3	0,3	4,3	4,6	5,1	4,8	7,3	5,4
Mittenrauwert R_a [μm]	0,019		0,0272	0,0596	0,1168	0,049	0,025	0,0136
Rautiefe R_z [μm]	0,158		0,4460	1,6476	1,8862	1,082	0,089	0,0898

Fortsetzung Tabelle 4-6

	D neu poliert	CrN	TiN	E	Hart- chrom	Chem. Nickel	Chromstahl 1.2316
Kontaktwinkel Wasser [°]	67,8	76,4	74,9	71,5	69,6	69,2	64,6
Standardfehler [°]	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6	1,1	0,4
Kontaktwinkel Ethylenglycol [°]	41,1	44,3	44,3	43,0	43,1	35,8	37,0
Standardfehler [°]	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,6	0,4
Kontaktwinkel Diiodmethane [°]	57,0	44,9	45,0	48,2	43,8	45,6	43,0
Standardfehler [°]	0,2	0,5	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1
Oberflächenenergie [mN/m]	40,2	40,5	40,7	40,8	42,2	43,4	44,9
Abweichung durch Standardfehler [%]	0,8	0,6	1,2	0,5	1,1	1,0	0,5
dispenser Anteil [mN/m]	28,1	34,9	34,3	32,3	33,2	34,5	33,5
polarer Anteil [mN/m]	12,1	5,6	6,3	8,4	8,9	9,0	11,4
Mittenrauwert R_a [μm]	0,0174	0,0280	0,0149	0,0998	0,0416	0,0109	0,009
Rautiefe R_z [μm]	0,1070	0,8416	0,2198	1,9646	0,3808	0,0994	0,098

Wie aus Abbildung 4-26 zu ersehen ist, liegen die Oberflächenenergien fast aller Beschichtungen zwischen 36 und 45 mN/m. Im Vergleich zu einem unbeschichteten Chromstahl mit 44,93 mN/m befinden sich die Oberflächenenergien aller metallischen Beschichtungen unterhalb dieses Wertes. Zwar sind die Differenzen der meisten Beschichtungen von durchschnittlich 5 mN/m relativ gering, doch haben sich in vielen Untersuchungen Vorteile dieser Beschichtungen im Adhäsionsverhalten (z. B. geringe Entformungskräfte beim Spritzgießen) gezeigt, weshalb sie in der Industrie oft erfolgreich eingesetzt werden. Das geringste Adhäsionsvermögen besitzt mit Abstand die Beschichtung A. Mit 21,5 mN/m und Kontaktwinkeln von zum Teil mehr als 90° erweist sich diese Beschichtung als stark hydrophob. Die PEEK-Beschichtung besitzt mit 53,52 mN/m mit Abstand die größte Oberflächenenergie aller Beschichtungen.

Zusätzlich sind in Abbildung 4-26 jeweils auch die maximalen bzw. minimalen Oberflächenenergien, die sich nach den Kontaktwinkeln zu- bzw. abzüglich der jeweiligen Standardfehler aus den Berechnungen ergeben. Die Abweichungen sind mit maximal 1,1 % sehr gering und beeinflussen das qualitative Ergebnis der Messungen damit nicht.

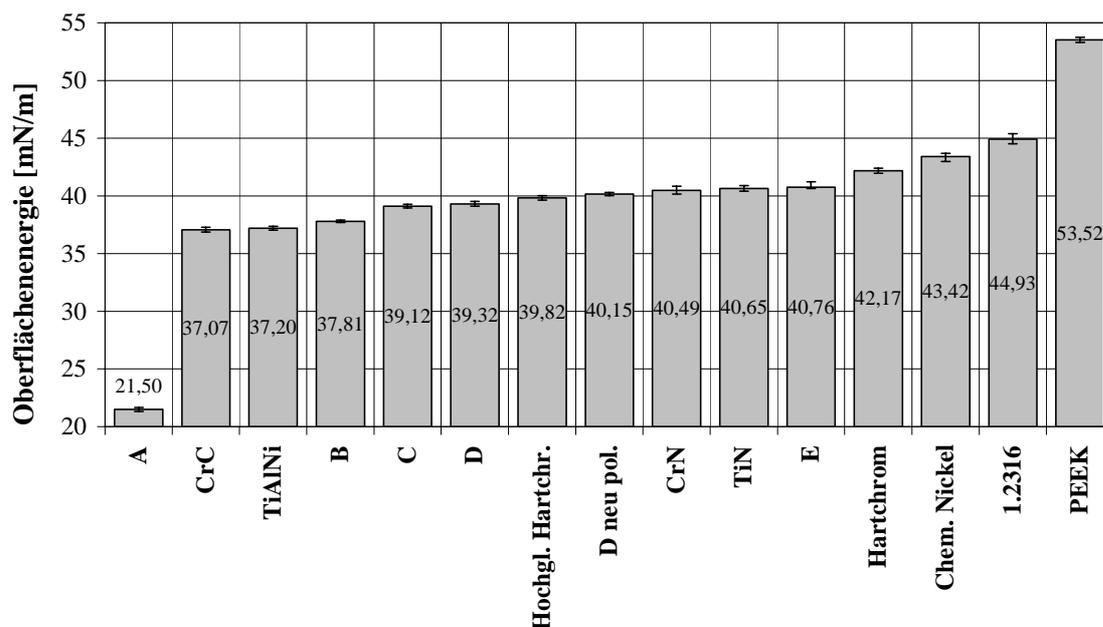


Abbildung 4-26 Oberflächenenergien verschiedener Beschichtungen inkl. Standardfehler

Bei Betrachtung der polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergien (Abbildung 4-27) zeigt sich, dass fast alle Beschichtungen überwiegend disperse Anteile besitzen. Dieses Verhältnis von dispersen zu polaren Anteilen stimmt mit den Ergebnissen anderer Autoren [Bra, Hie01] überein. Der Übersichtlichkeit halber sind in den Abbildungen Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 noch einmal die einzelnen Beschichtungen, diesmal jedoch nach dem polaren und dispersen Anteil der Oberflächenenergie geordnet, dargestellt.

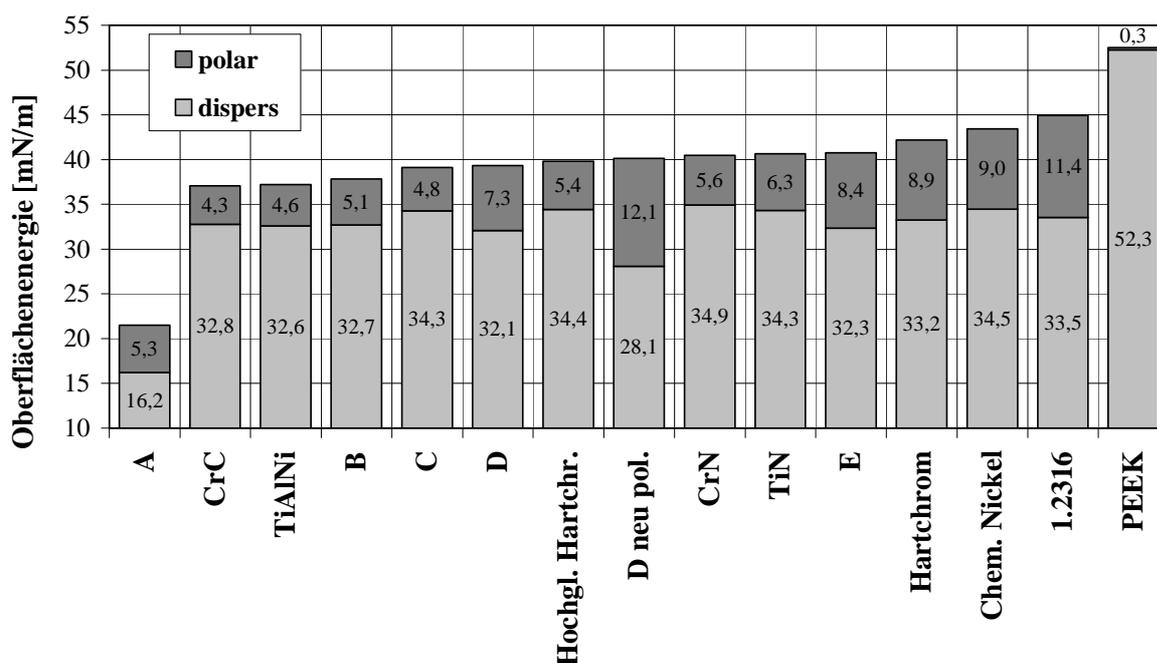


Abbildung 4-27 Polare und disperse Anteile der Oberflächenenergien

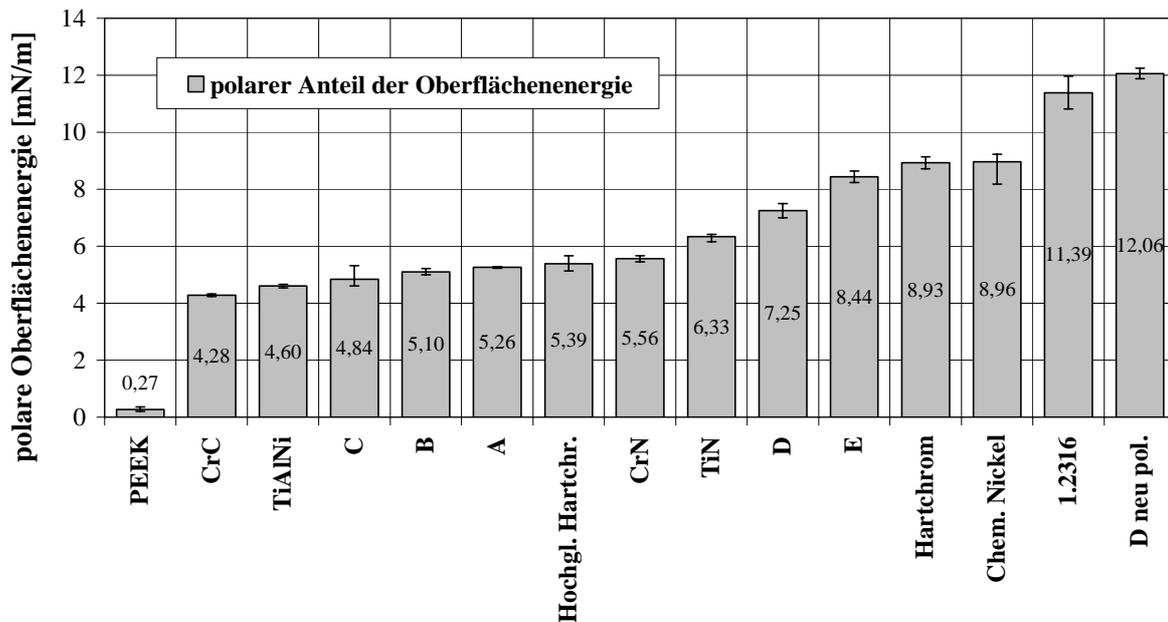


Abbildung 4-28 Polare Anteile der Oberflächenenergie inkl. Standardfehler

Gemäß der in Kapitel 4.7 vorgestellten Theorie sollten jeweils nur die polaren und die dispersen Anteile der Oberflächenenergie bzw. –spannung der Schmelze und der Werkzeugoberfläche in Wechselwirkung treten. Hierzu sind natürlich die polaren und dispersen Oberflächenspannungen der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Polyolefine von Interesse. Messungen der Oberflächenspannung von Polymertropfen mittels der Pendant-Drop-Methode waren jedoch nicht möglich, da es sich bei allen Materialien um Extrusionstypen mit entsprechend hoher Viskosität handelte. Selbst bei stark erhöhten Temperaturen bildete sich kein gleichmäßiger Tropfen aus. Eine interessante Technik zur Messung der Oberflächenspannung von Polymerschmelzen, bei der der Kunststoff zunächst als Filament extrudiert wird, wird in [Lae04] vorgestellt. Messungen der Oberflächenenergie von PE-Folien ergaben für das PE-LD 28,5 mN/m, für das PE-LLD 27,2 mN/m und für das PE-HD 26,2 mN/m. Bei allen Typen lagen die polaren Anteile unterhalb von 0,6 mN/m, d.h., alle untersuchten Typen waren trotz Additiven wie Stabilisatoren etc., wie auch das PEEK, fast vollständig unpolar. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass Thermoplaste mit linearer und symmetrischer Molekülkonfiguration wie z. B. PP und PE unpolar sind. Ein Zusatz von 2 % organischem bzw. anorganischem Farb-Masterbatch wirkte sich nicht nachweisbar auf die Oberflächenenergien aus.

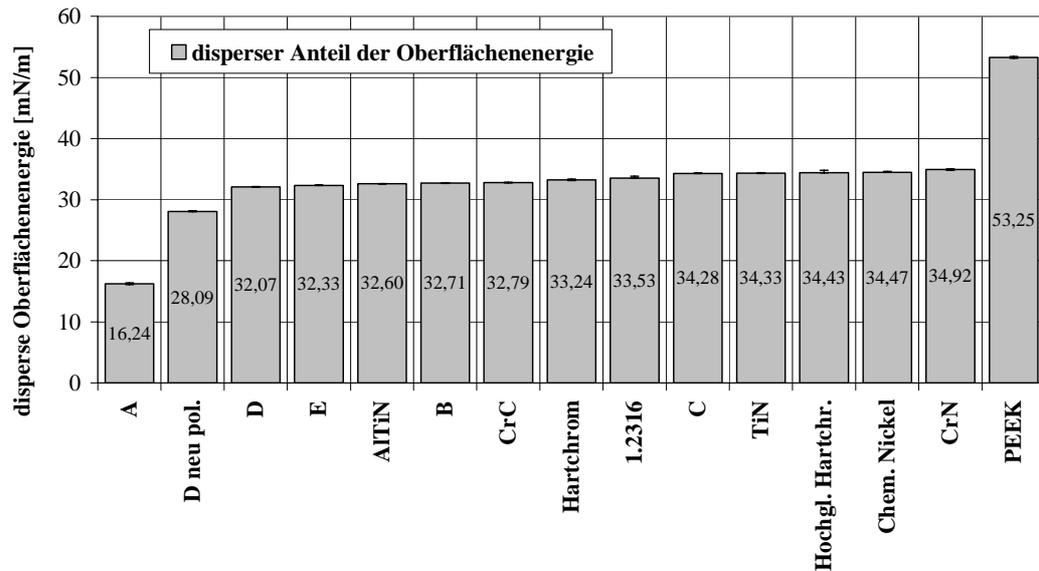


Abbildung 4-29 Disperse Anteile der Oberflächenenergien inkl. Standardfehler

Schlussendlich zeigen nur zwei Beschichtungen ein besonderes energetisches Merkmal auf. Zum einen die Beschichtung A, deren polare, aber vor allem auch disperse Anteile im Vergleich zu den anderen Beschichtungen sehr gering sind. Für diese Beschichtung kann eine geringe Adhäsion zur Polymerschmelze erwartet werden. Zum anderen die PEEK-Beschichtung, die mit Abstand die größte Oberflächenenergie besitzt und fast vollständig disperse Eigenschaften aufweist. Damit scheint lediglich bei polaren Kunststoffen ein Einsatz als Antihalt-Beschichtung empfehlenswert. Im Weiteren wurde versucht, die gemessenen Oberflächenenergien mit dem Mittenrauwert der Testbeschichtungen zu korrelieren. Wie in Abbildung 4-30 zu erkennen ist, ist ein derartiger Zusammenhang nicht gegeben. Für PEEK konnten keine Rauwerte ermittelt werden, da das Material für eine Rauigkeitsmessung mit einem Tastschnittgerät zu weich war.

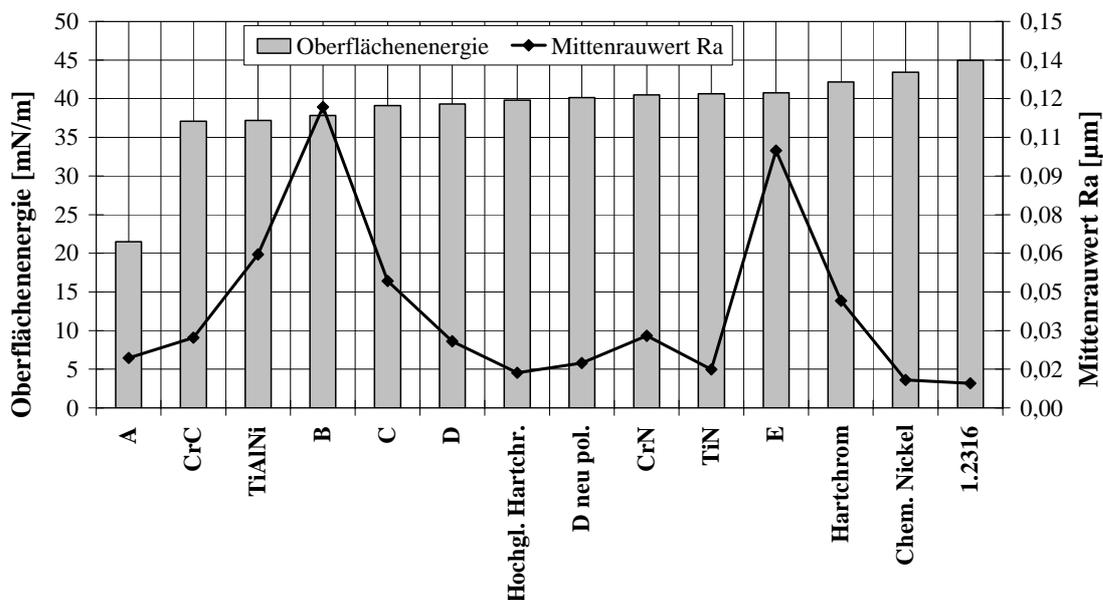


Abbildung 4-30 Oberflächenenergien und die entsprechenden Mittenrauwerte

4.8 Anbackversuche

Zwecks weiterer Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Polymer und Metall wurden so genannte "Anbackversuche" durchgeführt. Diese Tests sollten zeigen, wie gut das Polymer auf den einzelnen Beschichtungen haftet.

Die Beschichtungsproben bestanden aus runden Scheiben mit einem Durchmesser von $D = 14$ mm, die mittels eines Wasserstrahls aus einer größeren, runden Probenscheibe ($D = 50$ mm) geschnitten wurden. Somit wiesen alle Proben nahezu identische Eigenschaften (Beschichtung, Rauigkeit) auf. Als Polymertyp wurde das PE-HD (Hostalen GM 9255 F2) ausgewählt, um einen direkten Vergleich zu den Spülversuchen (siehe Abschnitt 4.6) zu ermöglichen. Auch in dieser Untersuchung wurde der Einfluss der beiden Masterbatch-Typen untersucht. Hierzu wurden mittels eines Laborextruders jeweils 2 % des Farb-Batches in das PE-HD compoundiert. Um den Einfluss dieser Verarbeitung auf die Versuchsergebnisse zu eliminieren, wurde auch das reine PE-HD unter den gleichen Bedingungen einmal durch den Extruder gefahren. Die extrudierten Stränge wiesen einen Durchmesser von 12 mm auf. Aus diesen wurden dann mithilfe eines Mikrotoms in 900 μm dicke Scheiben geschnitten, die zum Anbacktest auf die beschichtete Probenseite aufgelegt wurden.

Die so vorbereiteten Proben wurden bei einer Temperatur von 60°C in einen Trockenschrank gegeben. Dann wurde durch Spülen des gasdichten Schrankes mit Stickstoff (N_2) eine sauerstofffreie Atmosphäre eingestellt. Anschließend wurde der Schrank auf 250°C aufgeheizt und die Temperatur über 12 Stunden gehalten. Danach kühlten die Proben unter Stickstoffatmosphäre auf Raumtemperatur ab.

Nach dem Abkühlen wurde die PE-Schmelze mit einer Pinzette vom Probekörper abgezogen. Das Ablöseverhalten des Polymers von der Probenoberfläche wurde nach folgendem Schema (subjektiv) von einer Person bewertet:

- ++ Polymer fällt ohne Krafteinwirkung herunter
- + Polymer kann mithilfe einer Pinzette leicht entfernt werden
- 0 Polymer lässt sich mit einer Pinzette und zusätzlichem Kraftaufwand entfernen
- Polymer kann nur mit einer Pinzette und zusätzlich hohem Kraftaufwand entfernt werden, z. T. mithilfe einer Rasierklinge, mit der im Randbereich ein kleiner Teil abgelöst wurde
- Polymer lässt sich nicht entfernen
- Tendenz

Wie in Tabelle 4-7 dargestellt war bei fast allen Beschichtungen festzustellen, dass sich das PE-HD mit anorganischer Pigmentierung am besten von den Probenoberflächen ablösen lässt, dass PE-HD mit organischen Pigmenten am schlechtesten. Bei allen Proben war die Haftung im Randbereich deutlich stärker, was die Beurteilung des Ablöseverhaltens erschwert und auf spezielle Wechselwirkungen im Dreiphasenpunkt Polymer-Beschichtung-Atmosphäre hinweist.

Tabelle 4-7 Bewertung des Anbackverhaltens der einzelnen Beschichtungen, Rauwerte R_a und R_z

Beschichtung	PE-HD	PE-HD + 2 % anorgan. blau (1)	PE-HD + 2 % organ. blau (2)	R_a [μm]	R_z [μm]
Chem. Nickel	0 → -	+	-	0,012	0,16
TiN	-	0	-	0,015	0,18
TiAlNi	0	+	-	0,020	0,35
1.2316	0 → -	+ → 0	- → --	0,027	0,23
C	0 → -	+	-	0,049	1,23
CrC	+	+ → ++	-	0,077	0,83
PEEK	0	+	--	0,014	0,12
CrN	0	+	-	0,077	1,60
Hartchrom	-	0	-	0,028	0,23
A	0	+	-	0,014	0,10
D	+	+ → ++	0	0,012	0,08
1.2714	-	0	- → --	0,019	0,21

Wie eingangs beschrieben, wurden die PE-Scheiben durch Extrusion eines Rundprofils hergestellt. Nun sind es aber gerade die Randschichten dieses Stranges, die beim Abkühlen an der Umgebungsluft am ehesten zu thermisch-oxidativem Abbau neigen. Dies kann u. U. auch zu der erhöhten Adhäsion in den Randschichten führen.

Zur Überprüfung der Korrelation zwischen den Rauigkeiten R_a bzw. R_z mit dem Ablöseverhalten wurde eine lineare Regressionsrechnung durchgeführt. Hierzu wurden die Bewertungskriterien “++“ bis “--“ zunächst in Zahlenwerte von “0“ (“++“) bis 4 (“--“) umgerechnet. Sämtliche Regressionsrechnungen führten jedoch zu Bestimmtheitsmaßen $R^2 \leq 0,1$, d.h., es konnte keine Korrelation zwischen der Oberflächenrauigkeit und dem Anbackverhalten festgestellt werden. Offen bleibt z. B. nun noch die Frage, inwieweit die Schwindung des PE-HD Einfluss auf die Anhaftung hat und ob das Schwindungsverhalten ggf. durch den Pigmenttyp beeinflusst wird.

Betrachtet man nun den Zusammenhang zwischen der Oberflächenenergie und dem Ablöseverhalten, so korreliert das Ablöseverhalten des reinen PE-HD mit $\rho = 0,35$ eher mit dem polaren Anteil der Oberflächenenergie als mit dem dispersen ($\rho = 0,06$). D.h., eine Zunahme des polaren Anteils der Oberflächenenergie verstärkt die Anhaftung des Polymers im Sinne der Adhäsionsarbeit. Interessant ist der Zusammenhang beim Zusatz der Farb-Masterbatches. Mit $\rho = 0,4$ korreliert eher der polare Anteil der Oberflächenenergie mit dem mit anorganischen Batch eingefärbten PE-HD als der disperse ($\rho = 0,03$). Bei der Einfärbung mit organischen Pigmenten korreliert hingegen der disperse Anteil der Oberflächenenergie mit $\rho = 0,5$, während sich der polare Anteil mit $\rho = -0,3$ umgekehrt proportional verhält. Aufgrund der insgesamt jedoch sehr geringen Korrelation der Oberflächenenergien mit dem Ablöseverhalten sind die zuvor dargestellten Zusammenhänge jedoch keinesfalls eindeutig.

4.9 Untersuchung ausgewählter Oberflächenbeschichtungen an einer Blasfolienanlage unter Produktionsbedingungen

Ziel dieses Abschnitts des Forschungsvorhabens war die Untersuchung ausgewählter Oberflächenbeschichtungen hinsichtlich einer Verkürzung der Umstellzeiten an einer industriellen Blasfolienanlage unter Produktionsbedingungen. Hierzu wurde eine Blasfolienanlage im Extrusionstechnikum des Maschinen- und Anlagenherstellers WINDMÖLLER & HÖLSCHER eingesetzt, die in ihrer Anlagengröße und -ausführung identisch ist mit Produktionsanlagen in der industriellen Praxis.

4.9.1 Parameter der Blasfolienanlage

Bei der für alle Versuche eingesetzten Extrusionsanlage handelt es sich um eine Mono-Blasfolienanlage mit einer Arbeitsbreite von 1600 mm. Eingesetzt wird ein 90 mm Extruder ($L/D = 30$ mit Barrierschnecke) sowie ein Mono-Blaskopf mit einem Düsendurchmesser von 280 mm (B-160/315-P2, Spaltweite 1,25/2,25). Die Anlagenhöhe beträgt 18 Meter. Eine schematische Darstellung einer Blasfolienanlage ist in der folgenden Abbildung wiedergegeben. Eine Beschreibung des Blasfolienverfahrens an dieser Stelle unterbleibt aus Platzgründen, hier sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

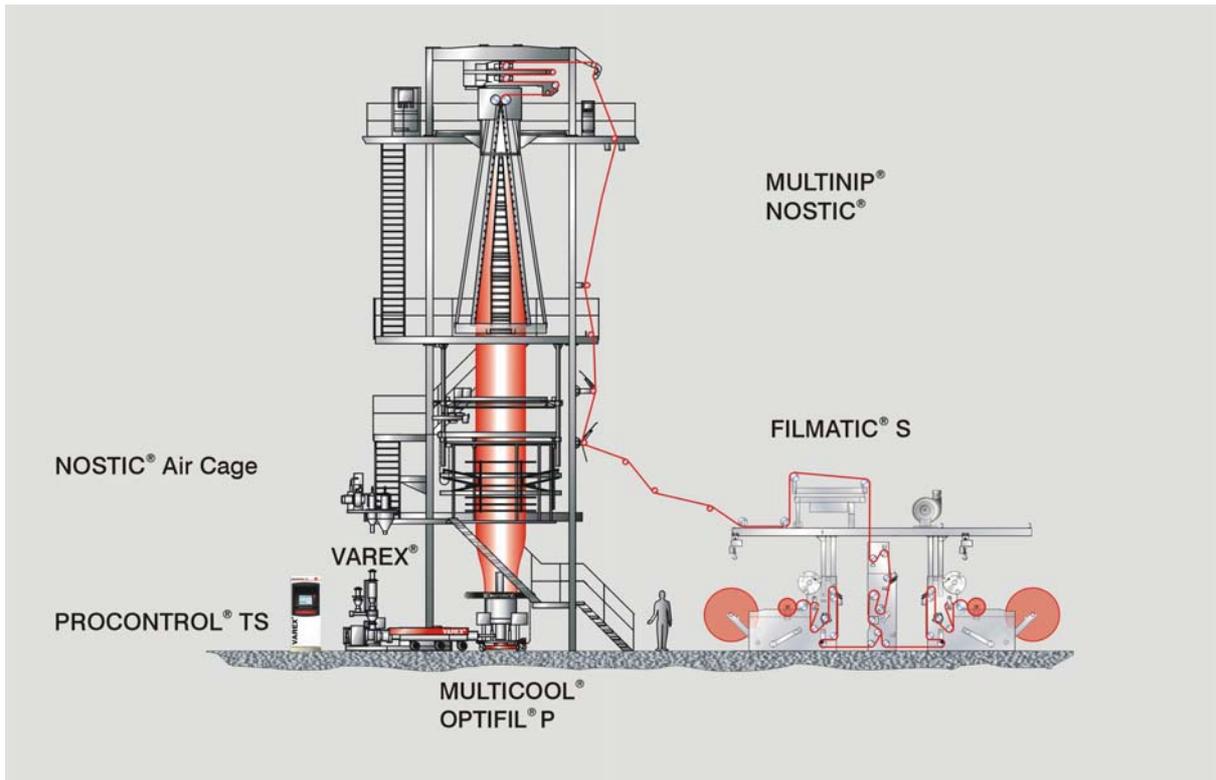


Abbildung 4-31 Schematische Darstellung einer Blasfolienanlage

4.9.2 Versuchsdurchführung

Es wurden 3 Versuchsreihen mit jeweils identischem Versuchsablauf, Einstellparametern und Rohstoffen durchgeführt. Diese 3 Versuchsreihen unterschieden sich damit lediglich in der Oberflächenbeschichtung des eingesetzten Extrusionswerkzeugs (Blaskopf).

Zwischen den Versuchsreihen wurde der Blaskopf demontiert und gereinigt sowie anschließend entschichtet und zur Neubeschichtung zu den jeweiligen Beschichtungsherstellern gesandt, bevor er bei Windmüller & Hölscher wieder zusammengebaut wurde.

Innerhalb jeder Versuchsreihe wurde jeweils ein Rohstoff aus den 3 unterschiedlichen PE-Typen PE-LD, PE-LLD und PE-HD eingesetzt, wobei das Freispülverhalten bei jedem dieser Rohstoffe unter Zugabe von sowohl 2% des organischen und 2% des anorganischen Masterbatches MB (blau) untersucht wurde. Damit ergeben sich für jede der 3 Versuchsreihen 6 unterschiedliche Einstellungen.

Mit jeder PE-Type wurde in der Reihenfolge PE-LD, PE-LLD und PE-HD an jeweils einem Versuchstag wie folgt vorgegangen:

Vorgehensweise	Dauer
Anfahren	ca. 60 Min
Zudosieren organisches MB (2% Polybatch 4500)	ca. 45 Min
Spülen	ca. 45 Min
Zudosieren anorganisches MB (2% Polybatch 4020)	ca. 45 Min
Spülen	ca. 120 Min
Summe	ca. 5,5 Stunden

Die Versuche wurden mit einer Durchsatzleistung von 220 kg/h sowie den für die jeweiligen Rohstoffe praxisüblichen Temperatureinstellungen durchgeführt. Bei einem Aufblasverhältnis von 2 wurde eine Folie mit 100 µm Dicke hergestellt. Diese Folie wurde mit 2% des blauen Masterbatches eingefärbt. Nach Erreichen eines stationären Anlagenzustandes wurde die Masterbatchzugabe unterbrochen und das Freispülen anhand der Farbumstellung von blau nach transparent beobachtet und ausgewertet. Der Spülvorgang galt dann als beendet, wenn auf dem Folienwickel rein optisch kein Blaustich mehr erkennbar war. Hierzu wird der sog. Rollenspiegel, d.h. die Farbveränderungen an den Stirnkanten des Folienwickels, beurteilt (vgl. Abbildung 4-5).

Für die weitere Auswertung wurde die Folie im Wickler der Extrusionsanlage in mehrere Nutzenbreiten von jeweils ca. 150mm Breite geschnitten. Diese Folienrollen wurden nach Abschluss der Extrusionsreihen visuell beurteilt sowie im Labor mittels Farbmessgeräten (vgl. Kap. 3.1 und 3.2) hinsichtlich des Freispülverhaltens vermessen.

4.9.3 Eingesetzte Rohstoffe

Aus jeder der 3 PE-Klassen PE-LD wurde eine Type ausgewählt, die häufig in der Blasfolienextrusion eingesetzt wird:

- PE-LD: LD 185 BW der Fa. Exxon Mobil Chemical
- PE-LLD: Dowlex NG 5056 E der Fa. Dow
- PE-HD: Hostalen GM 9255 F2 der Fa. Basell

Alle Versuchsreihen wurden mit Rohstoffen aus jeweils einem Lot durchgeführt um mögliche Beeinflussungen der Messergebnisse durch Chargenschwankungen auszuschließen.

Die Viskositätskurven dieser Rohstoffe in der folgenden Abbildung zeigen, dass sich die 3 eingesetzten Typen im Viskositätsniveau (Höhe der Kurve) bzw. der Strukturviskosität (Steigung der Kurve) im Bereich der Schergeschwindigkeiten, die in Blasfolienwerkzeugen typischerweise erreicht werden (0,1 bis 10 1/s), deutlich voneinander unterscheiden.

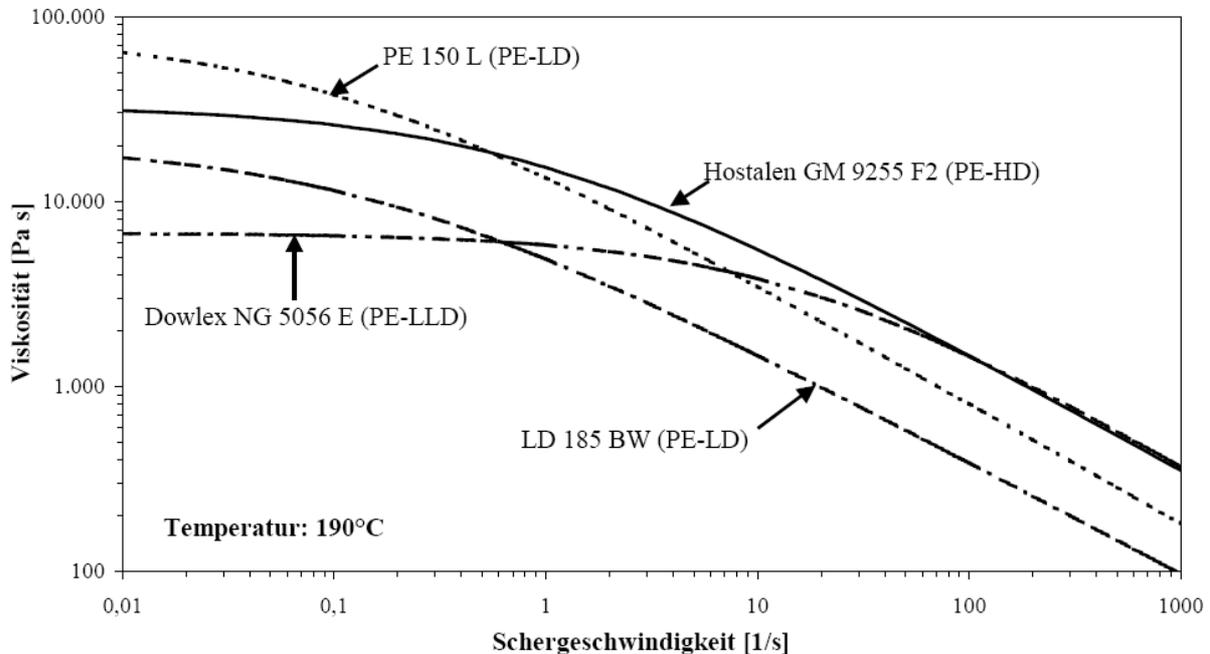


Abbildung 4-32 Viskositätskurven der eingesetzten Rohstoffe PE-LD, -LLD und -HD

Mit jeweils 2% wurden blaue Farb-Batche der Fa. Schulmann zudosiert, diese in vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben wurden. Eingesetzt wurden:

- Ultramarinblau (Pigmentblau 29, Polybatch blue 4500), ein anorganisches Farb-Batch
- Kupfer-Phtalocyanine Pigment (Pigmentblau 15, Polybatch 4020), ein organisches Farb-Batch

4.9.4 Eingesetzte Oberflächenbeschichtungen

In der ersten Versuchsreihe (Bezeichnung A „Chrombeschichtung“) war der Blaskopf mit einer Hartverchromung beschichtet, die üblicherweise bei Extrusionswerkzeugen zum Einsatz kommt. Diese erste Versuchsreihe stellt die Referenzmessung dar, anhand derer mögliche Veränderungen des Freispülverhaltens durch andere Oberflächenbeschichtungen zu beurteilen sind.

Für die zweite Versuchsreihe kam eine Beschichtung zum Einsatz aus dem Bereich Keramik/Metallglas (Versuchsreihebezeichnung B „Metallglasbeschichtung“). Sie zeichnet sich laut Hersteller aus, durch eine starke Antihafwirkung in der Kunststoff- und Lebens-

mittelverarbeitung, bietet aber auch eine hohe Korrosionsfestigkeit und wird in Dicken von 30-40 μm aufgetragen, wobei beim Endpolieren die Oberflächenrauigkeiten Vergleich zur unbeschichteten Oberfläche verbessert wird. Sie soll Standzeiten aufweisen, die den heute in der Praxis eingesetzten Standzeiten von nitrierten oder verchromten Oberflächen entsprechen.

In der dritten Versuchsreihe (Bezeichnung C „Nanobeschichtung“) wurde eine Nanobeschichtung auf der Basis chemischer Nanotechnologie eingesetzt. Diese weist laut Hersteller außerordentliche Anti-Adhäsivität, ausgezeichnete Korrosions- und Temperaturbeständigkeit auf und ist für Industrieanlagen mit hohem Verschmutzungsgrad in der Druck-, Papier- und Folienindustrie geeignet. Einsätze in der Druckindustrie belegen deutliche Standzeitverlängerungen und geringere Reinigungskosten. Diese Beschichtung, die Nanopartikel enthält, wird ähnlich wie ein Lack aufgetragen und anschließend bei 300°C ausgehärtet. Sie wurde ausgewählt, da diese Beschichtung in den Laborversuchen als einzige deutliche Unterschiede zeigte und obwohl vermutet werden darf, dass die Standzeit der Beschichtung in einem Blaskopf nicht an die in der Praxis üblichen Werte herankommt.

Das Kriterium der langen Standzeit ist von besonderer Bedeutung und wurde bei allen ausgewählten Beschichtungen berücksichtigt, da es bereits bekannt ist, daß z.B. PTFE-/Teflon-haltige Beschichtungen aufgrund ihrer „Gleiteigenschaften“ zu einer messbaren Verbesserung des Freispülverhaltens führen. In der industriellen Praxis werden diese Beschichtungen aber nicht eingesetzt, da sie durch Abrasion in kurzer Zeit ausgespült werden, was zu unakzeptablen Erneuerungszyklen bzw. Kosten führt.

4.9.5 Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Blaskopfbeschichtungen

Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgte mittels Farbanalyse (Herleitung des Verfahrens vgl. Kap. 3 und 4.3.4). Exemplarisch für die Vielzahl, der bei der Auswertung gewonnenen Messdaten sind, in Abbildung 4-33 für die Versuchsreihe „Freispülen bei PE-HD mit organischem Farb-Batch“ die Farbwerte aus dem CIELAB-Farbsystem

- L^* = Helligkeit
- a^* = + rot / - grün
- b^* = + gelb / -blau

dargestellt. Die x-Achse gibt mit der Masse den Zeitraum an (über den Durchsatz 220 kg/h), der vom Beginn des Freispülens bis zum Erreichen des Endzustandes (transparente Folie) benötigt wird. Auf der y-Achse sind Werte L^* , a^* und b^* aus dem CIELAB-

Farbsystem wiedergegeben für die 3 untersuchten Oberflächenbeschichtungen A, B und C (Chrom-, Nano- und Metallglasbeschichtung).

Die dargestellten Messkurven bestehen aus jeweils ca. 150 zeitlich aufeinanderfolgenden Messpunkten (alle 5 Meter auf der Folienrolle), wobei jeder einzelne Messpunkt aus 3 Einzelmessungen gemittelt wurde. Wichtig bei der Interpretation der Kurvenverläufe ist, dass nicht die Absolutwerte des Farbsystems zwischen den verschiedenen Rohstoffen verglichen werden (die Absolutwerte sind abhängig vom Rohstoff) sondern der zeitliche Kurvenlauf mit seinem Anfangsverlauf und dem asymptotisch annähernden Ende berücksichtigt wird.

