

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Forschungsthema	4
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3.1	Einleitung	4
3.2	Stand der Forschung zur Elektrosortierung und eigene Vorarbeiten	6
3.3	Stand der Technik zu Elektrosortier- und Aufladeeinheiten	9
4	Forschungsziel und Ablauf	13
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
6	Projektergebnisse	14
6.1	Untersuchungen zum Einfluss von Füllstoffen und Additiven auf die triboelektrischen Eigenschaften	14
6.1.1	Versuchsanlagen, Versuchsmaterialien und Versuchsauswertung	14
6.1.2	Einarbeiten von Füllstoffen und Additiven	16
6.1.3	Charakterisierung der additivierten und gefüllten Modellpolymere	17
6.1.4	Einfluss von Füllstoffen und Additiven auf das Trennverhalten von Modellsystemen (PP/LDPE)	20
6.1.5	Einfluss der Elektronenstrahlvorbehandlung auf gefüllte oder additivierte Modellsysteme (PP/LDPE)	24
6.1.6	Trennverhalten von ABS/PS-Granulatgemischen	28
6.1.7	Vergleich des Einflusses von Additiven und Füllstoffen in den verschiedenen Kunststoffen	30
6.1.8	Vergleich des Trennverhaltens von bestrahlten und unbestrahlten ABS/PS-Granulatgemischen mit Additiven oder Füllstoffen	33
6.1.9	Untersuchungen zur Stabilität inkorporierter Ladungen	37
6.1.10	Untersuchungen zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit	38
6.2	Entwicklung einer kontinuierlichen Anlage zur Elektrosortierung	40
6.2.1	Gesamtanlage	40
6.2.2	Konzeption und Bau der kontinuierlichen Aufladeeinheit	41
6.2.3	Messtechnik	44
6.2.4	Verweilzeituntersuchungen	49
6.3	Trennversuche an der kontinuierlichen Anlage	58
6.3.1	Versuchsmaterialien	58
6.3.2	Referenzuntersuchungen an der diskontinuierlichen Anlage	59
6.3.3	Ergebnisse erste Testphase	60
6.3.4	Ergebnisse zweite Testphase	65
7	Verwendung der Zuwendungen	67

8	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	67
9	Wirtschaftlicher Nutzen für kmU	68
10	Innovativer Beitrag der Ergebnisse zu industriellen Anwendungsgebieten	69
11	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	69
12	Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	70
13	Durchführende Forschungsstellen	72
14	Formelverzeichnis	73
15	Anhang	

1 Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Entwicklung einer kontinuierlich arbeitenden Anlage zur *Elektrosortierung* von Kunststoffgemischen. Die Entwicklung sollte vorzugsweise am Beispiel der Trennung zweikomponentiger ABS/PS-Gemische (ABS = Acryl-Budatien-Styren-Copolymer, PS = Polystyren) erfolgen. Da technisch verwendete Kunststoffe additiviert und/oder gefüllt sind, sollten parallel zur Entwicklung der kontinuierlichen Anlage grundlegende Untersuchungen zum Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Aufladeeigenschaften und Ladungsstabilität von Kunststoffen durchgeführt werden. Die Ergebnisse von Modelluntersuchungen an definiert gefüllten bzw. additivierten Kunststoffen mit Polyolefinmatrizes ermöglichten Aussagen über die intrinsischen Beiträge von Füllstoffen bzw. Additiven. Während Farbstoffe, Ruß und Kreide kaum Einfluss auf die elektrostatische Aufladung hatten, konnte ein Einfluss von Flammschutzmitteln und Antistatika nachgewiesen werden. Den größten Einfluss zeigte allerdings Talkum, das bei jeder Polymerkomponente eine negative Aufladung hervorrief, sodass in Kontakt mit nichtgefüllten Polyolefinen zwar eine sehr gute Trennung möglich war, diese aber polymerunspezifisch erfolgte. Bei den Versuchen zur elektrostatischen Aufladung von ABS/PS-Gemischen war der Einfluss der Additive und Füllstoffe auf das Aufladeverhalten gravierender. Hier kam es in Folge eingebrachter Füllstoffe bzw. Additive zu einer Umkehrung der polymerspezifischen Aufladung, was bei der Elektrosortierung in der Praxis zu Trennproblemen führen kann. Zur Vermeidung solcher Trennprobleme wurde ein Vorbehandlungsverfahren zur Überkompensation der füllstoff- bzw. additivbedingten Aufladungseffekte entwickelt. So konnte – von mit Talkum hochgefüllten ($\geq 20\%$) Kunststoffen abgesehen – der ladungskontrollierende Einfluss von Additiven und Füllstoffen im System ABS/PS durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung kompensiert werden. Hochgefüllte Kunststoffabfälle können aufgrund ihrer hohen Dichte in einer der Elektrosortierung vorgeschalteten Schwimm-Sink-Trennanlage abgetrennt werden.

Für den Aufbau einer kontinuierlich arbeitenden Anlage zur Elektrosortierung war zunächst die Entwicklung einer kontinuierlich arbeitenden Aufladungseinheit erforderlich. Basierend auf den umfangreichen Erfahrungen mit einer diskontinuierlich arbeitenden Anlage^[1,2] wurde eine kontinuierliche Wirbelschicht gewählt, die bisher als Aufladungseinheit noch nicht existierte. Sie besteht aus einem Anströmboden, einem Abströmboden und fünf Kammern, die einzeln angeströmt werden. Die Luftströme werden mit Blenden gesteuert. Mit unterschiedlichen Blechanordnungen in den Kammern kann der Materialtransport variiert werden. Unter Verwendung der kontinuierlichen Wirbelschicht wurde eine komplette kontinuierliche Anlage zur Elektrosortierung von Kunststoffen aufgebaut, die aus der Lufterzeugung (Seitenkanalgebläse), einem Adsorptionstrockner, der Aufladungseinheit, einem elektrostatischen Plattenscheider, einem Bandförderer zum Abtransport der Trennprodukte und der Mess- und Steuertechnik besteht. Die Anlage wurde strömungstechnisch vermessen und optimiert^[3]. Um auch für größere Granulate einen konstanten Durchsatz zu erzielen, musste die Luftgeschwindigkeit erhöht und die Partikelbewegung durch Leitbleche beruhigt werden. Dadurch konnten Kunststoffgemische mit dem angestrebten Durchsatz von 8-10 kg/h getrennt werden konnten.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

¹ K. Husemann, U.A. Peuker, F. Simon, E. Reinsch, V. Albrecht: *Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Elektrosortierung praxisrelevanter Kunststoffabfallgemische*, Schlussbericht zum AiF-Vorhaben-Nr. 14980 BR (2009).

² E. Németh: *Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2003).

³ C. Messerschmidt: *Untersuchungen an einer kontinuierlichen Wirbelschicht zur triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen*. Arbeit zur Erlangung des Grades *Master of Science*, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2013).

2 Forschungsthema

Elektrosortierung von Kunststoffen als kontinuierlich arbeitender Prozess am Beispiel der Trennung von PS/ABS

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Einleitung

Aufgrund politischer Vorgaben auf nationaler und europäischer Ebene und den daraus resultierenden gesetzlichen Rahmenbedingungen, die Rücknahmeverpflichtungen beinhalten (z.B. EU-Richtlinien über die *Rücknahme und Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten WEEE*^[4], EU-Richtlinien zur *Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe RoHS*^[5], *Altautoverordnung*^[6]) und zu einer Wiederverwertung von Kunststoffabfällen verpflichtet^[7], ist es erforderlich, Kunststoffabfälle insbesondere roh- und werkstofflich zu verwerten.

Kunststoffabfälle liegen meist als Gemisch verschiedener Kunststoffe oder als Verbundmaterial vor. Eine gemeinsame Verarbeitung der unterschiedlichen Kunststoffsorten über ihre Schmelze würde aufgrund der thermodynamischen Nichtmischbarkeit der einzelnen Sorten zu instabilen und minderwertigen Produkten führen. Eine Trennung von Kunststoffabfallgemischen in sortenreine Komponenten ist daher für eine werkstoffliche Verwertung zwingend notwendig. Aus dem hohen Aufkommen an gemischten Kunststoffabfällen, dem gesetzlichen Verlangen nach einem Recycling und den qualitativen Anforderungen an die Recyclate ergibt sich die Notwendigkeit, Kunststoffabfallgemische im industriellen Maßstab effektiv und effizient in sortenreine Fraktionen zu sortieren. In den letzten Jahren wurden hierzu verschiedene Sortierverfahren (z.B. Handglaubung, Kunststofferkennung und -sortierung mittels spektroskopischer Methoden, Schwimm-Sink-Trennung und Elektrosortierung) verwendet, die z.T. auch im großtechnischen Maßstab betrieben werden. Ein wesentliches Problem stellte die weitgehend sortenreine Trennung von ABS/PS-Kunststoffgemischen dar, die großtonnagig bei der werkstofflichen Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten anfallen. Die große chemisch-strukturelle Ähnlichkeit der Kunststoffe und die Ähnlichkeit von physikalischen Eigenschaften auf denen einige Trennverfahren basieren (z.B. annähernd gleiche Dichten ermöglichen keine Separation über Schwimm-Sink-Trennungsverfahren), verhinderten bisher

⁴ Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)* – Joint declaration of the European Parliament, the Council and the Commission relating to Article 9. Official Journal L 037, 13/02/2003 S. 24-39.

⁵ Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the *Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*. Official Journal L 037, 13/02/2003 S. 19-23.

⁶ Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on *End-of-Life Vehicles* – Commission Statements. Official Journal L 269, 21/10/ 2000 S. 34-43.

Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung – AltfahrzeugV). Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21.06.2002, BGBl. I S. 2214, geändert durch Artikel 364 der Verordnung vom 31.10.2006, BGBl. I 2407, neugefaßt durch Bek. vom 21.06. 2002, BGBl. I 2214, geändert durch Art. 364 V vom 31.10.2006, BGBl. I 2407.

Dreher, J.: *Das Recht der Altautoverwertung – Die Umsetzung der EG-Altauto-Richtlinie (2000/53/EG) in nationales Recht unter besonderer Berücksichtigung der bisherigen deutschen Rechtslage zum Umwelt- und Energierecht*. Band 5, Nomos Verlagsgesellschaft, Lüneburg (2002).

⁷ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27.09. 1994, BGBl. I 1994 S. 2705; 1996 S. 1354; 1998 S. 509, 1485, 2455; 2000 S. 632; 27.7. 2001 S. 1950, 2001 S. 2331; 29.10.2001. S. 2785 Art. 57; 21.8.2002 S. 3322 02; 25.1.2004 S. 82 04) (Gl.-Nr.: 2129-27-2).

das Sortieren solcher Gemische. Zwar erlaubt der Einsatz von spektroskopischen Methoden im nahen Infrarot (NIR) prinzipiell ein Erkennen der jeweiligen Kunststoffspezies; die Methode ist aber für ein Sortieren von Shredderprodukten, d.h. granulierten Kunststoffgemischen wenig geeignet. Die Aufarbeitung von Kunststoffrecyclaten erfordert aber eine Zerkleinerung vor dem Sortierprozess, um Bauteile, die aus unterschiedlichen Kunststoffen mittels Füge-technologien (z.B. Kleben, Schweißen, Crimpen, Schnappverbindungen) hergestellt wurden, voneinander zu trennen.

Eine elegante Methode, die kleine Kunststoffteilchen (Flakes, Granulate) im trockenen Zustand trennen kann, ist die Elektrosortierung. Das Phänomen der triboelektrischen Aufladung von elektrischen Leitern und Nichtleitern ist seit langer Zeit bekannt und wird vielfältig technologisch genutzt (z.B. Elektrophotographie^[8] als Grundlage elektrostatischer Kopier- und Druckverfahren, elektrostatische Filtration^[9], Fällungen^[10] und Farbbeschichtung^[11]). Früh erkannte man, dass die triboelektrische Aufladung von Kunststoffen stoffspezifisch erfolgt^[12] und vom molekularen Aufbau des Kunststoffs abhängig ist^[13]. Mit dieser Erkenntnis eröffnete sich die prinzipielle Möglichkeit, mehrkomponentige Kunststoffgemische nach einer triboelektrischen Aufladung in einem elektrischen Feld zu trennen (Elektrosortierung)^[14,15,16,17,18]. Die Elektrosortierung erscheint für die ABS/PS-Trennung insbesondere geeignet, da große Abfallmengen in kontinuierlicher Arbeits- und Betriebsweise getrennt werden können und die Trennung – im Gegensatz zur Flotation^[19] bzw. Schwimm-Sink-Trennung – ohne wässrige Phase auskommt, d.h. die Recyclate nach ihrer Separation nicht getrocknet werden müssen. Es erscheint legitim, die Menge der als Abfall anfallenden Kunststoffe anhand der Kunststoffproduktion abzuschätzen. Im Jahr 2012 wurden in Deutschland etwa 19,5 Mio. t Kunststoffe produziert^[20]; 12,8 Mill. t wurden zu Halbzeugen und Endprodukten verarbeitet. Davon entfielen etwa 500 000 t auf Polystyren (PS) und etwa 285 000 t auf Styrencopolymere, insbesondere ABS. In der Elektro- und Elektronikindustrie sowie der Automobilindustrie fanden mehr als 50 Masse-% der ABS-Copolymere, häufig in Kombination mit PS Verwendung. Nach o.g. Richtlinien^[4,5,6,7] sind diese Kunststoffe in naher Zukunft seitens der Hersteller und des Handels kostenneutral zurückzunehmen und weitgehend werkstofflich wiederzuverwerten

⁸ C.F. Carlson: *Electrophotography*. US Patent No. 2,297,691 (06.10.1942) [.

⁹ A.A. Moshkin; S.A. Moshkina: *Electrical filters made of polymer materials*. J. Electrostatics 40/41 (1997) 681-685.

¹⁰ C. Riehle; F. Löffler: *Electrical similarity concerning particle transport in electrostatic precipitators*. J. Electrostatics 29 (1993) 147-165.

¹¹ W. Kleber; A. Lang, A.: *Triboelectrically charged powder coatings generated by running through holes and slits*. J. Electrostatics 40/41 (1997) 237-240.

¹² R. Brück: *Chemische Konstitution und elektrostatische Eigenschaften von Polymeren*. Kunststoffe 71 (1981) 234-239.

¹³ V. Albrecht; E. Németh; G. Schubert; F. Simon: *Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity*. J. Electrostatics 58 (2003) 3-16.

¹⁴ E. Németh: *Triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2003).

¹⁵ E. Németh; G. Schubert; V. Albrecht; F. Simon, F.: *Triboelektrische Aufladung von Kunststoffgemischen – Triboelectric charging of mixed plastics*. Aufbereitungstechnik 45 (2005) 35-46.

¹⁶ V. Albrecht; A. Janke; A. Drechsler; G. Schubert; E. Németh; F. Simon: *Visualization of charge domains on polymer surfaces*. Progress in Colloid Polymer Science 132 (2006) 48-53.

¹⁷ V. Albrecht; E. Reinsch; U. Gohs; R. Schünemann; K. Husemann; F. Simon, F.: *Zur elektrostatischen Trennung von Polyolefingemischen*. Aufbereitungstechnik 49 (2008) 26-34.

¹⁸ V. Albrecht; A. Janke; E. Németh; G. Schubert; F. Simon: *Some aspects of the polymers' electrostatic charging effects*. J. Electrostatics, 67 (2009) 7-11.

¹⁹ O. Stückrad: *Sortieren von Kunststoffgemischen durch Flotation*. Dissertation, Technische Universität Clausthal (1996).

²⁰ M. Herrmann; S. Weihe: *Geschäftsbericht 2012 Plastics Europe*, Plastics Europe Deutschland e.V. – Verband der Kunststoffherzeuger, Frankfurt am Main (2013).

3.2 Stand der Forschung zur Elektrosortierung und eigene Vorarbeiten

Die ersten Versuche, Kunststoffe mittels Elektrosortierung zu trennen, liegen schon Jahrzehnte zurück^[21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32]. Im Wesentlichen wurden Versuche unternommen, Zweikomponentengemische zu trennen^[14-16,21-32]. Lange Zeit war es für technische Kunststoffgemische nicht möglich, Voraussagen über die zu erwartende Ladungshöhe und Polarität der Gemischkomponenten zu machen, bzw. diese trennungsrelevanten Parameter *gezielt* zu beeinflussen.

In unseren Arbeiten^[15,17,33,34,35,36,37] haben wir zeigen können, dass chemisch-physikalische Verfahren genutzt werden können, das Aufladeverhalten von Kunststoffen, die im Gemisch vorliegen, stoffspezifisch zu beeinflussen und so eine Trennung der Gemische in sortenreine Fraktionen zu ermöglichen. So war es möglich, nach einer Vorbehandlung Gemische aus den strukturell sehr ähnlichen Polyolefinen Polypropylen (PP), *High-density*-Polyethylen (HDPE) und *Low-density*-Polyethylen (LDPE) sortenrein mittels Elektrosortierung zu trennen^[17, 37].

-
- ²¹ Kali und Salz AG.: *Vermischte Kunststoffabfälle elektrostatisch trennen*. *Plastverarbeiter* 44 (1993) 26.
- ²² L. Calin; A. Mihalcioiu; A. Iuga; L. Dascalescu: *Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification*. *Particulate Sci. Techn.* 25 (2007) 205-211.
- ²³ G. Dodbiba; J. Sadaki; K. Okaya; A. Shibayama; T. Fujita: *The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics*. *Minerals Eng.* 18 (2005) 1350-1360.
- ²⁴ G. Dodbiba; A. Shibayama; T. Miyazaki; T. Fujita: *Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone*. *Magnetic Electrical Separation* 11 (2002) 63-92.
- ²⁵ M. Lungu: *Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect*. *Minerals Eng* 17 (2004) 69-75
- ²⁶ A. Iuga; L. Calin; V. Neamtu; A. Mihalcioiu; L. Dascalescu: *Tribocharching of plastics granulates in a fluidized bed device*. *J. Electrostatics* 63 (2005) 937-942.
- ²⁷ Y. Matsushita; N. Mori; T. Sometani: *Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades*. *Electrical Engineering in Japan* 127 (1999) 33-40.
- ²⁸ A. Hoche; I. Stahl: *Anwendung eines elektrostatischen Sortierverfahrens für Kunststoffe*. Tagungsband *Kolloquium Sortieren* (1999) Berlin, S. 299-303.
- ²⁹ C.H. Park; H.S. Joen; H.S. Yu; O.H. Han; J.K. Park: *Application of electrostatic separation to the recycling of plastic waste: Separation of PVC, PET and ABS*. *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008) 249-255.
- C.H. Park; H.S. Joen; B.G. Cho; J.K. Park: *Triboelectrostatic separation of conveyering plastics in chopped waste electric wire*. *Polym. Eng. Sci.* (2007) 1975-1982.
- C.H. Park; H.S. Joen; J.K. Park: *PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation*. *J. Hazardous Mat.* 44 (2007) 470-476.
- ³⁰ I.I. Inculet; G.S.P. Castle; J.D. Brown: *Electrostatic separation of plastics for recycling*. *Particulate Sci. Techn.* (1998) 16, 91-100.
- ³¹ R. Meyer-Staude; R. Köhnlechner: *Triboelektrische Sortierung im industriellen Maßstab*. 8. Tagungsband *Kunststoff-Recycling Kolloquium* (1999) Krefeld, S. 2.43-2.51.
- ³² Hamos GmbH: *PVC-freie PET-Flakes*. *Recycling Magazin* 19 (2006) 14.
- ³³ O. Mientkewitz: *Die triboelektrische Aufladung von Kunststoffen für die Trennung in einem elektrostatischen Feld*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2000).
- ³⁴ G. Schubert; E. Németh; F. Simon; V. Albrecht: *Beeinflussung der Kontaktaufladung von Kunststoffen durch Modifizierung ihrer Oberfläche*. In: *Partikelwechselwirkung bei Prozessen der Mechanischen Verfahrenstechnik – Abschlussbericht zum Sonderforschungsbereich 285*, Herausgeber: K. Husemann; K. Graichen. Shaker-Verlag, Reihe Berichte aus der Verfahrenstechnik, Aachen (2004), ISBN 3-8322-3245-1, S. 183-212.
- ³⁵ V. Albrecht; A. Janke; G. Schubert; E. Németh: *Untersuchungen zur triboelektrischen Aufladung von verschiedenen Polymeren*. In: *Polymerwerkstoffe 2002*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Band 1 (2002) 569-572, ISBN 3-86010-656-2.
- ³⁶ E. Németh; F. Simon; V. Albrecht; G. Schubert: *Verfahren zur elektrostatischen Trennung von Kunststoffgemischen*. Patent DE 10 2004 024 754 (13.05.2004).
- ³⁷ V. Albrecht; U. Gohs; K. Husemann; E. Reinsch; R. Schünemann; F. Simon: *Verfahren zur elektrostatischen Trennung von Kunststoffgemischen durch prozessvorbereitende Elektronenbestrahlung der Gemische*. Patent DE 10 2007 055765.7 (11.12.2007)

Trotz der intensiven Nutzung und der großen praktischen Bedeutung der triboelektrischen Aufladung, ist über ihre elektronischen und molekularen Mechanismen nur wenig bekannt^[38]. Bislang existiert keine allgemeingültige und allgemein akzeptierte Erklärung für das Phänomen der triboelektrischen Aufladung für elektrische Nichtleiter^[39]. Dies mag unter anderem an den experimentellen Schwierigkeiten liegen, die aufgrund unterschiedlicher Kontaktierungsarten, unterschiedlicher Versuchsbedingungen und nicht ausreichend beschriebenen Kunststofftypen (z.B. Modellpolymere vs. gefüllte und additivierte Typen) häufig zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führten. Widersprüche in den abgeleiteten Modellvorstellungen zur triboelektrischen Aufladung ergaben sich auch aus der Überlagerung mehrerer Auflademechanismen und der variablen Stabilität der Oberflächenladungen, die auch von verschiedenen äußeren Faktoren in komplexer Weise beeinflusst werden. Die Wirkung von bestimmten Substanzen auf die Aufladeigenschaften von Polymeren machte man sich in vielfältiger Weise zu nutzen, um das Auflade- und Entladeverhalten zu steuern. So ist aus der Entwicklung und Herstellung von *Tonern* für die Drucktechnik der Einsatz ladungssteuernder Additive bekannt^[40,41,42]. Zur Vermeidung unerwünschter Aufladeerscheinungen kommt eine Vielzahl von *Antistatika* zum Einsatz^[11]. Offensichtlich beeinflussen adsorptiv aufgebraachte Stoffe das Aufladeverhalten von Kunststoffen. Systematische Arbeiten zur Beeinflussung der triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen mittels anorganischer Salze^[43], Tenside und Polyelektrolyte^[14,34], Säuren und Basen^[14,34,43] sowie Feinstkorn^[14,34] liegen vor, liefern aber ein wenig übersichtliches Bild, sodass kaum verallgemeinerungsfähige Ansätze zum Einsatz solcher Stoffe für ein *Steuern* der Aufladung gegeben sind.