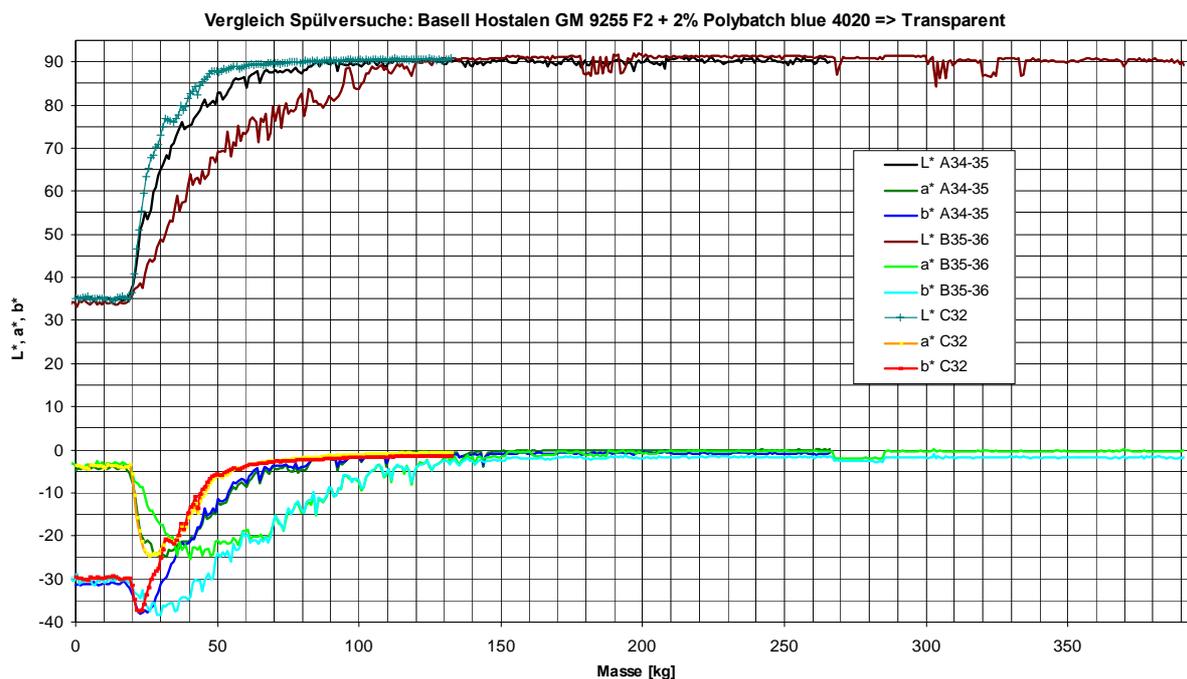


Abbildung 4-33 Versuchsergebnisse mit den 3 Oberflächenbeschichtungen für das PE-HD mit dem organischen Farb-Batch

Gemäß den Erkenntnissen in Kap. 4.3.4 reicht es, bei einem Farbwechsel von Blau nach Transparent, wie er in diesen Versuchsreihen durchgeführt wird, lediglich den b^* -Wert zu betrachten. Da hierdurch die Lesbarkeit und Auswertung der Messergebnisse vereinfacht wird, sind in den folgenden Abbildungen lediglich die b^* -Werte dargestellt (bei normierter Skalierung der x- oder Zeitachse).

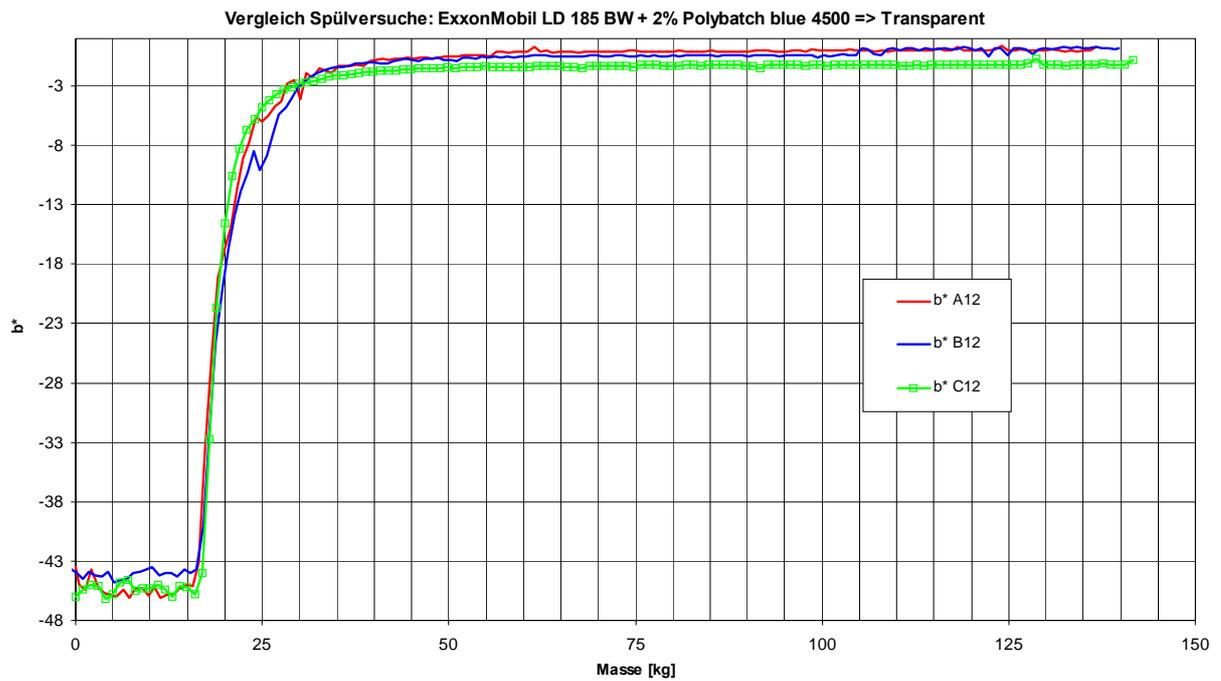


Abbildung 4-34 Vergleich der Spülversuche mit PE-LD (Exxon LD 185 BW) mit 2% anorganischem Masterbatch (Polybatch blue 4500)

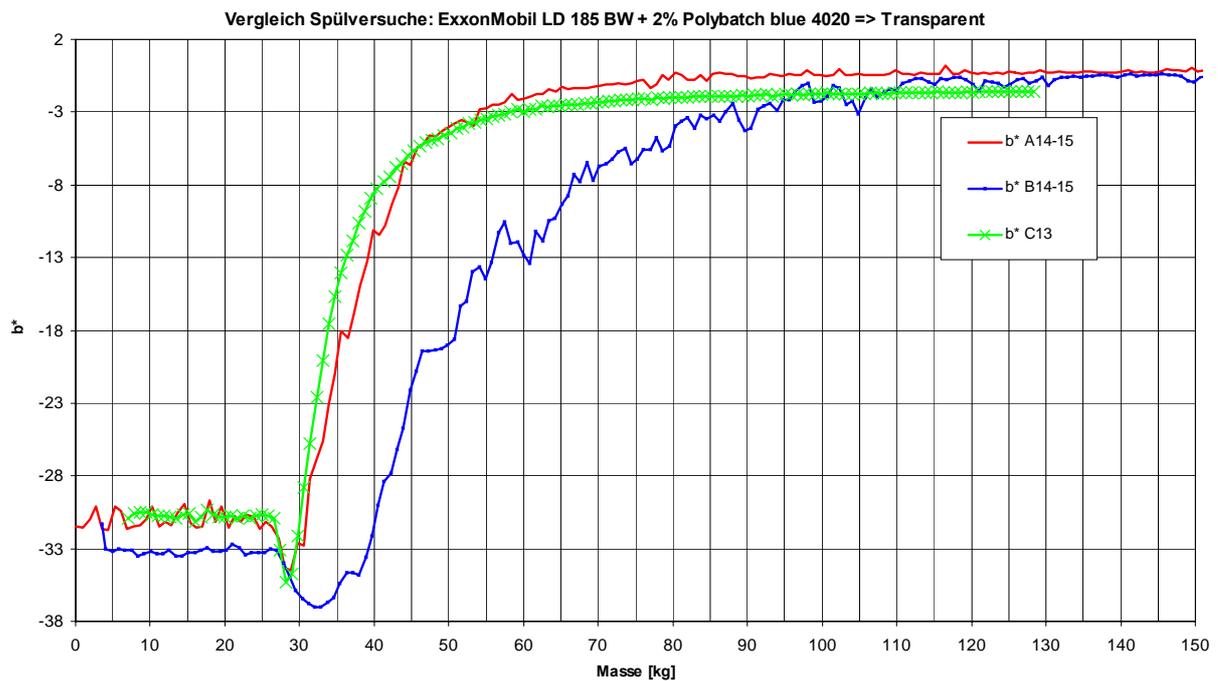


Abbildung 4-35 Vergleich der Spülversuche mit PE-LD (Exxon LD 185 BW) mit 2% organischem Masterbatch (Polybatch blue 4020)

Legende für Beschichtung: rot = A „Chrombeschichtung“

blau = B „Metallglasbeschichtung“

grün = C „Nanobeschichtung“

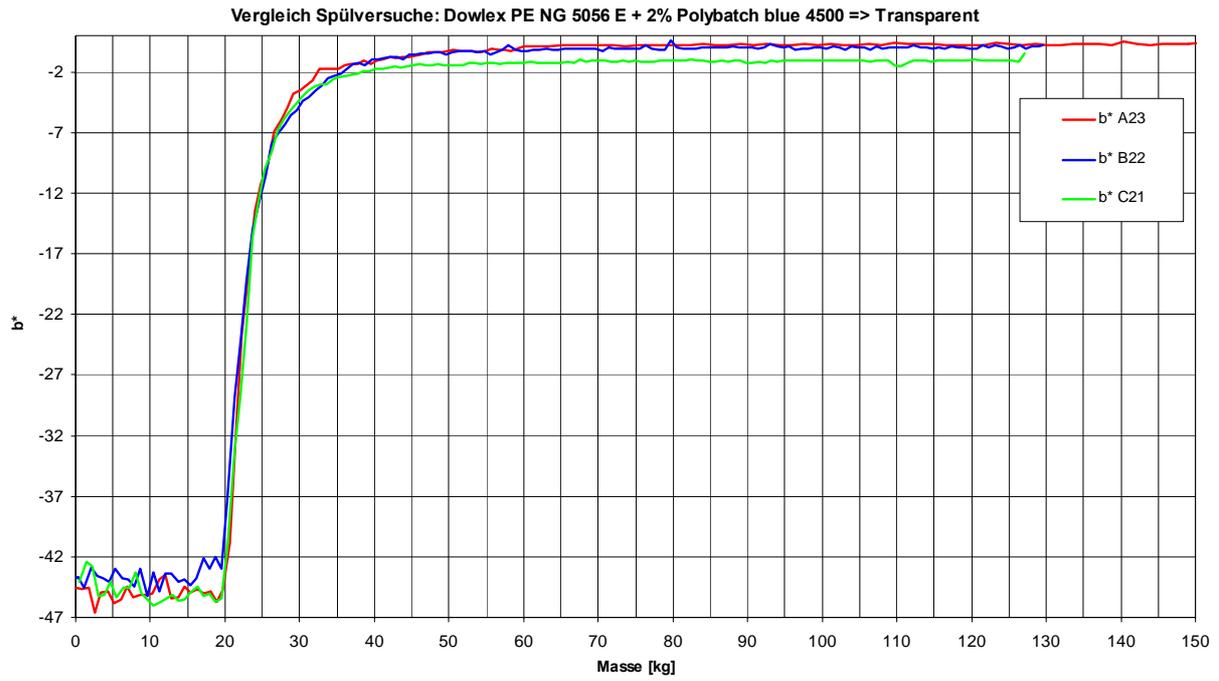


Abbildung 4-36 Vergleich der Spülversuche mit PE-LLD (Dowlex PE NG 5056 E) mit 2% anorganischem Masterbatch (Polybatch blue 4500)

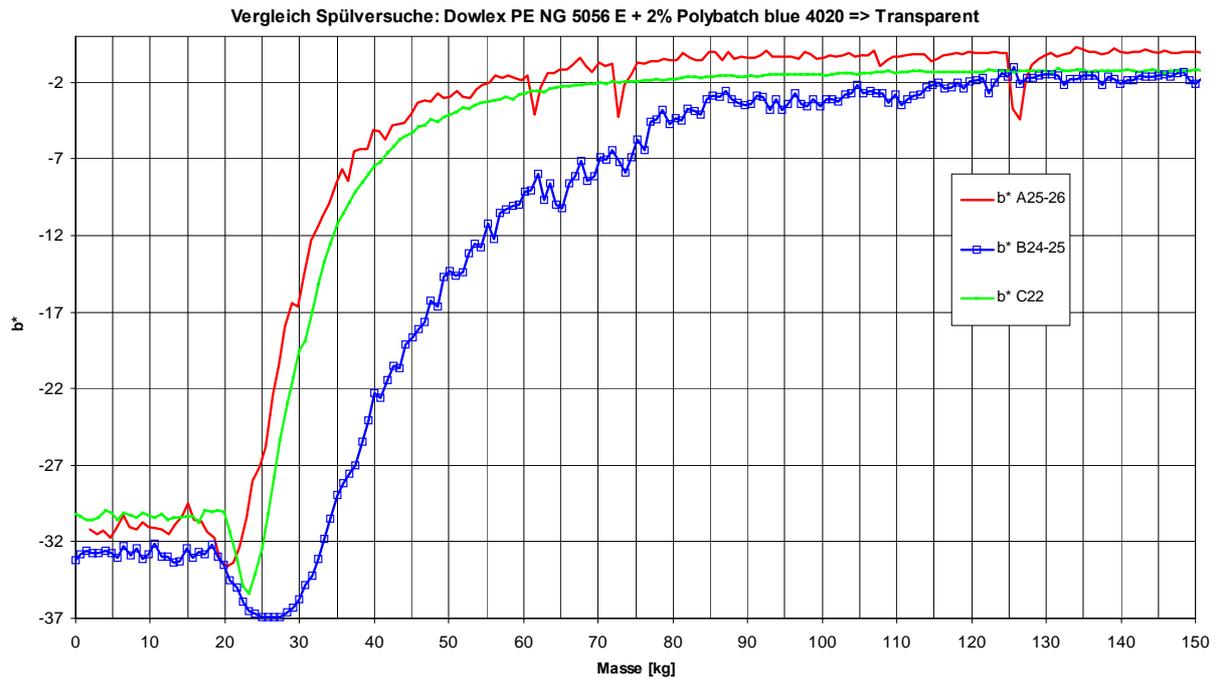


Abbildung 4-37 Vergleich der Spülversuche mit PE-LLD (Dowlex PE NG 5056 E) mit 2% organischem Masterbatch (Polybatch blue 4020)

Legende für Beschichtung: rot = A „Chrombeschichtung“
blau = B „Metallglasbeschichtung“
grün = C „Nanobeschichtung“

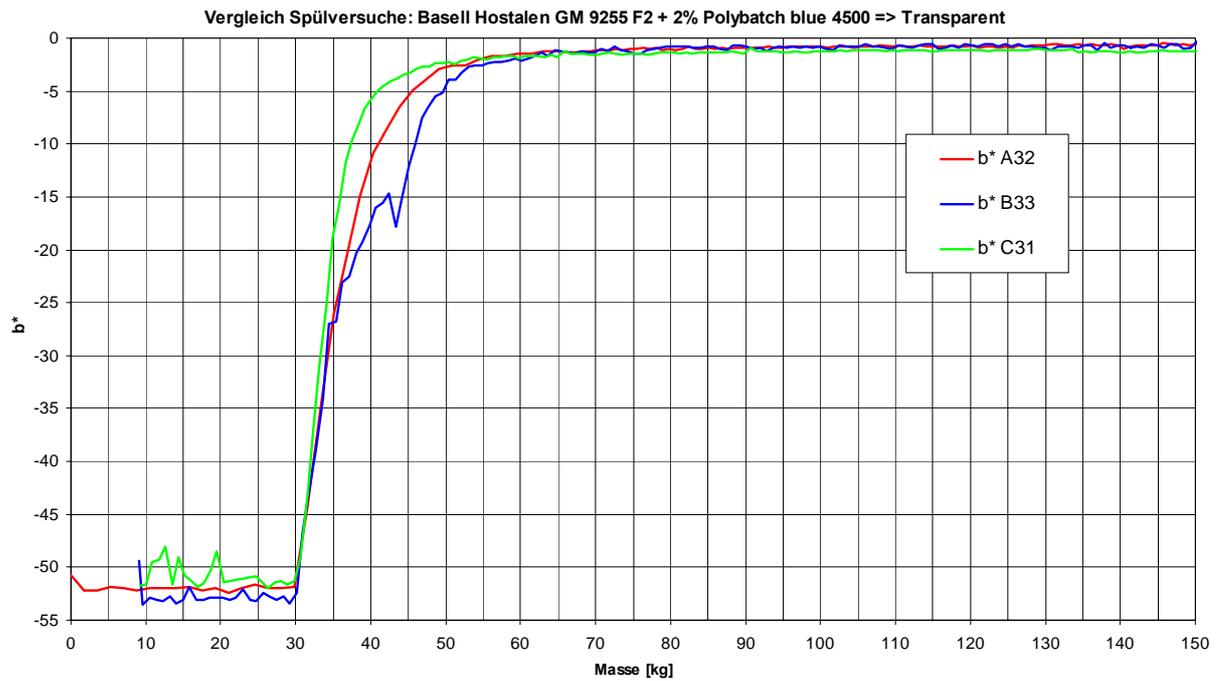


Abbildung 4-38 Vergleich der Spülversuche mit PE-HD (Hostalen GM 9255 F2) mit 2% anorganischem Masterbatch (Polybatch blue 4500)

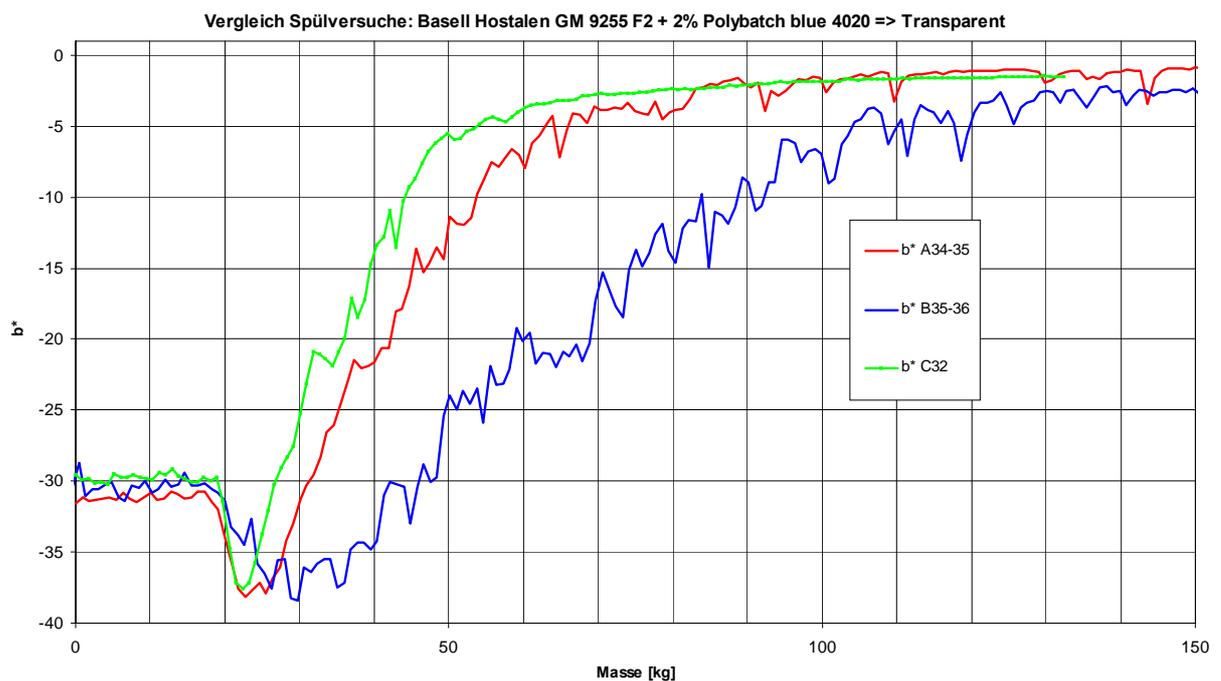


Abbildung 4-39 Vergleich der Spülversuche mit PE-HD (Hostalen GM 9255 F2) mit 2% organischem Masterbatch (Polybatch blue 4020)

Legende für Beschichtung: rot = A „Chrombeschichtung“

blau = B „Metallglasbeschichtung“

grün = C „Nanobeschichtung“

Bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des Freispülens, so sind für das organische Farb-Batch (Abbildung 4-34, Abbildung 4-36 und Abbildung 4-38) nahezu keine Unterschiede erkennbar. Lediglich bei dem Rohstoff PE-HD ist zu beobachten, dass der Kurvenanstieg mit der Nanobeschichtung C steiler verläuft als bei der Chrombeschichtung A und der Metallglasbeschichtung B. Allerdings ist auch hier kein Unterschied im Erreichen des zeitlichen Endpunktes zu erkennen. Daher ist anzunehmen, dass diese Unterschiede im zeitlichen Verlauf ohne Bedeutung für die industrielle Praxis sind.

Geringfügig anders fallen die Messergebnisse für das anorganische Farb-Batch aus (Abbildung 4-35, Abbildung 4-37 und Abbildung 4-39). Hier werden insbesondere beim PE-HD, in deutlich geringerem Umfang aber auch beim PE-LLD und -LD, längere Freispülzeiten (späteres Erreichen des Endwertes) mit der Metallglasbeschichtung B beobachtet. Tendenziell scheint beim anorganischen Farb-Batch darüber hinaus die Nanobeschichtung B minimal kürzere Freispülzeiten (schnelleres Freispülen) zu haben als die üblicherweise in der Industrie eingesetzte Chrombeschichtung (A).

Wegen der geringen Unterschiede zwischen den untersuchten Oberflächen wird an dieser Stelle auf eine Quantifizierung der Unterschiede, wie z.B. in Tabelle 4-2 und 4-3 für die Versuche am Laborwerkzeug durchgeführt, verzichtet. Diese Werte können ggf. direkt aus den Messkurven der Abbildung 4-34 bis Abbildung 4-39 entnommen werden. Lediglich für das Freispülen von PE-HD mit organischem Masterbatch (vgl. Abbildung 4-39) sei angegeben, dass mit den Chrom- und Nanobeschichtungen der Endwert des Freispülens bei ca. 100 kg erreicht wird, während dies mit der Metallglasbeschichtung erst nach 150 kg der Fall ist. Bei den eingestellten Extrusionsparametern von 220 kg/h entspricht der Unterschied von 50 kg zwischen den Beschichtungen damit immerhin einer längeren Freispülzeit von ca. 13 bis 14 Minuten. Um etwa die Hälfte kürzer (statt 50 kg ca. 30 kg), aber noch immer im deutlichen Unterschied zu den Beschichtungen A und C zeigte sich diese Beschichtung auch beim PE-LD und PE-LLD (vgl. Abbildung 4-35 und Abbildung 4-37).

Es ist davon auszugehen, dass die minimalen Unterschiede zwischen der Nano- (C) und der Chrombeschichtung (A) sich in der industriellen Praxis nicht bemerkbar machen. Die (geringen) längeren Freispülzeiten mit der Metallglasbeschichtung dagegen lassen diese Beschichtung weniger geeignet für Blasköpfe erscheinen. Allerdings kann diese Aussage bislang nur mit den untersuchten Materialkombinationen untermauert werden.

4.9.6 Bewertung der Ergebnisse

Ebenso wie die mit dem Laborwerkzeug gewonnen Erkenntnisse, bei denen eine größere Anzahl untersuchter Oberflächenbeschichtungen Eingang fanden, zeigen auch die Untersuchungen an einem Extrusionswerkzeug in „Industriegröße“, dass die Freispül-

eigenschaften mit den unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen eng beieinander liegen. Diese Untersuchungen belegen, dass in der industriellen Praxis der Folienextrusion mit der Verchromung bereits ein hoher Qualitätsstandard in der Beschichtung erreicht worden ist. Die heute standardmäßig eingesetzte Oberflächenverchromung wird mit den untersuchten Oberflächenbeschichtungen hinsichtlich Freispüleigenschaften nicht oder nur unwesentlich, verbessert. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Freispüleigenschaften nur einen Aspekt der Beschichtung darstellen. Weitere Aspekte wie Schutz vor mechanischer Beschädigung, Korrosion, Standzeit etc. konnten nicht in vollem Umfang bei den vorliegenden Untersuchungen berücksichtigt werden. Ebenso wurde aus Kostengründen ein Versuch mit einer Teflonbeschichtung ausgelassen, der aus wissenschaftlichem Interesse und als Vergleich interessant wäre. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit einer derartigen Beschichtung, die aber keine Standfestigkeit aufweist, messbar bessere Freispüleigenschaften erzielbar sind.

Darüber hinaus lassen die Messergebnisse aber auch den Schluss zu, dass neben der Oberflächenbeschichtung die rheologische Auslegung des Blaskopfes (Fließkanalgeometrie, Anzahl der Umlenkungen, Größe der benetzten Oberfläche etc.) wahrscheinlich einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Freispüleigenschaften von Blasköpfen ausüben als die Oberflächenbeschichtung. Dieser Punkt ist bei der Weiterentwicklung von Extrusionswerkzeugen zu berücksichtigen.

5. Einfluss verschiedener Fließkanalgeometrien auf das Spülverhalten von Extrusionswerkzeugen

Für die Versuchsreihe zur Untersuchung verschiedener Fließkanalgeometrien wurden von den Partnern Reifenhäuser und ETA folgende Module angefertigt, von denen einige Beispiele in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. Durch den modularen Aufbau ist eine leichte Demontage des mit erstarrter Schmelze gefüllten Kanals möglich.

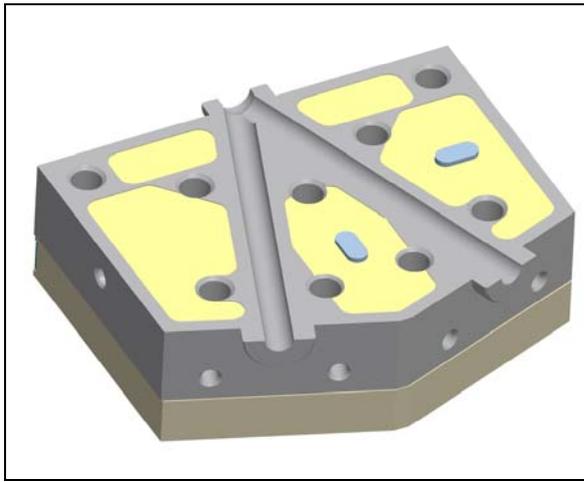


Abbildung 5-1 V-Modul (Reifenhäuser)

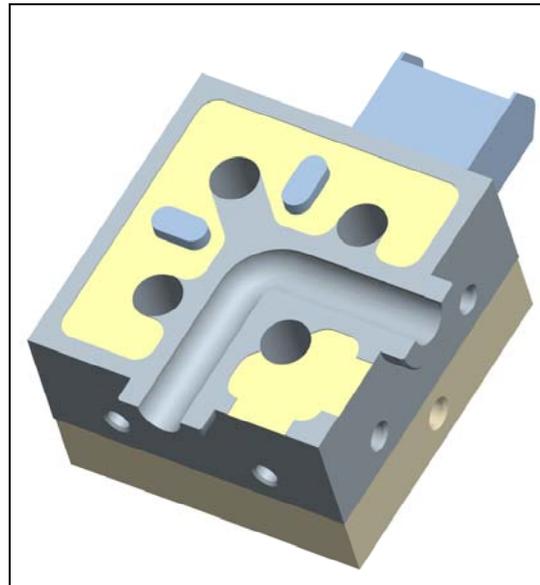


Abbildung 5-3 L-Modul (Reifenhäuser)

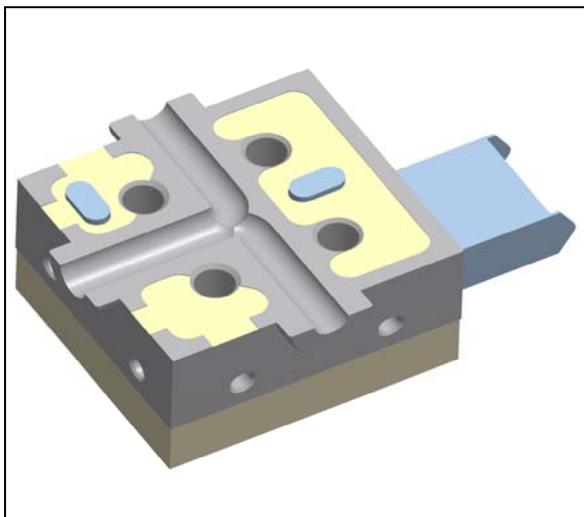


Abbildung 5-2 T-Verteiler (Reifenhäuser)

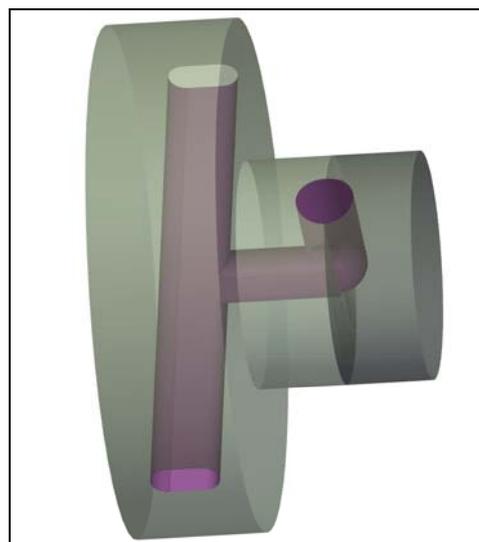


Abbildung 5-4 T-Verteiler ETA

5.1 T-Verteiler

T-Verteiler werden z. B. in Radial-Wendelverteilerwerkzeugen zur Vorverteilung des Schmelzestromes eingesetzt. Aus strömungsmechanischer Sicht handelt es sich dabei um eine interessante Geometrie, wie der folgende Abschnitt zeigen soll.

Untersucht wurde ein T-Verteiler, wie er im Schnitt in Abbildung 5-5 dargestellt ist. Der runde Eintrittsquerschnitt hat einen Durchmesser von 20 mm (zwecks Anflanschung an den Bypass), die beiden Austrittsquerschnitte haben jeweils 16 mm Durchmesser. Der innere Radius der Aufteilung beträgt 2 mm, der äußere 18 mm.

Die Versuche wurden exakt wie zuvor beschrieben durchgeführt. Die Zeit, nach der der Spülvorgang abgebrochen wurde, betrug 30 s. Abbildung 5-5 zeigt ein Foto des in der Mittelebene durchtrennten Stranges aus PE-HD, in dem die noch nicht gespülten, mit 2 % anorganischen Farb-Batch gefärbten Randschichten zu erkennen sind.

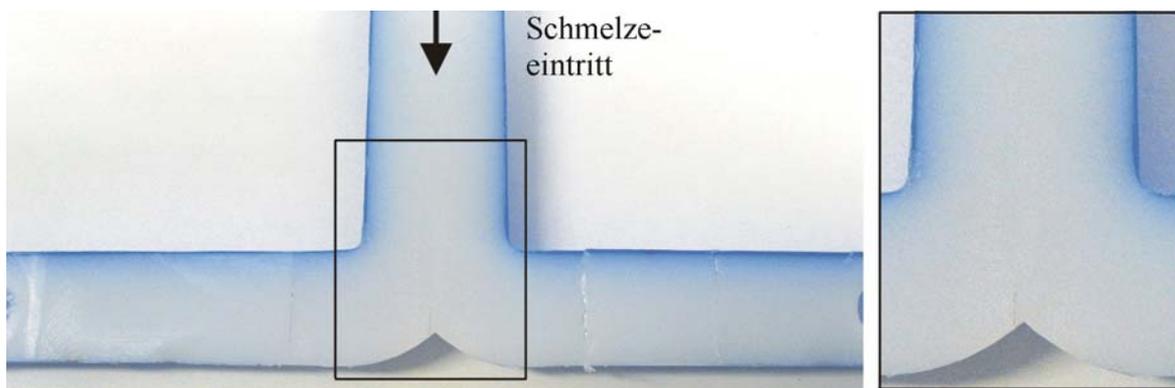


Abbildung 5-5 Querschnitt T-Verteiler, PE-HD mit anorgan. Masterbatch

Wie in der Abbildung 5-5 zu sehen ist, wird der Wandbereich rund um die Spitze, an der sich die Strömung nach rechts und links aufteilt, besonders gut gespült. Dies ist folgendermaßen zu erklären: Durch die symmetrische Aufteilung des Schmelzestroms trifft während des Spülvorgangs bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt frische, nicht eingefärbte Schmelze aus der Mitte der ankommenden Strömung direkt auf die gegenüberliegende Werkzeugwand und spült diese relativ rasch. Durch diesen Austausch wird die Schmelze, die zuvor die höchste Geschwindigkeit besaß, nunmehr zur wandnah fließenden Schicht mit der niedrigsten Geschwindigkeit. Gleichzeitig nimmt auch die Scherbeanspruchung der Schmelze stark zu.

Prinzipiell gilt für Strömungen von Polymerschmelzen durch Extrusionswerkzeuge die Regel, dass einmal wandnah strömende Schmelzevolumina auch wandnah bleiben. Dies ist durch das streng laminare Fließverhalten der Polymerströmungen bedingt und führt zu den bekannten, breiten Verweilzeitspektren. Eine wirkliche Umlagerung und Durchmi-

schung der Schmelzeströmung wäre nur durch statische Mischer zu erreichen. Diese werden aber gerade bei Blasfolienwerkzeugen nur sehr ungern angewendet, da sie sehr teuer sind, prinzipbedingt einen relativ hohen Strömungswiderstand haben und in den dünnen Folien zu erkennbaren Fließlinien führen können.

Die zunächst qualitativen, optischen Eindrücke aus Abbildung 5-5 werden durch die Messungen der Schichtdicken im Querschnitt auch quantitativ bestätigt.

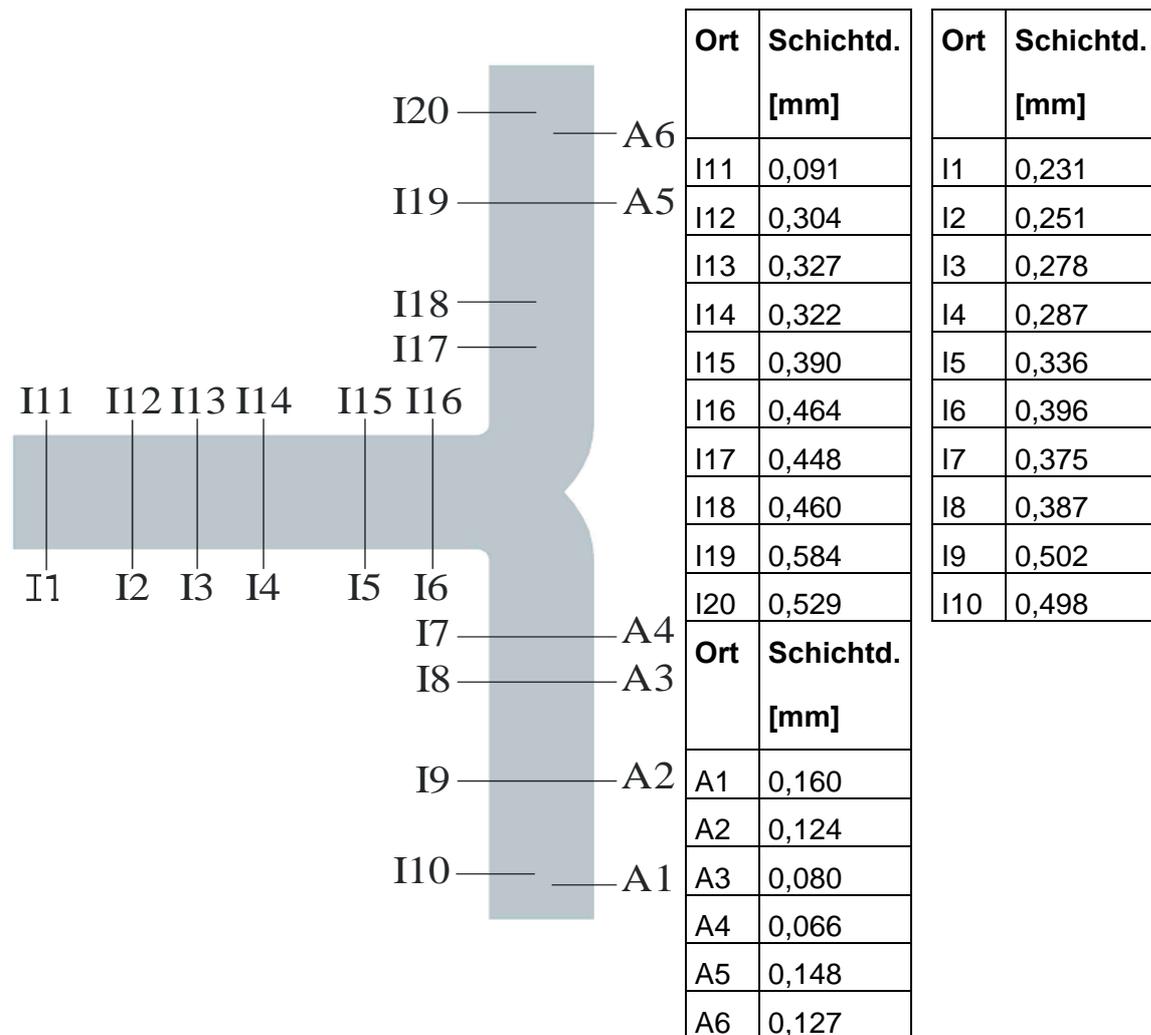


Abbildung 5-6 Randschichtdicke entlang der Außenkontur

Wie aus Abbildung 5-6 zu ersehen ist, nimmt entlang der beiden Innenkonturen I1-I5 bzw. I11-I15 die Dicke der verbleibenden blauen Randschicht in Strömungsrichtung kontinuierlich zu. Von I5 nach I6 bzw. I15 nach I16 ist dann eine stärkere Schichtzunahme zu verzeichnen. Folgt man dem Schichtdickenverlauf auf der Innenseite weiter, so nimmt dieser jeweils direkt nach den Umlenkungen, also von I6 zu I7 bzw. I16 zu I17, wieder ab, um von da an in Richtung Austritt kontinuierlich anzusteigen. Dieses Verhalten ist durch eine lokale Erhöhung der Wandschubspannung im Bereich der relativ scharfen Umlenkung zu erklären. Weiter verdeutlicht werden die Zusammenhänge durch Abbildung 5-7, in der die

Verteilung der Schergeschwindigkeit über dem Querschnitt des T-Verteilers grafisch dargestellt ist. Die dieser Abbildung zugrunde liegende isotherme, numerische Strömungssimulation wurde mit dem Programm *Polyflow*[®] für strukturviskose Materialien nach dem *Cross-Law*-Ansatz durchgeführt. Alle Simulationsparameter wie Durchsatz, Materialkennwerte etc. entsprachen dem Versuch. Auch wenn die absoluten Schergeschwindigkeiten in der Nähe von Singularitäten, wie sie die mit einem Radius von 2 mm doch relativ scharfe innere Umlenkung darstellt, mit Vorsicht zu betrachten sind, wird klar, dass an dieser Stelle die Wandschergeschwindigkeiten lokal extrem ansteigen. Dies führt dazu, dass diese Wandbereiche entsprechend gut gespült werden, was sich auch stromabwärts auf die Randschichtdicken auswirkt.

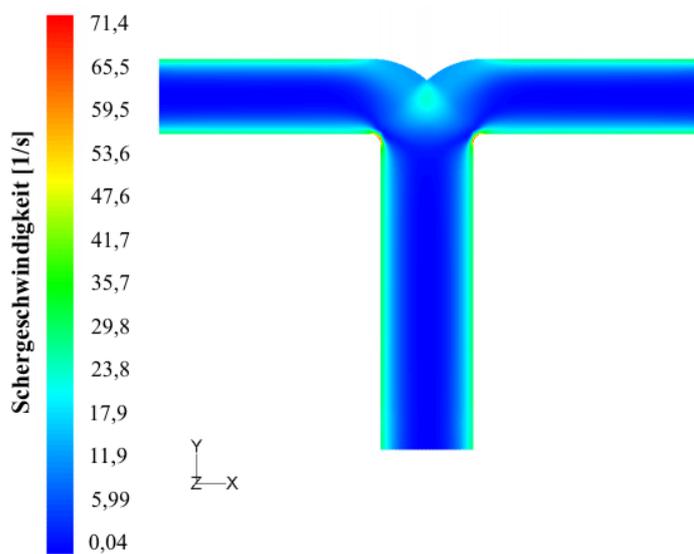


Abbildung 5-7 Schergeschwindigkeit im Querschnitt des Strömungskanals

Welche Auswirkung die Aufteilung der Strömung auf die Randschichtverteilung kurz vor dem Werkzeugaustritt hat, verdeutlicht Abbildung 5-8. Dort ist die verbleibende Randschichtdicke über dem halben Umfang des runden Fließkanals dargestellt.

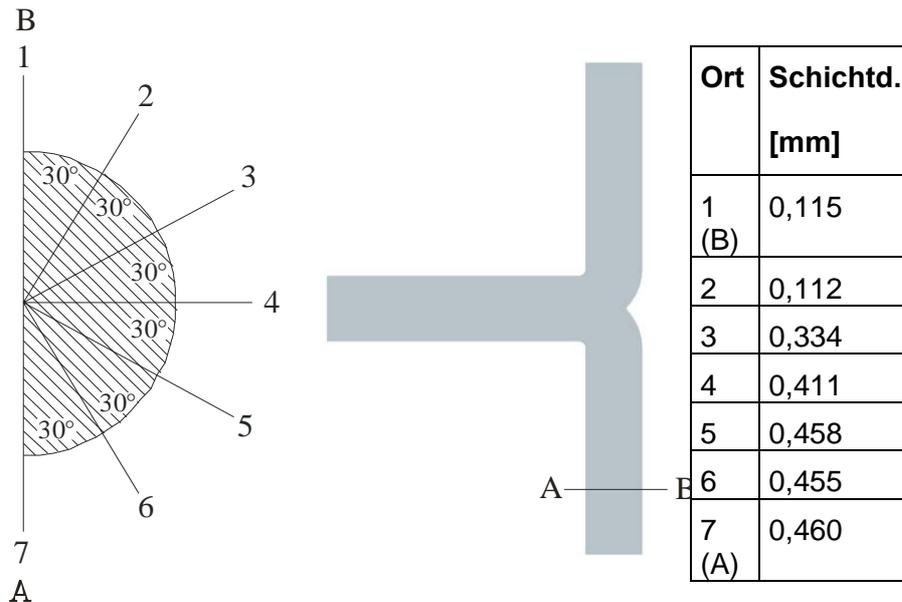


Abbildung 5-8 Randschichtdicke im Querschnitt

Wie bereits in Abbildung 5-6 zu erkennen war, sind die Schichtdicken an den Orten I9 und I19 ca. dreimal so groß, wie an den jeweils gegenüber liegenden Stellen A2 und A5. Über den Umfang betrachtet (Abbildung 5-8) wird deutlich, wie weit sich der besser gespülte Bereich in Umfangsrichtung ausdehnt. Während an den Orten 1 und 2 mit ca. 0,11 mm praktisch die gleiche Schichtdicke vorliegt, nimmt diese bis zur Stelle 4 auf 0,411 mm stark zu und steigt von da an bis zur Stelle 1 nur noch leicht auf 0,46 mm an. Der besser gespülte Wandbereich ist also größer 60°.

Das Beispiel zeigt, welche große Hilfestellung die numerische Strömungssimulation bieten kann, die Fließvorgänge in Extrusionswerkzeugen besser zu analysieren und zu verstehen. Die Verteilung der herrschenden Wandschergeschwindigkeiten ist gut geeignet, um die Spülcharakteristik eines Strömungskanals zu bewerten. Allerdings sind auch immer parallel die Wechselwirkungen der einzelnen Konturen sowie die Verläufe der Stromfäden zu betrachten.

5.2 90°-Umlenkung

90°-Umlenkungen sind in Extrusionswerkzeugen relativ häufig vorzufinden. Meist werden sie als so genannter "Sweep" ausgeführt, d.h. der Querschnitt normal zur Leitkurve hat über die gesamte Länge einen konstanten Durchmesser. Wie auch die T-Verteiler sind derartige Umlenkungen in größerer Anzahl in der Schmelzevorverteilung von Radial-Wendelverteilerwerkzeugen vorhanden – dort jedoch oft aus konstruktiven Gründen mit ovalem und nicht mit kreisrundem Querschnitt.

Untersucht wurde eine 90°-Umlenkung mit einem über die gesamte Länge konstanten Kreisquerschnitt (Sweep) mit einem Durchmesser von 20 mm. Bei einem Innenradius von 5 mm betrug der Außenradius entsprechend 25 mm. Der Spülversuch wurde genau wie mit dem T-Verteiler durchgeführt. Abbildung 5-9 zeigt ein Bild inkl. vergrößertem Ausschnitt des in der Mittelebenen durchtrennten Stranges aus PE-HD, in dem wiederum die noch nicht gespülten, mit 2 % anorganischen Farb-Batch gefärbten, Randschichten zu erkennen sind.

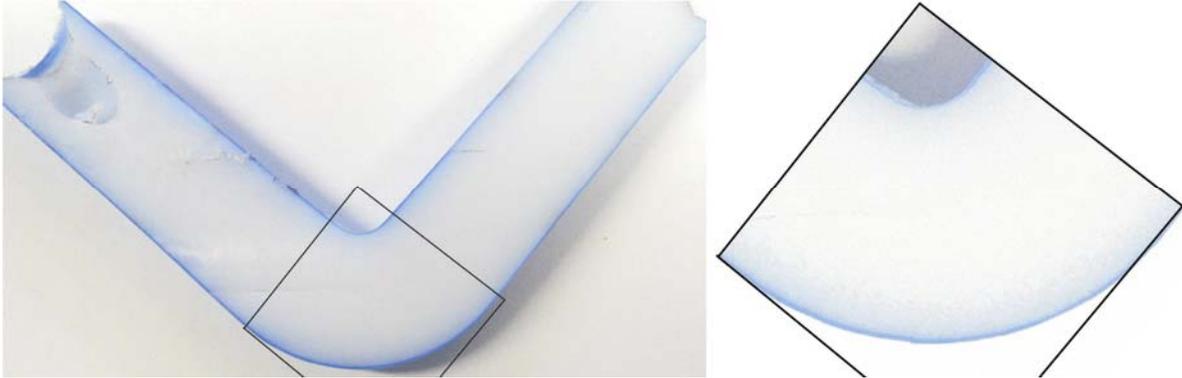
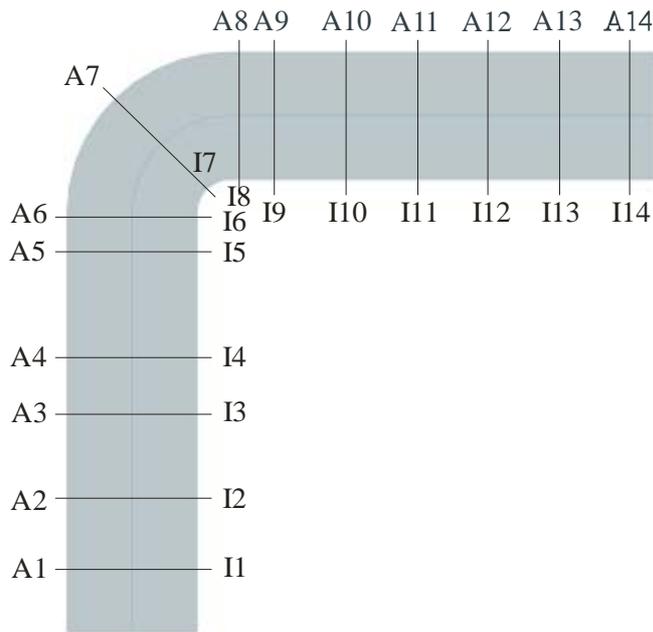


Abbildung 5-9 Querschnitt 90°-Umlenkung, PE-HD mit anorgan. Masterbatch

Auffällig ist zunächst, dass der kleinere Radius der Innenkontur besser gespült zu sein scheint, als der äußere Radius. Die exakten Schichtdickenverläufe entlang der Außen- und der Innenkontur sind in Abbildung 5-10 aufgelistet. Folgt man dem Schichtverlauf entlang der Innenkontur, beginnend am Werkzeugeintritt bei I1, so nimmt die Schichtdicke bis kurz vor dem 5 mm-Radius (Ort I5) zunächst kontinuierlich zu. Im Bereich der eigentlichen Umlenkung (I6-I8) nimmt die Schicht wieder ab. Hierbei handelt es sich um das gleiche Phänomen wie bei dem T-Verteiler, dass infolge der hohen lokalen Schergeschwindigkeiten auch die Schichtdicken lokal abnehmen. Nach dem Radius (I9) nimmt die Randschichtdicke bis zum Werkzeugaustritt (I14) wieder stetig zu.



Ort	Schichtd. [mm]	Ort	Schichtd. [mm]
A1	0,152	I1	0,101
A2	0,175	I2	0,130
A3	0,204	I3	0,164
A4	0,260	I4	0,192
A5	0,247	I5	0,236
A6	0,247	I6	0,224
A7	0,344	I7	0,197
A8	0,386	I8	0,154
A9	0,253	I9	0,163
A10	0,253	I10	0,188
A11	0,258	I11	0,323
A12	0,304	I12	0,293
A13	0,325	I13	0,314
A14	0,318	I14	0,324

Abbildung 5-10 Randschichtdicke entlang der beiden Randkonturen einer 90°-Umlenkung

Entlang der äußeren Kontur nimmt die Schichtdicke zunächst bis zum Beginn des Radius (A6) zu. Im Gegensatz zur Innenkontur nimmt die Schicht aber entlang des 25 mm Radius (A6-A8) weiterhin zu und nicht ab. Im weiteren Verlauf zwischen den Messstellen A8 und A9 sinkt die Schichtdicke fast sprunghaft von 0,386 mm bei A8 auf 0,253 mm bei A9, um von da an wieder kontinuierlich bis zum Austritt anzusteigen.

Erklärt werden können diese Verläufe wiederum sehr gut anhand der in Abbildung 5-11 dargestellten Verteilung der Schergeschwindigkeiten. Beim Durchströmen der Umlenkung wird die im jeweiligen Kanalquerschnitt anzutreffende maximale Geschwindigkeit in Richtung der Innenkontur verschoben. Dies führt am Innenradius zu relativ hohen Wandschergeschwindigkeiten, am Außenradius jedoch zu Geringeren. Dies bewirkt, dass die Region um den Innenradius besser, die im Bereich des Außenradius entsprechend schlechter gespült werden und auch zu Ablagerungen neigen können.

Der Geschwindigkeitsunterschied nimmt allgemein mit abnehmendem Krümmungsradius zu. Abbildung 5-12 zeigt hierzu eine Grafik, in der das Verhältnis der Wandschubspannung an der Außen- bzw. Innenseite des Krümmers mit dem Radius R_K zu der Wandschubspannung τ_{RW} , die sich in einem geraden Rohr mit dem Radius R_R (d.h. $R_K \rightarrow \infty$) ergibt, über dem Verhältnis R_K/R_R aufgetragen ist [Mi91].

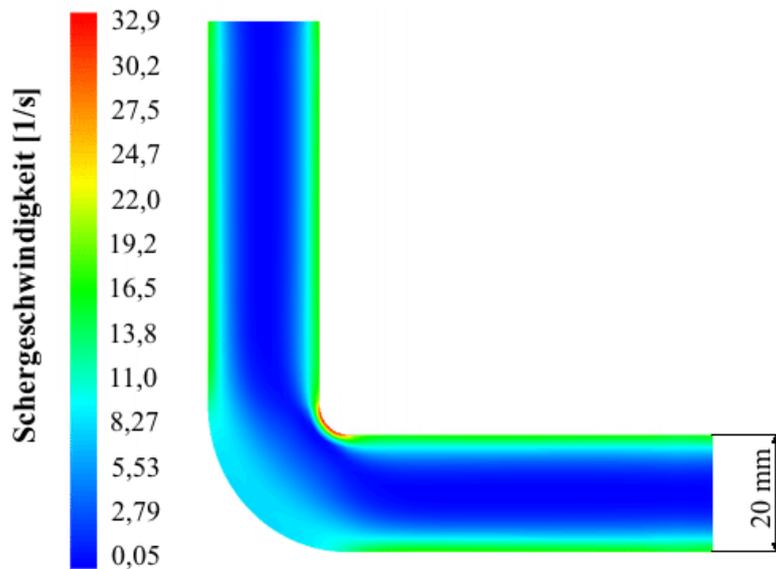


Abbildung 5-11 Schergeschwindigkeit im Querschnitt des Strömungskanals

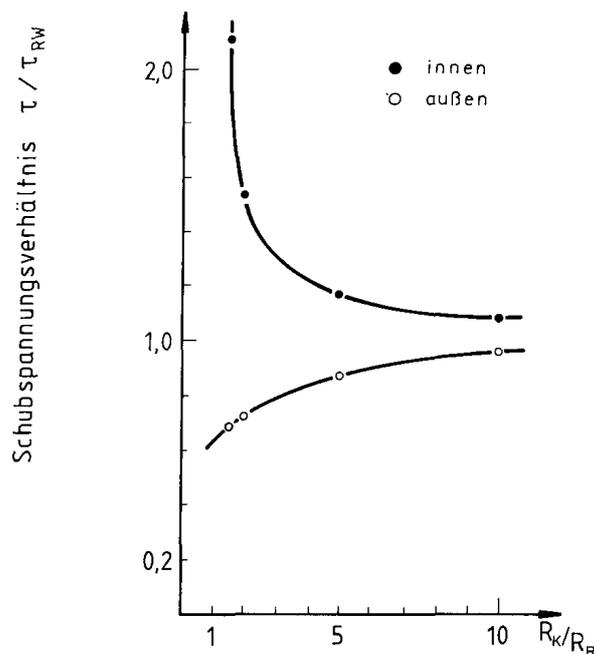


Abbildung 5-12 Wandschubspannungen in Abhängigkeit vom Radienverhältnis [Mi91]

Erst ab einem Verhältnis $R_K/R_R = 10$ werden die Unterschiede zwischen den Schubspannungen vernachlässigbar gering und die Rohrkrümmung hat kaum noch Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung [Mi91].

Abbildung 5-13 gibt am Beispiel einer PE-LD Strömung bei 200°C und einem Durchsatz von 77,9 kg/h einen qualitativen Eindruck, welche räumliche Ausdehnung der schlechter spülbare Bereich am äußeren Radius hat.

Aus Abbildung 5-10 ist weiter zu entnehmen, dass zu Beginn des Werkzeugs die Randschichtdicke um den Umfang noch relativ gleichmäßig verteilt zu sein scheint. So sind z. B. die Schichtdicken bei A5 und I5 fast identisch. Nach der Umlenkung ist die innere Schicht zunächst deutlich dünner als die äußere, im weiteren Verlauf gleichen diese sich bis zum Austritt jedoch an.

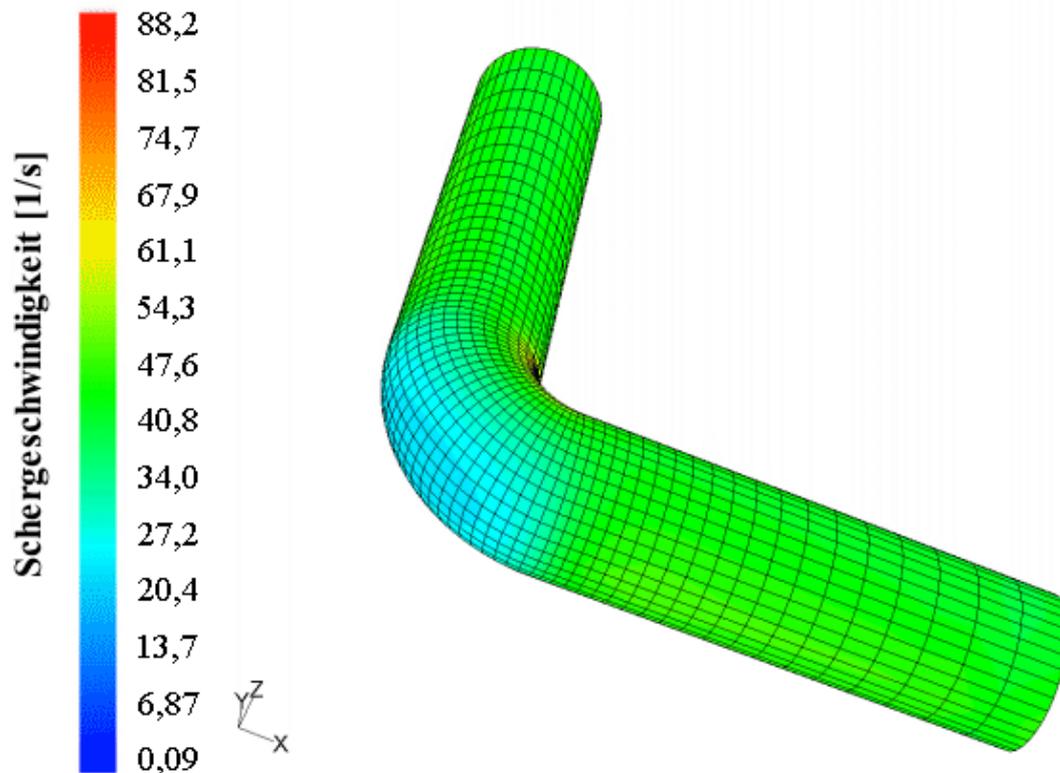


Abbildung 5-13 Wandschergeschwindigkeiten an einer 90°-Umlenkung

Eine bessere Information zum Schichtdickenverlauf über den (halben) Umfang gibt Abbildung 5-14. Der Schnitt A-B liegt direkt in der Mitte der Umlenkung. Die Messwerte verdeutlichen wiederum, dass der innere Radius 7(B) mit einer Schichtdicke von 0,08 mm deutlich besser gespült wird, als der äußere Radius mit einer verbliebenen Schichtdicke 1(A) von 0,331 mm. Über den Umfang nimmt die Schicht von Ort 7(B) zu Ort 1(A) stetig zu.

Die annähernd lineare Zunahme der Randschichtdicke ist in Abbildung 5-15 noch einmal in grafischer Form dargestellt. Zusätzlich ist in derselben Abbildung der entsprechende Verlauf der Wandschergeschwindigkeit über dem Winkel (proportional zum Bogenmaß) aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen Wandschergeschwindigkeiten bzw. -schubspannungen und dem Spülverhalten wird wiederum bestätigt.

Der direkt aus diesem Diagramm ableitbare Zusammenhang zwischen Schichtdicke X [mm] zum Zeitpunkt t und stationärer Wandschergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ [1/s] kann mittels

folgender Potenzfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9736$ approximiert werden:

$$X = 1,5984 \cdot \dot{\gamma}^{-1,0927} \quad (\text{Gl.5.1})$$

Ca. 45 mm hinter der Umlenkung, in dem in Abbildung 5-14 als Schnitt C-D dargestellten Querschnitt, herrscht über den gesamten Umfang bereits wieder eine homogene Wandschergeschwindigkeit und auch die Randschichtdicke ist wieder relativ gleichmäßig.

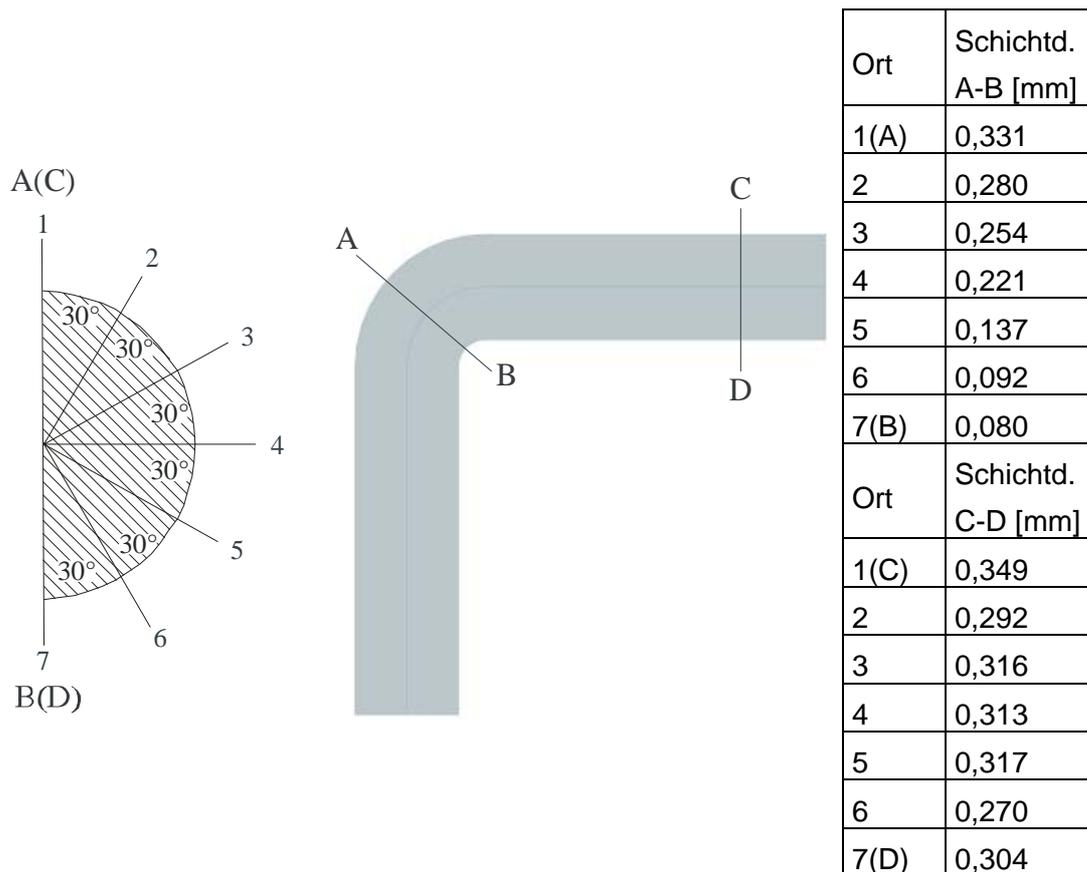


Abbildung 5-14 Randschichtdicke im Querschnitt

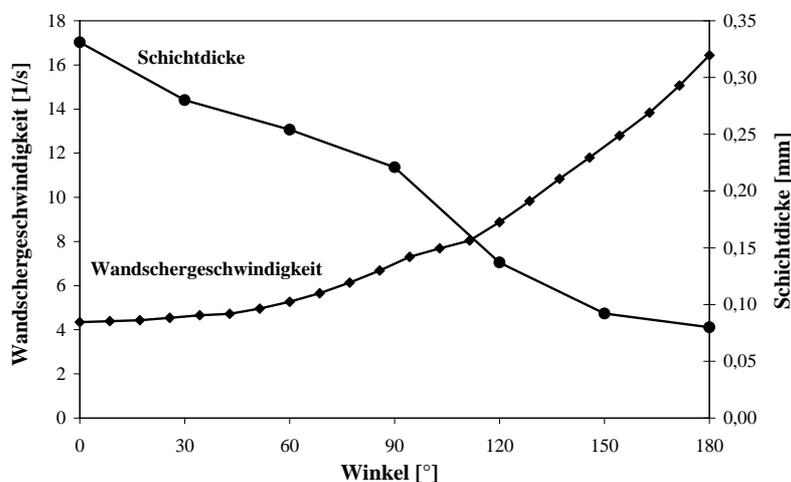


Abbildung 5-15 Wandschergeschwindigkeit und Schichtdicke über dem halben Umfang

5.2.1 Optimierung einer 90° Umlenkung mit ovalem Querschnitt

Bei der Auslegung von Blasfolienwerkzeugen mit horizontalem (radialem) Wendelverteiler haben die Druckverluste im Werkzeug eine sehr viel höhere Priorität als bei den konzentrischen Wendelverteilerwerkzeugen. Die auf die Trennebene der Scheibenpakete projizierten Drücke verursachen, ähnlich wie bei Spritzgießwerkzeugen, hohe Kräfte, die die Werkzeugscheiben auseinander drücken. Diese Kräfte müssen sehr aufwendig mit zahlreichen Schrauben aufgefangen werden, um auch bei höheren Drücken (> 400 bar) die Dichtigkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden bei derartigen Werkzeugen zur Schmelzevorverteilung keine Kanäle mit rundem Querschnitt, sondern mit einem wie in Abbildung 5-16 dargestellten näherungsweise ovalen oder auch doppelt wappenförmigen Querschnitt verwendet. Bei gleicher Querschnittsfläche der Kanäle ist die in die Werkzeugtrennebene projizierte Fläche kleiner, es entstehen also geringere Kräfte.

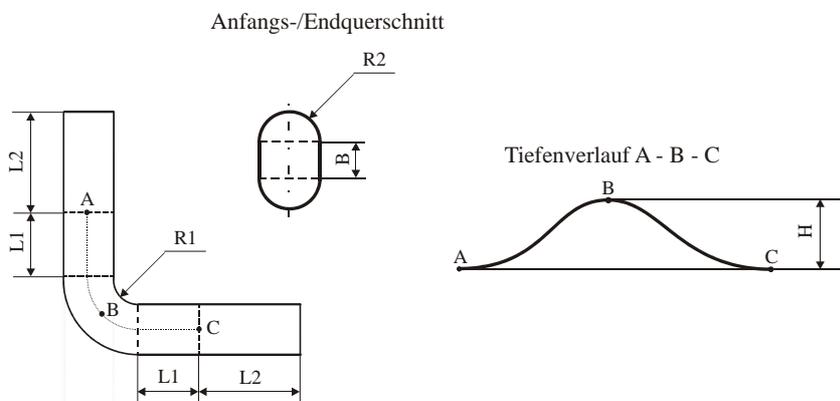


Abbildung 5-16 Geometrie der ovalen Umlenkung

Aus strömungsmechanischer Sicht und auch in Bezug auf das Verweilzeitspektrum sind derartige ovale Querschnitte auf jeden Fall ungünstiger als runde. Das Verhältnis der Fließkanaloberfläche zum Volumen ist schlechter.

Die in Abbildung 5-17 dargestellten Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass die Wandschergeschwindigkeiten am Grund der Kanäle deutlich geringer sind als an den Seitenflächen. Eine 90°-Umlenkung eines derartigen Querschnitts führt nun, ähnlich wie bei einer Umlenkung mit kreisrundem Querschnitt, in dem in Abbildung 5-18 mit "3" gekennzeichneten Bereich zu den geringsten Wandschergeschwindigkeiten.

Die Fertigung derartigen ovalen Kanäle erfolgt bei Horizontal-Verteilerwerkzeugen relativ einfach in der Trennebene mittels Fingerfräasers mit einem runden Kopf, der teilweise mit dem Schaft in das Werkstück eintaucht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Idee ist nun, den Fräser im Verlauf der Umlenkung kontinuierlich aus dem Werkstück herauszuziehen, um ihn dann ab der Mitte der Umlenkung wieder bis auf Ursprungtiefe eintauchen zu lassen. Hierzu wurde als Tiefenverlauf, wie in Abbildung 5-16 dargestellt, eine Sinusfunktion gewählt, da diese sehr fließende und strömungsgünstige Querschnittsüber-

gänge ermöglicht. Gemäß Abbildung 5-16 wird bei Punkt A begonnen, den Fräser herauszuziehen, bei Punkt B hat er seine minimale Eintauchtiefe erreicht und bei Punkt C wieder seine Ausgangstiefe erlangt.

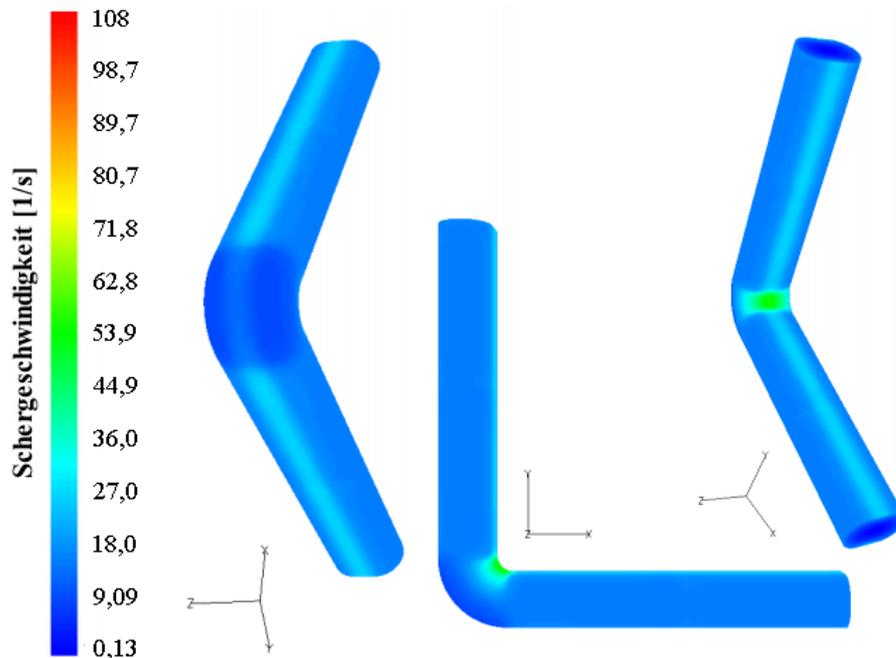


Abbildung 5-17 Wandschergeschwindigkeiten an einer 90°-Umlenkung mit ovalem Querschnitt (verschiedene Ansichten)

Im Rahmen von numerischen Strömungssimulationen wurde nun über Parametervariationen systematisch der Einfluss der in Abbildung 5-16 dargestellten Geometrieparameter auf die Wandschergeschwindigkeiten untersucht. Die Parameter der 14 einzelnen Geometrien sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Der innere Radius R_2 betrug in allen Simulationen 8 mm, die Breite $B = 7,069$ mm. Damit betrug das Querschnittsverhältnis $(2 \cdot R_2 + B)/(2 \cdot R_2)$ des Kanals 1:1,442. Eine Höhe von $H = 3,5345$ mm bedeutet beispielsweise, dass der Kanal genau in der Mitte der Umlenkung einen kreisrunden Querschnitt mit dem Radius R_2 hat. Bei $H = 0$ findet überhaupt keine Verkleinerung des Querschnitts statt. Eine Geometrie mit $H = 3,5345$ mm ist z. B. in Abbildung 5-18 zu erkennen. Eine weitere Verjüngung des Kanals ist nicht sinnvoll, da der Querschnitt sonst zu einer Art Ellipse werden würde. L_2 wurde so angepasst, dass die Geometrie wegen einer Vergleichbarkeit der Druckverluste immer die gleichen äußeren Abmaße ($L_1 + L_2 + R_1 + 2 R_2 = 108$ mm) besaß.

Tabelle 5-1 Geometrieparameter (alle Maße in [mm]).

	L ₁	L ₂	R ₁	R ₂	H	B
Geometrie 1	0	87	5	8	0	7,069
Geometrie 2	50	37	5	8	1,767	7,069
Geometrie 3	25	62	5	8	1,767	7,069
Geometrie 4	12,5	74,5	5	8	1,767	7,069
Geometrie 5	50	37	5	8	3,5345	7,069
Geometrie 6	25	62	5	8	3,5345	7,069
Geometrie 7	12,5	74,5	5	8	3,5345	7,069
Geometrie 8	50	39	3	8	3,5345	7,069
Geometrie 9	25	64	3	8	3,5345	7,069
Geometrie 10	12,5	76,5	3	8	3,5345	7,069
Geometrie 11	50	32	10	8	3,5345	7,069
Geometrie 12	25	57	10	8	3,5345	7,069
Geometrie 13	12,5	69,5	10	8	3,5345	7,069
Geometrie 14	10	72	10	8	3,5345	7,069

Die isotherme Simulation wurde wiederum mit der CFD-Software *Polyflow*[®] durchgeführt. Als Randbedingung wurden InkompRESSibilität des Fluids, Wandhaftung und ein vollständig ausgeprägtes Strömungsprofil am Eintritt sowie ein Durchsatz von 27 kg/h angenommen. Die Materialdaten entsprachen denen von Hostalen GM 9255 F2 (siehe Anhang) bei einer Temperatur von 190°C. Zum Vergleich des Spülverhaltens der einzelnen Geometrien wurden die Wandschergeschwindigkeiten an den vier in Abbildung 5-18 dargestellten Stellen herangezogen.

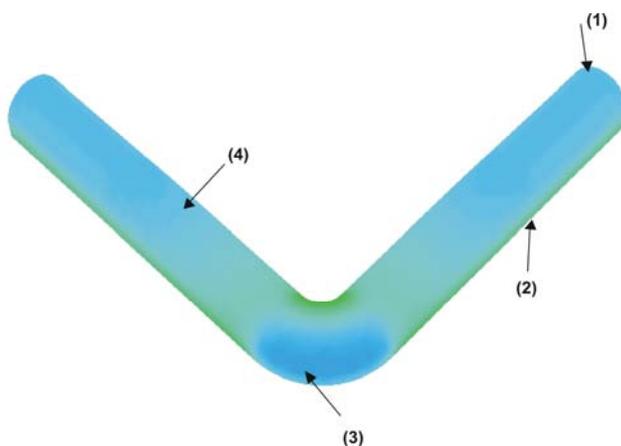


Abbildung 5-18 90°-Umlenkung (eingefärbt nach Wandschergeschwindigkeit) mit Stellen signifikanter Wandschergeschwindigkeit

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zu den einzelnen Geometrien sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Zunächst sollen die Effekte der Querschnittsveränderung und des

Beginns der Verjüngung bei konstantem Radius $R_1 = 5$ mm anhand der Geometrien 1 bis 7 (Tabelle 5-1 und 5-2) systematisch beurteilt werden. Bei konstantem Radius $R_1 = 5$ mm korreliert der Druckverlust Δp sehr stark mit dem Wert H für die Querschnittsverjüngung. Ebenso ist jedoch eine eindeutige Abhängigkeit zu den Längen L_1 bzw. L_2 zu erkennen. Je kürzer die Fließkanallänge mit reduziertem Querschnitt ist, also je kürzer L_1 , umso geringer ist der Druckverlust Δp . Dabei wirkt sich die Verkleinerung der Länge L_1 von 50 mm auf 12,5 mm bei einer Höhe von $H = 3,5345$ mm doppelt so stark auf den Druckverlust aus, wie bei $H = 1,767$ mm.

Tabelle 5-2 Simulationsergebnisse zu den einzelnen Geometrien

	Δp [bar]	V_{mx} [m/s]	$\dot{\gamma}_{max}$ [1/]	$\dot{\gamma}_1$ [1/]	$\dot{\gamma}_2$ [1/]	$\dot{\gamma}_3$ [1/]	$\dot{\gamma}_4$ [1/]	$\dot{\gamma}_1/\dot{\gamma}_2$ [-]	$\dot{\gamma}_1/\dot{\gamma}_3$ [-]	$\dot{\gamma}_1/\dot{\gamma}_4$ [-]	$\dot{\gamma}_2/\dot{\gamma}_3$ [-]
Geom. 1	27,73	0,057	55,66	14,93	23,00	8,44		65%	177%		273%
Geom. 2	29,65	0,069	70,46	14,03	23,10	11,88	16,35	61%	118%	86%	194%
Geom. 3	28,91	0,069	69,36	14,52	23,00	11,95	13,36	63%	122%	109%	192%
Geom. 4	28,59	0,068	69,53	14,49	23,12	11,74	12,62	63%	123%	115%	197%
Geom. 5	32,51	0,087	88,35	14,54	23,20	15,93	15,47	63%	91%	94%	146%
Geom. 6	30,74	0,087	89,99	14,32	22,80	16,52	12,63	63%	87%	113%	138%
Geom. 7	30,21	0,091	110,98	14,54	22,90	16,72	11,13	63%	87%	131%	137%
Geom. 8	32,52	0,088	116,43	14,51	22,99	14,46	13,55	63%	100%	107%	159%
Geom. 9	30,76	0,088	119,81	14,56	22,96	14,85	12,62	63%	98%	115%	155%
Geom. 10	30,45	0,095	150,10	14,51	22,79	16,96	10,98	64%	86%	132%	134%
Geom. 11	32,45	0,085	62,38	14,40	22,95	19,32	13,47	63%	75%	107%	119%
Geom. 12	30,68	0,085	62,89	14,63	22,91	18,43	12,97	64%	79%	113%	124%
Geom. 13	29,94	0,086	71,00	14,64	23,05	20,33	11,87	64%	72%	123%	113%
Geom. 14	29,38	0,086	93,43	14,88	22,98	20,15	10,55	65%	74%	141%	114%

Die Korrelation zwischen der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ und der Höhe H sowie den Längen L_1 bzw. L_2 ist mit einem Korrelationskoeffizienten von $\rho = 0,993$ für die Schergeschwindigkeit eindeutig. Während bei $H = 1,767$ mm kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ und den Längen L_1 bzw. L_2 zu erkennen ist, bewirkt bei $H = 3,5345$ mm eine Verkürzung von $L_1 = 50$ mm auf 12,5 mm eine Erhöhung der Schergeschwindigkeit um 5 %.

Als Nächstes soll bei konstanter Höhe $H = 3,5345$ mm anhand der Geometrien 5 bis 14 der Einfluss der Länge L_1 bzw. L_2 und des Radius R_1 auf den Druckverlust sowie die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$, die nun in der Symmetrieebene liegt, analysiert werden. Während sich der Radius R_1 nur sehr gering auf den Druckverlust auswirkt, bewirkt eine Ver-

kürzung von L_1 von 50 mm auf 12,5 mm eine Reduzierung des Druckverlustes um ca. 7,5 %. Auf die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ hat der Radius R_1 hingegen einen deutlichen Einfluss. Bei einer Länge von $L_1 = 50$ mm bewirkt die Vergrößerung des Radius von 3 mm auf 10 mm einen Anstieg der Schergeschwindigkeit um 33 %, während die Steigerung bei $L_1 = 12,5$ mm nur ca. 20 % beträgt.