Aus der bekannten Beeinflussung des Auf- und Entladeverhaltens durch die Anwesenheit von s.g. *dritten Stoffen* wird häufig geschlossen, dass auch zufällige Oberflächenkontaminationen und ein Altern der Kunststoffoberflächen zur signifikanten Veränderung des Aufladeverhaltens von Kunststoffen führen. Unter diesen Voraussetzungen wären der Erfolg und die Qualität der Kunststofftrennung stets von der Vorgeschichte der Abfallgemische abhängig. Eine technologische Nutzung der elektrostatischen Separation würde wenig sinnvoll erscheinen. Im Rahmen eines Projekts im DFG-Sonderforschungsbereichs 285 *Partikelwechselwirkung bei Prozessen der Mechanischen Verfahrenstechnik* an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg^[34] und dem IGF-Projekt 14980 BR *Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Elektrosortierung praxisrelevanter Kunststoffabfallgemische* haben wir uns intensiv mit den Mechanismen der triboelektrischen Aufladung und ihrer Steuerung beschäftigt^[1,16,18]. Die Versuche zur triboelektrischen Aufladung und zur Trennung mehrkomponentiger Kunststoffgemische erfolgte an einem am *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik* der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (IMVTAT) aufgebauten elektrostatischen Labor-Freifallscheider^[14,15,17]. Die tatsächliche Aufladung der separierten Kunststofffraktionen wurde in den als Faraday-Bechern ausgelegten Auffanggefäßen im unmittelbaren Anschluss an den Trennvorgang gemessen. Der Labor-Freifallscheider ermöglichte die Trennung praxisrelevanter Mengen, wobei sowohl die Verfahrensparameter (Aufladezeit, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte, Temperatur, Feldstärke) als auch die stoffli-

³⁸ B.D. Terris; J.E. Stern; D. Rugar; H.J. Mamin: *Contact electrification using force microscopy*. Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 2669–2672.

³⁹ L.B. Schein: *Electric field theory of toner charging*. J. Imaging Science and Technology 44 (2000) 475-483.

⁴⁰ H.T. Macholdt: *Organische Pigmente für Photokopierer und Laserdrucker – Ein Kapitel angewandte Forschung*. Chemie in unserer Zeit 24 (1990) 176-181.

⁴¹ R. Baur, H.T. Macholdt: *Charge control agents and triboelectrically-adjusted pigments in electrophotographic toner*. J. Electrostatics 40/41 (1997) 621-626.

⁴² J.H. Anderson: *The effect of additives on the tribocharging of electrophotographic toners*. J. Electrostatics 37 (1996) 197-209.

⁴³ M. Wedemann: *Untersuchung zum Einfluss verschiedener Additive naßtechnischer Aufbereitungsprozesse in der Recyclingindustrie auf die Trennleistung der nachfolgenden elektrostatischen Kunststoff-Kunststoff-Separation nach triboelektrischer Aufladung*. Diplomarbeit, Fachhochschule Ansbach (2007).

chen Eigenschaften (Anzahl der zu trennenden Komponenten, Art der Vorbehandlung der Kunststoffgemische, Zugabe oberflächenaktiver Substanzen) variiert werden konnten. Das Wandmaterial der Aufladeeinrichtung konnte ebenfalls den gewünschten Versuchsbedingungen angepasst werden (Nutzung verschiedener Metall- oder Kunststoffwände).

Aufgrund der vermuteten komplexen gegenseitigen Beeinflussungen der verschiedenen Parameter im Gemisch wurden zunächst nur Einkomponenten- und Zweikomponentensysteme untersucht, um den Mechanismus der triboelektrischen Aufladung zu erforschen. Aus der strengen Korrelation zwischen den Lewis-Säure-Base-Eigenschaften der Kunststoffoberflächen und dem Aufladeverhalten konnte der Mechanismus des Elektronentransfers zwischen zwei Kontaktpartnern experimentell bestätigt und als grundlegender Mechanismus zur trioelektrischen Aufladung interpretiert werden^[13,35]. Das unterschiedliche Aufnahmevermögen von Wasser, das an den Kunststoffoberflächen als Film adsorptiv gebunden vorliegen kann oder Quellschichten ausbildet, führt zu einem zusätzlichen Ladungstransport, der sich in einer Korrelation zwischen Oberflächenwiderstand und Aufnahmevermögen von Wasser äußerte. Sich ausbildende Quellschichten und Adsorptionsfilme konnten sicher durch eine Kombination von Wasserdampfadsorptionsmessungen und ellipsometrischen Untersuchungen festgestellt werden^[35,44]. Rasterkraftmikroskopische Untersuchungen (AFM) im *Electric-Field-Gradient-Force-Microscopy-Modus* (EFM) wurden genutzt, um die Stabilität von Oberflächenladungen und die Kinetik der Entladung an verschiedenen Kunststoffoberflächen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und damit in Abhängigkeit der Ausbildung von Wasserfilmen bzw. Quellschichten zu untersuchen^[16,18]. Überraschend wurde gefunden, dass die Stabilität der aufgetragenen Oberflächenladung unabhängig von der Stellung des Kunststoffs in der triboelektrischen Reihe^[12] ist und dass keine Korrelation zwischen Ladungsdichte (Anzahl der Ladungen pro Flächeneinheit) und der Entladungskinetik besteht^[11]. Das Auf- und Entladungsverhalten wird vielmehr polymerspezifisch von der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Die Anwesenheit von Oberflächenwasser ermöglicht ein Fließen von Ladungen. Die relative Luftfeuchte konnte so als steuernder Prozessparameter bei der elektrostatischen Separation von Kunststoffgemischen genutzt werden. Auch oberflächenaktive Substanzen, die aus ihren Lösungen auf die zu trennenden Kunststoffgemische aufgebracht wurden, beeinflussten zum Teil das Aufladeverhalten der einzelnen Kunststofffraktionen^[14,15,34]. Insbesondere die Adsorption des Azinfarbstoffs *Nigrosin* ermöglichte eine Trennung, der sonst nicht stoffspezifisch aufladbaren Komponenten von PE/PP-Gemischen^[14,17].

Schwerpunkt im Vorläuferprojekt, dem IGF-Vorhaben 14980 BR *Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Elektrosortierung praxisrelevanter Kunststoffabfallgemische* war die Suche nach weiteren Vorbehandlungsmöglichkeiten für die Trennung von Polyolefingemischen^[11]. Dabei erwies sich eine Vorbehandlung von PE/PP-Gemischen in einem Sauerstoff-Niederdruckplasma als effizient, wenn sich der Vorbehandlung eine bestimmte Lagerungszeit anschloss^[17,36]. Die Ursachen hierfür wurden in den polymerspezifisch unterschiedlichen Funktionalisierungsgraden der Oberflächenbereiche und dem Aufbrechen der kristallinen Bereiche gesehen^[44,45].

Als dritte aufladungssteuernde Vorbehandlung wurde die Elektronenbestrahlung von PE/PP-Granulatgemischen erfolgreich genutzt^[37]. Hier führte das stoffspezifische Abklingverhalten der in die Granulate implantierten Elektronen und erzeugten Radikationen zur stofflichen Separation im elektrischen Feld des Freifallscheiders. Es wurde nachgewiesen, dass im *Low-density*-PE (LDPE) die implantierten Elektronen und erzeugten Radikationen nach einigen Stunden vollständig dissipierten, sich im *High-density*-PE (HDPE) wesentlich länger hielten

⁴⁴ V. Albrecht, F. Simon; G. Schubert, E. Németh: *Einflussfaktoren auf die Wasserdampfadsorption an Polymeren*. Chemie Ingenieur Technik 74 (2002) 1425-1428.

⁴⁵ B. Heydel: *Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung verschiedener Kunststoffoberflächen auf die Kontaktaufladung zur Optimierung der Elektrosortierung von Kunststoffabfällen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden (2007).

und im Polypropylen (PP) noch nach mehreren Tagen nachweisbar waren. Es war erstmals möglich, auch Gemische aus HDPE und LDPE in sortenreine Fraktionen zu trennen^[17], wobei an den Polymeren keine nachweisbaren chemischen Veränderungen auftraten.