Über alle Geometrien (1 bis 14) betrachtet, ist der Einfluss der Höhe H auf den Druckverlust als ähnlich signifikant zu bewerten, wie der Längen L_1 bzw. L_2 . Der Radius R_1 spielt hier kaum eine Rolle. Auf die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ hat die Höhe H einen noch größeren Einfluss als der Radius R_1 . Der Einfluss der Längen L_1 bzw. L_2 ist als nur sehr gering zu bewerten.

Aus verfahrenstechnischer Sicht können zwei Forderungen formuliert werden: Zum einen die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ zu erhöhen, zum anderen den Druckverlust Δp aber gleichzeitig möglichst gering zu halten. Aus den zuvor dargestellten Zusammenhängen folgt, dass L_1 zu minimieren und R_1 zu maximieren sind. Bei H muss ein Kompromiss zwischen Druckverlust und Steigerung der Schergeschwindigkeit gefunden werden.

Unter diesen Gesichtspunkten wäre z. B. Geometrie 13, die in Abbildung 5-19 dargestellt ist, als geeignet anzusehen. Zu überlegen ist jedoch, ob es wirklich erforderlich ist, dass die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_3$ höher ist als die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_1$ im geraden Rohrabschnitt, wie es bei Geometrie 13 der Fall ist. Im Sinne einer Reduzierung des Druckverlustes könnte H z. B. noch geringfügig verkleinert werden. Angemerkt sei noch, dass bei einer relativ abrupten Querschnittsverjüngung, wie sie bei einem Wert von $L_1 \leq 12,5$ mm vorliegt, die Einlaufdruckverluste, Dehnströmungen und viskoelastischen Effekte einen erkennbaren Einfluss auf die Strömung haben werden. Diese Effekte wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

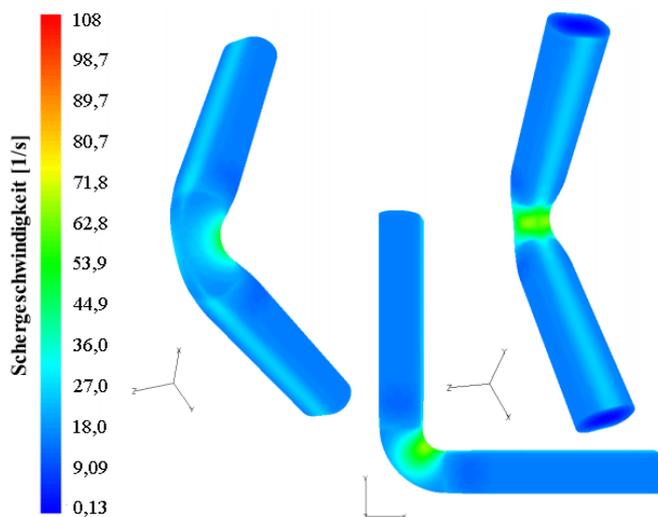


Abbildung 5-19 Wandschergeschwindigkeiten Geometrie 13

5.2.2 Automatisierte numerische Optimierung einer 90°-Umlenkung

Aus mechanischer Sicht ist die Strömung durch ein gekrümmtes Rohr um einiges komplexer als durch ein Gerades. Wie bereits erläutert, herrschen in einem Rohrkrümmer Kräfte, die das Geschwindigkeitsmaximum in Richtung des Krümmungsinneren verschieben, was entsprechende Auswirkungen auf die Wandschergeschwindigkeiten hat. Dies führt zu den besagten Spülproblemen an der äußeren Kanalwand.

Die meisten Studien zum Thema "Strömungen durch gekrümmte Rohre" haben die Verringerung des Druckverlustes als Ziel der Optimierung. Andere wiederum behandeln z. B. die Reduzierung von Cholesterinablagerungen in menschlichen Arterien wie der Aorta, die extreme Krümmungen besitzt [Ped]. Abbildung 5-20 zeigt den Aufbau eines in den 60'er Jahren durchgeführten Experiments mit dem Ziel, den Strömungswiderstand eines Rohrkrümmers unter Anwendung von Evolutionsstrategien (ES) zu verringern [Re00]. Zur Messung der Differenz zwischen zwei Evolutionsschritten wurden zwei von Pressluft durchströmte ($Re = 68.000$) Kunststoffschläuche verwendet, die jeweils durch verschiebbare Stangen fixiert waren. Das Ergebnis der Optimierung ist im rechten Teil der Abbildung 5-20 dargestellt und verfügt über einen um 2 % geringeren Strömungswiderstand als die Ausgangskontur (Start) gleichen Durchmessers (Viertelkreis). Mit einem L/D -Verhältnis von 31 ist diese Kontur jedoch wohl eher für Pipelines geeignet. Die gleiche Optimierungsaufgabe wurde z. B. mit einem ähnlichen Ergebnis von einem Mitarbeiter der Firma *Fluent Inc.* durch Kopplung einer kommerziellen CFD-Software mit Evolutionsalgorithmen gelöst [Bud03].

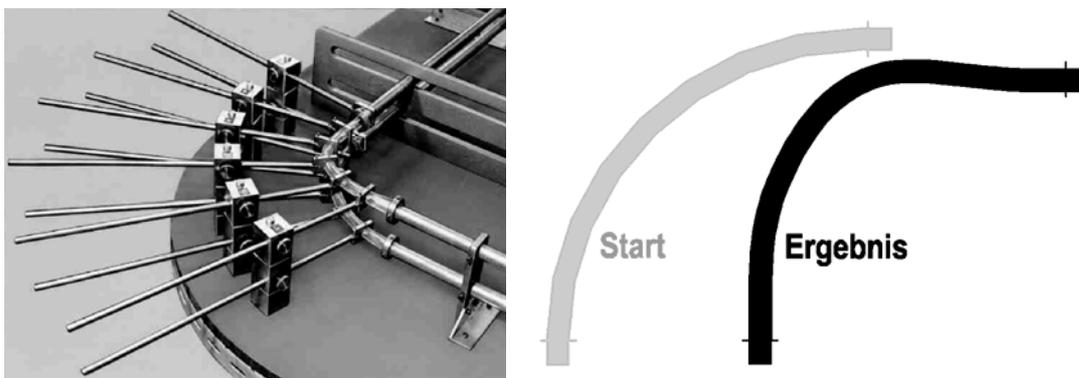


Abbildung 5-20 Optimierung eines 90°-Krümmers unter Anwendung von Evolutionsstrategien [Re00]

Im Rahmen dieser Arbeit (siehe auch [Nie04a, Riv04]) wurde eine iterative Methode zur automatischen Optimierung einer 90°-Umlenkung entwickelt. Ziel war es, entlang der gesamten Wand eine möglichst homogene Wandschergeschwindigkeit zu erreichen. Dies

wurde durch eine Modifikation der Wandkontur in Abhängigkeit von den herrschenden Wandschergeschwindigkeitsgradienten erreicht. Aus Gründen der Vereinfachung musste das Problem jedoch auf einen zweidimensionalen Fall reduziert werden. Hierdurch lassen sich zunächst nur die Verhältnisse in einem Bogenspalt sehr großer Breite simulieren, wobei der Wandeinfluss weitestgehend vernachlässigt wird [Mi91].

Die FEM-Simulation an sich wurde mit der kommerziellen CFD-Software *Polyflow*[®] (*Fluent Inc.*) durchgeführt. Der Optimierungszyklus bestand aus vier Schritten: Analyse, Optimierung, Netzgenerierung und Simulation (Abbildung 5-21).

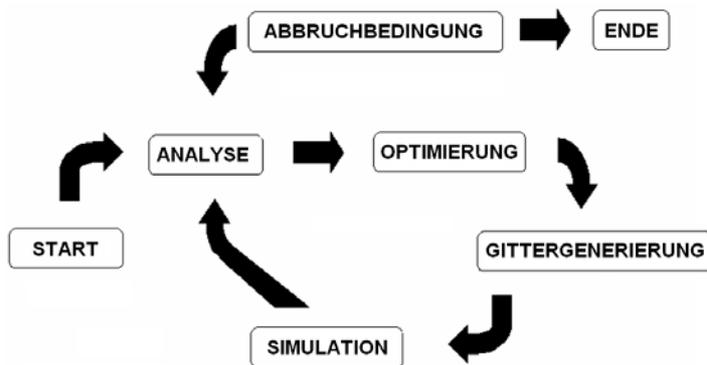


Abbildung 5-21 Schema der iterativen Optimierungsschleife

Nach einer allerersten Berechnung der Strömungszustände der Start-Geometrie werden die diskreten Schergeschwindigkeitswerte in den FE-Knoten in eine Datenbank geschrieben und von einem externen *Visual-Basic*-Programm analysiert. Der Algorithmus wählt zunächst nach bestimmten Kriterien einzelne Knoten entlang beider Wände aus. Alle Wandknoten, deren Schergeschwindigkeit mehr als einen bestimmten Betrag von der Ziel-Schergeschwindigkeit abweicht, werden in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeitsdifferenz um eine berechnete Strecke entlang eines vorbestimmten Vektors verschoben. Basierend auf diesen Berechnungen wird automatisch ein neues FEM-Netz erzeugt und die Simulation startet erneut. Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis das Abbruch- oder auch Konvergenzkriterium erfüllt ist. Dieses besagt, dass die Summe aller Veränderungen der Schergeschwindigkeit in den einzelnen Wandknoten in Relation zur letzten Iteration einen definierten Betrag unterschreitet.

Randbedingungen und Einschränkungen

Der erste Schritt in jeder FEM-Simulation ist immer die Erstellung und Vernetzung der zu betrachtenden Geometrie. In diesem Fall wurde der kommerzielle Preprocessor *Gambit*[®]

der Fa. *Fluent Inc.* zur Erzeugung des Netzes der zweidimensionalen 90°-Umlenkung verwendet. Das strukturierte Gitter mit 2.900 Rechteckelementen ist in Abbildung 5-22 dargestellt.

Das zweidimensionale Berechnungsgebiet der 90°-Umlenkung besteht aus drei unterschiedlichen Grenzen (Boundary Sets, *BS*), die in Abbildung 5-22 dargestellt sind: *BS1* (Inflow), *BS2* (Outflow) and *BS3* (Wall). Die Randbedingung *BS3* repräsentiert die Wandhaftung der Schmelze, charakterisiert durch normale (v_n) und tangentiale (v_t) Geschwindigkeiten von Null. An der Austrittsfläche (*BS2*) betragen die Normalkräfte (f_n) und tangentialen Geschwindigkeiten (v_t) Null. Für die Eintrittsfläche wurde eine spezielle Randbedingung gewählt, bei der aus dem auf die Kanaltiefe bezogenen Volumenstrom $\dot{V}_{2D} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m s}$ ein vollständig entwickeltes Strömungsprofil errechnet wird. Alle Berechnungen wurden für eine laminare, stetige, isotherme und inkompressible Strömung mit den strukturviskosen Materialparametern des PE 150 bei 190°C (Materialkennwerte siehe Anhang) durchgeführt. Die Abmessungen des Strömungsgebietes können Abbildung 5-23 entnommen werden.

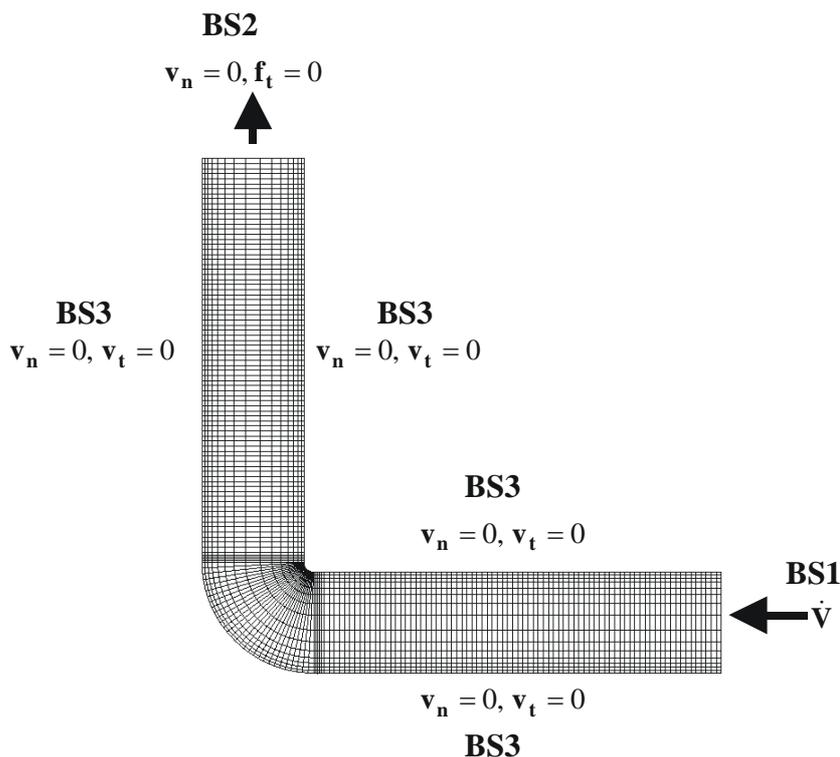


Abbildung 5-22 Berechnungsgebiet mit Randbedingungen

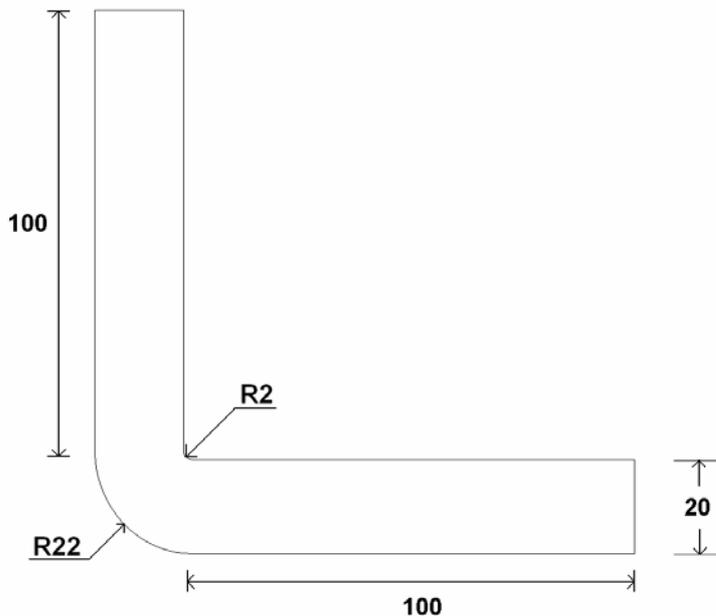


Abbildung 5-23 Abmessungen der zweidimensionalen Umlenkung in [mm]

5.2.3 Durchführung der Optimierung

Die eigentliche Optimierung wurde durch Verschiebung aller FE-Knoten an beiden Wänden vorgenommen. Dies bedeutet, dass so viele Freiheitsgrade wie FE-Knoten an den Wänden existieren. Nur die Knoten am Eintritt und am Austritt sind fix und definieren die geometrischen Randbedingungen der Optimierung. Während der gesamten Optimierung der Netzgeometrie werden die Randbedingungen sowie die Materialparameter nicht verändert.

Nachdem die Strömungszustände in der Start-Geometrie mit der CFD-Software *Polyflow*[®] berechnet wurden, wird der Ergebnis-Datensatz in Form einer CSV-Datei (Comma Separated Values) nach *MS-Excel*[®] exportiert. Die Analyse, Optimierung und Berechnung der neuen Geometrie für die nächste Iteration erfolgt in *Excel*[®] über die Programmiersprache *Visual Basic*. All die verschiedenen Programme, die für die Optimierung, die Geometrieerstellung, die Vernetzung, die Definition der Randbedingungen, die Berechnung und die Optimierung sind über eine Schnittstelle (Batch-Datei) gekoppelt, die den Datentransfer von einem Programm zum nächsten steuert. Hierdurch wird ein automatisierter Optimierungsprozess ermöglicht.

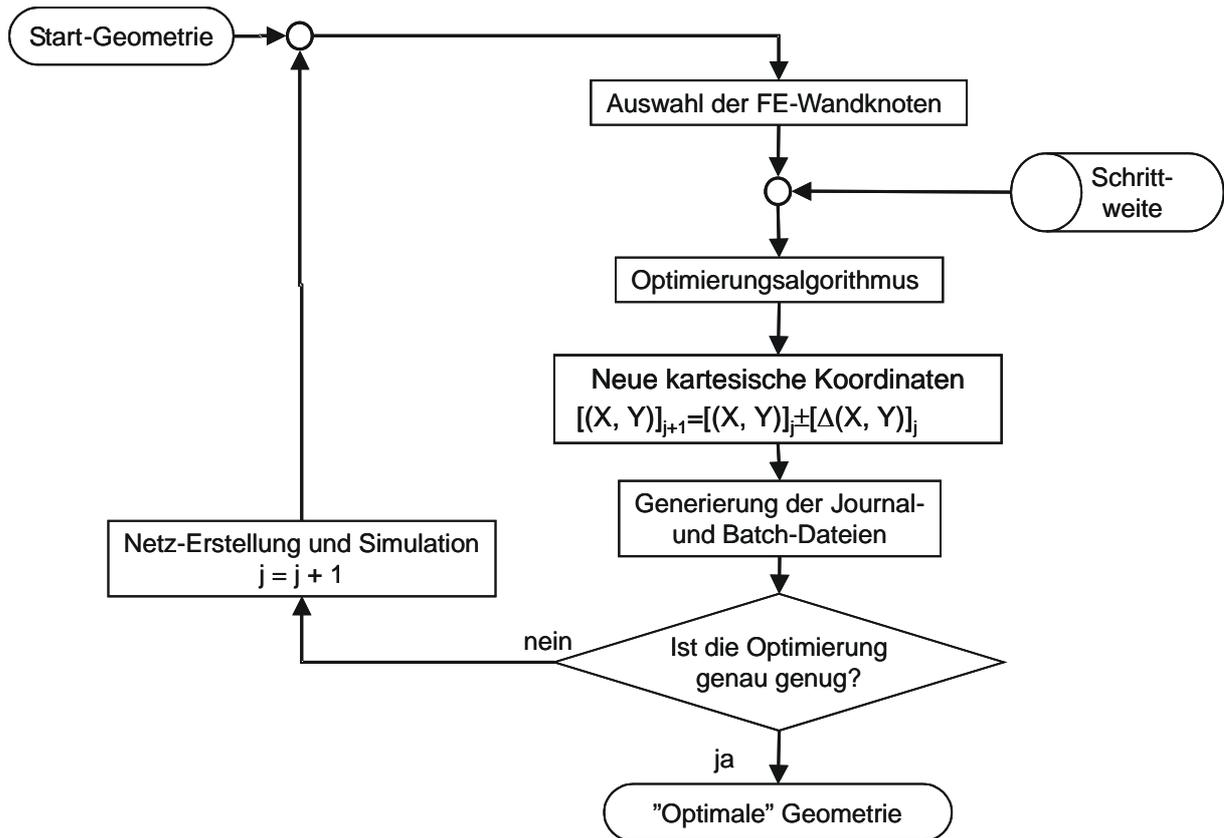


Abbildung 5-24 Flussdiagramm der Optimierung

Das eigentliche Ziel der Optimierung sind die Schergeschwindigkeiten in jedem einzelnen Wandknoten. Da die Optimierung durch Verschiebung der FE-Knoten realisiert wird, ist die Definition von zwei grundsätzlichen Kriterien für jede einzelne Iteration j erforderlich:

Minimierung der Schergeschwindigkeit an der inneren Wand

$$\dot{\gamma}_{Iteration(j)}^{innen} < \dot{\gamma}_{Iteration(j-1)}^{innen}$$

Maximierung der Schergeschwindigkeit an der inneren Wand

$$\dot{\gamma}_{Iteration(j)}^{außen} > \dot{\gamma}_{Iteration(j-1)}^{außen}$$

So lange die Schergeschwindigkeit in jedem einzelnen Wandknoten um einen bestimmten Betrag größer bzw. kleiner als die Ziel-Schergeschwindigkeit ist, verschiebt der Optimierungsalgorithmus diese Knoten. Das Flussdiagramm dieses iterativen Optimierungsprozesses ist in Abbildung 5-24 dargestellt.

Nachdem die CSV-Datei mit den Simulationsergebnissen nach *Excel* exportiert wurde, wählt der Optimierungsalgorithmus alle FE-Wandknoten aus, deren Schergeschwindigkeit um mehr als die so genannte modifizierte Standardabweichung σ_{mod} von der Ziel-Schergeschwindigkeit abweicht. Im Vergleich zu der bekannten Standardabweichung beinhaltet Gleichung 5.2 zusätzlich einen Verschiebungsfaktor sf zur Berechnung der modifizierten Varianz $\sigma_{mod.}^2$.

$$\sigma_{mod.}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{\gamma}_i - \dot{\gamma}_{Ziel})^2}{n \cdot sf} \quad (Gl.5.2)$$

Wie in Abbildung 5-25 dargestellt, vergrößert ein Verschiebungsfaktor $sf > 1$ die Anzahl der Knoten, die gleichzeitig in jedem Iterationsschritt verschoben werden. Dies ist nützlich, um die Optimierung zu beschleunigen.

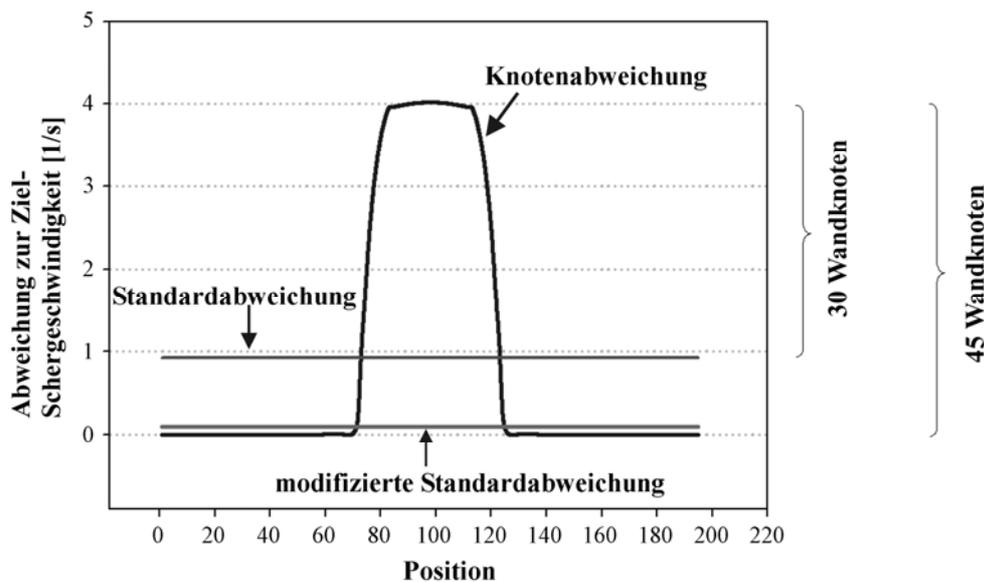


Abbildung 5-25 Einfluss des Verschiebungsfaktors sf auf die Anzahl der zu verschiebenden Knoten

Nachdem der Algorithmus festgelegt hat, welche Knoten verschoben werden sollen, berechnet ein weiterer Algorithmus die Richtung und die Strecke für die Verschiebung jedes einzelnen gewählten Knotens. Die Richtung wird, wie in Abbildung 5-26 dargestellt, anhand des angrenzenden Winkels zwischen dem Knoten und dem Pivot-Koordinatensystem ermittelt. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass sich alle Knoten entlang vorgegebener Vektoren bewegen. Außerdem können so alle denkbaren Geometrien dargestellt und kritische Verformungen der Netztopologie vermieden werden. Die Strecke für die Verschiebung wird für jeden Knoten anhand einer schergeschwindigkeitsabhängigen Funktion $f[(\dot{\gamma}_i, \dot{\gamma}_{i, arg et})]$ berechnet.

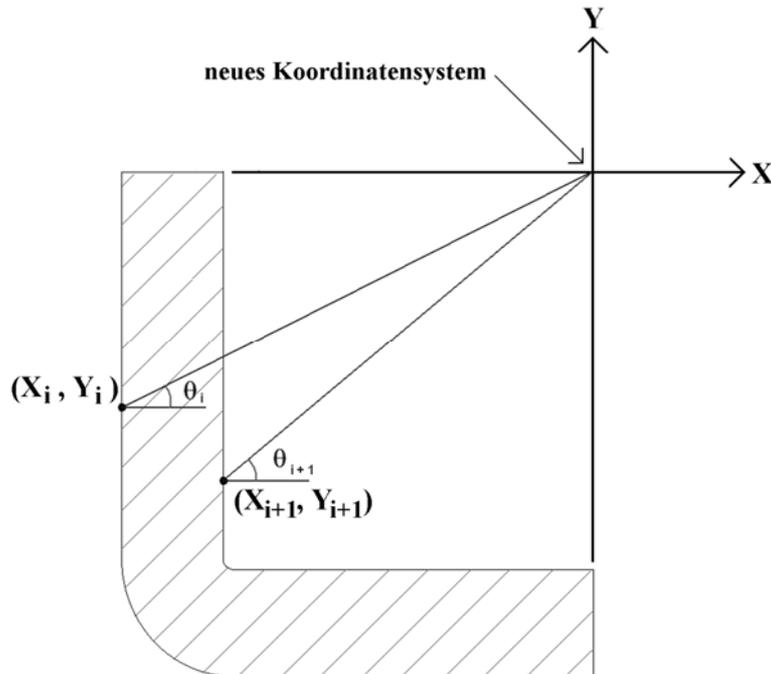


Abbildung 5-26 Polar-Koordinatensystem

Die neuen Koordinaten für jeden verschobenen Knoten werden wie folgt berechnet:

$$[(X, Y)]^{j+1} = [(X, Y)]^j \pm [\Delta(X, Y)]^j \quad (\text{Gl.5.3})$$

Eine der wichtigsten Regeln für die Knotenverschiebungen betrifft die Verschiebungsrichtung. Die Regel ist relativ einfach und besagt, dass an der inneren Wand alle Knoten mit einer Schergeschwindigkeit größer als die Ziel-Schergeschwindigkeit in Richtung des Koordinatensystems verschoben werden und umgekehrt (siehe Abbildung 5-26). Im Gegenzug werden alle Knoten an der äußeren Wand mit einer niedrigeren Schergeschwindigkeit als der Zielwert in Richtung des Koordinatenursprungs verschoben und umgekehrt.

5.2.4 Optimierungsergebnisse

Nach 599 Iterationen wurde die zweidimensionale Optimierung manuell gestoppt. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Schergeschwindigkeitsverteilung entlang beider Wände bereits einen zufriedenstellenden Zustand erreicht. Die charakteristischen Parameter der Optimierung sind in Abbildung 5-27 dargestellt. Im Vergleich zur Anfangsgeometrie konnte eine Verringerung der maximalen Wandschergeschwindigkeit um 60 % erreicht werden. Auf der anderen Seite stieg die maximale Geschwindigkeit innerhalb der Geometrie gleichzeitig um 2,7 %, während der Druckverlust um 3 % reduziert werden konnte.

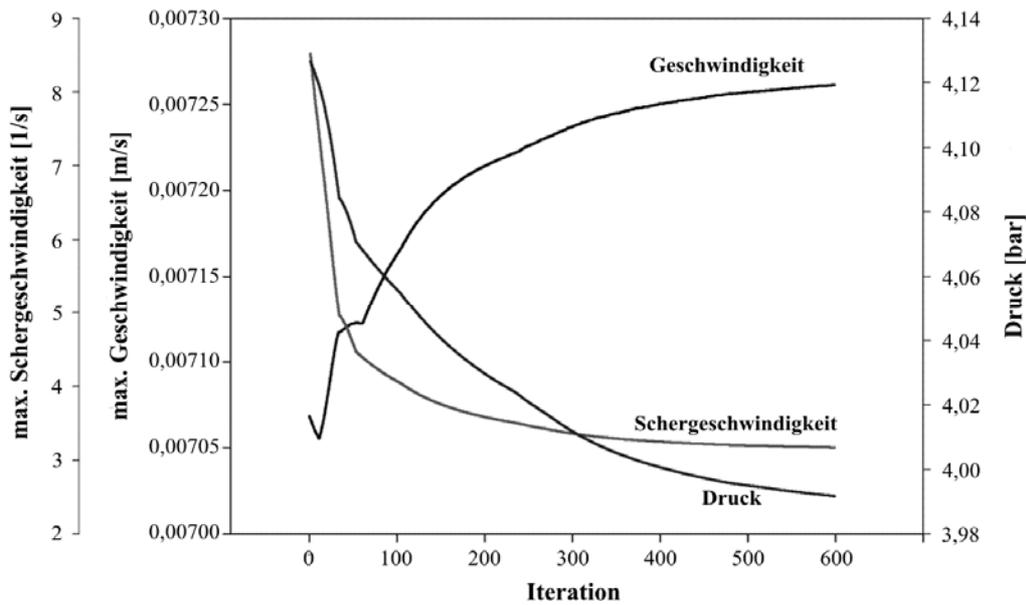


Abbildung 5-27 Maximale Wandschergeschwindigkeit, max. Geschwindigkeit und Druckverlust über der Anzahl an Iterationen

Abbildung 5-28 zeigt den Verlauf der maximalen (Außenwand) bzw. minimalen (Innenwand) Wandschergeschwindigkeit über allen Iterationen. Die minimale Schergeschwindigkeit an der Außenwand erreicht mit einer Abweichung von nur 7 % beinahe den Zielwert von 2,057 1/s. Die maximale Schergeschwindigkeit an der Innenwand nach 599 Iterationen weicht zwar ca. 35 % von der Ziel-Schergeschwindigkeit ab, konnte aber dennoch signifikant reduziert werden.

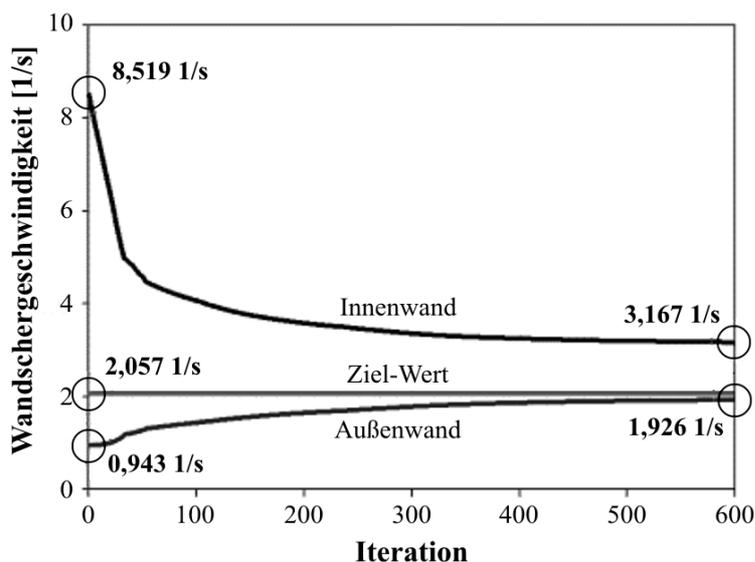


Abbildung 5-28 Max. Schergeschwindigkeit an der Innenwand und min. Schergeschwindigkeit an der Außenwand im Vergleich zur Ziel-Schergeschwindigkeit

Wie in Abbildung 5-29 dargestellt, sind der äußere und der innere Radius sehr viel größer als bei der Start-Geometrie. Natürlich ist wohl bekannt, dass eine Vergrößerung des inne-

ren Radius zu einer reduzierten Schergeschwindigkeit an der inneren Wand führt. Wäre die Optimierung nicht manuell gestoppt worden, hätte sich der innere Radius bis zu dem zwischen den beiden Rand-Eck-Knoten maximal möglichen Wert von 100 mm vergrößert.

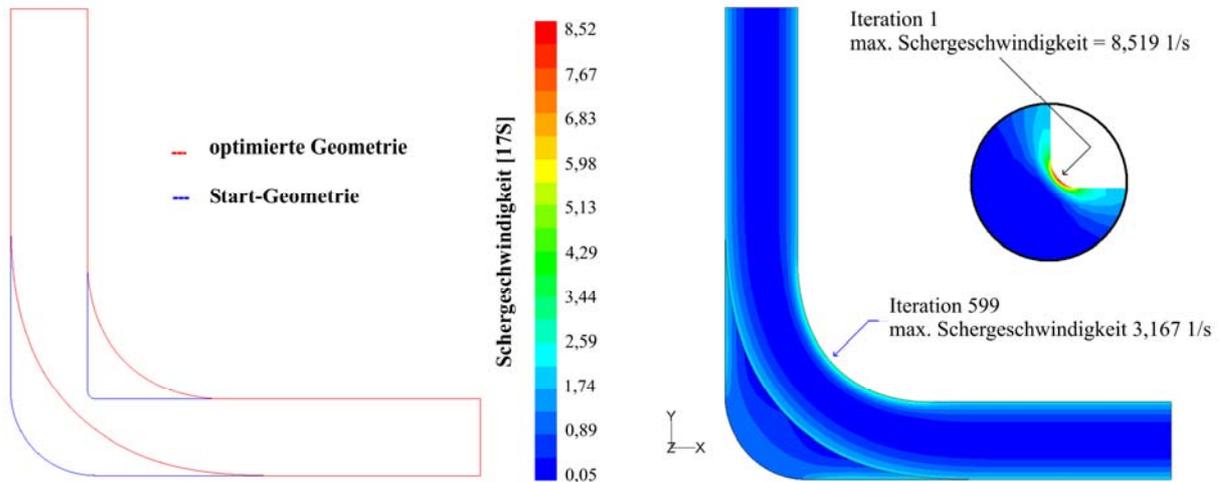


Abbildung 5-29 Vergleich der Start- und der optimierten Geometrie, Verbesserung der Wandschergeschwindigkeit

Abbildung 5-30 verdeutlicht, dass durch die Optimierung überdies im Bereich der Umlenkung eine Verengung des Querschnitts erzielt wird. In der Grafik dargestellt ist die Kanalbreite in gleichmäßig angeordneten Stützstellen (Position) entlang des Kanals. Ausgehend von einer Breite von 20 mm reduziert sich der Kanalquerschnitt bis hin zur Mitte der Kanallänge auf 18,56 mm, um dann wiederum auf 20 mm anzusteigen. Dies führt zu einer homogeneren Verteilung der Schergeschwindigkeit entlang der beiden Wände als bei einem Kanal mit konstantem Querschnitt und reduziert das Verweilzeitspektrum.

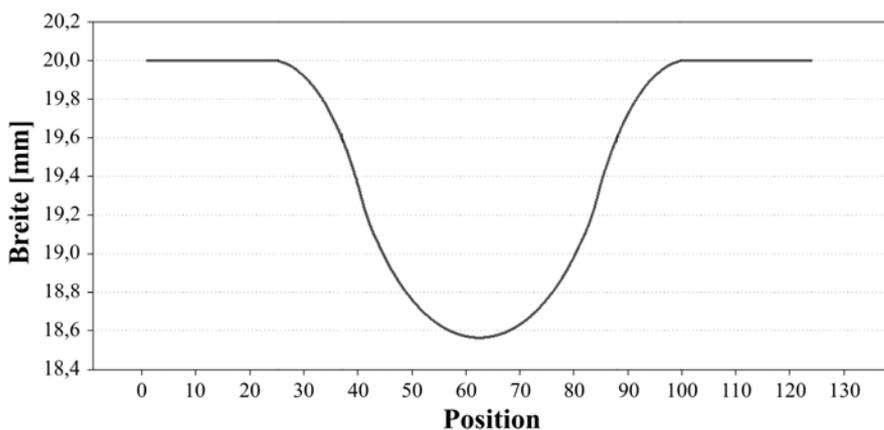


Abbildung 5-30 Kanalbreite entlang der Umlenkung

Weder die Innen- noch die Außenkontur lassen sich durch einen einzigen Kreisbogen mit konstantem Radius annähern. Hierzu sind in Abbildung 5-31 die Radien (R) der beiden Konturen über der Position, d.h. in den FEM-Knoten an den Wänden, dargestellt. Das

entsprechende Koordinatensystem ist ebenfalls aus den Abbildungen ersichtlich. Bei der Innenkontur sinkt der Radius zunächst leicht, um dann zum Mittelpunkt der Kurve hin über den Ausgangsradius hinaus anzusteigen. Bei der Außenkontur fällt der Radius nahezu parabelförmig zur Kurvenmitte hin ab. Beide Kurvenverläufe sind bezüglich des Kurvenmittelpunktes symmetrisch. Aus dem Verlauf dieser beiden Radien ergibt sich der in Abbildung 5-30 dargestellte Verlauf der Kanalbreite.

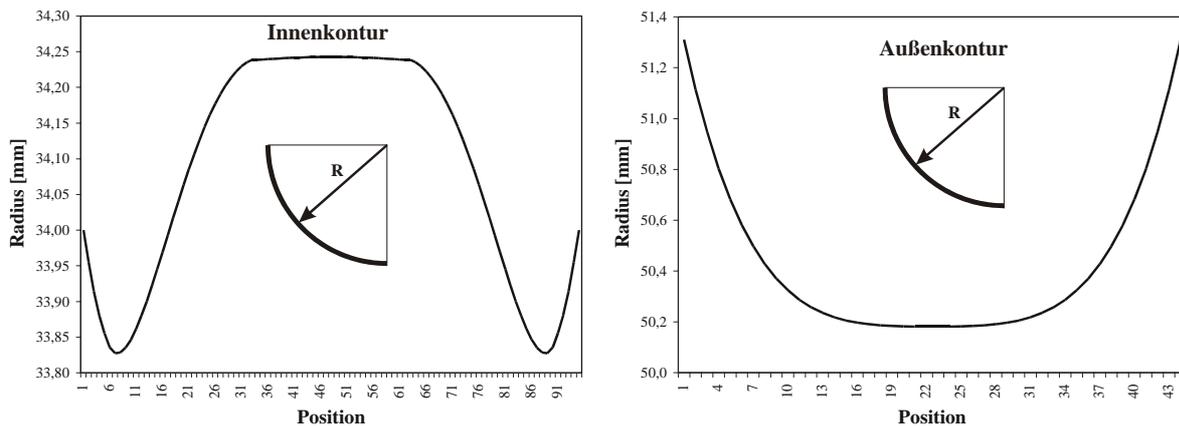


Abbildung 5-31 Radienverläufe der Innen- und Außenkonturen

In Abbildung 5-32 und 5-33 sind die Verläufe der Schergeschwindigkeiten entlang beider Wände sowohl für die Start- und für die Endgeometrie als auch für eine so genannte approximierte Geometrie dargestellt. Die angenäherte Geometrie stellt quasi eine Vereinfachung der optimierten Geometrie dar, indem aus dieser ein mittlerer Innenradius von 34 mm abgeleitet und der Umlenkungsquerschnitt bei konstant 20 mm gehalten wurde. Die Ergebnisse dokumentieren, dass es unter Verwendung des Optimierungsprogrammes möglich ist, die Schergeschwindigkeit an beiden Wänden gleichzeitig zu reduzieren bzw. zu erhöhen. Eine derart homogene Verteilung der Wandschergeschwindigkeit an der Außenkontur, wie sie Abbildung 5-33 dargestellt ist, ist mit einer vereinfachten (approx.) Geometrie nicht zu erreichen.

Wie eingangs dieses Kapitels dargestellt, hat diese Arbeit zum Ziel, das Verweilzeitspektrum einer dreidimensionalen 90°-Umlenkung zu optimieren. Zur Vereinfachung der Optimierungs-Algorithmen wurde zunächst ein zweidimensionaler Fall betrachtet. Der nächste Schritt ist nun, die so erzielten Ergebnisse auf den dreidimensionalen, realen Fall auszuweiten. Dies wurde erreicht, indem jeweils durch die gegenüberliegenden Wandknoten eine Kreisfläche senkrecht zur Strömungsrichtung gelegt wurde, und diese Flächen anschließend zu einer kontinuierlichen Geometrie verbunden wurden.

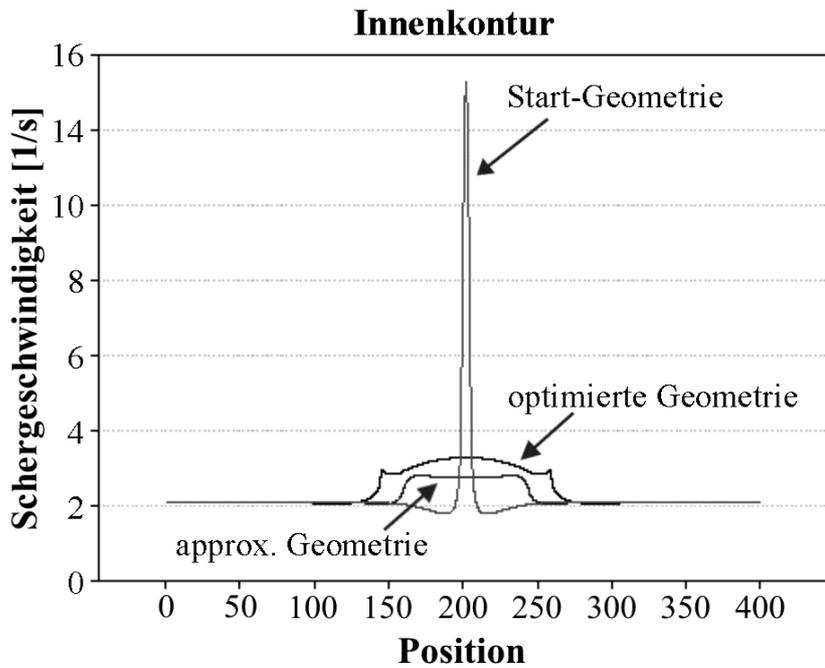


Abbildung 5-32 Wandschergeschwindigkeit entlang der Innenkontur der Umlenkung

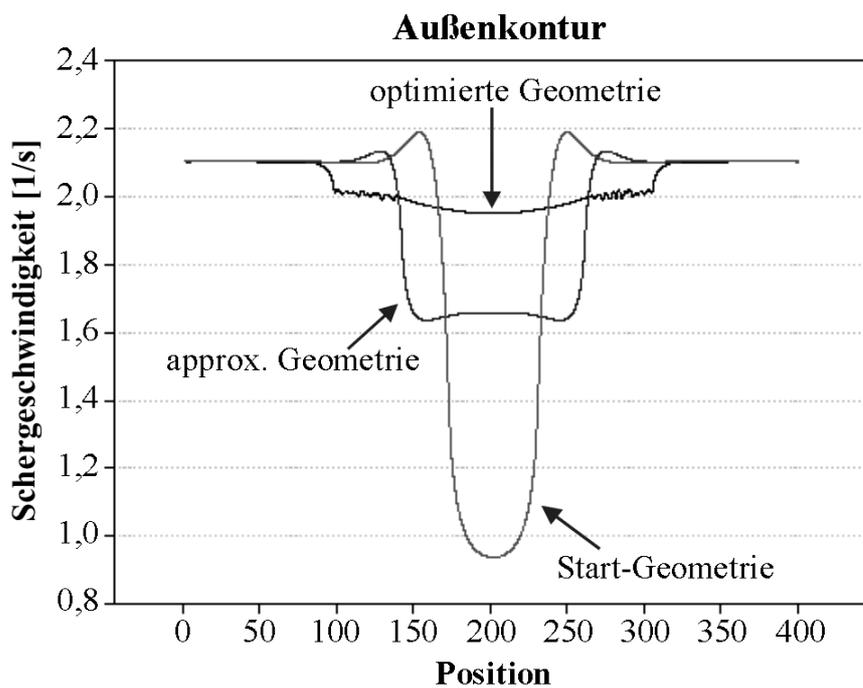


Abbildung 5-33 Wandschergeschwindigkeit entlang der Außenkontur der Umlenkung

In Abbildung 5-34 und 5-35 sind die Wandschergeschwindigkeiten für die Anfangsgeometrie und die optimierte Geometrie dargestellt. Auch für diese dreidimensionale Geometrie konnten die Wandschergeschwindigkeiten eindeutig verbessert werden. Leider ist der Druckverlust der optimierten Geometrie mit $23,18 \cdot 10^5$ Pa jedoch um 10 % größer als für die Anfangsgeometrie mit $21,08 \cdot 10^5$ Pa. Für eine dreidimensionale Umlenkung weist dies auf einen Konflikt zwischen den Zielen "homogene Wandschergeschwindigkeit" und

“möglichst niedrigen Druckverlust“ hin. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch die in Kapitel 5.2.1 dargestellten Optimierungen einer 90°-Umlenkung mit ovalem Ausgangsquerschnitt.

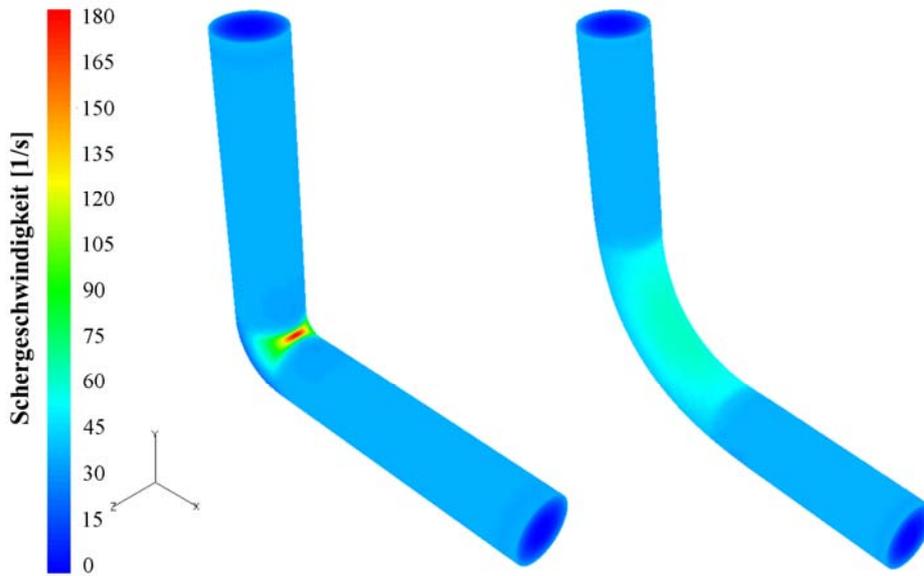


Abbildung 5-34 Vergleich der Wandschergeschwindigkeiten für eine typische und eine optimierte Umlenkung

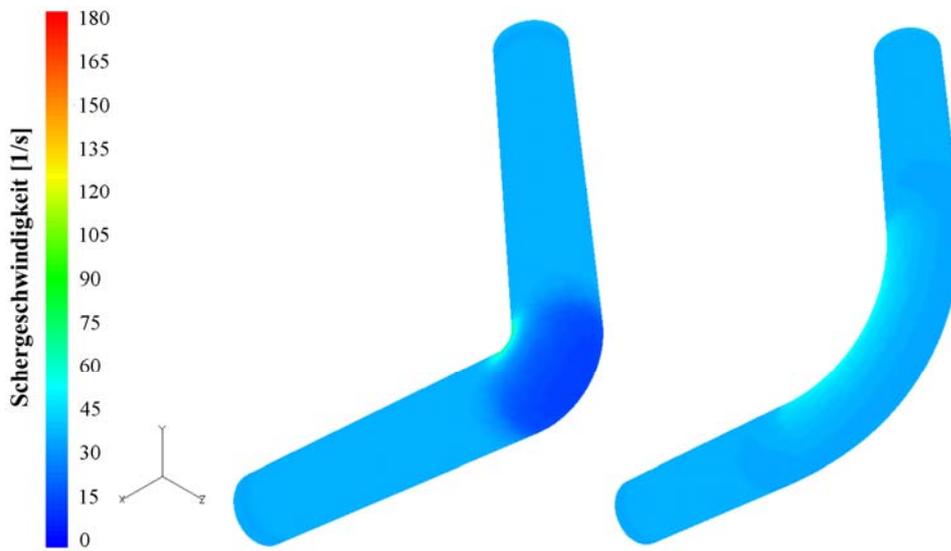


Abbildung 5-35 Vergleich der Wandschergeschwindigkeiten für eine typische und eine optimierte Umlenkung

5.2.5 Experimentelle Untersuchungen

Nachdem sich das in den vorangehenden Abschnitten beschriebene numerische Optimierungsverfahren als funktionstüchtig erwiesen hatte, war die Untersuchung einer optimierten 90°-Umlenkung in Spülversuchen der notwendige nächste Schritt.

Hierzu wurde zunächst eine zweidimensionale Optimierung unter folgenden Randbedingungen durchgeführt: Material PE-LD (LD 185 BW), Durchsatz 27 kg/h, Temperatur 190°C. Die in Abbildung 5-36 dargestellten Eckpunkte A bis D bildeten die geometrischen Randbedingungen und waren fix, d.h., sie konnten durch den Optimierungsalgorithmus nicht verschoben werden.

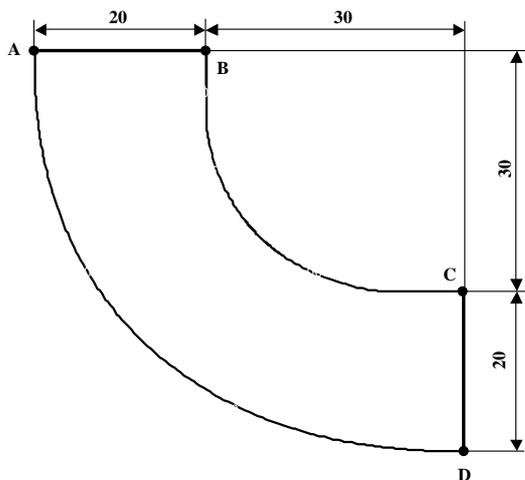


Abbildung 5-36 Kontur der optimierten Umlenkung mit Abmaßen

Abbildung 5-36 zeigt neben den geometrischen Verhältnissen auch das Ergebnis der zweidimensionalen numerischen Optimierung. Auch bei dieser Kontur lassen sich sowohl die äußere als auch die innere Wand nicht mit Kreisbögen mit konstantem Radius approximieren. Abbildung 5-37 verdeutlicht, dass der Querschnitt des Kanals (normal zur Kanalmitte) nahezu sinusförmig vom Eintritt (Position 0) bis hin zur Kanalmitte symmetrisch von 20 auf 18,92 mm abnimmt, um dann wieder auf 20 mm (Position 38) anzusteigen.

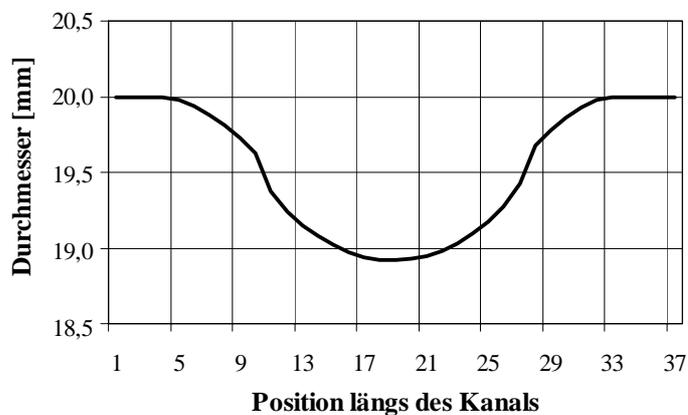


Abbildung 5-37 Durchmesser über der Kanallänge

Wie bereits beschrieben, wurden auch in diesem Fall die zweidimensionalen Optimierungsergebnisse auf den dreidimensionalen Fall übertragen. Die Geometrie und die Wandschergeschwindigkeiten der so optimierten 90°-Umlenkung sind in Abbildung 5-38 dargestellt. Die CNC-Daten für die Fertigung der Geometrie sind in Tabelle 10-5 angegeben.

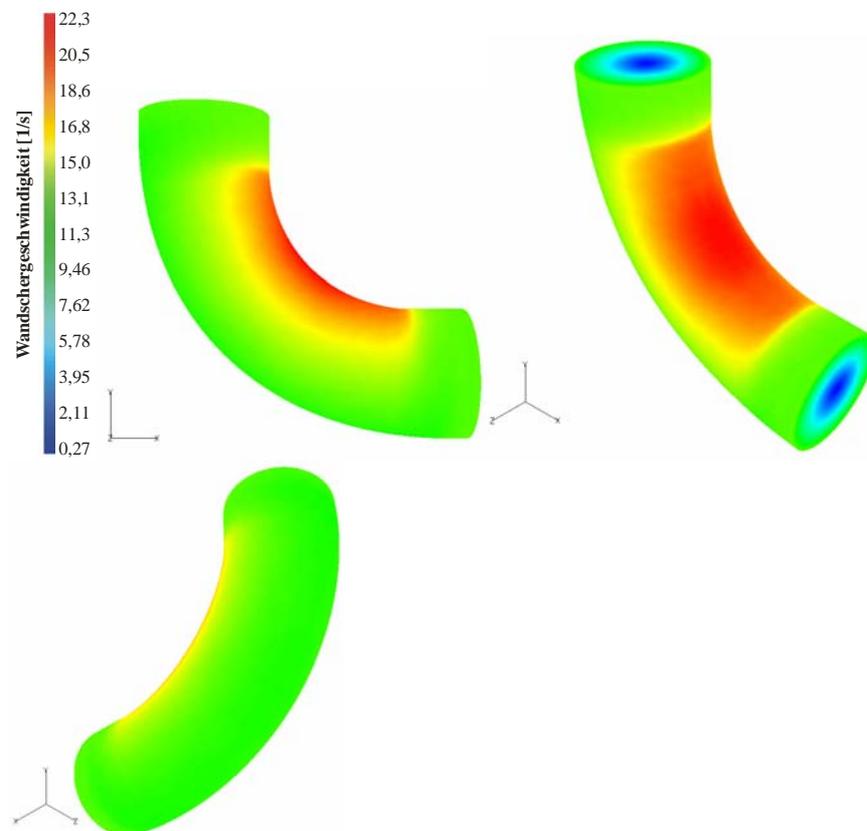


Abbildung 5-38 Wandschergeschwindigkeit der optimierten Geometrie

Während am inneren Radius eine erhöhte Wandschergeschwindigkeit zu beobachten ist, ist die Wandschergeschwindigkeit entlang der Außenkontur sehr homogen, was ja auch Ziel der Optimierung war.

Eine 90°-Umlenkung mit einem ungleichmäßigen Querschnittsverlauf, wie er in Abbildung 5-37 dargestellt ist, ist leider nur mit entsprechend großem Aufwand durch mehrzeiliges Fräsen herzustellen. Einzeiliges Fräsen würde die Fertigung stark vereinfachen. Dies würde dann aber bedeuten, dass kein ungleichförmiger Querschnitt mehr gefertigt werden könnte. Folgende Möglichkeiten wurden im Vergleich zu der optimierten Kontur simuliert: Optimierte Innenkontur in Verbindung mit einem konstanten Querschnitt von 20 mm sowie ein an die optimierte Innenkontur angepasster Innenradius von 21,5 mm, ebenfalls in Verbindung mit einem konstanten Querschnitt von 20 mm. Die entsprechenden Simulationsergebnisse sind in Abbildung 5-39 in Form der Wandschergeschwindigkeiten entlang der Innen- und der Außenkontur im Vergleich dargestellt.

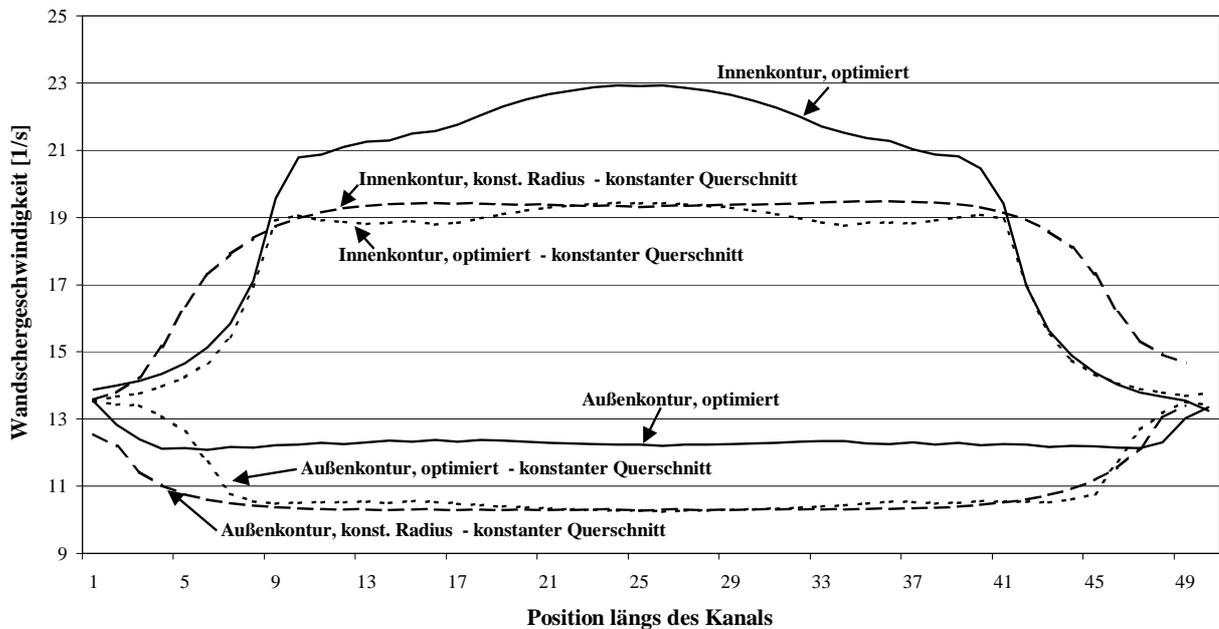


Abbildung 5-39 Vergleich der Wandschergeschwindigkeiten entlang der Innen- und Außenkonturen von zwei vereinfachten Geometrien zur optimierten Kontur

Es zeigt sich, dass bei der vollständig optimierten Geometrie an der Innenkontur die höchste Wandschergeschwindigkeit erzielt wird, was auch zu einer höheren Wandschergeschwindigkeit längs der Innenkontur führt. Maßgeblich für eine homogenere Verteilung der Wandschergeschwindigkeit längs des äußeren Radius ist also nicht nur der Verlauf der Innenkontur, sondern die Kombination desselbigen mit einem variablen Querschnitt. Analog zu den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Untersuchungen an einer anderen 90°-Umlenkung ist im direkten Vergleich zu Abbildung 5-9 in Abbildung 5-40 der Querschnitt eines Schmelzestranges dargestellt, der mittels eines abgebrochenen Spülversuches erzeugt wurde. Die blaue Grenzschicht entlang der Außenkontur nimmt gleichmäßig über der Länge ab und zeigt keinerlei Anstieg in der Mitte der Kontur.

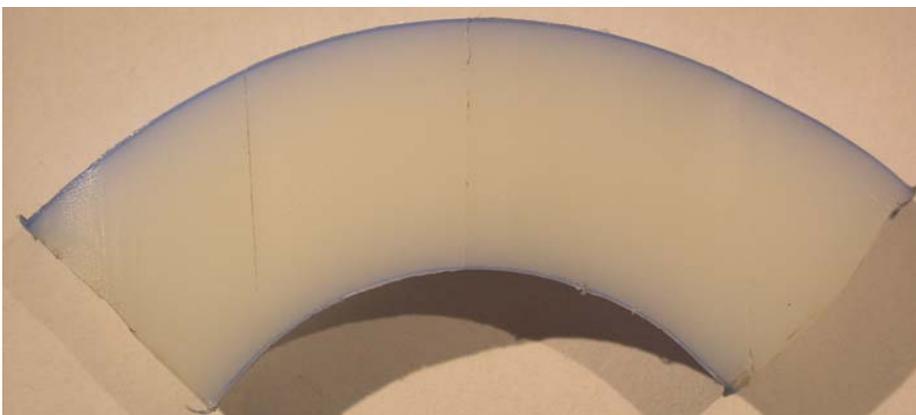


Abbildung 5-40 Schnitt durch die teilweise gespülte 90°-Umlenkung: Verteilung der blauen Randschicht

5.3 Beschichtungsmodul

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Einflussfaktoren des Masterbatches und die Möglichkeiten der Prozessführung analysiert und bewertet. Im Folgenden wird der Ansatz verfolgt, Pigmente nur als eingefärbte Außenschicht auf die Blasfolie aufzubringen.

5.3.1 Motivation

Während der Untersuchungen innerhalb des Projektes stellte sich die Frage nach dem Effekt einer deutlichen Verkürzung der Fließwege der farbigen Schmelze. Daraus entwickelte sich das folgende Konzept eines Beschichtungsringes, der auf das Monowerkzeug aufmontiert wird und so spät wie möglich die Farbe als funktionale Außenschicht aufextrudiert.

Das Konzept basiert auf den Grundlagen der Coextrusion, bei der Pigmente auch nur in einer Lage zudosiert werden. Dies geschieht aber in der Regel über einen der Hauptextruder. Dadurch sind die Fließwege sehr lang und durch Schmelzefilter und Wendelverteilergeometrie vom Strömungsverhalten her nachteilig. Für ein folgendes farbloses Produkt müssen der verunreinigte Extruder und das gesamte Werkzeug gespült werden. Der Spülaufwand der schmelzeleitenden Geometrie ist bei dieser Methode wie schon beschrieben sehr groß. Äußerlich aufgetragene Farben als funktionelle Schicht werden beispielsweise in der Rohrextrusion zur farblichen Markierung durch Streifen oder Ringe ebenfalls eingesetzt. Die in Kap. 2.2 kurz beschriebenen Mehrschichtwerkzeugkonzepte können im Prinzip Farbe als separate Schicht produzieren. Hier ist aber in der Regel immer ein Spülvorgang notwendig, der innerhalb der Anlagenbetriebszeit durchgeführt werden muss. Das folgende Konzept lehnt sich an die Konstruktionen der Radialverteiler-Coexwerkzeuge an, soll aber auf einen klassischen Monowendelverteiler aufmontierbar sein.

5.3.2 Konzept

Das konstruktive Konzept, das sich mit dem Effekt der Verkürzung der Fließwege und der Machbarkeit einer farbigen Außenbeschichtung beschäftigte, ist das im Folgenden vorgestellte Beschichtungsmodul für Blasfolienanlagen.

Die Anforderungen an das Modul stellen sich wie folgt dar:

- Beschichten, so nah wie möglich am Düsenaustritt
- Verkürzung der Fließwege der farbigen Schmelze
- leichte Montage und Demontage auf dem vorhandenen Monowerkzeug

- Herstellung einer zweischichtigen Folie, mit einer farblosen Hauptlage und einer farbigen Außenschicht, die einer eingefärbten Monofolie gleicht.

Das Konzept beinhaltet die Konstruktion eines Beschichtungsringes, der in einfacher Art und Weise auf das bereits vorhandene Wendelverteilermonowerkzeug montiert werden kann und durch einen separaten Extruder mit farbiger Schmelze gespeist wird. Für farblose Folgeprodukte soll das Modul einfach demontierbar sein, sodass die Anlage in kurzer Zeit nach der Demontage des Beschichtungsringes komplett farbfrei ist und weiter produzieren kann. Die Reinigung des separaten Extruders und des Moduls beeinflusst dann nicht die Produktionszeit.

5.3.3 Umsetzung des Konzeptes

Das konstruierte Modul lehnt sich an die Horizontal- bzw. Radial-Wendelverteilerwerkzeuge an, wodurch sich die Bauhöhe auf ein Minimum begrenzen lässt. Das konstruierte Modul besteht aus Oberteil und Unterteil, die mit acht Schrauben aufeinander geschraubt und mit Zentrierstiften zentriert werden. Es wurde so konstruiert, dass es durch die vier bereits vorhandenen Gewindebohrungen auf der Oberseite des Monowerkzeugs darauf befestigt werden kann. Seine Oberseite ist mit der bisherigen Oberseite des Düsenpaltzentrierringes des Monowerkzeuges identisch, sodass auch für den Kühlringaufbau keine Veränderungen vorgenommen werden mussten. Im Oberteil des Moduls befindet sich der Anschluss der Schmelzeleitung des Beistellextruders, die Schmelzezuführung zur Verteilgeometrie im Unterteil und der Temperatursensor. Das Modul wurde mit einem eigenen Heizband ausgestattet. Abbildung 5-41 zeigt den schematischen Gesamtzusammenbau im Schnitt. Sie beinhaltet auch die notwendige passend angefertigte Innendornverlängerung, die ebenfalls über bereits vorhandene Gewindebohrungen montiert werden konnte.

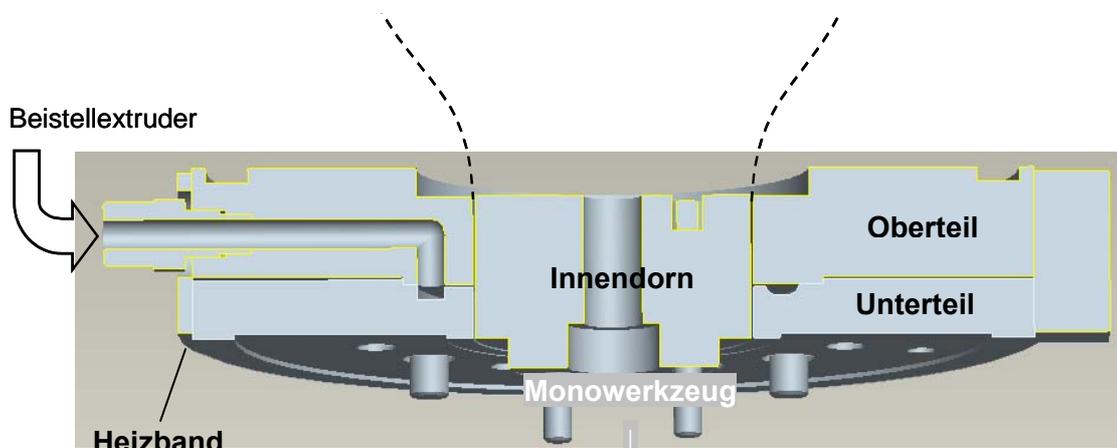


Abbildung 5-41 Beschichtungsmodul im montierten Zustand

Im Unterteil (Abbildung 5-41) befindet sich die Radialverteiltergeometrie. Da es sich bei dem Versuch um eine Machbarkeitsstudie handelt, wurde die Geometrie des Fließkanals im ersten Schritt sehr einfach gehalten (Abbildung 5-42).

Die Verteilgeometrie wurde im Grundsatz der Verteilgeometrie eines Be- und Entschichtungsmoduls der Fa. ETA nachempfunden, das auf der K2004 vorgestellt wurde.

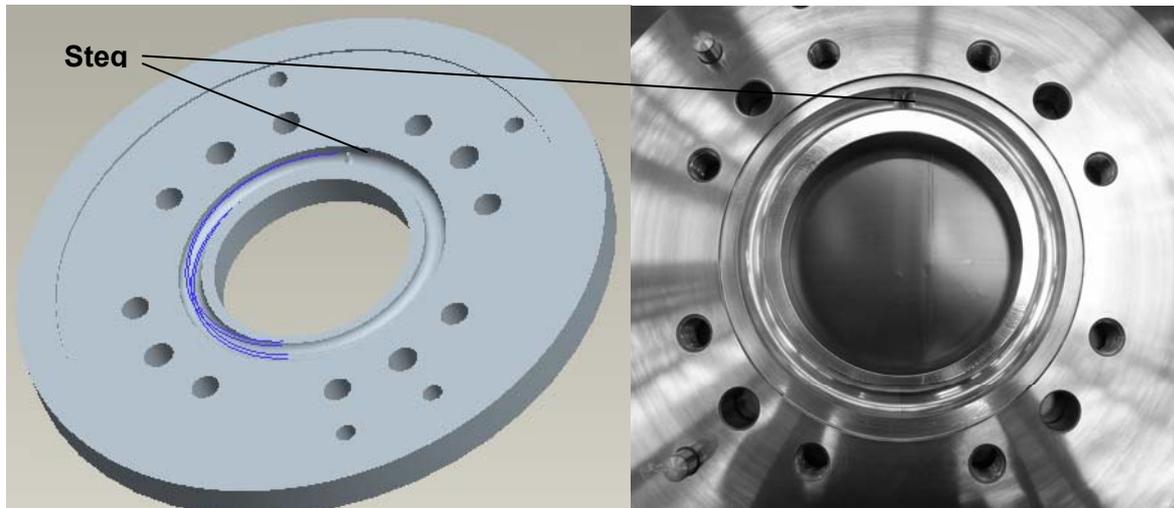


Abbildung 5-42 Unterteil mit Verteilgeometrie

Dabei handelt es sich um einen einfachen anfänglich halbrunden und zur Gegenseite be-reiter und flacher werdenden Querschnitt, dessen Innenkreis dezentriert ist, sodass die Drosselfeldbreite b zur Gegenseite hin abnimmt (Abb. 6.3). Der Zustrom der Schmelze erfolgt vom Oberteil senkrecht auf einen Steg, der die Schmelze beim Einlauf in die Verteilgeometrie teilt.

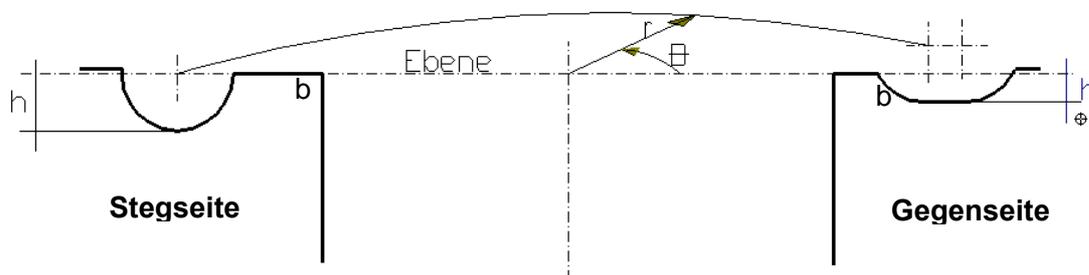


Abbildung 5-43 Aufbau der Wendelgeometrie

Analytische Fließ- oder Druckberechnungen der Strömungsvorgänge wurden in diesem ersten Schritt nicht gemacht.

5.3.4 Versuchsdurchführung

Nach dem Bau und Montage des Moduls wurde ein Spülversuch mit den gleichen Parametern durchgeführt, wie bei den Versuchen zum Einfluss des Pigmentbatches. Der Vergleichsversuch für das Beschichtungsmodul ist der Ist-Zustand der Laboranlage an der Uni mit einem Kupferphthalocyanin-Blau-Pigment. Die gleiche Pigmentbatchmischung aus 3% CuPhCy und Dow PE150L wurde auch für die Beschichtungsschmelze gewählt. Im Unterschied zum Vergleichsversuch wurde durch das, durch einen zusätzlichen separat betriebenen Extruder gespeiste Beschichtungsmodul eine zweischichtige Folie erzeugt. Durch Einstellung des Massedurchsatzes des Beschichtungsextruders wurde ein Folienfarbton eingestellt, der den gleichen Farbton wie der Referenzversuch hatte. Der Massedurchsatz und damit die Farbbeschichtung wurde aufgrund des optischen Vergleichs der Zweischichtfolie mit der durchgefärbten Monofolie des Referenzversuchs eingestellt. Der Messedurchsatz des Hauptextruders wurde stets so geregelt, dass der Gesamtmasse- durchsatz und damit die Foliendicke von 100 µm sich nicht veränderten. Erst nachdem an der für die Farbmessung definierten Stelle mit bloßem Auge nahezu kein Farbunterschied mehr festzustellen war, wurde für 30 Minuten der Betriebspunkt beibehalten und eine blaue Zweischichtfolie produziert.

Nach 30 Minuten wurde für den Farbwechsel auf farblos beim ersten Versuch einfach der Beistellextruder abgeschaltet und der Gesamtmassestrom durch den Hauptextruder geliefert, sodass wieder eine Monofolie ohne Farbanteil extrudiert wurde. Nach ca. 15 min war die produzierte Folie farblos und der Wickel wies keinen Farbschleier mehr auf. Aus dem Wickel wurden, in gleicher Weise wie bereits beschrieben, Folienproben entnommen und farblich vermessen.

Eine der Ursprungsideen war aber ebenso der Abbau des Moduls und das Wideranfahen der dann komplett von farbiger Schmelze freien Anlage, um mit dem Spülen nicht die Produktionszeit zu belasten und möglichst schnell wieder die Produktion aufzunehmen. Dazu wurde der Versuch wiederholt, jedoch zum Zeitpunkt des Abstellens des Beistell- extruders wurden beide Extruder angehalten, die Folienblase getrennt und das Modul und die Innendornverlängerung über die vier Befestigungsschrauben abmontiert. Im Anschluss wurde die Anlage wieder angefahren und die ursprünglichen Produktparameter wieder eingestellt. Die Gesamtzeit hierfür betrug ca. 45 min.

Bei dem zweiten Versuch fiel kein Folienwickel mit Farbwechsel an, dadurch konnte auch keine Vergleichsfarbmessung gemacht werden. Produktwechselabfall fiel jedoch an, da die Anlage wieder angefahren und auf die entsprechenden Produktabmessungen gebracht werden musste. Die Abfallmenge betrug hierdurch ca. 4,2 kg. Zusätzlich ist die Masse zu addieren, die für das Spülen des Beistellextruders und des abmontierten Mo-

duls erforderlich wäre. Hierfür existiert jedoch kein Messwert, da nach dem Durchlaufen des zweiten Versuchs das Modul geöffnet wurde.

5.3.5 Ergebnis der Auswertung

Schon der Vergleich der Spülwickel des Referenzversuchs aus der Versuchsreihe mit verschiedenen Masterbatches (Kap. 4) und dem ersten Versuch mit Beschichtungsmodul einen deutlichen Unterschied (Abb. 6.5).

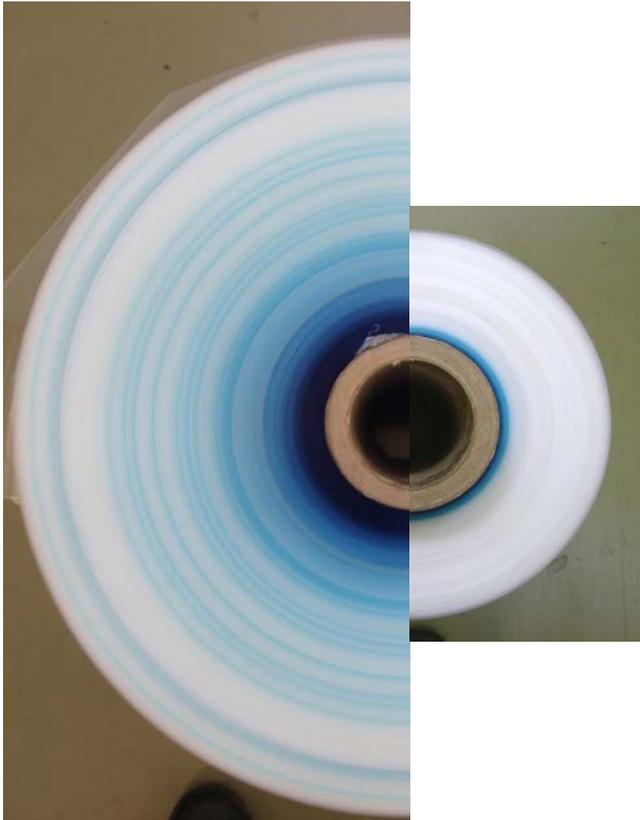


Abbildung 5-44 Vergleich der Wickel mit und ohne Beschichtungsmodul

Die linke Seite der Abbildung zeigt einen Standardspülvorgang bei gleichbleibendem Massedurchsatz. Die rechte Seite zeigt den Folienwickel vom Zeitpunkt des Abstellens des Beistellextruders. Der Wickel ohne Modul beginnt zu dem Zeitpunkt, als farbloses Granulat in die Einfüllzone gefüllt wird, daher auch das anfänglich tiefblaue, da der Extruder noch komplett mit blau gefüllt war. Der Wickel mit Modul beginnt bei Ausschalten des Beistellextruders. Die kurze Blauphase rührt daher, dass nur ca. 30 mm des Schmelzweges vor Düsenaustritt zu spülen waren.

Zusätzlich zum Farbvergleich wurde eine Schichtdickenmessung an der Stelle, an der die Farbmessung erfolgte durchgeführt. Das Schichtdickenverhältnis von eingefärbter Schicht zur Gesamtdicke von 100 µm betrug ca. 0,27.

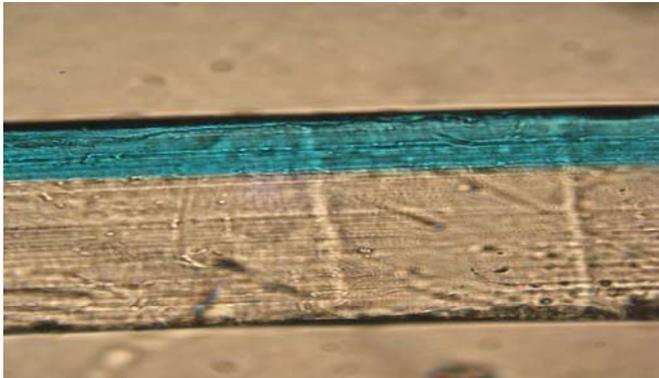


Abbildung 5-45 Dünnschnittaufnahme der zweischichtigen Folie zur Schichtdickenmessung

Zum objektiven Vergleich der Spüldauer wurden alle sechs Meter Proben aus dem Wickel entnommen und wie bekannt eine Farbmessung gemacht. Die folgende Grafik (Abb. 6.7) zeigt zum Vergleich die Farbmesswerte b^* des Versuchs mit Modul (schwarze Kurve) und des Vergleichsversuchs ohne Modul (grau) über den gesamten Farbwechsel von Blau auf Transparent.