Die Vorbehandlungen, die von uns zur erfolgreichen Trennung von Polyolefingemischen entwickelt wurden, führten zu der Frage nach der Qualität des Elektrosortierprozesses bei Verwendung oberflächenkontaminierter oder gealterter Kunststoffgranulate, die für zu recycelnde Materialien als typisch angesehen werden können. Biofilme erschienen uns als ladungsbeeinflussende Filmbildner sehr relevant, da sie im wesentlichen Polypeptide, Zucker und Fette beinhalten. Polypeptide besitzen aufgrund von Betainstrukturen zwischen freien Amino- und Carboxylgruppen potentielle Ladungsträger. Polysaccharide und Fette (Fettester, fette Öle) tragen keine nativen Ladungen, können aber durch eine spezifische Adsorption von vorzugsweise Hydronium- oder Hydroxylionen – genau wie jede andere Oberfläche – geladen werden. Um den Einfluss solcher Stoffe auf das Aufladeverhalten von Kunststoffgranulaten zu untersuchen, haben wir zu separierende LDPE/PP-Gemische bewusst mit Hühnereiweiß, Zuckerwasser und Sonnenblumenöl kontaminiert, anschließend elektronenbestrahlt und dann im elektrostatischen Freifallscheider getrennt. Bei keinem der Kunststoffgemische wurde der Trennerfolg oder die Trennschärfe durch die aufgebrauchten Kontaminationen beeinflusst^[46]. Dies mag plausibel erscheinen, wenn man den Mechanismus der stoffspezifischen Aufladung während des Vorbehandlungsschritts in Betracht zieht. Der aufgezeigte Mechanismus legt aber auch nahe, dass Füllstoffe, Pigmente und Additive, hier insbesondere Antistatika, die sich im Volumen der Kunststoffe befinden, das Auflade- und Entladeverhalten über Ladungstransportvorgänge signifikant beeinflussen können. Erste Voruntersuchungen von uns zeigten, dass in LDPE und PP einextrudierte Farbpigmente die Trennung elektronenbestrahlter Granulatgemische qualitativ nicht verschlechterten. Die Wirkung von Füllstoffen, wie anorganische Oxide (deren Oberflächen immer native Ladungen und adsorbiertes Wasser aufweisen), Rußpartikeln (Farb- und Leitruß), Flammenschutzmitteln sowie Antistatika (z.B. permanent ladungstragende Ammoniumsalze und zur Ladungsbildung potentiell geeignete Alkylamine) war für Polyolefine, aber auch für polare Kunststoffe vollkommen unbekannt, jedoch von erheblichem wissenschaftlichen und technologischen Interesse

3.3 Stand der Technik zu Elektrosortier- und Aufladeeinheiten

In der Literatur wird über verschiedene Anlagen zur Elektrosortierung berichtet, die sich im Wesentlichen in der Art und Wirkungsweise der Aufladeeinheiten unterscheiden. Dabei handelt es sich um diskontinuierlich betriebene Apparate wie Vibrationsbehälter^[26,33], Zyklo-
ne^[24,29], spezielle Mischer^[27] oder die triboelektrische Aufladung in diskontinuierlich arbeitenden Wirbelschichten^[14,22,25]. Für den industriellen Einsatz werden der pneumatische Transport in Rohrleitungen^[29], der kontinuierliche Transport in rotierenden Mischern^[30] oder zwischen schwingenden Platten^[31,32] beschrieben. Die geschilderten Verfahren erscheinen hinsichtlich ihrer Effektivität und Effizienz nicht vergleichbar, da im Allgemeinen Angaben zu den Prozessparametern, der Art der separierten Kunststofftypen oder die Quantifizierung der Trennergebnisse fehlen.

Vibrationsbehälter und schwingende Platten

Die Aufladung durch Schwingungen ist im Förderbereich unerwünscht, stellt aber eine effektive Variante zur Triboaufladung dar. Die Effektivität der Aufladung ist dabei hauptsächlich von der Bewegungscharakteristik der Schwingungen, von der Verweilzeit der

⁴⁶ V. Albrecht; E. Reinsch; K. Husemann; F. Simon: *Electrostatic separation – An effective way to recycle mixed plastic wastes*. Proceedings of the III Simposio International Sobre la Química y los Residuos (22.10.-23.10.2008), Barcelona (Spanien)

Partikel im Apparat und von der Zahl der Partikel-Partikel- bzw. Partikel-Wand-Kollisionen abhängig. Eine Steigerung der Amplitude der Schwingungen liefert in Summe zwar eine höhere Energie pro Aufprall der Teilchen, die Partikel-Partikel- bzw. Partikel-Wand-Kollisionen nehmen jedoch ab. Je häufiger die Partikel mit anderen Partikeln oder der Wandung kollidieren, desto besser werden diese aufgeladen^[47].

Eine kontinuierliche Variante der Aufladung durch Schwingungen wird von der Fa. Hamos Recycling- und Separationstechnik GmbH, Penzberg eingesetzt. Hier wird das Material kontinuierlich durch einen schwingend aufgehängten Behälter (Schwingförderer) transportiert. Für die gewünscht hohen Aufladungen sind entsprechend hohe Feststoffbeladungen erforderlich^[31,32].

Die Aufladung und Sortierung der Materialien kann auch als Gesamtprozess in einem vibroelektrostatischen Scheider erfolgen. Dieser Scheider besteht im Wesentlichen aus einem leicht geneigten Schwingförderer, welcher mit zwei Plattenelektroden ausgestattet ist. Der Vorteil dieses Apparates liegt in seiner schmalen Bauweise und der vergleichsweise geringen Feldstärke zwischen den Elektroden. Die Form der zu sortierenden Partikel hat genau dann einen Einfluss auf die Effektivität des Trennprozesses, wenn bei beispielsweise runden Partikeln die Kraft des elektrischen Feldes geringer ist als die Beschleunigungskraft, welche aufgrund der Neigung entsteht. Man kann sich die Sortierung ähnlich einem Schwingherd vorstellen, wobei die Sortierung durch das elektrische Feld hervorgerufen wird^[48].

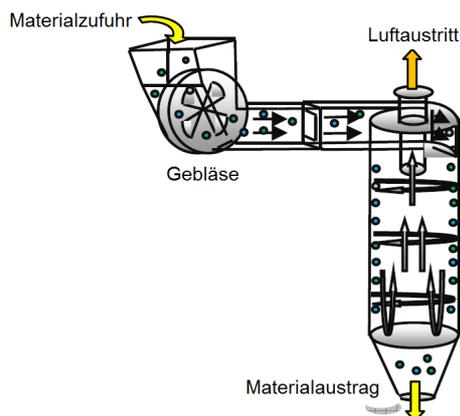


Abb. 1: Schema eines Tribozyklons^[49]

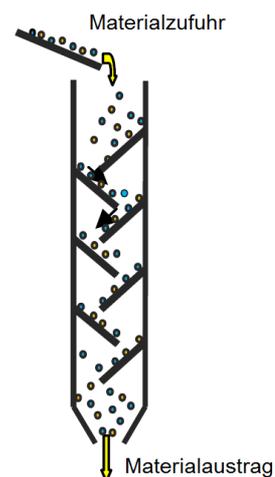


Abb. 2: Schema eines statischen Apparats^[49]

Zyklone und Rohre

Die Aufladung aller der unter Zyklonen und Rohren vorgestellten Apparate wird von den Kontakten zwischen Partikeln und Wand dominiert. Die Effektivität der Triboaufladung ist daher stark von dem Material der Wandung abhängig^[49].

Aerozyklone ermöglichen eine triboelektrische Aufladung. Dabei werden die Kunststoffpartikel durch ein Gebläse in Luft dispergiert, bevor sie tangential im Zyklon beschleunigt werden (Abb.1). Die erzeugten Zentrifugalkräfte bewirken die Reibung der Partikel an der Wandung

⁴⁷ L. Dascalescu, S. Bente; M. Huzau; A. Samuila: *Charging of mm-sized insulating particles in vibratory devices*. J. Electrostatics 63 (2005) 705-710.

⁴⁸ M. Saeki: *Vibro-electrostatic separation of binary ABS/PS granular mixtures*. J. Physics – Conference Series 142 (2008) 012030 und Bd. Electrostatics (2007) 1-6.

⁴⁹ M.M. Zemat; A.T. Rizouga; K. Medles; L. Dascalescu: *Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles*. IEEE Transactions of Industry Applications 49 (2013) 1113-1118 [Artikel-Nr. 6477116].

und führen damit eine Aufladung herbei. Für den Zyklon werden die Wandmaterialien so gewählt, dass sie sich gegen die aufgegebenen Kunststoffe gut aufladen. Das Tauchrohr dient nur der Luftabfuhr und ist zumeist mit einem Sieb geschützt, sodass das Aufgabegut vollständig im unteren Zyklonteil ausgetragen werden kann^[29,49,50].

Die Aufladung in Rohren basiert ebenfalls vorzugsweise auf Partikel-Wand-Kontakten. Praktisch wird dieses Prinzip bei der bekannten Pulverbeschichtung^[11] angewendet. Das fluidisierte Pulver lädt sich bei Kollisionen mit der Rohrwand, die aus einem passenden Kontaktwerkstoff besteht, auf. Die an der Rohrwand verbleibende Ladung kann abgeführt und zur Beurteilung der Pulverqualität messtechnisch erfasst werden^[51].

Mittels eines zick-zack-förmig ausgeführten Rohrs (Abb. 2) kann die Aufladung energetisch günstiger als bei einem Zyklon umgesetzt werden, da das Material frei gefördert wird. Das Material lädt sich auf dem Weg durch den statischen Scheider gegen das Wandmaterial auf. Um eine ähnlich gute Ladung pro Fläche zu erreichen muss der Apparat jedoch größer ausgeführt sein, da die Partikel-Wand-Kontakte nicht so intensiv wie im Zyklon sind^[49].

Bei der Wahl des Wandmaterials ist dabei neben seiner Position in der triboelektrischen Reihe vor allem auf die Rauigkeit und Verschleißfestigkeit zu achten. Die Grundrauigkeit des Materials und die bei Abrasion entstehende Rauigkeit verringern die Kontaktfläche und verschlechtern damit die triboelektrische Aufladung^[24].

Trommeln, Schnecken und Mischer

Die Aufladung von Kunststoffen in Trommeln, Schnecken oder Mischern sind kostengünstige Varianten sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb. Das Schema der Aufladung in einer Trommel ist in Abb. 3 dargestellt. Sie wird maßgeblich von der Trommeldrehzahl und dem Werkstoff der Wandung beeinflusst. Durch die erhöhte Drehzahl werden die Teilchen, auf Grund der Zunahme der Zentrifugalkräfte, an die Wand gedrückt. Ein Zentrifugieren der Teilchen ist daher – anders als bei Zerkleinerungsvorgängen in Trommelmühlen – erwünscht. Sollen Partikel-Partikel-Kontakte überwiegen, wird eine Kaskaden- oder Kataraktbewegung angestrebt. Durch die leichte Neigung der Trommel werden die Partikel zum Trommelende transportiert und fallen in den sich anschließenden elektrostatischen Scheider. Die Aufladung in der Trommel bringt hohe Reinheit bei der Sortierung bei großen Durchsätzen^[27,49,52]. Die Aufladung in Trommeln kann für unterschiedlichste Materialien und variierende Mischungsverhältnisse wirtschaftlich eingesetzt werden. Besonders interessant für diese Technologie sind Produktionsabfälle, da diese relativ sauber sind und aus nur wenigen Polymersorten bestehen^[52].

Bei Trommeln, Schnecken und Mischern hat der Durchsatz einen entscheidenden Einfluss auf die Effektivität der Aufladung, da mit ihm die Anzahl der Partikel-Partikel-Kollisionen steigt und sich die Nettoladung je Partikel erhöht. Die Wahrscheinlichkeit für Partikel-Partikel-Kontakte ist in Trommeln und Mischern höher als in Zyklonen und Rohren, was vorteilhaft für die triboelektrische Aufladung erscheint^[30,49].