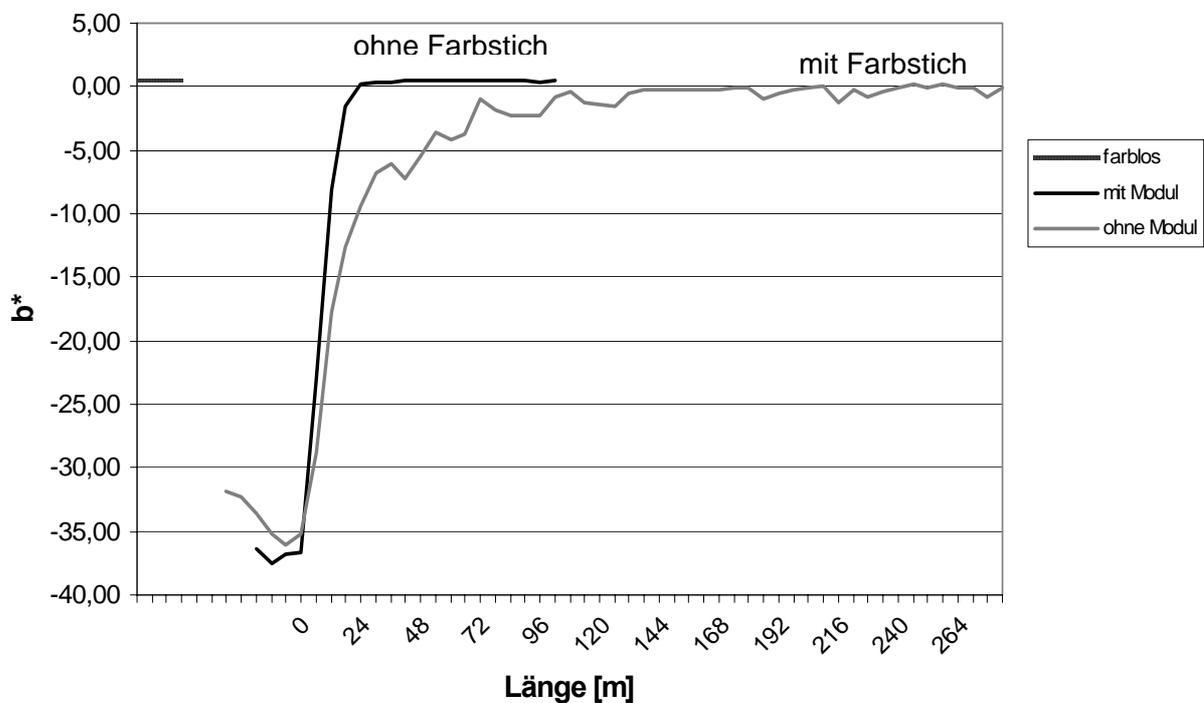


Abbildung 5-46 Farbkurven der Spülversuche mit und ohne Beschichtungsmodul

Ohne Modul behält der Wickel bis zum Ende einen sichtbaren Farbstich, die Farbringe auf dem Wickel in Abb. 6.5 sorgen auch im Kurvenverlauf für Unregelmäßigkeiten. Mit Modul wird bereits nach 48 Metern der Referenzwert der farblosen Folie erreicht. Ohne Modul benötigt man bis zum 99,5% Niveau 168 m und erhält einen weiterhin auf dem Wickel sichtbaren Farbstich.

5.3.6 Konzeptbewertung und Ausblick

Im Ergebnis lässt sich sagen, dass eine Verkürzung der Fließwege der farbkonterminierten Schmelze einen deutlichen Effekt auf die Spüldauer hat.

Unter Berücksichtigung der Kenntnis über langsam strömende Randschichten ist dies nicht überraschend. Ob eine Verdoppelung der Fließwege auch den doppelten Spülaufwand bedeutet, wurde in dieser Versuchsreihe und in den Studien von [Nie05] nicht untersucht, wäre aber eine wissenswerte Erkenntnis zur Optimierung des Spülvorgangs über konstruktive Maßnahmen.

Dieses Modul lehnt sich konstruktiv an die Beschichtungskonstruktion der Fa. ETA (Kapitel 5.4) und an die Radialverteilerkonzepte der Blasfoliencoextrusion an.

Die Vorteile des hier in einfacher Art auf ein Monowerkzeug montiertes Modul sind für den Farbspülvorgang u.a., dass die Gesamtanlage sauber bleibt. Die Spülzeiten bei Farbwechseln und damit die Produktionspausen sind sowohl beim Abbau des Moduls, als auch bei einfachem Abschalten der Beschichtung sehr kurz. Spülzeiten oder Anlagenstillstände sind im Gegensatz zu den bisherigen Methoden sehr genau planbar. Die Wirtschaftlichkeit lässt sich für einzelne Anwendungsfälle z.B. für Farbanwendungen individuell berechnen.

Es sind jedoch eine Reihe von Aspekten offen, deren Untersuchung für eine Bewertung der Möglichkeiten eines solchen Moduls in der Praxis notwendig ist.

- Es ist nicht getestet worden, wie dünn die aufgetragene Farbschicht sein kann, um den gleichen Farbton zu treffen (im Versuch ca. 1/4 bis 1/3 der Gesamtdicke).
- Die Verteilgeometrie war sehr einfach und um den Umfang nicht optimiert.
- Es ist nicht getestet worden, das Modul und den Beistellextruder bei laufender Blase zu spülen.

Die Nachteile liegen darin, dass ein flexibler Beistellextruder mit Gravimetrie und Peripherie benötigt wird.

Das generelle Prinzip des äußeren Auftrags von Farbschichten, wie es schon bei anderen Extrusionsprodukten Verwendung findet, lässt sich aber auch auf nicht sichtbare Additive

wie Gleitmittel oder Antiblockmittel übertragen. Damit kann ein einfach auf- und abbaubares flexibles Einzelmodul sowohl auf Mono- als auch auf Coextrusionswerkzeugen Einsatzmöglichkeiten finden.

5.4 Abschöpfmodule

Die im Folgenden beschriebenen 'Abschöpfmodule' zur Beschleunigung von Material- und Farbwechseln basieren auf der Umkehrung des Prinzips der Beschichtung, welche in Abschnitt 5.3 behandelt wird.

Da bei Material- und Farbwechseln die wandnahen Schmelzeschichten aufgrund von Wandhaftung und sehr geringer Fließgeschwindigkeit nur sehr langsam aus dem Extrusionswerkzeug ausgespült werden, entstand die Idee, diese Schichten vor dem Werkzeugaustritt zu separieren und über einen Bypass abzuführen, sodass am Werkzeugaustritt schon nach einer kürzeren Spülzeit nur noch die frische Schmelze aus der Kernströmung des neuen Materials bzw. die frische Schmelze mit der neuen Farbe austritt [Bur05]. In Abbildung 5-47 ist das Grundprinzip eines solchen Abschöpfmoduls zur Abführung einer äußeren Schmelzerandschicht aus einem ringförmigen Fließkanal schematisch dargestellt.

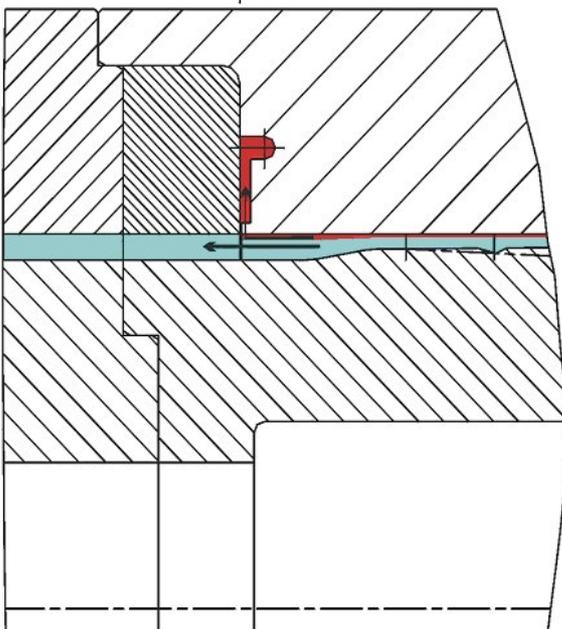


Abbildung 5-47 Abschöpfmodul zur Separierung und Abführung einer äußeren Schmelzerandschicht aus einem ringförmigen Fließkanal

Für die Abführung der inneren Schmelzerandschicht aus einem ringförmigen Fließkanal kann ein prinzipiell ähnliches Abschöpfsystem im Innern des Werkzeuges eingesetzt werden. Darüber hinaus ist es möglich, ein äußeres Abschöpfsystem auch zur Beschleunigung eines Material- oder Farbwechsels in einer Schmelzebohrung zu verwenden.

Damit über dem Umfang eines ringförmigen Fließkanals, sowohl außen als auch innen, gleichmäßig dicke Schmelzerandschichten abgeschöpft werden, müssen die ringförmigen Drosselspalten und Sammelkanäle der Abschöpfmodule auf einen rundum gleichmäßigen Durchsatz und Druckverlust ausgelegt werden. Diese Aufgabenstellung ist ähnlich wie bei einem Beschichtungsmodul, bei dem über die Gestaltung der Fließkanäle eine rundum gleichmäßige Beschichtungsdicke zu gewährleisten ist. Die unterschiedlichen Fließrichtungen bei einem Beschichtungsmodul und einem Abschöpfmodul sind für die Lösung dieser Aufgabenstellung ohne Bedeutung. Daher kann man grundsätzlich ein Beschichtungsmodul auch als Abschöpfmodul verwenden und umgekehrt. Jedoch unterscheiden sich in der Regel die Durchsätze und die Anforderungen an die Güte der Rundumverteilung der zugeführten bzw. der abgeführten Schmelzerandschichten. Aus diesen unterschiedlichen Anforderungen ergeben sich in der Praxis unterschiedliche anwendungsspezifische Ausführungen für Abschöpf- und Beschichtungsmodule. Da ein Abschöpfmodul nur während eines Material- oder Farbwechsels in Betrieb ist, sind die Ansprüche an die Gleichmäßigkeit der Dicke der rundum abgeführten Schmelzeschichten häufig deutlich geringer als bei einer Beschichtung, mit der während einer längeren Produktionsphase eine Randschicht im Produkt erzeugt wird. Deshalb können bei Abschöpfmodulen einfachere geometrische Lösungen verwendet werden als bei Beschichtungsmodulen.

5.4.1 Praktische Erprobung

Zur praktischen Erprobung des Abschöpfkonzepts wurden von der ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf, ein Grundwerkzeug mit zwei Werkzeugmodulen (Abschöpfmodule für Innen- und Außenabschöpfung von Schmelzerandschichten) konstruiert und angefertigt sowie Versuche in Zusammenarbeit mit dem Rohstoffhersteller Degussa AG, Marl, in dessen Technikum durchgeführt.

Das Versuchswerkzeug ist in Abbildung 5-48 im Schnitt dargestellt. Die Abschöpfmodule sind am vorderen Ende der Düseneinheit eingefügt (siehe Ausschnitt X in Abbildung 5-49). Um eine gleichmäßige Schmelzeabschöpfungen über dem Umfang zu gewährleisten, sind die Drosselspalte und Sammelkanäle sowohl außen als auch innen in ihren Breiten exzentrisch ausgeführt. Während die Abführung der abgeschöpften äußeren Schmelzeranschicht auf relativ einfache Weise über einen seitlich am Mundstück angeordneten beheizten Adapter (Pos. 260) möglich ist, der zur Steuerung des abgeschöpften Schmelzestroms eine Drosselschraube (Pos. 265) besitzt, ist die Abführung der im Innern abgeschöpften Schmelze aufwendiger. Die innere Schmelzerandschicht muss durch Bohrungen in verschiedenen Werkzeugteilen zunächst nach hinten geführt werden und tritt dann aus einem beheizten Winkeladapter (Pos. 250) aus, der zur Steuerung des abgeschöpften Schmelzestroms ebenfalls über eine Drosselschraube (Pos. 275) verfügt.

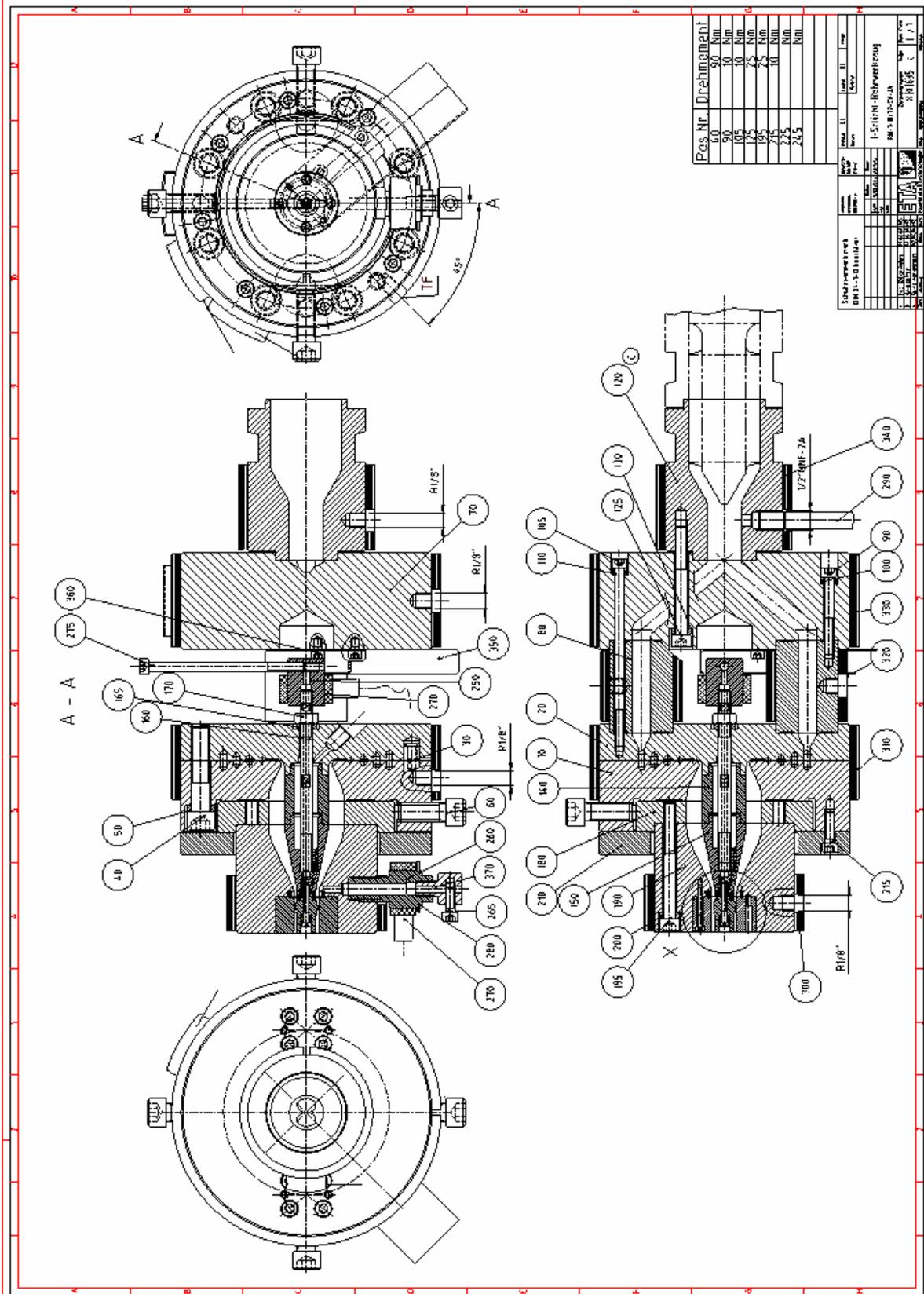


Abbildung 5-48 Versuchswerkzeug mit einem äußeren und einem inneren Abschöpfmodul

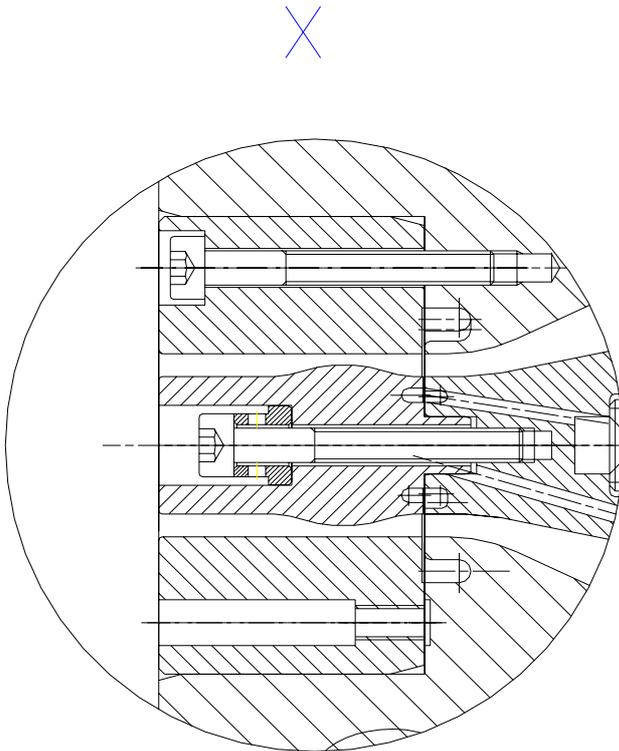


Abbildung 5-49 Äußeres und inneres Abschöpfmodul des Versuchswerkzeugs

Bei der praktischen Erprobung der Abschöpfmodule im Technikum der Degussa AG, Marl, wurden verschiedene harte, weich gemachte und schlagzähe PA 12-Typen eingesetzt. Die erhebliche Beschleunigung von Material- und Farbwechseln durch die Randschichtabschöpfung konnte in diesen Versuchen klar bestätigt werden. Die Verkürzung der Material- und Farbwechsel hängt von der Höhe der abgeschöpften Randschichtanteile ab und kann über die Drosselschrauben in einem weiten Bereich eingestellt werden.

Ein typisches Ergebnis geben die im Folgenden beschriebenen Farbwechselversuche mit einem PA 12 von schwarz auf gelb wieder. Die eingestellten Verfahrensparameter waren dabei:

- Massetemperatur: 240 °C
- Dorn / Hülse: 12 mm / 16 mm
- Abzug: 10 m/min
- Durchsatz: 12,8 kg/h
- Rohrmaß: 8 x 1 mm

Bei dem ersten Farbwechsel war die Randschichtabschöpfung geschlossen, bei dem Zweiten ist eine Schmelzeabführung von ca. 12g/10min (das entspricht nur etwa 0,6% des gesamten Durchsatzes (!)) eingestellt worden. In 30 Sekunden-Intervallen wurden jeweils Proben bis zum vollständigen Farbwechsel entnommen und einer visuellen Prü-

fung unterzogen. Durch die Randschichtabschöpfung konnte die für den vollständigen Farbwechsel benötigte Zeit um ca. 25% verringert werden.

Um die Funktion eines Abschöpfmoduls auf der Messe K 2004 (Düsseldorf, 20.-27.10.04) anschaulich darstellen zu können, wurden ein Plexiglasmodell angefertigt und Farbwechsel mit verschiedenfarbigen Silikonpasten gefilmt [Rah04, Bus05, NN04]. Abbildung 5-50 zeigt einen Farbwechsel von weiß auf schwarz, bei dem deutlich erkennbar wird, dass die Wände der Zuführbohrung vor dem Abschöpfmodul noch mit der weißen Silikonpaste benetzt sind, während unmittelbar nach dem Abschöpfmodul der Farbwechsel bereits vollzogen ist und die schwarze Silikonpaste aus dem Kern der Strömung die Wände vollständig benetzt.

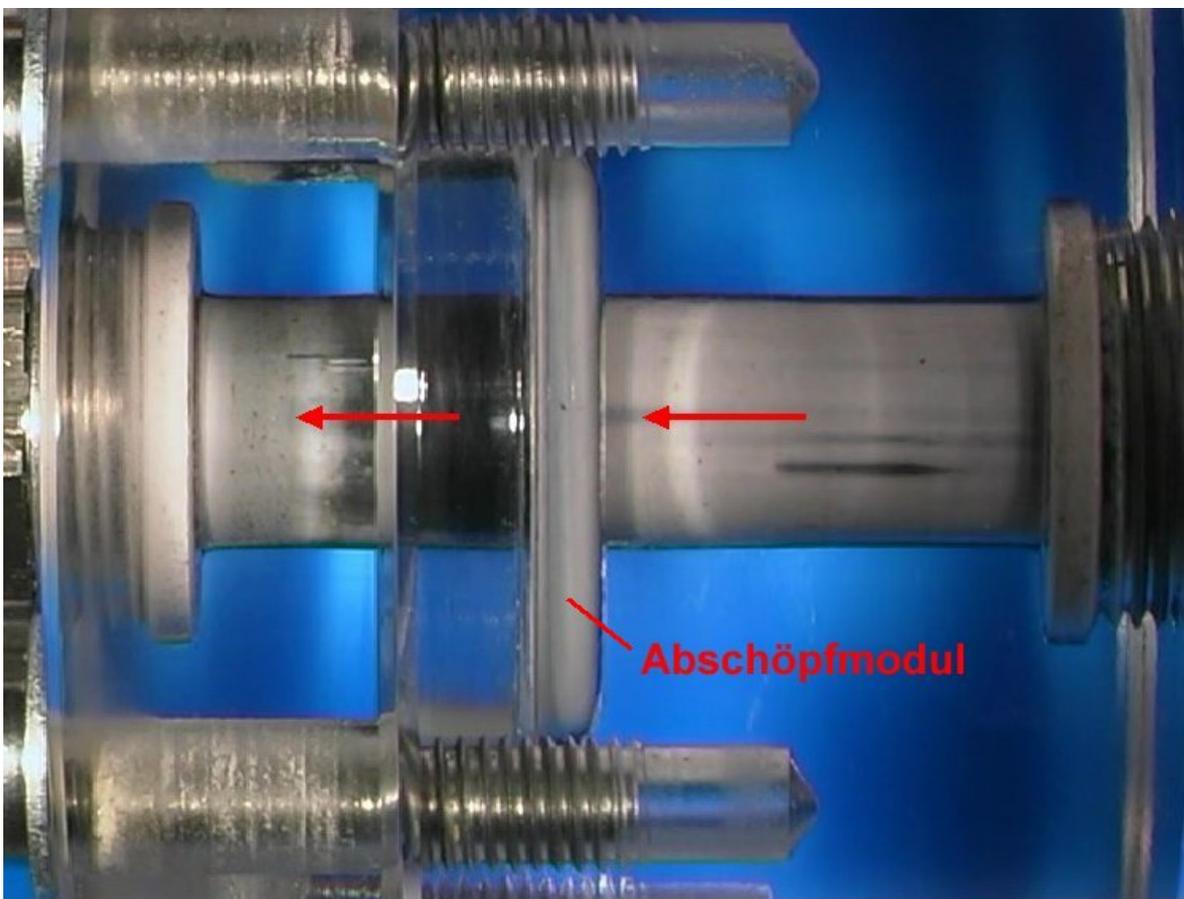


Abbildung 5-50 Plexiglasmodell zur Veranschaulichung der Beschleunigung von Material- und Farbwechseln mit einem äußeren Abschöpfmodul

5.4.2 Ausblick

Mit den oben beschriebenen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass Abschöpfmodule grundsätzlich eine Beschleunigung von Material- und Farbwechseln ermöglichen. Inzwischen sind von der ETA Kunststofftechnologie GmbH mehrere Extrusionswerkzeuge mit Abschöpfmodulen gebaut bzw. an bestehenden Werkzeugen Abschöpfmodule nachgerüstet worden, mit denen dieses Ergebnis in der Praxis bestätigt wurde.

Das Konzept der Schmelzeabschöpfung wurde von der ETA Kunststofftechnologie GmbH zum Patent angemeldet [Bu03].

Die Randschichtabschöpfung eröffnet neben der Beschleunigung von Material- und Farbwechseln weitere interessante Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Produktrandschichten und -oberflächen. In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich während der laufenden Produktion bei bestimmten Materialien durch eine gezielte Abschöpfung der Schmelzerandschichten kurz vor dem Düsenaustritt störende Materialablagerungen am Düsenaustritt (Bartbildung) unterbinden lassen. Dadurch können Oberflächenfehler und Produktionsstörungen durch Streifen und mitgerissene Partikel vermieden werden.

Weitere, noch nicht abgeschlossene Untersuchungen befassen sich mit den Auswirkungen, die das Entfernen der Randschichten auf die Produktqualität hat. Da die Randschichten des Produkts im Gebrauch den höchsten mechanischen Belastungen und unter Umständen gleichzeitig ungünstigen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, könnten durch das Entfernen von Schmelzerandschichten, die durch Ihre lange Verweilzeit während des Fließens im Werkzeug bereits vorgeschädigt sind, möglicherweise Verbesserungen bei der Produktqualität erreicht werden.

5.5 Schmelzeumschichter

Bei Schmelzebohrungen besteht neben der oben beschriebenen Randschichtabschöpfung eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung von Material- und Farbwechseln. Dabei wird die Randschicht der alten Schmelze nicht abgeschöpft, sondern mithilfe eines 'Schmelzeumschichters' in den Kern der Schmelzeströmung umgeleitet, sodass die Fließkanalwände nach dem Schmelzeumschichter vollständig mit dem neuen Material oder der neuen Farbe aus dem Kern der zugeführten Schmelzeströmung benetzt werden. In Abbildung 5-51 ist das Funktionsprinzip eines solchen Schmelzeumschichters dargestellt.

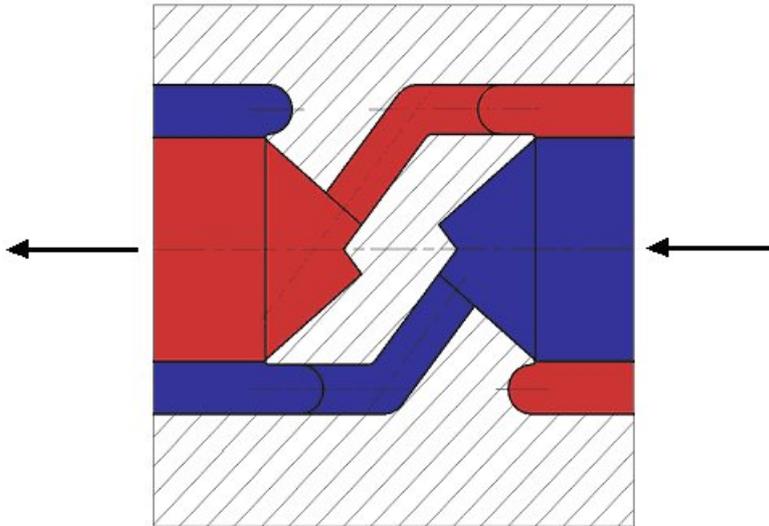


Abbildung 5-51 Funktionsprinzip eines Schmelzeumschichters

Um die Funktion eines Schmelzeumschichters auf der Messe K 2004 (Düsseldorf, 20.-27.10.04) anschaulich darstellen zu können, wurden ein Plexiglasmodell angefertigt und Farbwechsel mit verschiedenfarbigen Silikonpasten gefilmt [Rah04, Bus04]. Abbildung 5-52 zeigt einen Farbwechsel von weiß auf schwarz, bei dem deutlich erkennbar ist, dass die Wände der Zuführbohrung vor dem Schmelzeumschichter noch mit der weißen Silikonpaste benetzt sind, während unmittelbar nach dem Umschichter der Farbwechsel bereits vollzogen ist und die frische schwarze Silikonpaste aus dem Kern der Strömung die Wände vollständig benetzt.

Das Konzept des Schmelzeumschichters wurde von der ETA Kunststofftechnologie GmbH zum Patent angemeldet [Bu04].

Inzwischen sind von der ETA Kunststofftechnologie GmbH mehrere Extrusionswerkzeuge mit Schmelzeumschichtern gebaut bzw. an bestehenden Werkzeugen Schmelzeumschichter nachgerüstet worden, mit denen die Spülzeiten bei Material- und Farbwechseln erheblich verkürzt werden konnten. Im Vergleich zu den oben beschriebenen Abschöpfmodulen ist der Vorteil des Schmelzeumschichters, dass die Schmelze vollständig im Werkzeug und im Produkt verbleibt und nicht teilweise abgeführt wird und entsorgt werden muss.

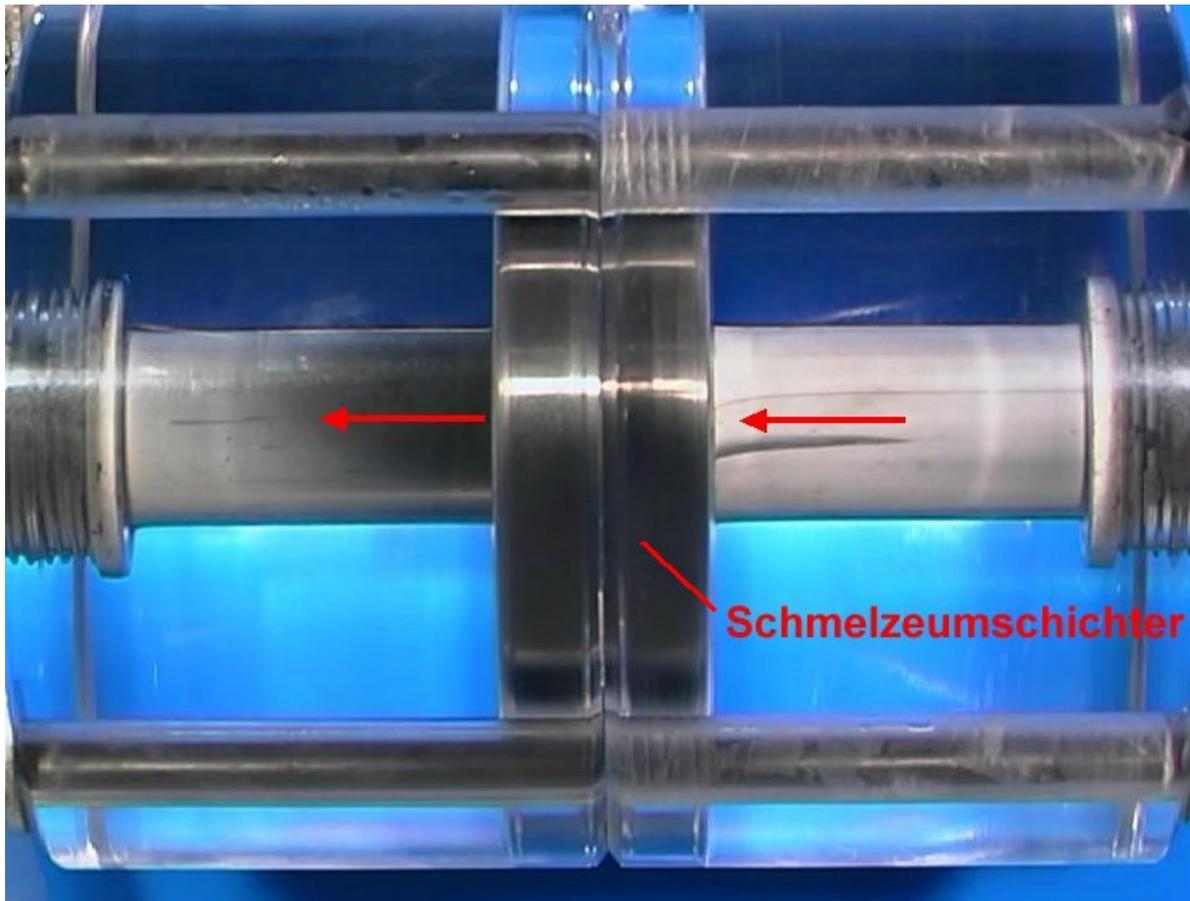


Abbildung 5-52 Plexiglasmodell zur Veranschaulichung der Beschleunigung von Material- und Farbwechseln mit einem Schmelzeumschichter

5.6 Extrusionswerkzeuge mit spülzeitoptimierten Fließkanalgeometrien

Auf der Grundlage der in den vorangegangenen Abschnitten konzipierten und untersuchten geometrischen Einzelmaßnahmen zur Spülzeitoptimierung der Fließkanalgeometrien von Extrusionswerkzeugen wurden von der ETA Kunststofftechnologie GmbH zwei Teilwerkzeuge konstruiert und gebaut, bei denen jeweils mehrere Maßnahmen umgesetzt wurden.

Die Teilwerkzeuge wurden in vorhandene Werkzeuge eingebaut und unter Produktionsbedingungen bei den Firmen Bischof + Klein GmbH & Co. KG, Lengerich, und Kautex Textron GmbH & Co. KG, Bonn, bzw. Kautex Textron Benelux bvba, Tessenderlo, Belgien, eingehend erprobt.

5.6.1 Spülzeitoptimiertes 1-Schicht-Blasfolienwerkzeug

Bei dem ersten Projekt wurde ein seit einigen Jahren bei der Firma Bischof + Klein eingesetztes 1-Schicht-ETA-Blasfolienwerkzeug des Typs BFWS-I-1-160 mit neuen, spülzeitoptimierten Werkzeugteilen ausgerüstet. Von den Änderungen betroffen waren das Umlenstück, der Wendelverteiler und das Gehäuse (siehe Abbildung 5-53).

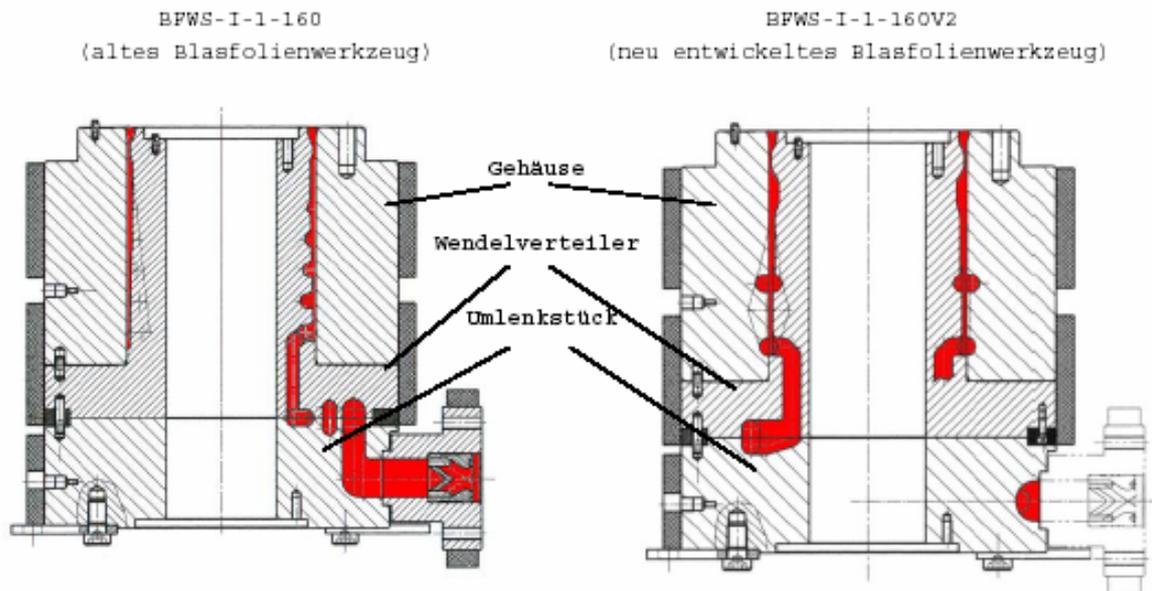


Abbildung 5-53 Vergleich des bisher eingesetzten und des optimierten ETA-Blasfolienwerkzeugs vom Typ BFWS-I-1-160

Bei der Konstruktion der optimierten Teile wurde zur Verbesserung des Material- und Farbwechselerhaltens konsequent darauf geachtet, die von Schmelze benetzten Fließkanaloberflächen zu reduzieren und lokal schlecht gespülte Fließkanalbereiche zu vermeiden.

Im Einzelnen wurden folgende Maßnahmen durchgeführt (siehe Abbildung 5-54):

- Reduzierung der Wendelanzahl von 8 auf 4. Dadurch war eine einfachere Schmelzevorverteilung mit kürzeren Fließwegen und kleineren Fließkanaloberflächen möglich.
- Wendelverteilerkanäle auch im Gehäuse.
- Schmelzeumschichter im Anschlussstück vor dem Werkzeug.
- Ausführung der ersten 1-auf-2-Schmelzeaufteilung mittels gebohrter, Y-förmig angeordneter Kanäle statt mit gefrästen ringförmigen Kanälen.
- Geometrisch optimierte 90°-Umlenkungen und 2-auf-4-Schmelzeaufteilungen.

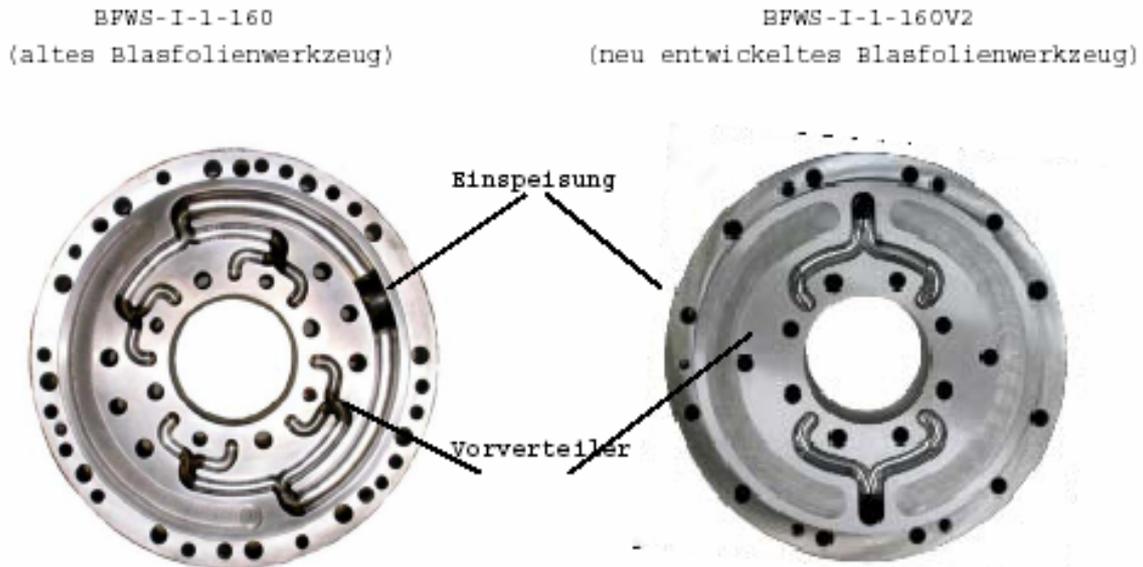


Abbildung 5-54 Vergleich des bisher eingesetzten und des optimierten ETA-Blasfolienwerkzeugs vom Typ BFWS-I-1-160 – Draufsicht auf das Umlenkstück

Die vergleichenden Untersuchungen des alten und des optimierten Werkzeugs unter Produktionsbedingungen bei der Firma Bischof + Klein wurden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt und dokumentiert [Ber05]. Da außer an den oben genannten Werkzeugteilen keine weiteren Änderungen an anderen Anlagenbestandteilen vorgenommen wurden und exakt gleiche verfahrenstechnische Randbedingungen (Temperaturen, Durchsatz, etc.) eingehalten wurden, konnten die Auswirkungen der optimierten Werkzeugteile auf die Farbwechselzeiten exakt und unverfälscht erfasst werden.

Es wurden Farbwechsel von weiß eingefärbtem Material auf nicht eingefärbtes Material mit zwei verschiedenen PE-LD-Typen (Basell Lupolen 2420 D und Lupolen 2420 H) untersucht. Während der Farbumstellungen wurden in regelmäßigen Zeitabständen Folienproben entnommen. Anhand der vom Qualitätsmanagement der Firma Bischof + Klein festgelegten Folienqualitätsmerkmalen wurde entschieden, wann die Farbwechsel jeweils als abgeschlossen angesehen werden konnten.

Die für die Farbwechsel benötigte Zeit und die während der Umstellung produzierte Ausschussmenge wurden mit dem optimierten Blaswerkzeug beim Wechsel von dem Material Lupolen 2420 D mit weißem Farbzusatz auf Lupolen 2420 D ohne Farbzusatz um 22 % und beim Wechsel von Lupolen 2420 H mit weißem Farbzusatz auf Lupolen 2420 H ohne Farbzusatz um 14 % gesenkt.

Diese Ergebnisse belegen, dass die angewandten Optimierungsmaßnahmen unter praxisüblichen Produktionsbedingungen Farbwechselzeiten wirksam verringern können.