Wirbelschichten

Die triboelektrische Aufladung in Wirbelschichten (Abb. 4) wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht^[2,3,33,34]. Bisher wurde sie im technischen Maßstab jedoch kaum angewendet.

⁵⁰ G. Dodbiba; A. Shibayama; T. Miyazaki; T. Fujita: *Triboelectrostatic Separation of ABS, PS and PP Plastic Mixture*. Materials Transactions 44 (2003) 61-166.

⁵¹ J. Wagner: J. Wagner GmbH, Markdorf [www.wagner-group.de] (2012).

⁵² A. Tilmatine; K. Medles; M. Younes; A. Bendaoud, L. Dascalescu: *Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles*. IEEE Transactions of Industry Applications 46 (2010) 1564-1569 [Artikel-Nr. 5462911].

Die Ausprägung einer Wirbelschicht ist von vielen Faktoren abhängig, dadurch erscheint die Optimierung des Prozesses sehr komplex. Die Wirbelschicht kann durch Anströmung eines porösen Bodens, auf dem sich die Partikelschicht befindet, oder durch einen Propeller erfolgen. Der koaxiale Propeller erzeugt einen spiralförmig bewegten Luftstrom, in welchem die Partikel fluidisiert werden. Die Effektivität der Aufladung ist dabei stets vom Werkstoff der Wandung und von dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Behälters abhängig. Je größer das Oberflächen-Volumen-Verhältnis ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit von Partikel-Wand-Kontakten. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen gilt deshalb als größter Einflussfaktor für die Aufladung in der Wirbelschicht^[53,54].

Durch die Aufladung der Partikel kann es zur Adhäsion der Teilchen an der Wand kommen. Dies verringert einerseits die Konzentration an Partikeln in der Wirbelschicht und senkt damit die Wahrscheinlichkeit von Partikel-Partikel-Kontakten. Zum anderen wird die Wahrscheinlichkeit von Partikel-Wand-Kontakten durch die belegte Wandung stark reduziert^[54,55,56]. Bei der durch den Propeller erzeugten Wirbelschicht erfolgt zusätzlich zu den Partikel-Wand- und Partikel-Partikel-Kontakten die Kollision der Teilchen mit dem Propeller. Je höher die Propeller-Drehzahl ist, desto intensiver werden diese Zusammenstöße^[55].

In unseren Arbeiten^[2,3,33,34] zeigte die triboelektrische Aufladung in Wirbelschichten ausgezeichnete Trennerfolg. Da die zu trennenden Kunststoffe vor der Elektrosortierung meistens gewaschen werden, ist die Möglichkeit einer Trocknung in der Wirbelschicht ein positiver Nebeneffekt^[49].

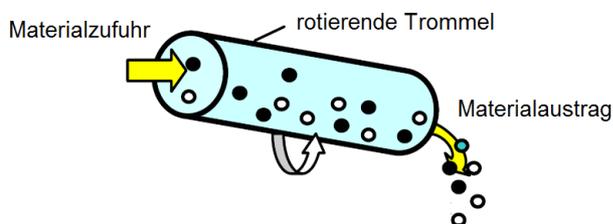


Abb. 3: Schema der triboelektrischen Aufladung in einer rotierenden Trommel^[49]

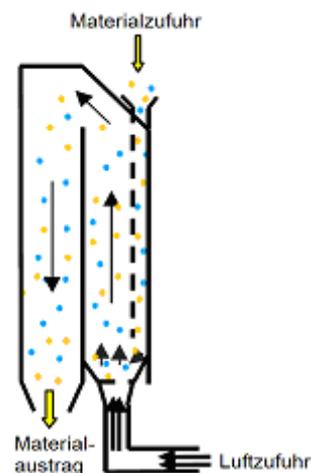


Abb. 4: Schema der Wirbelschichtaufladung^[49]

⁵³ K.M. Forward: *Triboelectrification of granular materials*. PhD Thesis, Case Western Reserve University (2009).

⁵⁴ M. Miloudi; K. Medles; A. Tilmatine; M. Brahami; L. Dascalescu: *Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials*. J. Electrostatics 69 (2011) 631-637.

⁵⁵ M. Linsenbühler: *Herstellung und Charakterisierung funktionalisierter Composite-Partikel*. Dissertation, Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg (2005) 49-64.

⁵⁶ P. Mehrani; H.T. Bi; J.R. Grace: *Electrostatic charge generation in gas-solid fluidized beds*. J. Electrostatics 63 (2005) 165-173.

4 Forschungsziel und Ablauf

Das wesentliche Ziel des Vorhabens bestand in der Entwicklung einer kontinuierlich arbeitenden Anlage, mit der als Abfall anfallende Kunststoffgemische durch das Verfahren der *Elektrosortierung* getrennt werden können. Die Entwicklung sollte vorzugsweise am Beispiel der Trennung zweikomponentiger ABS/PS-Gemische erfolgen. Für die Entwicklung eines skalierungsfähigen *kontinuierlich* arbeitenden Verfahrens zur Elektrosortierung von Kunststoffgemischen wurden die Verfahrensparameter (relative Luftfeuchte, Wandmaterialien und Luftgeschwindigkeiten) am bereits verfügbaren, diskontinuierlich arbeitenden Labor-Freifallscheider ermittelt.

Da die ABS und PS Kunststofftypen, die in der Elektronik- und Konsumgüterproduktion Anwendung finden (z.B. Computer inkl. Zubehör, Weiß- und Braungeräte etc.), stets gefüllte Polymere sind, ergab sich die Notwendigkeit, den Einfluss von typischen Füllstoffen und Additiven (z.B. TiO₂, Pigmente, Ruße, Flammschutzmittel, ionische Antistatika usw.) auf das Aufladeverhalten der Kunststoffe zu untersuchen. Parallel zur Entwicklung der kontinuierlichen Anlage sollten grundlegende Untersuchungen zum Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Aufladeigenschaften und Ladungsstabilität von Kunststoffen durchgeführt werden. Die Modelluntersuchungen an definiert gefüllten bzw. additivierten Kunststoffen mit Polyolefinmatrices ermöglichen eine Separation der intrinsischen Beiträge von Füllstoffen bzw. Additiven, Farbstoffen und Flammschutzmitteln von den polymerspezifischen Beiträgen zur Aufladung bzw. Ladungsstabilität. Eingeschlossen sind auch grundlegende Aussagen zur Ladungsstabilität auf Polymeroberflächen und in Polymermatrices, die Ruße oder ionogen wirkende Antistatika beinhalten. Im Ergebnis der chemisch-physikalischen Untersuchungen wurden praxisrelevante Erkenntnisse zum Mechanismus und zur Steuerung der triboelektrischen Aufladung (z.B. auch die Möglichkeit von Vorbehandlungsverfahren zur Überkompensation der Ladungseffekte, die durch Füllstoffe bzw. Additive generiert werden) von gefüllten, gefärbten und additivierten Polymeren erarbeitet. Danach erfolgte die Übertragung der grundlegenden Untersuchungen an gefüllten bzw. additivierten Modellkunststoffen bezüglich der Auswirkungen von Füllstoff, Additiven, Antistatika und Flammschutzmitteln auf die Trennergebnisse bei der Elektrosortierung von ABS/PS. Auch für ABS/PS-Gemische wurde die etablierte Vorbehandlung durch Elektronenbestrahlung zur Kompensation von Ladungseffekten der Füllstoffe und Additive genutzt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt ist eine Gemeinschaftsarbeit des *Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik* (IMVTAT) der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (Forschungsstelle 1) und dem *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.* (IPF) (Forschungsstelle 2).

Folgende Firmen haben die Projektbearbeitung durch die Bereitstellung von Materialien und Versuchsanlagen sowie viele anregende Diskussionen unterstützt. Für ihr Engagement sei ihnen an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

GUT GmbH, Stuttgart

Hamos GmbH, Penzberg

Hoffmann und Voss GmbH, Viersen

Kunststoffrecycling CKT GmbH & Co. KG, Bad Langensalza

KURIS Interessengemeinschaft Kunststoffrecyclinginitiative Sachsen e.V., Dresden

Multiport Recycling GmbH, Bernburg

RTW Rubber Technology Weidmann GmbH & Co., Bindlach

6 Projektergebnisse

6.1 Untersuchungen zum Einfluss von Füllstoffen und Additiven auf die triboelektrischen Eigenschaften

6.1.1 Versuchsanlagen, Versuchsmaterialien und Versuchsauswertung

Diskontinuierliche Versuchsanlage zur triboelektrischen Aufladung und Trennung der Kunststoffgemische

Die Versuchsanlage zur triboelektrischen Aufladung und Trennung der Kunststoffgemische ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Sie besteht aus der Luftkonditionieranlage, der Aufladeeinheit und dem elektrostatischen Freifallscheider mit den Auffangbehältern. Mit der Luftkonditionieranlage bestehend aus Kühler, Adsorptionstrockner und Befeuchter ließen sich gewünschte Prozessbedingungen reproduzierbar einstellen. Temperatur, Feuchte und Volumenstrom der Luft wurden kontinuierlich gemessen und automatisch geregelt. Die Aufladeeinheit bestand aus einer zylindrischen Wirbelkammer, die direkt über dem elektrostatischen Freifallscheider angeordnet war und in der die Granulate von der aufbereiteten Luft (relative Luftfeuchte $\varphi = 25\%$, Temperatur $T = 25\text{ °C}$) durchströmt wurden. Die Konditionierung erfolgte in ruhender Schüttung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s. Durch Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit auf 5 m/s wurden die Partikel in der entstandenen Wirbelschicht vier Minuten aufgeladen. Danach wurde der Austrag geöffnet und das Gemisch in das elektrische Feld des elektrostatischen Freifallscheider geleitet. Dieser bestand aus zwei schräg angeordneten Elektroden, an denen eine Gleichspannung anlag (die Spannung wurde von zwei Hochspannungsgleichrichtern erzeugt). Die fallenden Partikel wurden entsprechend dem Vorzeichen ihrer Nettoladung zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden ausgelenkt und fielen in die unterhalb der Elektroden befindlichen Auffangbecher, die als *Faraday-Becher* ausgebildet waren.

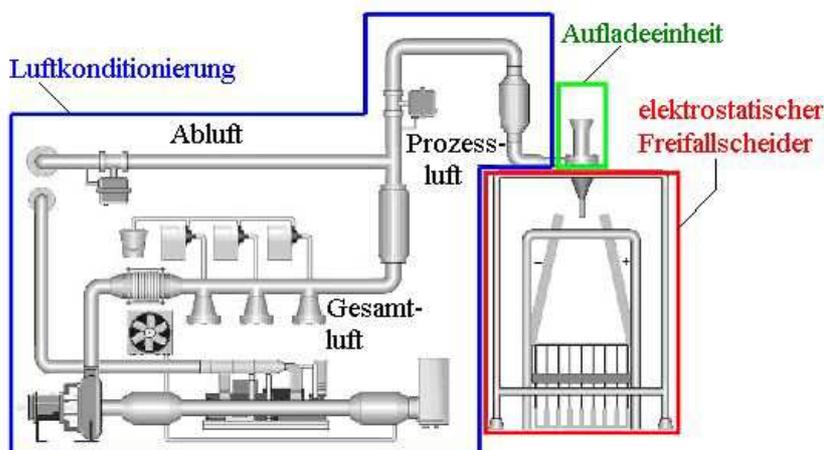


Abb. 5: Schematischer Aufbau des diskontinuierlich arbeitenden elektrostatischen Labor-Freifallscheiders mit Luftkonditionierung und Aufladeeinheit. Die Auffangkästen unter dem elektrostatischen Freifallscheider wurden als Faraday-Becher ausgelegt

Die Ladung der aufgefangenen Kunststoffpartikel wurde mit einem Elektrometer (Typ 6517A, Keithley Instruments) gemessen. Die Analyse der Produkte in den einzelnen Auffangbehältern erlaubte es, die Masse- und Ladungsverteilung der Kunststoffpartikel zu ermitteln.

Die Entwicklung und der Aufbau einer kontinuierlich arbeitenden Laboranlage zur triboelektrischen Aufladung und Trennung von Kunststoffgeschichten werden im Abschnitt 6.2 beschrieben.

Elektronenbestrahlungsanlage

Die Elektronenstrahlbehandlung der Granulate erfolgte mit einem Elektronenbeschleuniger ELV-2 (INP Novosibirsk, Russland) unter sehr schonenden Elektronenenergien und Dosen. Die entsprechenden Parameter wurden aus früheren Arbeiten übernommen^[37] (Elektronenenergie $E_s = 0,6$ MeV bei einem Strom von $I = 4,0$ mA; Dosis $D = 7,5$ kGy). Zur Vermeidung von Kontaminationen durch das Transportsystem des Elektronenbeschleunigers wurden die Granulatgemische in handelsüblichen Folietüten aus Polyethylen bestrahlt. Nach der Elektronenbestrahlung und einer Lagerung zwischen 24 und 48 h wurden die bestrahlten Kunststoffgemische triboelektrisch in der Aufladeeinheit des Freifallscheiders aufgeladen und im elektrischen Feld des Freifallscheiders getrennt.

Versuchsmaterialien

Low-density-Polyethylene (LDPE): Polyethylene LDPE 150 L, Dow Olefinverbund GmbH, Skopau (Deutschland);

Polypropylene (PP): Polypropylene HD 120 MO, Borealis AS, Stathelle (Norwegen);

Polystyren (PS): Polystyren PS K158, BASF;

Acrylnitril-Butadien-Styren-Copolymer (ABS): ABS Terluran GP-22, BASF.

Versuchsauswertung

Die in den 8 Auffangbehältern nach der Trennung angefallenen Fraktionen (vgl. auch Abb. 19) wurden per Handklaubung hinsichtlich der Polymersorten sortiert und die Gesamtmasse im Behälter und die Einzelmassen der Polymere ausgewogen.

Die Darstellung der Sortiererergebnisse erfolgte in Balkendiagrammen die entweder die Masseverteilung oder das Ausbringen der getrennten Komponenten über der Kastennummer zeigen (z. B. Abb. 10). Zusätzlich erfolgte die Bestimmung von Kenngrößen, die in der Aufbereitungstechnik Bedeutung erlangt haben. Die Kenngrößen *Masseausbringen* (R_m , r_m) *Wertstoffausbringen* (R_c , r_c), *Wertstoffgehalt* (c) und die *Sortierkennzahl* (B) sind wie folgt definiert:

$$R_m = \frac{m_c}{m_a} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (1)$$

Das Masseausbringen gibt an, welcher Teil der Aufgabe in einem beliebigen Produkt (Kasten) ausgebracht wird.

$$R_c = \frac{m_{i,j}}{m_{i,G}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (2)$$

Das Wertstoffausbringen (Gleichung (2)) gibt an, welcher Teil des in der Aufgabe enthaltenen Wertstoffes in einem beliebigen Produkt (Kasten) ausgebracht wird. Dabei bezeichnet $m_{i,j}$ die Masse der Komponente i , die in Kasten j ausgebracht wurde, $m_{i,G}$ die Gesamtmasse der Komponente i im Gemisch und $m_{G,j}$ die Gesamtmasse aller Komponenten im Kasten j . Beide Kenngrößen können sowohl für einzelne Kästen, als auch als kumulierte Größe über mehrere Auffangkästen aufsummiert angegeben werden.

$$c = \frac{m_{i,j}}{m_{G,j}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (3)$$

Mit Gleichung (3) wird die Konzentration, d. h. hier die Reinheit des Produktes beschrieben.

$$B = \frac{A_r}{A_{T,ideal}} \quad (4)$$

Die *Sortierkennzahl* B beschreibt den Gesamtrennerfolg mit einer Zahl. Sie wird aus einem R_c - R_m -Diagramm^[1] (s. Abb.60) ermittelt. Aufgetragen wird in diesem Diagramm das kumulierte Wertstoffausbringen einer Komponente über dem Masseausbringen aller Komponenten. Dabei werden die Flächen für die reale Sortierung, die sich zwischen der Kurve für die ideale Sortierung und der Kurve für die ideale Mischung befindet, zur Fläche der idealen Sortierung ins Verhältnis gesetzt.

6.1.2 Einarbeiten von Füllstoffen und Additiven

Die Einarbeitung der in den Tabellen 1 und 2 aufgeführten Füllstoffe und Additive in die Polymermatrices erfolgte am *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.* mit einem Extruder ZSK 30 nach einem Vormischen im Haupttrichter bei einem Durchsatz von 10 kg/h. Die gefüllten bzw. additivierten Kunststoffe fielen als Stranggranulat an. Die Verarbeitungstemperaturen lagen bei LDPE bei 150 °C bis 180 °C und bei PP, ABS und PS bei 200 °C bis 220 °C. Die eingebrachten Gehalte an Füllstoffen wurden durch Röntgen-Fluoreszenzmessungen (RFA) überprüft (vgl. Abschnitt 6.1.3).

Nachdem Antistatika Irgastat, Leitruß, verschiedene Farbstoffe, Flammschutzmittel Magnifin (Magnesiumhydroxid) und Hydral Coat (Aluminiumhydroxid) sowie die Füllstoffe Kreide und Talkum in verschiedenen Konzentrationen in die Modellpolymere PP und PE eingearbeitet und untersucht wurden, wurden PS- und ABS-Matrices mit verschiedenen Additiven und Füllstoffen *compoundiert*. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde als Antistatika ebenfalls 15% Irgastat und als Füllstoffe wieder Kreide und Talkum in den verschiedenen Konzentrationen, die für PP und LDPE zur Anwendung kamen, verwendet. Als Flammschutzmittel werden für ABS und PS immer noch bromierte Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Daher erfolgte in ABS und PS die Einarbeitung von jeweils 20 Ma-% Saytex CP-2000 (Tetrabrombisphenol) bzw. 12 Ma-% Saytex 8010 (Decabromdiphenylethan), die von der Firma Albermale zur Verfügung gestellt wurden. Die *Compoundierung* erfolgte auf Grund der relativ geringen Mengen im ZSE 27 Maxx. Die ABS- und PS-Granulate mit dem bromierten Flammschutz waren deutlich kleiner (Korndurchmesser ca. 2 mm) als die anderen Granulate (Korndurchmesser ca. 4 mm).

Tab. 1: Die in PP bzw. LDPE eingearbeiteten Mengen an Füllstoffen bzw. Additiven

	Compoundierung von PP	Compoundierung von LDPE
Antistatika	15 Ma-% Irgastat P18	15 Ma-% Irgastat P18
Flammschutz	20, 40 bzw. 65 Ma-% Magnifin H5	20, 40 bzw 65 Ma-% Magnifin H5 40 bzw 65 Ma-% Hydral Coat
Farbpigmente	0,5 Ma-% Pigment weiß	5 % Masterbatch orange
	0,5 Ma-% Pigment gelb	0,2 % Masterbatch braun
	0,2 % Masterbatch blau	5 % Masterbatch braun
	0,2 % Masterbatch grün	5 Ma-% Masterbatch Farbruß
Leitruß	8% Printex XE 2	8% Printex XE 2
Füllstoffe	5, 20 bzw. 40 Ma-% Talkum	5, 20 bzw. 40 Ma-% Talkum
	5, 20 bzw. 40 Ma-% Kreide ^[a]	5, 20 bzw. 40 Ma-% Kreide ^[a]

^[a] Omyacarb 2 SV

Tab. 2: Die in PS bzw. ABS eingearbeiteten Mengen an Füllstoffen bzw. Additiven

	Compoundierung von PS	Compoundierung von ABS
Antistatika	15 Ma-% Irgastat P18	15 Ma-% Irgastat P18
Flammschutz	20 Ma-% Saytex CP 2000	20 Ma-% Saytex CP 2000
	12 Ma-% Saytex 8010	12 Ma-% Saytex 8010
UV-Stabilisator	0,5 Ma-% Irganox 1076	0,5 Ma-% Irganox 1076
Füllstoffe	5, 20 bzw. 40 Ma-% Talkum	5, 20 bzw. 40 Ma-% Talkum
	5, 10, 20 bzw. 40 Ma-% Kreide ^[a]	20 bzw. 40 Ma-% Kreide ^[a]

^[a] Omyacarb 2 SV

6.1.3 Charakterisierung der additivierten und gefüllten Modellpolymere

Die Charakterisierung der additivierten und gefüllten Kunststoffe erfolgte zunächst mit Hilfe der Röntgen-Fluoreszenzanalyse (RFA-Spektrometer EDX 800 HS, Shimadzu Deutschland GmbH, Duisburg). Dabei konnten auch geringe Konzentrationen der verschiedenen Additive (z.B. nur 0,2 % des *Masterbatches* in PP oder PE) nachgewiesen werden. Die quantitative Bestimmung gestaltete sich ohne kunststoffspezifische Kalibrierung schwierig. Methodenbedingt werden Elemente niedriger Ordnungszahlen nur mit sehr geringer Intensität erfasst und eine Auswertung über die Streuwerte der Kohlenwasserstoffmatrix erschien ungenau und stark fehlerbehaftet. Die Untersuchungen mit den wellenlängendispersiven RFA-Spektrometern ZSX Primus II und Supermini (beide Rigaku Europe SE, Ettlingen) und einer semi-quantitative Analyse ohne Kalibrierungskurven ergaben für den eingearbeiteten Kreideanteil sehr gute Ergebnisse (Tab. 3), sodass von einer präzisen Einarbeitung der vorgegebenen Mengen während der Extrusion ausgegangen werden kann. Bei den Füllstoffen aus Elementen kleinerer Ordnungszahlen (z.B. Mg) erfolgte die Kalibrierung an Hand einer Probe mit bekanntem Füllstoffgehalt. Dadurch konnten wieder sehr gute Ergebnisse erreicht werden, die auch die exakte Einarbeitung von Talkum und Magnifin nachwies.