Die optimierten Werkzeugteile haben jedoch nicht nur einen positiven Einfluss auf Material- und Farbwechselzeiten. Die kürzeren Fließwege des optimierten Werkzeugs besitzen einen geringeren Druckverlust. Dadurch können höhere Durchsätze gefahren werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass das verbesserte Spülverhalten des Werkzeugs auch dazu beiträgt, Materialablagerungen und daraus resultierende Folienqualitätsmängel in längeren, konstanten Produktionsphasen zu verringern oder gänzlich zu vermeiden. Diese Aspekte sollen längerfristig weiter beobachtet werden.

Bei der oben beschriebenen Erprobung der optimierten Werkzeugteile war bei den Farbwechseln eine deutlich sichtbare Streifenbildung an der Folienblase festzustellen. An den Streifen wurde erkennbar, dass auch die optimierten Werkzeugteile noch lokale Bereiche mit längerer Verweilzeit besitzen, aus denen die alte Materialfarbe schlechter ausgespült wird. In einem zweiten Optimierungsschritt wurden daher Werkzeugteile weiter verbesserten Fließkanalgeometrien entworfen und in das Werkzeug eingebaut. Mit diesen weiter optimierten Werkzeugteilen konnte die Streifenbildung bei Farbumstellungen deutlich verringert werden. Die Material- und Farbwechselzeiten konnten damit noch weiter reduziert werden.

5.6.2 Spülzeitoptimiertes Dünnschichtpaket für ein 6-Schicht-Werkzeug

Bei dem zweiten Projekt wurde von der ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf, ein seit einigen Jahren bei der Firma Kautex Textron Benelux bvba, Tessenderlo, Belgien, eingesetztes 6-Schicht-ETA-Coextrusionswerkzeug des Typs HKWS-6-300/500 mit einem neuen, spülzeitoptimierten Dünnschichtpaket ausgerüstet.

Das sogenannte Dünnschichtpaket umfasst bei diesem Werkzeug die Wendelverteiler für die EVOH-Barrierschicht und die beidseitig angrenzenden Haftvermittlerschichten, die die inneren, sehr dünnen Materialsichten bei den mit diesem Werkzeug hergestellten 6-Schicht-Produkten mit Schichtaufbau (von innen nach außen)

PE-HD / Haftvermittler / EVOH / Haftvermittler / Regenerat / PE-HD

bilden (Abbildung 5-55 nächste Seite).

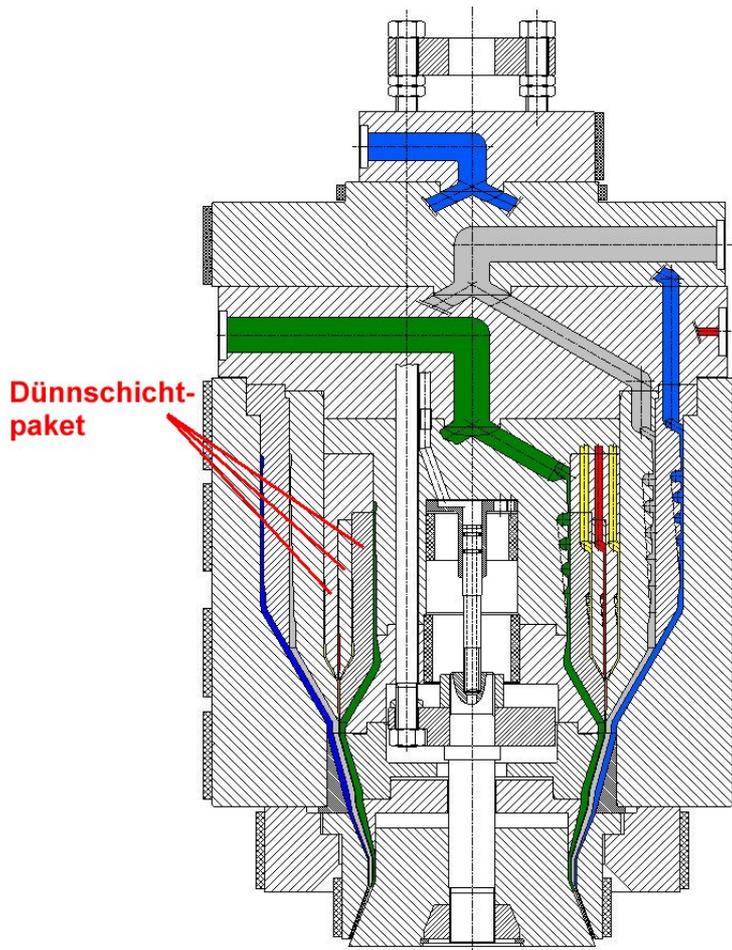


Abbildung 5-55 ETA-6-Schicht-Coextrusions-Werkzeug des Typs HKWS-6-300/500

Bei diesem Werkzeugtyp wird eine Verbesserung des Spülverhaltens nicht für die Beschleunigung von Material- und Farbwechseln der üblichen Art, d.h. bei einer Umstellung zur Herstellung von Produkten mit anderem Materialaufbau oder anderen Farben benötigt, da dieser Werkzeugtyp typischerweise in Anlagen eingesetzt wird, die über Monate oder Jahre ausschließlich ein Produkt mit einem unveränderten Satz an Materialtypen für die einzelnen Schichten herstellen.

Die Forderung nach einem verbesserten Spülverhalten zur Verringerung der während des Spülens verbrauchten Materialmengen resultiert hier aus den Spülvorgängen, die regelmäßig beim Abstellen und Anfahren der Anlagen vor und nach längeren Produktionspausen, z.B. an Wochenenden, durchgeführt werden. Vor einem solchen längeren Stillstand muss das EVOH-Barrierschichtmaterial mit einem thermisch stabilen PE-LD aus dem Werkzeug herausgespült werden, weil das thermisch empfindliche EVOH während einer längeren Stillstandzeit in den Fließkanälen des Werkzeugs verbrennen und Ablagerungen bilden würde. Beim Wiederanfahren der Anlage muss dann zunächst in einem umgekehrten Spülvorgang das PE-LD wieder durch EVOH ersetzt werden. Ähnliche Spülprozedu-

ren werden abhängig von den eingesetzten Materialtypen zuweilen ebenfalls bei den beiden Haftvermittlerschichten und der Regeneratschicht durchgeführt.

Die Spülvorgänge vor und nach dem Abstellen der Anlagen verursachen einen hohen Materialverbrauch und benötigen einige Zeit. Insbesondere das bei den Spülvorgängen ausgespülte und wegen der Vermischung mit dem PE-LD-Spülmaterial nicht weiter verwendbare EVOH stellt einen hohen Kostenfaktor dar.

Mit dem optimierten Dünnschichtpaket wurde das Ziel verfolgt, bei der EVOH-Schicht und den Haftvermittlerschichten deutlich kürzere Spülzeiten und einen verringerten Materialverbrauch zu erreichen. Dazu wurde ein Dünnschichtpaket mit spülzeitoptimierten Fließkanalgeometrien angefertigt und in ein bei der Firma Kautex Textron Benelux bvba, Tessenderlo, Belgien vorhandenes Ersatzwerkzeug eingebaut. Das optimierte Ersatzwerkzeug wurde dann in eine Produktionsanlage eingesetzt, die seit einigen Jahren mit einem bis auf das Dünnschichtpaket baugleichen Werkzeug in Betrieb ist.

Da an der Produktionsanlage ansonsten keine weiteren Modifikationen vorgenommen wurden, konnte unter Produktionsbedingungen ein unverfälschter Vergleich des Spülverhaltens des optimierten Dünnschichtpakets mit der bisher eingesetzten Werkzeugausführung durchgeführt werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung des Spülverhaltens. Das optimierte Dünnschichtpaket ermöglicht deutlich kürze Spülzeiten und einen geringeren Materialverbrauch während der Spülvorgänge. Eine genauere Quantifizierung der Verbesserungen steht jedoch aus.

Bei dem bisherigen Produktionseinsatz haben sich weitere Vorteile des optimierten Dünnschichtpakets herausgestellt. Durch die verweilzeitoptimierten Fließkanalgeometrien sind die Schichtdickenverteilungen der Dünnschichten auf dem Umfang gleichmäßiger und das Werkzeug ist unempfindlicher gegen Ablagerungen von thermisch geschädigtem bzw. verbranntem Material geworden, welche sich zunächst anhand von Streifen in den Dünnschichten zeigen, bevor sie nach längerer Zeit so dick anwachsen können, dass sie die Fließkanäle lokal blockieren, wodurch in den Dünnschichten Lücken entstehen. Um die Unterschiede bei der Bildung von Materialablagerungen genauer vergleichen zu können, wurde das bisher in dieser Anlage eingesetzte Werkzeug demontiert und genau auf Materialablagerungen untersucht. Das Werkzeug mit dem optimierten Dünnschichtpaket soll nach einigen Monaten Betriebszeit zum Vergleich in ähnlicher Weise ebenfalls demontiert und auf Materialablagerungen untersucht werden.

5.7 Erprobung einer spülzeitoptimierten Werkzeuggeometrie an einem Mehrschicht-Blaskopf

Die mit einem auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 3.4 modifizierten Blasfolienwerkzeug von der Fa. Reifenhäuser durchgeführten Technikumsversuche wurden von der Uni mittels der Farbmessung nach dem bereits beschriebenen Prinzip ausgewertet.

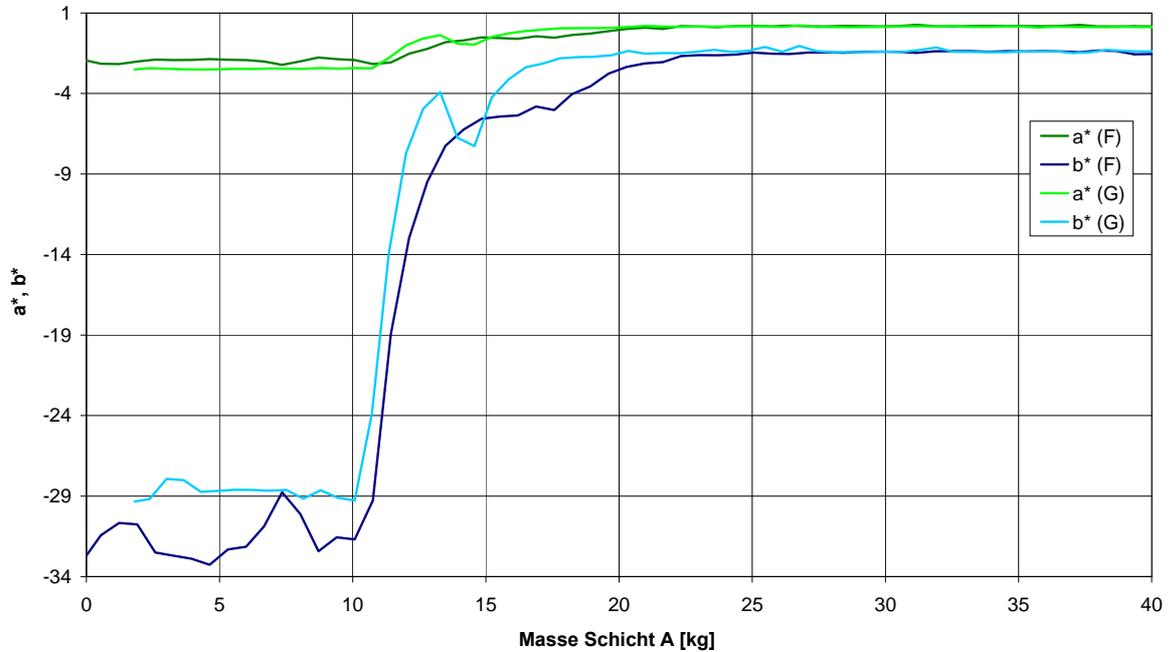


Abbildung 5-56 Vergleich Farbwechsel LDPE mit 2 % Blau 4500 anorganisch

Obwohl sich anhand der Farbverläufe eine deutliche Änderung der Spülcharakteristik nachweisen ließ, konnte die totale Spülzeit bzw. Materialmenge nicht signifikant reduziert werden.

Auch eine erneute Versuchsdurchführung mit leichter Modifikation der Werkzeugkanalgeometrie ergab keine Verbesserung im Spülverhalten des Werkzeuges.

6. Alternative Steuer- und Regelungskonzepte für Anfahr- und Produktwechselvorgänge

6.1 Analyse vorhandener Steuerungskonzepte

Einen grundlegenden Überblick über die praktische Bedienbarkeit eingesetzter Steuerungssysteme im Einsatz zu erlangen, wurde von der Uni Interview mit den Anlagenbedienern zu den Schwerpunktthemen Spülprozess, Spülfähigkeit, Automatisierungsgrad und Fähigkeit zur Unterstützung geführt. Die so erfassten Anlagentypen sind sowohl Mono- als auch Coexanlagen verschiedenster Generationen. Neben den Steuerungen, die bei den Projektpartnern im Einsatz sind, sind auch verschiedene Hersteller von Folienanlagen auf der Kunststoffmesse K2004 in Düsseldorf besucht worden, um deren Steuerungstechnik in die Untersuchungen mit aufzunehmen. Auf der Messe wurde der Schwerpunkt der Recherchen speziell auf die Möglichkeiten der Steuerung bei der Unterstützung von Spülprozessen gelegt. Die Ergebnisse sind in die Entwicklung des alternativen, erweiterten Steuerungskonzeptes eingeflossen.

Gängige Steuerungen im Einsatz

Die meisten Hersteller bieten ihre Anlagen heute mit Steuerungen an, die alle Komponenten ansteuern können, wobei diese meistens in zwei Einheiten aufgeteilt sind. Von einer Einheit aus wird die Anlage mit den Extrudern, der Gravimetrie, der Kühlung und dem Abzug gesteuert. Die Steuerung der Wickeleinrichtung wird an einer zweiten Einheit vorgenommen. Neben dem ganz praktischen Argument, dass der Bediener den jeweiligen Anlagenteil im Blick hat, ist die Teilung ohnehin aus Sicherheitsgründen vorgeschrieben.

Unterschiede gibt es hauptsächlich bei der technischen Ausführung der Steuerungseinheiten. Verbreitet sind heute Steuerungen, die über ein Bedienterminal, oftmals auch mit Touchscreen verfügen. Von einer Bedieneroberfläche aus gelangt man über Schaltflächen in verschiedene Untermenüs für die einzelnen Anlagenteile. Dort können alle Einstellungen vorgenommen und die aktuellen Prozessparameter abgefragt werden. Das heißt es können nicht nur die Einstellungen vorgenommen, sondern auch gleichzeitig die Abweichungen und damit die Qualität kontrolliert werden. Zudem bieten diese Steuerungen die Möglichkeit Einstellungen die sich bewährt haben zu speichern und für einen späteren Auftrag als Rezept zu hinterlegen. Neben den Prozessparametern wird auch der aktuelle Produktionsstatus ständig erfasst. Alle Steuerungen nutzen diese Daten für die Regelung der Gravimetrie, indem sie die neu eingewogenen Massen an Granulat oder Zuschlagsstoffen dem noch verbleibenden Teil des Auftrags so anpassen, dass die Vorratsbehälter bei Beendigung des Auftrags nahezu leer sind.

Es gibt aber auch heute noch einige Hersteller, die für ihre Anlagen Steuerungen mit konventionellen Drehschaltern und Knöpfen und digitalen Anzeigen anbieten. Die Einstellung der einzelnen Prozessparameter erfolgt an gesonderten Schaltern, was die Steuerungseinheit komplex werden lässt und die Übersichtlichkeit verringert. Programme oder Rezepte können in diesen Steuerungen nicht hinterlegt werden. Diese Steuerungen werden aber nur noch in Anlagen im niedrigeren Preissegment eingesetzt und sind hauptsächlich für Märkte in Südamerika und Asien bestimmt.

Viele Anlagen, die bei deutschen Verarbeitern im Einsatz sind, sind z.T. älteren Baujahrs und verfügen noch über Steuerungen dieser Art, da die Nutzungsdauer einer Anlage über 20 Jahren liegen kann. Problematisch ist, dass sich bei älteren Anlagen, die in der Zeit errichtet wurden als Steuerungen, wie sie heute eingesetzt werden noch nicht geplant waren. Somit gestaltet sich das Umrüsten auf neue Steuerungen als sehr aufwendig, weil die entsprechenden Schnittstellen natürlich nicht vorhanden sind.

Das Spülprogramm Purge Assist

Die Maschinenhersteller Windmüller&Hölscher und Kiefel bieten in ihren Steuerungen als Zusatztool das Spülprogramm „Purge Assist“ an. Dieses Programm soll den Spülprozess und damit den Produktwechsel beschleunigen und die Ausschussproduktion verringern. Dazu werden die einzelnen Extruder gezielt angesteuert. Der Extruder mit dem größten Masseausstoß wird als Leitextruder definiert, die anderen als Nebenextruder. Durch das schnelle Ändern der Drehzahlen und damit des Masseausstoßes der einzelnen Extruder sollen die Komponenten schneller gereinigt werden. Um zu gewährleisten, dass die Folienblase stabil bleibt und nicht abreißt muss der gesamte Masseausstoß nahezu konstant gehalten werden. Das wird dadurch erreicht, dass die Drehzahlen des Leitextruders und der Nebenextruder genau entgegengesetzt verändert werden. Wird die Drehzahl des Leitextruders also abgesenkt, müssen die Drehzahlen der anderen Extruder entsprechend steigen. Wird dann die Drehzahl des Leitextruders schnell erhöht, müssen die Drehzahlen der anderen Extruder in gleichem Maße sinken, um den gesamten Masseausstoß konstant zu halten.

Die Idee dahinter ist, dass sich in dem Extruder, dessen Drehzahl schnell erhöht wird, auch der Druck und die Schmelzegeschwindigkeit plötzlich erhöhen. Dadurch soll in den Bereichen, die schlecht zu spülen sind, weil die Verweilzeit der Schmelze dort hoch ist, die anhaftende Schmelze durch die steigenden Scherkräfte besser gespült werden.

Dieses Spülprogramm läuft vollkommen automatisch ab. Es muss lediglich manuell per Knopfdruck gestartet und beendet werden. Die Entscheidung wann der Reinigungsprozess beendet werden kann liegt beim Bediener.

Zusammenfassung der Recherchen

Bei allen Recherchen haben sich zwei Kategorien von Steuerungen herauskristallisiert:

Es werden auf der einen Seite Maschinen angeboten, deren Steuerung einen sehr hohen Personalaufwand bedarf. Um einen effizienten Betrieb durchzuführen, müssen die Maschinenbediener über ein sehr großes Know-how verfügen. Die Steuerungen bieten keinerlei Möglichkeiten Daten zu sichern und auszuwerten, Erfahrungswerte anhand von Rezepten zu speichern und zu reproduzieren und somit einen Lernprozess ständiger Optimierung zu gewährleisten. Das Betreiben solcher Anlagen ist sehr personengebunden und wichtige betriebswirtschaftliche Parameter sind von der Tagesform des Bedieners abhängig. Eine drastische Ausschussreduzierung ist somit nicht möglich. Die Absatzmärkte dieser Hersteller liegen auch ausschließlich in sogenannten Billiglohnländern, wo der Anteil der Personalkosten deutlich geringer ist, als beispielsweise in den westlichen Industriestaaten. Die ständig steigenden Rohstoffpreise üben aber großen Druck aus, den Ausschuss zu reduzieren. Diese Anlagen sind sozusagen nur mit den Basics ausgerüstet und eignen sich besonders für die Massenproduktion einzelner Produkte und seltener Auftragsumstellung. Da die Ansprüche an die modernen Kunststoffverarbeiter von Flexibilität und ständiger Optimierung ihrer Produkte geprägt sind, genügen diese Maschinenkonzepte nicht um diesen gerecht zu werden.

Die zweite Gruppe von Maschinenherstellern bemüht sich laufend, die Bedienung der Anlagen zu optimieren und immer mehr zu automatisieren. Die Konzepte, die zurzeit angeboten werden, gehen schon in die richtige Richtung, sind aber noch weit davon entfernt, den Blasfolienextrusionsprozess von dem Know-how des Einzelnen loszulösen. Die meisten Anlagen werden abgesehen vom Wickler über ein Terminal gesteuert, was die Arbeit sehr erleichtert. Dem Bediener wird über eine logische Menüführung die Möglichkeit geboten schnell, effektiv und bequem seine Arbeit zu verrichten. Es ist auch fast immer Standard, dass man Rezepte hinterlegen und wieder abrufen kann. Dies erfordert aber eine hohe Qualifikation des Bedieners. Bei den meisten Anbietern sucht man jedoch vergeblich nach einem Spülprogramm, was Produktwechsel erleichtern würde. Es fehlt auch komplett die Möglichkeit, die Anlage an und herunterzufahren. Deswegen sieht es im tatsächlichen Betrieb so aus, dass diese modernen Anlagen genau so gefahren werden wie die Basicanlagen. D.h., die Möglichkeiten werden entweder nicht genutzt, weil sie noch nicht ausgereift sind und viel Einsatz vom Einzelnen verlangen oder Standardvorgänge sind noch nicht ausreichend sicher. Also gestaltet sich das Arbeiten genauso wie an den Basicanlagen.

6.2 Bewertung der Prozessfähigkeit der Anlagen

Durch die Besuche bei den Verarbeitern wurde deutlich, dass es weder einen typischen Produktionsalltag, noch einen repräsentativen Anlagenbediener gibt.

Der Produktionsalltag wird hauptsächlich geprägt durch die abzuarbeitenden Aufträge. Wie sich herausstellte, gibt es sowohl zwischen den Verarbeitern, als auch zwischen den einzelnen Anlagen, teilweise deutliche Unterschiede in der durchschnittlichen Auftragsgröße. Die Anzahl der notwendigen Produktwechsel und der daraus resultierende finanzielle Verlust durch Ausschussproduktion und Kapazitätsverlust bewegen sich daher in weiten Grenzen. Außerdem wurde deutlich, dass die Produktwechsel bei weitem nicht der alleinige Grund sind, warum große Menge Müll produziert und damit Ressourcen verschwendet werden.

Zudem lieferte die Befragung der Bediener ebenfalls sehr unterschiedliche Ergebnisse. Einige der befragten Personen waren mit der derzeitig eingesetzten Steuerung sehr zufrieden und sahen keinen Grund darin etwas zu ändern. Andere hingegen sahen durchaus Spielraum für Verbesserungen und hatten auch schon konkrete Vorstellungen darüber, mit welchen Funktionen ein Spülvorgang unterstützt werden könnte. Diese unterschiedlichen Ansichten mögen zum Teil daher rühren, dass der Produktionsalltag wie zuvor beschrieben bei den befragten Personen sehr unterschiedlich aussieht. Auch wurde bei einigen der Befragten eine Ablehnung gegenüber moderneren Steuerungen mit automatisierten Funktionen festgestellt, da sie offensichtlich fürchten, dass dadurch Arbeitsplätze eingespart werden könnten.

Aus den beschriebenen Beobachtungen wurde zudem deutlich, dass der Einsatz einer moderneren Steuerung mit automatisierten Funktionen nicht grundsätzlich notwendig ist. Die Anforderungen an die Steuerung unterscheiden sich zwar prinzipiell nicht, der Nutzen fällt aber sehr unterschiedlich aus und wird aufgrund dessen nicht in allen Fällen eine zusätzliche Investition rechtfertigen können.

Wenn man jedoch die zukünftige Entwicklung prognostiziert, werden Anlagen mit einer modernen Steuerung, die Prozesse automatisiert, einen klaren Wettbewerbsvorteil haben.

6.3 Entwicklung von Strategien und Konzepten für schnelle Anfahr- und Produktwechselfvorgänge

In Zusammenarbeit zwischen der Uni und der Fa. Reifenhäuser wurde ein Konzept entwickelt, dass eine programmierte Erweiterung des aktuellen Steuerungsprogramms der Fa. Reifenhäuser speziell für Spülprozesse beinhaltet.

Das Konzept des automatischen Spülvorgangs kann kurz so beschrieben werden:

Dem Bediener wird die Möglichkeit geboten, anhand von bis zu zehn Stützstellen, ein Profil für den Masseausstoß jedes einzelnen Extruders einzugeben. Das heißt, es werden für verschiedene Punkte auf einer Zeitachse die Werte für den Masseausstoß der einzelnen Extruder und die Dauer, wie lange der entsprechende Wert gehalten werden soll, vorgegeben. Die Werte für das Profil zwischen zwei Punkten werden aus diesen durch Interpolation berechnet. Im Betrieb wird also nach der Eingabe von den Stützstellen und das Starten des Spülprogramms durch den Bediener der gegenwärtige Arbeitspunkt als Startpunkt genommen und danach fahren die Extruder autark das vorgegebene Profil ab. Wenn das Programm beendet wird, schalten die Extruder automatisch wieder in den Handbetrieb. In der nächsten Stufe könnte die Anlage in einem massedurchsatz-einsparenden stationären Stand-by Zustand fallen. Der Bediener hat zusätzlich die Möglichkeit vorzugeben, wie oft das vorgegebene Profil abgefahren werden soll. Durch die Vorgabe der Stützstellen und somit des Profils haben die Bediener ausreichend Möglichkeit ihre eigenen Erfahrungswerte in das Spülprogramm einfließen zu lassen.

6.4 Umsetzung der entwickelten Konzepte

Die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts war Aufgabe der Softwareabteilung der Fa. Reifenhäuser.

Integrierung eines automatischen Spülvorganges

Dieser Abschnitt beschreibt das entwickelte Konzept für die Zusatzfunktionen in der Steuerung.

Das Programm automatisiert die Lastwechsel mittels vom Bediener vorgegebener Durchsatzkurven, wobei die Vorgaben sich auf wenige (im Entwurf 10) Stützwerte beschränken. Der Kurvenverlauf zwischen den Stützwerten wird linear interpoliert. Für jeden Extruder der Anlage werden die Stützwerte getrennt und voneinander unabhängig eingegeben. Zur Visualisierung existiert für jeden Extruder eine separate Sollwert- und Istwertkurve, die am Bediengerät gemeinsam in einem Diagramm dargestellt werden.

Hier sind die Vorteile, dass die Extruderdurchsatzfunktionen nicht fest gespeichert sind, sondern individuell nach den Erfahrungen eingegeben werden kann.

Bei dem vorliegenden Konzept hat der Bediener alle Freiheiten seinen eigenen optimalen Spülprozess einzugeben und immer wieder ablaufen zu lassen. Ein großer Vorteil dieses Systems ist, dass es die Möglichkeit zur ständigen Optimierung bietet. Somit kann man die Erfahrung einzelner Mitarbeiter nicht nur für immer im Unternehmen halten, sondern

man kann immer darauf aufbauen und diese weiterentwickeln. Diese Tatsache ist von immenser Wichtigkeit für ein Unternehmen, denn nur so wird der unüberschaubare Kosten- und Zeit-Faktor Spülprozess vom Einzelnen losgelöst und reproduzierbar gemacht.

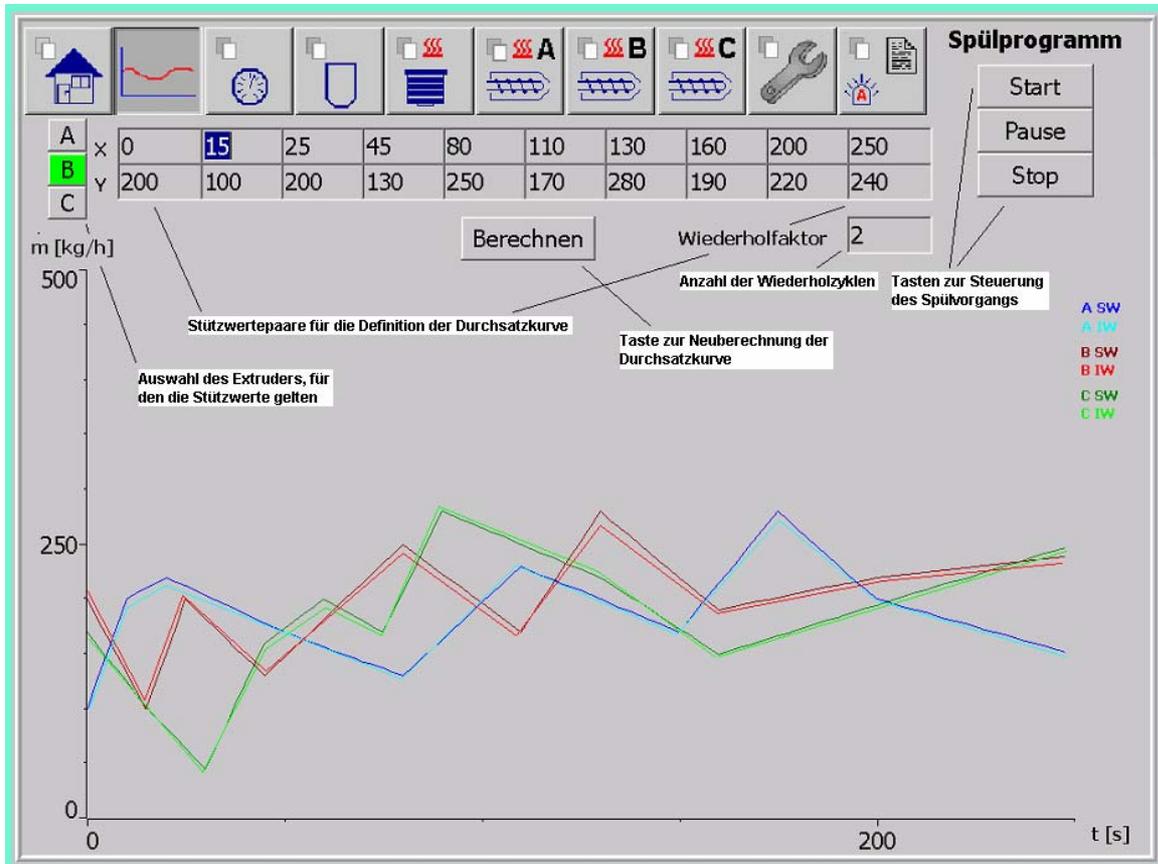


Abbildung 6-1 Darstellung des Bedienfeldes für den Spülvorgang

Die Abbildung 6-1 zeigt eine Hardcopy des für die Bedienung des Spülvorgangs vorgesehenen Bildes, welches in das vorhandene Bedienkonzept als Grundelement integriert werden soll.

Hierbei erfolgt die Berechnung der Profilkurve abschnittsweise von einem Stützwert zum nächsten mithilfe linearer Interpolation. Der erste Stützwert befindet sich im 0-Punkt der X-Achse (0 s, und Startzeitpunkt des Spülvorgangs) und weist als Y-Wert den aktuellen Durchsatzollwert des betreffenden Extruders auf. Dieser Punkt kann vom Bediener nicht verändert werden. Beim ersten nicht bedienten Stützwert (0,0), spätestens aber nach dem 10. Stützwert wird die Berechnung des Kurvenverlaufs beendet. Die Eingaben erfolgen in ganzen Sekunden für die X-Werte und ebenso als ganze Durchsatzollwerte in [kg/h] für die Y-Werte. Die Dauer des auf einen Extruder bezogenen Spülzyklus ergibt sich demnach aus dem X-Wert des letzten bedienten Stützwerts.

Für die Skalierung der X-Achse (Zeit in s) wird der größte bediente X-Wert aller Extruder herangezogen, was letztlich auch die Gesamtdauer des Spülvorgangs bestimmt. Dieser Wert dient zudem als Skalierungsfaktor für die Kurvendarstellung auf dem Bediengerät, sodass alle Kurven mit der gleichen zeitlichen Auflösung angezeigt werden.

Das so vorgegebene Durchsatzprofil kann mittels Eingabe eines Wiederholfaktors mehrfach nacheinander durchlaufen werden, somit vereinfacht sich die Eingabe von periodischen Spülzyklen.

Nach Prüfung und eventueller Korrektur durch den Bediener wird der Spülvorgang durch Tastendruck (Start) eingeleitet. Er kann jederzeit, ebenfalls durch Tastendruck, unterbrochen (Pause) oder ganz gestoppt (Stopp) werden.

Der technische Ablauf ist wie folgt vorgesehen:

Nach dem Start des Spülvorgangs durch den Bediener werden die Extruder in den Handbetrieb umgeschaltet, der aktuelle Wert für den spezifischen Durchsatz der Extruderschnecke "eingefroren" und der momentane Durchsatz als Y-Wert in die Ursprungskordinate (0,0) übernommen. Der oben erwähnte spezifische Durchsatz entspricht der Steigung der Funktion $dm/dt = f(n)$, wobei im vorliegenden Fall von einem einfachen linearen Zusammenhang zwischen Massendurchsatz und Schneckendrehzahl ausgegangen wird. Aus systemtechnischen Gründen kann für die Dauer des Spülvorgangs nicht wie im normalen Produktionsbetrieb gearbeitet werden. Das heißt, dass der Durchsatz nicht mit Regelung, also mit Rückkopplung des tatsächlichen Durchsatz-Istwertes, gesteuert werden kann. Daher wird im Spülbetrieb der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Extruderdrehzahl eine proportionale Änderung des Durchsatzes zur Folge hat.

Im weiteren Verlauf des Spülvorganges werden die durch die Durchsatzkurven definierten Sollwerte im Sekundentakt an die Extruder ausgegeben. Nach Beendigung des Spülvorganges laufen die Extruder im Handbetrieb mit dem zuletzt vorgegebenen Durchsatz weiter. Das gilt auch für den Fall, dass der Bediener den Spülvorgang mithilfe der Taste 'Pause' unterbrochen oder mit der Taste 'Stopp' beendet hat.

Die Kurvendaten liegen im Speicher der Anlagensteuerung und können per Ethernet-Kopplung durch eine geeignete Software auf einen separaten Rechner übertragen und dort weiterverarbeitet werden.

6.5 Vergleichsversuche mit dem automatischen Spülprogramm

Da die programmiertechnische Umsetzung des Konzeptes bei der Firma Reifenhäuser mehr Zeit in Anspruch nahm als erwartet, konnten innerhalb der Projektlaufzeit keine Vergleichsversuche mehr mit dem Spülprogramm durchgeführt werden. Deswegen können an dieser Stelle keine Ergebnisse vorgestellt werden.

Dennoch kann auf das Einsparpotenzial rechnerisch aufgrund der historischen Daten geschlossen werden. Anhand der Produktionsdaten einer ausgewählten Anlage wurden die Produktwechsel genauer analysiert. Insgesamt wurden auf der Anlage in dem betrachteten Zeitraum ca. 150 Produktwechsel durchgeführt. Die dabei entstehende Abfallmenge betrug im Durchschnitt ca. 150 kg pro Produktwechsel. Die tatsächlichen Werte bewegen sich im Bereich von 28 bis 406 kg. In Abbildung 3-3 sind die Anzahl der Produktwechsel nach der Abfallmenge aufgetragen.

Der größte Teil der Produktwechsel verursacht offensichtlich Abfallmengen zwischen 90 und 150 kg. Auffällig ist jedoch, dass die Anzahl der Produktwechsel zu den größeren Abfallmengen hin langsamer sinkt als zu den kleineren Abfallmengen. Vor allem gibt es eine Reihe einzelner Werte, die mit mehr als 250 kg die durchschnittliche Abfallmenge deutlich überschreiten. Die Kernaussage der Auswertung war jedoch, dass es noch andere wichtige Faktoren gibt, wie z.B. Mitarbeitermotivation, Zeitpunkt des Wechsels (Schichtende, kurz vor einer Pause) und natürlich die Qualifikation des einzelnen Mitarbeiters, bei der eine Steuerung durch Automatisierungsfunktionen eine Vereinheitlichung und Reproduzierbarkeit erreichen kann.

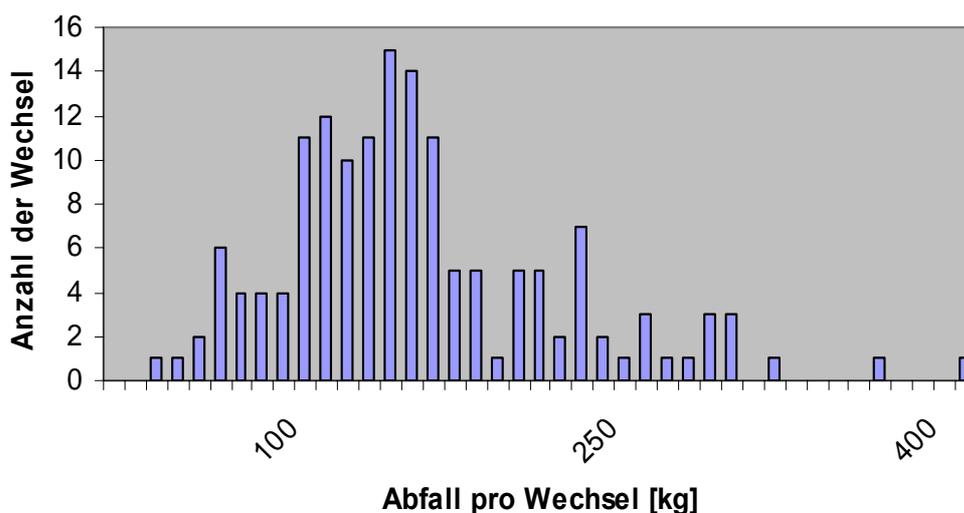


Abbildung 6-2 Verteilung der Produktwechselabfälle

Über die Ursachen des Einflusses des Bedienpersonals kann hier nur spekuliert werden, aber möglicherweise kommen die außergewöhnlich hohen Abfallmengen vereinzelt da-

durch zustande, dass das Personal gerade während es auf einer Anlage den Produktwechsel durchführen müsste und gleichzeitig auf einer anderen Anlage einen Fehler beheben muss. Oder der Wechsel steht gerade zur Pause oder zum Schichtwechsel an und wird einfach hinausgezögert oder nicht beendet.

Genau an diesem Punkt kann das neue Steuerungskonzept ansetzen. Die bisher durch die sehr hohen Abfallmengen gekennzeichneten Wechsel ließen sich dann im Säulendiagramm im Bereich der anderen Produktwechsel einordnen. Die Verteilung der Häufigkeit über der Abfallmenge würde dann unter der Voraussetzung, dass die Art des Produktwechsels keinen maßgeblichen Einfluss auf dessen Dauer hat, einer Normalverteilung entsprechen und somit in etwa die Form der Gaußschen Glockenkurve annehmen. Zudem wäre es vorstellbar mit einer automatisierten Steuerung den Produktwechsel nicht nur kalkulierbarer zu machen, weil er reproduzierbar würde, sondern vielmehr auch zu optimieren. Dabei darf natürlich nicht außer acht gelassen werden, dass alle Anforderungen die an einen Spülprozess gestellt werden auch erfüllt sein müssen.

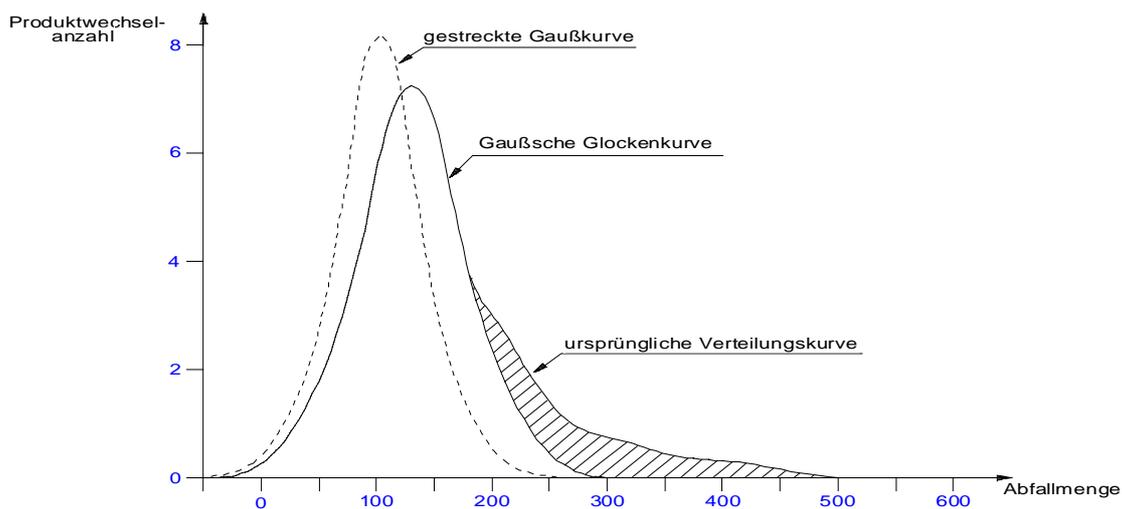


Abbildung 6-3 Verteilung der Abfallmengen

Graphisch betrachtet entspricht die gesamte Abfallmenge der Summe der einzelnen Balkenelemente, deren Wert sich aus dem Produkt ihrer Höhe und dem Wert ihres Standorts auf der horizontalen Achse zusammensetzt. Legt man eine Verteilungskurve über die Balkenelemente, so erhält man eine Kurve, deren Form in etwa der einer Gaußschen Glockenkurve entspricht. Da die Gesamtlänge aller Balkenelemente, die der Anzahl der Produktwechsel entspricht, gleich bleibt, kann die Automatisierung den Flächenschwerpunkt unter der Kurve weiter nach links rücken. Anhand von Abbildung 6-3 wird dies verdeutlicht. Durch eine Automatisierung kann die Verteilungskurve zunächst in die Form der Glockenkurve überführt werden. Das heißt, die Fläche, die rechts zwischen der Glocken-

kurve und der ursprünglichen Verteilungskurve liegt, wird nach links verschoben. Durch eine Standardisierung und Optimierung wird die Kurve schmaler und höher und gleichzeitig weiter nach links verschoben. Die Abfallmengen werden also weniger streuen und im Durchschnitt sinken.

Auf der betrachteten Anlage gab es im untersuchten Zeitraum 14 Produktwechsel mit einer Abfallmenge von jeweils mehr als 250 kg. Diese produzierten zusammen 4150 kg Abfall. Die durchschnittliche Abfallmenge der restlichen Produktwechsel beläuft sich auf ca. 135 kg gegenüber 150 kg bei Berücksichtigung der Gesamtzahlen. Gelingt es durch den Einsatz einer moderneren Steuerung diese "Spitzenwerte" zu vermeiden und auch auf den Wert von durchschnittlich 135 kg zu senken, so führt dies allein zu einer Ersparnis von über 2200 kg Granulat und somit ca. 10% der ursprünglichen Menge. Bei einem grob veranschlagten Rohstoffpreis von einem Euro pro kg entspricht dies in etwa 2.200 Euro. Zusätzliches Einsparpotenzial liegt sicherlich auch noch in der Optimierung des Produktwechsels. Eine deutliche Reduzierung der durchschnittlichen Abfallmenge von 135 kg sollte dadurch realisierbar sein. Somit ließen sich durch den Einsatz einer Steuerung mit zumindest teilautomatisiertem Produktwechsel mehrere tausend Euro allein an Rohstoffkosten auf dieser Anlage sparen. Neben den Rohstoffkosten könnten auch die Personalkosten gesenkt werden, weil der Bedienungsaufwand reduziert würde und somit mehr Anlagen von einem Arbeiter parallel betreut werden könnten. Außerdem führt die Verringerung der Ausschussproduktion auf das Produkt bezogen zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und der Entsorgungskosten. Gleichzeitig steigt die Produktivität, weil durch die Verkürzung der unproduktiven Zeit Produktionszeit hinzugewonnen wird. Insgesamt betrachtet ist der finanzielle Vorteil also noch deutlich höher als der Wert des eingesparten Rohstoffes.

7. Zusammenfassung

Prozessführung von Spülprozessen:

Vor der Untersuchung des Einflusses verschiedener Prozessparameter und Rohstoffe auf den Spülvorgang wurden Ist-Zustände auf verschiedenen Produktionsanlagen der Projektpartner erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten meist sehr unterschiedliche Spülzeiten und Spülmengen in Abhängigkeit von den eingesetzten Rohstoffen, den Prozessparametern sowie den jeweiligen Bediener der Anlagen. Zur Erfassung und zur Beschreibung des Spülvorganges konnte somit ein Vergleichsstandard entwickelt werden, der auf der Basis der Farbmessung eine Beurteilung des jeweiligen Stadiums des Materialwechsels ermöglicht. Nachteilig erwies sich nur die recht aufwendige Vermessung der Folienproben und extrudierten Stränge im Anschluss an die Versuche und kann in Zukunft sicherlich durch eine Online-Farbmessung äquivalent ersetzt werden.

Die Untersuchungen zu den verschiedenen Einflussfaktoren auf den Spülvorgang gliederte sich in die Einflussbereiche Prozessführung, Materialien und Spülmedien.

Die Versuchsreihen bezüglich der Prozessführung beinhaltete Temperatur- und Durchsatzvariationen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass eine Einflussnahme über die Temperaturführung keine Optimierung des Spülvorganges herbeiführt, der Ansatz der Durchsatzvariation hingegen vielversprechende Ergebnisse aufzeigte und bei verschiedenen zu spülenden Materialien deutliche Vorteile in Form der Abfall- und Zeitreduzierung erbrachte (siehe Kap. 3.4-3.6).

Zum Einfluss der Materialien wurde vorwiegend der Einfluss durch Pigmentbathe auf die Spüldauer und den Spülausschuss untersucht. Als Haupteinflussfaktor der Pigmentbathe kristallisierte sich vor allem die durchschnittliche Pigmentgröße heraus. Die Ergebnisse belegen, dass mit größer werdenden Pigmenten die Spüldauer des Materialwechsels abnimmt. Einen besonderen Problembereich stellen die feinen Teilchenanteile dar, die aus den rauen Oberflächenstrukturen strömungsmechanisch nur sehr schwer zu spülen sind und damit auch für die langanhaltenden Farbschleier beim Spülprozess verantwortlich gemacht werden können (siehe Abbildung 4-5).

Zudem konnte eine deutlich unterschiedliche Spülcharakteristik verschiedener Farbbatthe nachgewiesen werden. So benötigte ein organisches Blau (Kupfer-Phtalocyanine) mehr als die dreifache Menge an Spülmaterial wie ein anorganisches Blaupigment (Ultramarinblau). Eine Erklärung dieser Beobachtung konnte trotz des intensiven Kontaktes mit den Pigmentherstellern nicht gefunden werden. Lassen es die Produkthanforderungen zu, so kann derzeit lediglich bei der Planung und dem Entwurf von Produkten eine umweltge-

rechte Auswahl von Farbpigmenten, hinsichtlich der Abfallmengen und des Energieverbrauches eines Materialwechsels, getroffen werden.

Der Einsatz verschiedener Spülmedien lieferte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zwar konnten mitunter geringe Verbesserungen des Spülprozesses beobachtet werden, jedoch verliert der geringe einzusparende Materialbedarf durch die notwendige anschließende Reinigung des Spülmediums an Bedeutung.

Analyse verschiedener Oberflächenbeschichtungen:

Durch die große Anzahl von Technikumsversuchen war die Charakterisierung und Analyse der breiten Auswahl verschiedener, in der Praxis eingesetzter, Oberflächenbeschichtungen möglich. Insbesondere die aufwendige Kontaktwinkelmessung ermöglichte nach den Adhäsionstheorien eine Klassifizierung und Unterscheidung der verschiedenen Beschichtungen. So zeigten sie zwar in den polaren und dispersen Anteilen der Oberflächenenergie mitunter deutliche Abweichungen auf, die Unterschiede in der gesamten Oberflächenenergie der Beschichtungen hingegen ließ Effekte in der Praxis kaum erwarten. Bestätigung dieser Beobachtungen lieferten schlussendlich umfangreiche Extrusions- und Produktionsversuche im Technikum der Universität und der Projektpartner. Trotz einzelner Ausnahmen bei bestimmten Material-Beschichtungs-Kombinationen, blieb die erhoffte Verringerung der Verweilzeitspektren zumeist aus. Trotz des vielseitigen Einsatzes der Beschichtungen in Verarbeitungsbetrieben aller Art erwies sich keine Beschichtung im Vergleich zu standardmäßig eingesetzten Chromschichten als geeignet, die Spülzeiten und den Produktionsabfall deutlich zu minimieren.

Geometrieoptimierung der verarbeitenden Werkzeuge:

Die durchgeführten Untersuchungen stützen die These, dass hohe und einheitliche Wandschergeschwindigkeiten in Extrusionswerkzeugen zu einem verbesserten Spülverhalten führen. Hieraus lassen sich z.B., für die in Blasfolienwerkzeugen vorhandenen Geometrien, verschiedene Strategien zur Geometrieoptimierung entwickeln. Am Beispiel einer 90°-Umlenkung wurden im Rahmen der Arbeiten verschiedene Optimierungen durchgeführt und bewertet (siehe Kap. 5).

Auf der Grundlage der in diesem Arbeitspunkt konzipierten und untersuchten geometrischen Einzelmaßnahmen zur Spülzeitoptimierung der Fließkanalgeometrien von Extrusionswerkzeugen, wurden verschiedene Teilwerkzeuge von Projektpartnern konstruiert und gebaut, bei denen jeweils mehrere Maßnahmen umgesetzt wurden. Bei der Konstruktion der optimierten Teile und Werkzeuge wurde zur Verbesserung des Material- und Farbwechselverhaltens konsequent darauf geachtet, die von Schmelze benetzten Fließ-

kanaloberflächen zu reduzieren und lokal schlecht gespülte Fließkanalbereiche zu vermeiden.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung des Spülverhaltens. Das optimierte Dünnschichtpaket z.B. ermöglicht deutlich kürze Spülzeiten und einen geringeren Materialverbrauch während der Spülvorgänge (vgl. Kap. 5.6.2.). Bei dem bisherigen Produktionseinsatz haben sich zudem weitere Vorteile des optimierten Dünnschichtpakets herausgestellt. Durch die verweilzeitoptimierten Fließkanalgeometrien sind die Schichtdickenverteilungen der Dünnschichten auf dem Umfang gleichmäßiger und das Werkzeug ist unempfindlicher gegen Ablagerungen von thermisch geschädigtem bzw. verbranntem Material geworden.

Die Konstruktionen von Werkzeugen zur Beschichtung oder Umschichtung schwer zu spülender Randschichten erbrachte eine deutliche Reduzierung von bis zu 25 % an Spülmasse. Einzelne dieser verschiedenen Konzepte (vgl. Kap. 5.4 und 5.5) sind aufgrund der Ergebnisse bereits patentiert und bei verschiedenen Verarbeitern erfolgreich im Einsatz. So werden derzeit weitere Erfahrungen zur Optimierung von Extrusionswerkzeugen gesammelt, die in zukünftige Entwicklungen miteinfließen werden.

Alternative Steuer- und Regelungskonzepte:

Aufgrund zeitlicher Verschiebungen konnte der Einsatz eines neuentwickelten Steuer- und Regelungskonzeptes an der Technikumsanlage der Universität im Rahmen des Projektes nicht verwirklicht werden.

Aufgrund der erhobenen Produktionsdaten in den kunststoffverarbeitenden Betrieben ist jedoch eine Eingrenzung und Verbesserung der längsten Spülprozesse zu erwarten. Diese werden zumeist durch individuelle Umstände der Maschinenbediener verursacht. Das neuentwickelte Konzept ermöglicht dem Bediener, Reinigungs- und Materialwechsel zukünftig weitaus kontrollierter und reproduzierbarer durchzuführen. Durch automatisierte und produktspezifische Spülprogramme wird dem Maschinenführer ein Werkzeug an die Hand gegeben, das die Durchführung von Produktwechseln weitaus wirtschaftlicher und ökologischer als in der Vergangenheit ermöglicht.

8. Literaturverzeichnis

- [An98] Anastasiadis, S. H.; Hatzikiriakos, S. G.: The Work of Adhesion of Polymer/Wall Interfaces and its Association with the Onset of Wall Slip. *J. Rheol.* 42 (1998) 4, S. 795/812.
- [Bal03] Baldinger, P.: Der fliegende Farbwechsel – das Produktivitätspotenzial der ENGEL MARATHON Schneckensysteme. Vortrag auf dem ENGEL Symposium 2003.
- [BASF02] BASF AG. Technische Informationen TI/P 3392d, Oktober 2002: Farbmittel für Kunststoffe.
- [Bi83] Bischof, C.; Possart, W.: Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie Verlag 1983.
- [Bra] Brand, J.; Beckmann, C.; Gäbler, J.: Die Vielfalt der Kohlenstoffschichten – Ein Überblick. Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig.
- [Bud03] Budde, C.: Kopplung von Evolutionsstrategien mit Gambit/Fluent zur Gestaltoptimierung. Fluent CFD-Konferenz, 24./25.09.2003, Bingen
- [Bus04] Bussmann, M.: Präzision auf laufendem Meter. Messebericht zur K 2004, Kunststoffe 12, S. 54-58, 2004
- [Eul96] Eulenstein, T.; Hoster, B.; Lutterbeck, J.: Optimierungsmöglichkeiten von Elastomerwerkzeugen durch Oberflächenbehandlung. In: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik: Spritzgießen und Extrudieren von Elastomeren. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- [Fer97] Feron, B.; Wolf, D.; Wortberg, J.: Optimited Cooling of Blown Film by the Use of FE-Simulation. The Polymer Processing Society, European Meeting, Stuttgart, 1995
- [Fow64] Fowkes, F. M.: Predicting Attractive Forces at Interfaces. *Ind. Eng. Chem.* 56 (1964), S. 40/53.
- [Gä83] Gächter, R.; Müller, H.: Taschenbuch der Kunststoff-Additive. 2. Ausg. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1983.
- [Gev02] Gevgilili, H.; Kalyon, D. M.: Catastrophic Failure of the No-slip Condition at the Wall During Torsional Flows and Development of Gross Surface Irregularities During Capillary Flow of three Polymers. Society of Plastics Engineers ANTEC Technical Papers, 48 (2002).
- [Gl04] Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2004.
- [Göt00] Götz, W.: Hart im Nehmen. *Plastverarbeiter* 51 (2000) 9, S. 22/25.
- [Gri96] Grischke, M.: Hartstoffschichten mit niedriger Klebneigung. *JOT* 1 (1996), S. 4/7.
- [Gr04b] Groß, C.; Wortberg, J.: Reducing Purge Time and Substandard Goods at Color Change in Blown Film Extrusion by Selective Assortment of the Colored Pigments. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society PPS, Akron (OH), USA, June 2004.
- [Hab97] Habenicht, G.: Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer 1997.
- [Hatz93] Hatzikiriakos, S. G.; Stewart, C. W.; Dealy, J. M.: Effect of Surface Coatings on Wall Slip of PE-LLD. *Intern. Polymer Processing* 8 (1993) 1, S. 30/35.
- [Hatz95] Hatzikiriakos, S.G.; Hong, P.; Ho, W.; Stewart, C. W.: The Effect of Teflon Coatings in Polyethylene Capillary Extrusion, *J. Appl. Polym. Sci.*, 55 (1995), S. 595/603
- [Hen01] Hendess, P. M.; Bessemer, R. H.: Pipe and Tubing Extrusion. In: The SPE Guide on Extrusion Technology and Troubleshooting, Society of Plastics Engineers, 2001.
- [Her95] Herbst, W.: Industrielle organische Pigmente: Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. Weinheim: VCH 1995.
- [Hie01] Hieke, A.: Verschleißfeste Antihafschichten auf Basis modifizierter diamantähnlicher Kohlenstoffschichten. *Vakuum in Forschung und Praxis* 1 (2001), S. 9/13.

- [Hor80] Horsthemke, A.: Die Benetzbarkeit metallischer Oberflächen durch Wasser. Dissertation, Univ. Hannover 1980.
- [Isr85] Israelachvili, J. N.: Intermolecular and Surface Forces. 2. Aufl. New York: Academic Press 1985.
- [Kay02] Kayser, O.: Kombinierte Anwendung von Plasmanitrieren und PVD-Beschichtung im Kunststoffmaschinen- und -formenbau. *Vakuum in Forschung und Praxis* 14 (2002) 3, S. 156/160
- [Lar04] Larrazabal, H. J.; Hrymak, A. N.; Vlachopoulos, J.: Effect of Chemical and Morphological Conditions of the Die Wall on the Processability of linear polyolefins 335. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Akron (OH), USA, June 2004.
- [Mau00] Mauer Metallurgische Verfahrenstechnik GmbH: Oberflächenbeschichtungen für die Kunststoffverarbeitung. <http://www.mauer-mvt.de/v3.htm>
- [Me81] Menges, G.; Parey, J.; Brimmers, H.: Vermeiden von Ablagerungen im Werkzeug bei Extrusionsverfahren. *Maschinenmarkt* 87 (1981) 101, S. 2178/2180.
- [Mi91] Michaeli, W.: Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk. 2. Aufl. München, Wien: Hanser 1991.
- [Mi99] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 4. Aufl. München, Wien: Hanser 1999.
- [Mü03] Müller, A: Coloring of Plastics. München: Carl Hanser Verlag 2003.
- [Nie04a] Niemeier, H.; Rivera Sánchez, E.; Wortberg, J.: Automatic Residence Time Optimization of 90° Elbows in Extrusion Dies. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Akron (OH), USA, June 2004.
- [NN04] N.N.: Informationsblätter und Poster „Blasfolienwerkzeuge“ und „Zusatzeinrichtungen für Werkzeuge“ zur Messe K 2004, Düsseldorf 2004, ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf, 2004
- [Nu] Nutsch, G.: Komplexpraktikum Oberflächentechnik, Versuch POT 4, Barriere-Entladung. Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Plasma- und Oberflächentechnik.
- [Pal01] Palzer, S.; Hiebl, C.; Sommer, K.; Lechner, H.: Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel. *Chemie Ingenieur Technik* 73 (2001) 8.
- [Ped80] Pedly, T. J.: The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels, Cambridge Univ. Press, 1980, S. 160/234.
- [Rah04] Rahal, H.: Rohr und Profilextrusion. Messebericht zur K 2004, *Kunststoffe* 12, S. 50-53, 2004
- [Re00] Rechenberg, I.: Vorlesung Bionik I, TU Berlin, Kapitel 2: Biologische Evolution auf den experimentellen Prüfstand, WS00/01.
- [SchuA] A. Schulman GmbH: Technical Data Sheet POLYBATCH® blue 4500
- [SchuB] A. Schulman GmbH: Technical Data Sheet POLYBATCH® blue 4020
- [Schw96] Schwuger, M. J.: Lehrbuch der Grenzflächenchemie. Stuttgart, New York: Thieme 1996.
- [Se99] Semal, S.; Blake, T.D.; Geskin, V.: Influence of Surface Roughness on Wetting Dynamics. *American Chemical Society* 15 (1999), S. 8765/8770.
- [Sei02] Seidel, C.; Merten, A.; Münstedt, H.: Extrusionsdüsen aus Kunststoff. Das Düsenmaterial beeinflusst das Fließverhalten der Schmelze. *Kunststoffe* 92 (2002) 10, S. 157/160.
- [Si04] Internet Informationsschrift:
<http://www.uni-essen.de/chemiedidaktik/S+WM/Wirkung/Wirkung3.htm> (2004).
- [Ti04] TIGRES Dr. Gerstenberg GmbH, Hamburg, Internet Informationsschrift,
<http://www.tigres.de>, 2004.

- [Wal97] Walter, A.; Wortberg, J.: Energy Saving with improved drying technology. Vortrag anlässlich der SPE ANTEC `97, Toronto, 1997
- [Wen49] Wenzel, R.: Communication to the Editor – Surface Roughness and Contact Angle. J. Phys. Colloid Chem. 53 (1949), S. 1466/1467
- [Wo78] Wortberg, J.: Werkzeugauslegung für die Ein- und Mehrschichtextrusion. Dissertation, RWTH Aachen 1978.
- [Wo86] Wortberg, J.: Amortisation von Automatisierungsmaßnahmen beim Folienblasen. Kunststoffe 76 (1986) 8, 653-658
- [Wo95] Wortberg, J.; Wolf, D.; Feron, B.: Optimized Cooling of Blown Film by the Use of FE-Simulation. The Polymer Processing Society, European Meeting, Stuttgart, 1995
- [Wo96a] Wortberg, J.; Wolf, D.: Kühlluftsyste me analysieren. Plastverarbeiter 47 (1996) 5, 60-63
- [Wol92] Wolf, D.; Wortberg, J.: Blasfolienextrusion. Kunststoffe 82 (1992) 12, 1225-1229
- [Wol95a] Wolf, D.; Wortberg, J.: Dickenprofilregelung – transparent gemacht. Teil 1: P1 (1995) 9, 36-39; Teil 2: P1 (1995) 10, 40 ff.
- [Wol97] Wolf, D.; Feron, B., Wortberg, J.: Numerical Analysis of Cooling Air Systems in Film Blowing. Intern: Polymer Processing XII (1997) 1, 38-44
- [Wu82] Wu, S.: Polymer Interface and Adhesion. New York: Marcel Dekker 1982.
- [Ye88] Yekta-Fard, M.; Ponter, A.B.: The Influence of Vapour Environment and Temperature on the Contact Angle-Drop Size Relationship. J. Colloid and Interface Science, 126 (1988) 1.

Unveröffentlichte Studien- und Diplomarbeiten:

- [Ber05] Berlage, A.: Technisch wirtschaftliche Analyse von Verbesserungsmaßnahmen und Weiterentwicklung eines Blaswerkzeuges im Folien-Produktionsablauf mit einer Blasfolienextrusionsanlage, Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück, 2005
- [Bur05] Burmann, G., Wortberg, J.: Grundlagen und Strategie für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen. Beitrag zum Seminar „Auslegung von Schnecken und Werkzeugen in der Extrusion“, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, 2005
- [Fer98] Feron, B.: Entstehungsursachen der Dickenschwankungen bei der Blasfolienextrusion. Dissertation, Universität Essen, 1998
- [Gor04] Gorczyca, P.; Großmann, M.: Bewertung des Einflusses grundlegender Fließkanalgeometrien und unterschiedlicher Polymertypen auf das Spülverhalten von Extrusionswerkzeugen. Projektarbeit, Universität Duisburg-Essen, August 2004.
- [Gro05] Großmann, M.: Untersuchung der Adhäsion zwischen Polyethylen und unterschiedlich beschichteten Metalloberflächen. Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, März 2005.
- [Riv04] Rivera Sánchez, E.: Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur FEM basierten Optimierung der Verweilzeitcharakteristik einer 90°-Umlenkung für die Kunststoffextrusion. Studienarbeit, Universität Duisburg-Essen, Februar 2004.
- [Web05] Weber, C.: Einfluss von Ultraschall auf das Strömungsverhalten von Kunststoffschmelzen. Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, März 2005.
- [Wol95b] Wolf, D.: Analyse von Kühlluftsyste men zur Kühlleistungssteigerung und Verbesserung der Folienqualität. Dissertation, Universität Essen, 1995

9. Veröffentlichungen und Patentanmeldungen

Teilergebnisse aus diesem Verbundprojekt wurden seitens der Projektpartner auf folgenden Fachtagungen präsentiert:

Groß, C.; Wortberg, J.: Analysis of the influence of the variation of mass flow rate and temperature into the purge time at product change by blown film extrusion. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Akron (OH), USA, June 2004

Groß, C.; Wortberg, J.: Reducing purge time and substandard goods at color change in blown film extrusion by selective assortment of the colored pigments. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Akron (OH), USA, June 2004

Niemeier, H.: Grenzflächen- und Strömungsphänomene. Vortrag auf der 1. Duisburger Extrusionstagung – Extrusion von Folien und Platten, Duisburg, 23.-24.03.2004

Niemeier, H.; Rivera Sánchez, E.; Wortberg, J.: Automatic Residence Time Optimization of 90° Elbows in Extrusion Dies. Paper presented at the 20th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Akron (OH), USA, June 2004

Wortberg, J.; Groß, C.: Optimizing Purging Time at Product Change in Blown Film Extrusion by Selective Modification of Process Parameters. Paper presented at the Annual Technical Conference ANTEC of the Society of Plastics Engineers, Chicago (IL), USA, May 2004

Burmann, G., Wortberg, J.: Grundlagen und Strategie für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen. Beitrag zum Seminar „Auslegung von Schnecken und Werkzeugen in der Extrusion“, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, 2005

Promotionsschrift Niemeier:

Promotionsschrift Groß:

Veröffentlichungen voraussichtlich 2006 (genaue Angaben werden nachgereicht).

Patentanmeldungen

[Bu03] Burmann, G.; Wortberg, J.: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von endlosen Extrudaten, insbesondere Strang- oder Hohlprofilen (Schmelze-Randschichtabschöpfung), Patentschriften DE 103 35 354 A1 und EP 1 535 717 A1, Priorität: 28.11.2003

[Bu04] Burmann, G.; Wortberg, J.: Verfahren und Vorrichtung zum Umverteilen eines laminar strömenden Fluids in einem Strömungskanal, unveröffentlichte Deutsche Patentanmeldung, Priorität: 14.10.2004

10. Anhang

Ergänzende Tabellen:

Tabelle 10-1 Verwendete Farb-Masterbatches [Basf02, Mü03, SchuA, SchuB]

	Anorgan. Masterbatch POLYBATCH® blue 4500	Organ. Masterbatch POLYBATCH® blue 4020
Hersteller	A. Schulman GmbH	A. Schulman GmbH
Basis-Polymer	PE	PE
Spez. Dichte	1,13 g/cm ³	1,00 g/cm ³
Schüttdichte	650 g/l	625 g/l
Feuchtegehalt	< 1500 ppm	< 1500 ppm
Lichtechtheit	8	8
Wetterstabilität	4	5
Temperaturstabilität	300°C	290°C
Schmelzpunkt	80-120°C	80-120°C
Zusammensetzung	40 % Anorgan. Pigment + < 1 % Dispergiermittel	20 % Organ. Pigment + 20 % Dispergiermittel (PE Ho- mopolymer Wachs) + 60 % PE
	Anorgan. Pigment	Organ. Pigment
Chem. Formel	Na ₆₋₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ S _n (n=2-4)	
Pigmenttyp	Natriumaluminiumsilikat, sulfidhaltig, anorganisch	Cu-Phthalocyanin, β, organisch
Farbindex	Pigment blau 29	Pigment blau 15:3
Farbindex Formel	77007	74160
CAS-Nummer	57455.37.5	147.14.8
Dichte	2,35 g/cm ³	1,6 g/cm ³
Schüttdichte	keine Angaben	0,20 g/cm ³
Temperaturbeständigkeit	keine Angaben	280°C
Migration	5	5
Lichtechtheit	keine Angaben	8 (pure tone), 7-8 in PE
Wetterbeständigkeit	keine Angaben	5 (in PE)
Dispergierhärte	keine Angaben	< 10
Durchschnittliche Pig- mentgröße	1,2 µm	0,1 µm

Tabelle 10-2 Materialdaten

	PE 150 L	LD 185 BW	DOWLEX NG 5056 E	Hostalen GM 9255 F2
	DOW	ExxonMobil Chemical	DOW	Basell
Typ	PE-LD	PE-LD	PE-LLD	PE-HD
Dichte @ 23°C [g/cm ³]	0,920	0,927	0,919	0,957
Dichte @190°C [kg/m ³]	759,45	758,5	760,8	766,4
α [10 ⁻⁴ · K ⁻¹]	5,5	6,85	8	9,4
MFI @190°C/21,6kg [g/10min]	—	—	—	12
MFI @190°C/2,16kg [g/10min]	0,28	2,1	1,1	0,38
η_0 @190°C [Pa s]	79.911	20.653	6.720	32.800
λ @190°C [s]	11,82	6,9876	0,0665	1,25
m @190°C [-]	0,649	0,6054	0,679	0,635
E ₀ [kJ/mol]	63,20	53,4	34,6	29,3

Tabelle 10-3 Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z (beide gemäß DIN EN ISO 4287) der beschichteten Module (Längs zur Strömungsrichtung)

Beschichtung	R_a [µm]	R_z [µm]
Chemisch Nickel	0,0680	0,5955
Chromstahl (1.2316)	0,1211	1,0576
C	0,1024	1,1279
CrC	0,1205	1,1796
PEEK	0,5481	4,2223
CrN	0,0719	0,9018
Hartchrom	0,0430	0,4551
Hochgl. Hartchrom.	0,0264	0,1793
A	0,0159	0,1270
D	0,0082	0,0542

Tabelle 10-4 Testflüssigkeiten für die Kontaktwinkelmessungen

Bezeichnung	Summenformel	Herst., Nr.	Reinheitsgrad [%]	Dichte @ 20°C [kg/l]	sft [mN/m]	sftP [mN/m]	sftD [mN/m]
Ethylenglycol (1,2-Ethandiol)	HO-CH ₂ -CH ₂ -OH	Fluka 03750	> 99,5	1,1080	48,00	19,00	29,00
Diiodmethane (Methyleniodid)	CH ₂ I ₂	Fluka 66880	> 98	3,3254	50,00	2,60	47,40
Wasser	H ₂ O		Reintwasser	0,99821	72,10	52,20	19,90

Tabelle 10-5 CNC-Daten der optimierten 90°-Umlenkung

Nr.	Fräserbahn 1				Fräserbahn 2				Fräserbahn 3			
	X1	Y1	Z1	R1	X2	Y2	Z2	R2	X2	Y3	Z3	R3
1	1,00	40,00	9,0		-1,00	40,00	9,0		0,00	40,00	10,00	
2	1,00	39,50	9,0	589.720,0	-1,00	39,50	9,0	580,3	0,00	39,50	10,00	401,4
3	1,00	38,50	9,0	196.583,0	-1,00	38,50	9,0	193,4	0,00	38,50	10,00	133,8
4	1,00	37,50	9,0	53.612,0	-1,00	37,50	9,0	52,7	0,00	37,50	10,00	36,5
5	1,00	36,50	9,0	14.384,0	-0,98	36,50	9,0	52,7	0,01	36,50	9,99	36,5
6	1,00	35,50	9,0	3.854,4	-0,94	35,50	9,0	56,9	0,03	35,50	9,97	36,9
7	1,00	34,50	9,0	1.032,8	-0,88	34,50	9,0	56,9	0,06	34,50	9,94	36,9
8	1,00	33,50	9,0	276,7	-0,81	33,50	9,0	30,7	0,09	33,50	9,91	21,0
9	1,00	32,50	9,0	74,2	-0,72	32,50	9,0	30,7	0,14	32,50	9,86	21,0
10	1,00	31,50	9,0	19,9	-0,63	31,50	9,0	19,2	0,19	31,50	9,81	19,3
11	1,20	28,85	9,0	19,8	-0,17	28,73	9,0	19,2	0,51	28,79	9,69	19,3
12	1,64	26,24	9,0	29,3	0,42	26,02	9,0	35,7	1,03	26,13	9,62	36,3
13	2,29	23,67	9,0	32,6	1,19	23,38	9,0	35,8	1,74	23,53	9,57	36,3
14	3,14	21,18	9,0	32,6	2,13	20,81	9,0	36,2	2,63	20,99	9,54	37,0
15	4,17	18,76	9,0	32,1	3,25	18,33	9,0	33,9	3,71	18,54	9,51	35,1
16	5,40	16,43	9,0	31,2	4,56	15,94	9,0	32,8	4,98	16,19	9,49	34,7
17	6,81	14,21	9,0	30,5	6,04	13,67	9,0	31,8	6,43	13,94	9,47	34,1
18	8,41	12,12	9,0	29,9	7,70	11,53	9,0	31,5	8,06	11,83	9,46	32,2
19	10,18	10,18	9,0	29,9	9,54	9,54	9,0	30,5	9,86	9,86	9,46	32,2
20	12,12	8,41	9,0	29,8	11,53	7,70	9,0	30,5	11,83	8,05	9,46	32,2
21	14,21	6,81	9,0	29,8	13,67	6,04	9,0	31,4	13,94	6,42	9,47	32,2
22	16,43	5,40	9,0	30,5	15,94	4,55	9,0	31,9	16,18	4,97	9,49	34,1
23	18,76	4,17	9,0	31,1	18,32	3,24	9,0	33,1	18,54	3,71	9,52	34,6
24	21,18	3,14	9,0	33,1	20,80	2,11	9,0	34,1	20,99	2,62	9,55	36,0
25	23,67	2,29	9,0	33,7	23,37	1,16	9,0	35,5	23,52	1,73	9,59	36,0

26	26,24	1,65	9,0	33,7	26,02	0,39	9,0	36,1	26,13	1,02	9,64	39,7
27	28,85	1,20	9,0	31,4	28,73	-0,22	9,0	37,5	28,79	0,49	9,71	41,5
28	31,50	1,00	9,0	18,9	31,50	-0,68	9,0	18,8	31,50	0,16	9,84	20,3
29	32,50	1,00	9,0	18,9	32,50	-0,78	9,0	18,8	32,50	0,11	9,89	20,4
30	33,50	1,00	9,0	70,7	33,50	-0,86	9,0	70,1	33,50	0,07	9,93	48,5
31	34,50	1,00	9,0	263,9	34,50	-0,93	9,0	69,9	34,50	0,03	9,97	48,5
32	35,50	1,00	9,0	984,7	35,50	-0,98	9,0	45,7	35,50	0,01	9,99	31,8
33	36,50	1,00	9,0	3.675,0	36,50	-1,00	9,0	45,7	36,50	0,00	10,00	31,8
34	37,50	1,00	9,0	13.714,0	37,50	-1,00	9,0	59,3	37,50	0,00	10,00	42,1
35	38,50	1,00	9,0	51.116,6	38,50	-1,00	9,0	220,9	38,50	0,00	10,00	157,0
36	39,50	1,00	9,0	187.430,0	39,50	-1,00	9,0	810,0	39,50	0,00	10,00	5.757,8
37	40,00	1,00	9,0	562.290,0	40,00	-1,00	9,0	2.429,9	40,00	0,00	10,00	1.727,3

Wissenschaftliche Geräte:

Extruder

Typ: S 50 N, Einschneckenextruder mit genuteter und gekühlter Einzugszone

Hersteller: BEKUM Maschinenfabriken GmbH, Berlin

Schecke: Scher-Misch-Schnecke mit Wendelscherteil und Rautenmischer, Ø50mm/24D

Antrieb: Bürstenloser DC-Motor, 24 kW

Baujahr: 1995

Drucksensor

Hersteller: Gneuß Kunststofftechnik GmbH, Bad Oeynhausen

Typ: DAIV2

Messbereich: 0-200 bar

Messverstärker: Integrierter Messverstärker mit 0 –10 V Ausgangsspannung

Messfehler: 1 % des Endwertes

Temperatursensor

Hersteller: Gneuß Kunststofftechnik GmbH, Bad Oeynhausen

Typ: TF, Fe-Cu Ni (Typ J), keramisch isoliert

Messspitze: 10 mm

Farbmessgerät

Typ: color guide sphere spin d/8°, portables Spektralphotometer

Hersteller: Byk Gardner GmbH, Geretsried

Messprinzip: Reflexionsmessung von 400-700 nm, 20 nm Intervall

Bauart: d/8 spin (Geometrie Farbe), 11mm Messöffnung

Normalbeobachter: 2° (kl. Gesichtsfeld), 10° (gr. Gesichtsfeld)

Wiederholbarkeit: 0,01 ΔE^* , 1 σ

Vergleichbarkeit: 0,02 ΔE^* , 1 σ

Tastschnittgerät

Hersteller: Mahr GmbH, Göttingen

Software: MarSurf XR 20, Vers. 1.20_5

Auswertegerät: Perthometer S2

Vorschubgerät: PZK, induktiver Taster

Tastspitze: Radius 2 μm , Winkel 90°

Standard Messkraft: 0,75 mN

Kontaktwinkelmessgerät

Hersteller: DataPhysics Instruments GmbH, Filderstadt

Typ: Videogestütztes Kontaktwinkelmessgerät OCA 20

Software: SCA 20/21/22

Hochdruckkapillarrheometer

Hersteller: Kayeness Inc.

Typ: Galaxy V Capillary Rheometer, Model 8052

Düsen: 1 mm Durchmesser, 3,8 mm Länge, Winkel 180° 1 mm Durchmesser,
15 mm Länge, Winkel 180°

Optisches 3-Achsen-Messgerät

Hersteller: Optomess

Typ: 3D-CNC-Koordinaten-Messmaschine mit Video-Tastsystem, Opto-
mess A 250

Auflösung: 0,001 mm in jeder Achse

Messgenauigkeit: $3\mu\text{m} + L/100\mu\text{m}$

Vergrößerung: 15-60-fach

IR-Spektrometer

Hersteller: Shimadzu

Typ: IRPrestige-21 Fourier Transform Infrarot Spektrophotometer

Auflösung: max. $0,5\text{ cm}^{-1}$

Messbereich: $7800\text{-}350\text{ cm}^{-1}$

Ergänzende Abbildungen:

Bilder des Beschichtungsmoduls nach der Fertigung

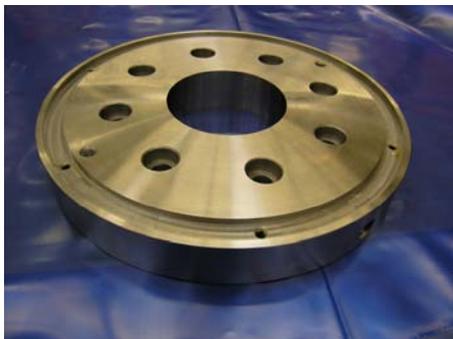


Abbildung 10-1 Oberteil



Abbildung 10-2 Unterteil mit Wendelgeometrie

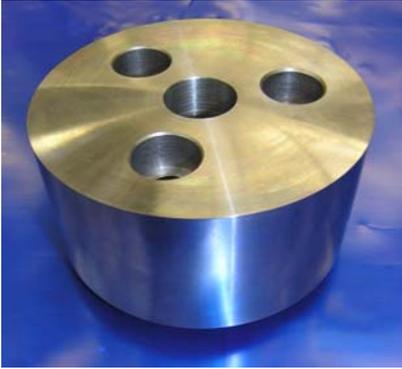


Abbildung 10-3 Dorn



Abbildung 10-4 Adapter



Abbildung 10-5 Zwischenstück

Bilder des demontierten Beschichtungsmoduls nach den Versuchen

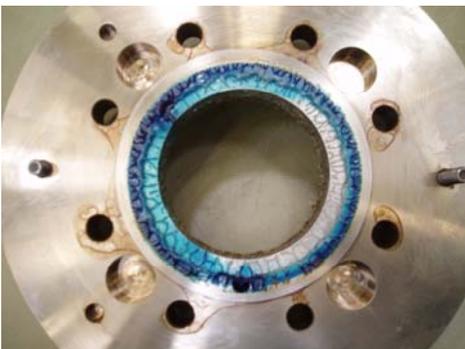


Abbildung 10-6 Oberteil nach dem Versuch

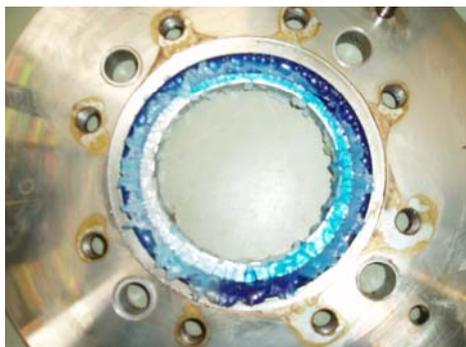


Abbildung 10-7 Unterteil nach dem Versuch