Tab. 3: Bestimmung der eingearbeiteten Kreideanteile mittels semiquantitativer wellenlängendispersiver Röntgen-Fluoreszenzanalyse (WD-RFA)

Kreideanteil im Kunststoff	Experimentell bestimmter Masseanteil an CaCO ₃ [%] [RFA-Spektrometer Supermini]	Experimentell bestimmter Masseanteil an CaCO ₃ [%] [Spektrometer ZSX Primus II]
PE + 5% Kreide		4,83
PE + 20% Kreide		20,9
PE + 40% Kreide		42,6
PP + 5% Kreide	4,62	5,01
PP + 20% Kreide	18,8	19,4
PP + 40% Kreide	42,1	43,9
PS + 5% Kreide	4,84	
PS + 10% Kreide	9,99	
PS + 20% Kreide	20,0	
PS + 40% Kreide	39,7	
ABS + 20% Kreide	21,7	
ABS + 40% Kreide	38,3	

Die Untersuchungen zur Wasseraufnahme zeigten, dass sich bei geringen Konzentrationen der Füllstoffe keine signifikanten Veränderungen ergaben (Abb. 6). Erst bei höheren Füllstoffkonzentrationen sind die hydrophilen Füllstoffpartikel an der Probenoberfläche präsent, so dass sie in der Lage sind, Wasser aufzunehmen. Eine deutliche Erhöhung des Wasseraufnahmevermögens gab es allerdings nur bei 65 % Magnifin und bei 15 % Antistatika in PE (Abb. 6).

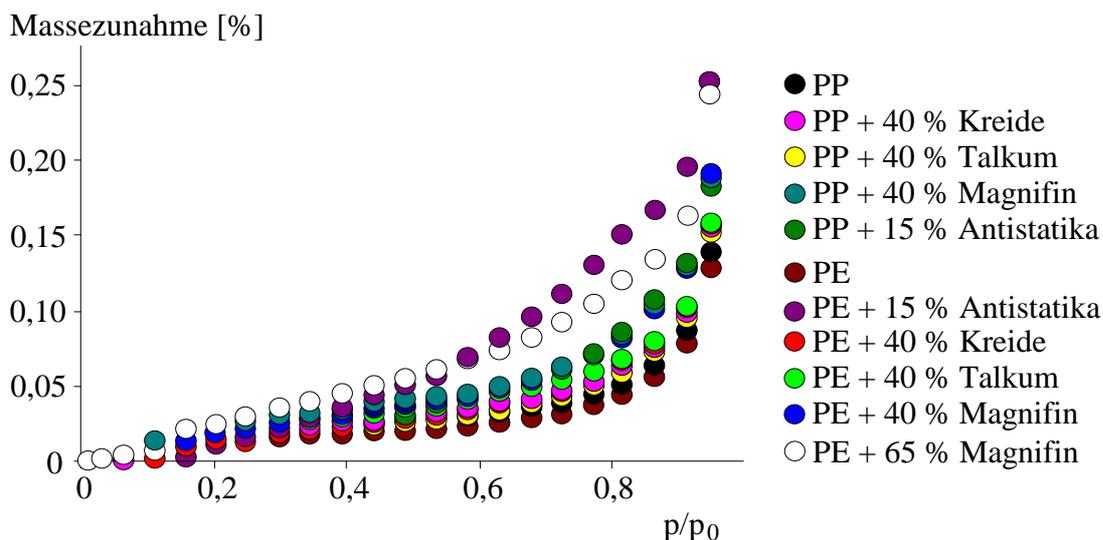


Abb. 6: Wasserdampfadsorptionsmessungen an gefüllten bzw. additivierten Polyolefinen (die Messungen erfolgten mit einem Sorptionsanalysator IGA-002 der Firma Hiden, Warrington, Großbritannien)

Obwohl Talkum brønstedsaure Oberflächen besitzt (Abb. 7), zeigten elektrokinetische Untersuchungen an gefüllten und additivierten Kunststoffen keine signifikanten Unterschiede im isoelektrischen Punkt (pH_{IEP} , Abb. 8). Für die elektrokinetischen Untersuchungen wurden aus gefüllten und additivierten Kunststoffproben Schmelzeplättchen hergestellt, die dann im Strömungspotentialexperiment untersucht wurden. Die Abhängigkeit der Zetapotentialwerte (ζ) vom pH-Wert zeigte, dass die eingearbeiteten Stoffe in den Schmelzeffilmen vollständig eingeschlossen vorlagen und somit keinen Beitrag zum Aufbau der elektrochemischen Doppelschicht leisteten.

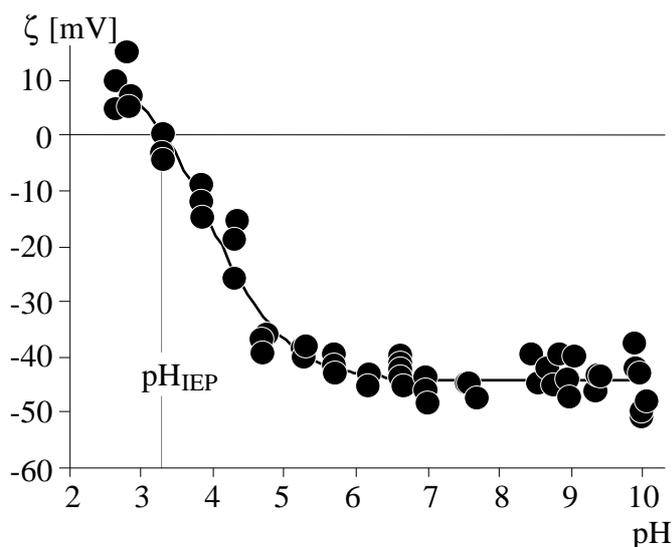


Abb. 7: Elektrokinetische Messungen (Partikel-Elektrophorese) von pulverförmigen Talkum in Abhängigkeit des pH-Werts. Die Bestimmung der Zetapotentialwerte (ζ) erfolgte in einer wässrigen $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung mit einem Zetasizer nano (Malvern Instruments GmbH, Herrenberg)

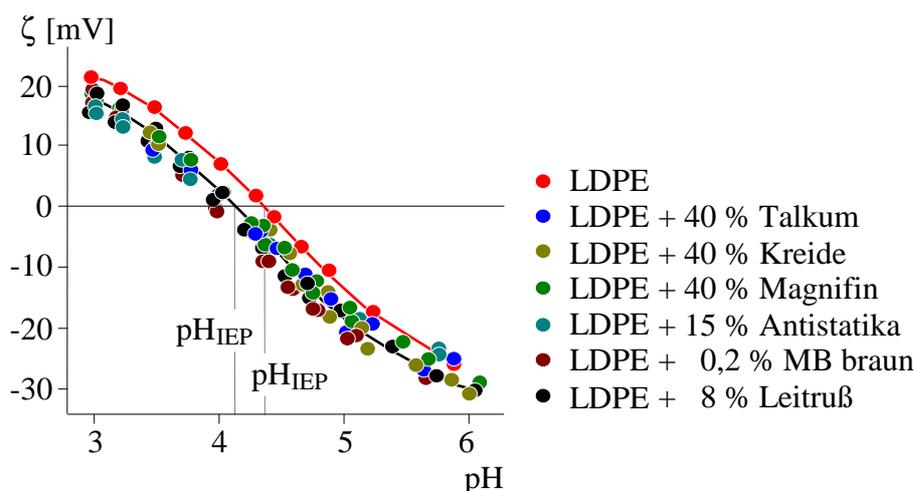


Abb. 8: Strömungspotentialmessungen an Schmelzplättchen verschieden gefüllter LDPE-Granulate in Abhängigkeit vom pH-Wert. Die Bestimmung der Zetapotentialwerte (ζ) erfolgte in einer wässrigen $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung mit einem Elektrokinetischen Analysator EKA III (Anton Paar, Graz, Österreich)

Dennoch korrelierte das Aufladeverhalten der talkumgefüllten Kunststoffe mit dem Füllgrad, sodass anzunehmen ist, dass die elektrischen Felder geladener Oberflächengruppen der inkorporierten Füllstoffpartikel zur Nettoladung nach der triboelektrischen Aufladung beitragen. Dass Füllstoffe in einer Polymermatrix hohe intrinsische Ladungen aufweisen, konnte an Hand rasterkraftmikroskopischer Untersuchungen nachgewiesen werden. Während das Phasenbild des reinen LDPE eine homogene Oberfläche zeigt (Abb. 9a), erkennt man bereits bei einem Füllgrad von 5% Talkum im LDPE helle und dunkle Areale, die unterschiedlich geladene Areale des gefüllten Kunststoffs zeigen (Abb. 9b).

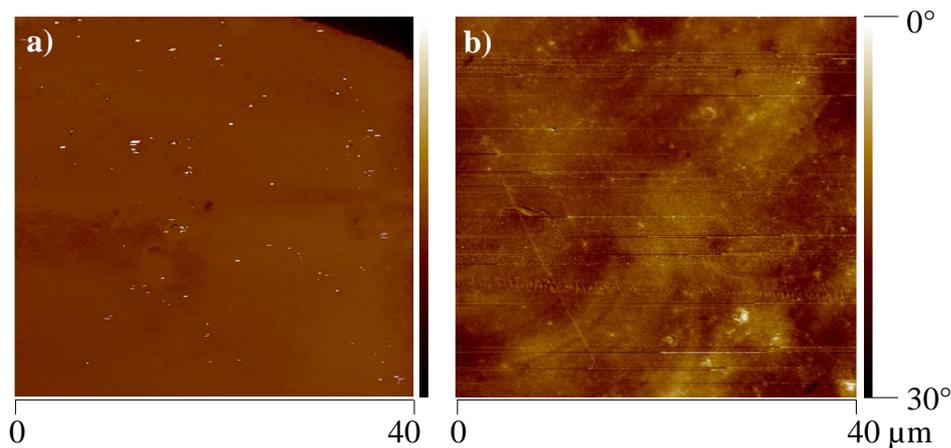


Abb. 9: Phasenbilder rasterkraftmikroskopischer Untersuchungen eines LDPE-Schmelzefilms ohne Füllstoff (a) und eines LDPE-Schmelzefilms mit 5 % Talkum (b). Die Messungen erfolgten mit einem NanoScope IIIa Dimension 3100 (Bruker-Nano, Billerica, USA) im Electric-Force-Gradient-Microscopy-Modus (EFM)

6.1.4 Einfluss von Füllstoffen und Additiven auf das Trennverhalten von Modellsystemen (PP/LDPE)

Für die Aufklärung des Einflusses von Füll- bzw. Zusatzstoffen wurde der vorhandene Labor-Freifallscheider mit Konditioniereinheit und Ladungsmessung verwendet. Ausgangspunkt bildeten die nicht additivierten und ungefüllten Modellsysteme PP und PE, die sich ohne Vorbehandlung gegeneinander nicht elektrostatisch aufladen und daher als Gemisch elektrostatisch nicht separierbar sind^[17]. Entsprechend dem Versuchsplan wurden Trennversuche von PP/PE-Gemischen durchgeführt, wobei jeweils nur eine Komponente additiviert oder gefüllt war. Auf diese Weise gelang es, die intrinsischen Beiträge der *compoundierten* Additive bzw. Füllstoffe auf das Aufladeverhalten einzuschätzen. Die gefundenen Einflüsse der Additive bzw. Füllstoffe wurden bestätigt, wenn additiviertes oder gefülltes PE gegen reines PE oder additiviertes oder gefülltes PP gegen reines PP aufgeladen wurden. Die Variation des Wandmaterials der Aufladeeinheit (Gold oder PE) und veränderte relative Luftfeuchten während der Konditionierungsphase hatten dabei keine signifikanten Einflüsse auf das Aufladeverhalten.

Farbpigmente und Leitruß

Verschiedene eingearbeitete Farbpigmente (MB braun, MB orange, MB grün, MB blau, gelb, weiß und Farbruß) beeinflussten die Trennung kaum, sodass die mit ihnen gefüllten Polyolefingranulate kaum aufgeladen wurden und in den mittleren Auffangkästen als Mischung anfielen. Auch 8 % Leitruß beeinflusste das Auflade- und Trennverhalten nicht (Abb. 10a). Durch veränderte Wandmaterialien der Aufladeeinheit (Gold oder PE, Abb. 10b und 10c)

oder variierte Luftfeuchten während der Konditionierung (25 % oder 50 %) konnte die Aufladung nicht signifikant beeinflusst werden.

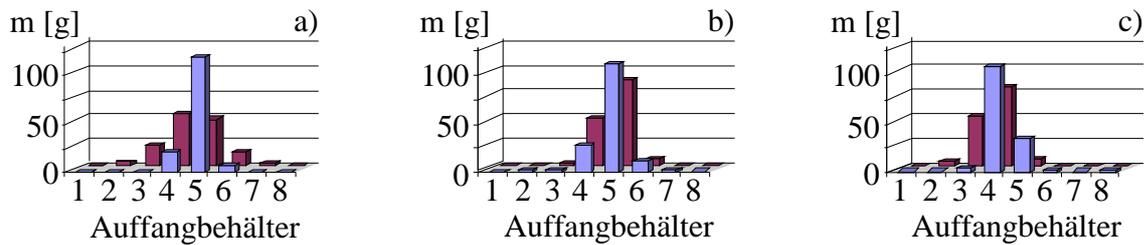


Abb. 10: Ergebnisse der elektrostatischen Trennung von ungefüllten PE und gefüllten PP

Abb. 10a: ungefülltes PE (■) und PP mit 8 % Leitruß (■), Aufladung im Goldzylinder

Abb. 10b: ungefülltes PE (■) und PP mit 0,2 % MB grün (■), Aufladung im Goldzylinder

Abb. 10c: ungefülltes PE (■) und PP mit 0,2 % MB grün (■), Aufladung im PE-Zylinder

Antistatika

Antistatika erhöhen die Leitfähigkeit von Kunststoffen, um eine elektrostatische Aufladung zu vermeiden. Antistatika sind meist hydrophile Substanzen, die aus der umgebenden Luft Wasser adsorbieren, wodurch es zur Bildung leitfähiger Oberflächenschichten (dünne Wasserfilme) kommt. Mit Hilfe von Wasserdampfadsorptionsmessungen konnten wir das größere Wasseraufnahmevermögen durch die Einarbeitung von 15 % Antistatika nachweisen (im PE noch stärker als im PP, vgl. Abb. 6). Erwartungsgemäß wurden PP/PE-Gemische mit Antistatikazusätzen im Freifallscheider kaum aufgeladen und waren schlecht trennbar (Abb. 11 a und b). Auch hier und bei allen weiteren Untersuchungen am System PE/PP hatte das Wandmaterial der Aufladeeinheit keinen Einfluss, so dass alle folgenden Ergebnisse mit der Aufladung der goldbeschichteten Aufladeeinheit erfolgt.

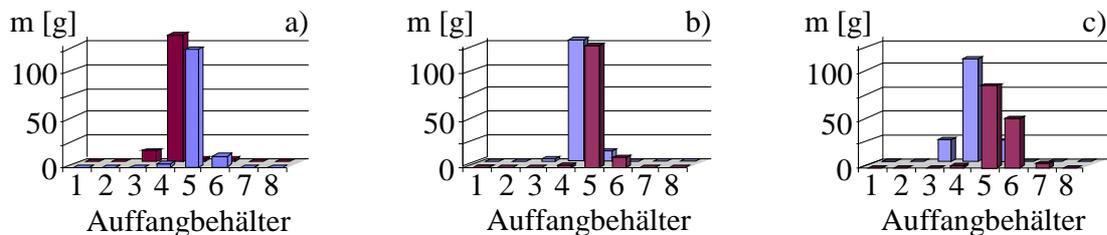


Abb. 11: Einfluss von Antistatika auf die elektrostatische Trennung von PE/PP

Abb. 11a: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 15 % Antistatika (■), relative Luftfeuchte von 25 %

Abb. 11b: Trennergebnis von PE mit 15 % Antistatika (■) und ungefüllten PP (■), relative Luftfeuchte von 25 %

Abb. 11c: Trennergebnis von PE mit 15 % Antistatika (■) und ungefüllten PP (■), relative Luftfeuchte von 50 %

Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 25 % auf 50 % während der Konditionierung im Freifallscheider führte trotz der erhöhten Wasseraufnahmefähigkeit von PE mit 15% Antistatika zu keiner signifikanten Veränderung der Aufladbarkeit (Abb. 11 b und c). Allerdings ist eine Tendenz zu erkennen, nach der die Komponente mit Antistatika in den Bereich positiver Aufladung verschoben wurde.

Flammschutz

Viele Flammschutzmittel sind ökologisch und gesundheitlich bedenklich, besonders halogenierte Flammschutzmittel. Deshalb wird – wenn möglich – zu mineralischen Flammschutzmitteln übergegangen, die allerdings in sehr hohen Konzentrationen eingebracht werden müssen^[57]. Für PE wird vorzugsweise Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) und für PP Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) verwendet. Auf Grund der höheren Verarbeitungstemperaturen ist beim PP ein Verwenden des preiswerteren $\text{Al}(\text{OH})_3$ nicht möglich. Für vergleichende Modelluntersuchungen wurden sowohl $\text{Al}(\text{OH})_3$ als auch $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in PE eingearbeitet. Die Füllstoffkonzentrationen variierten zwischen 20 % und 65 %. Es konnte gezeigt werden, dass sich die mit den Flammschutzmitteln gefüllten Kunststoffe gegen die ungefüllten Polyolefine positiv aufladen. Die Aufladung korrelierte mit der Konzentration an Flammschutzmittel, war aber bei den PE-Proben generell etwas höher als bei den PP-Proben. Auch wirkte Magnesiumhydroxid (Magnifin) stärker positivierend als Aluminiumhydroxid (Abb. 12).

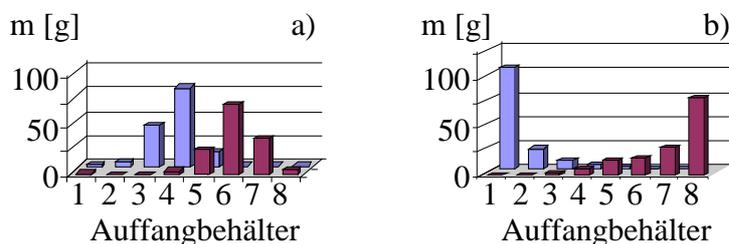


Abb. 12: Einfluss von Flammschutz auf die elektrostatische Trennung von Modellmischungen

Abb. 12a: Trennergebnis von PE mit 40 % $\text{Al}(\text{OH})_3$ (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 12b: Trennergebnis von PE mit 40 % Magnifin ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (■) und ungefüllten PP (■)

In den Abb. 12a und 12b ist die stärkere Verschiebung in den positiven Bereich (positiv geladene Teilchen landen in den Kästen 1 bis 3) bei Einarbeitung von 40 % Magnifin gegenüber 40 % Aluminiumhydroxid in PE ersichtlich. Die Abb. 13a und 13b zeigen, dass 40 % Magnifin in PP dagegen noch keinen ladungsbestimmenden Einfluss haben. Erst bei 65 % Magnifin in PP, das gegen reines PP aufgeladen wurde, ist zu erkennen, dass sich die Komponente mit Flammschutz positiv gegen die reine Komponente auflädt.

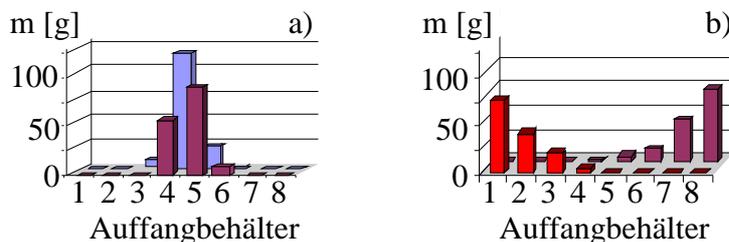


Abb. 13: Einfluss von Magnifin in PP auf die elektrostatische Trennung

Abb. 13a: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 40 % Magnifin ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (■)

Abb. 13b: Trennergebnis von ungefüllten PP (■) und PP mit 65 % Magnifin ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (■)

⁵⁷ R. Gächter, H. Müller: *Taschenbuch der Kunststoff-Additive*. 3. Ausgabe (1989) Carl Hanser Verlag, München und Wien.

Kreide und Talkum als Füllstoffe

Als Füllstoffe werden meist anorganische Zuschlagstoffe eingesetzt. Es wird zwischen aktiven und inaktiven Füllstoffen differenziert. Während inaktive Füllstoffe nur eine Volumenvergrößerung und damit eine Kostensenkung des Fertigteils bewirken sollen, werden aktive Füllstoffe eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Eigenschaften der Fertigteile, wie Steifigkeit, Härte, Oberflächenqualität und Wärmeformbeständigkeit zu verbessern^[58]. Typische Füllstoffe sind Kreide und Talkum. Kreide (Calciumcarbonat, CaCO_3) wird zur Erhöhung der Temperaturstandfestigkeit, Schlagfestigkeit oder zur Versteifung eingesetzt. Laut Literatur beeinflusst es die elektrischen Eigenschaften der Kunststoffe nicht^[59]. Talkum ist ein hydratisiertes Magnesiumsilicat, das die Biege- und Schlagfestigkeit verbessert^[58] und den elektrischen Widerstand der gefüllten Kunststoffe erhöht. Die Füllstoffe Kreide und Talkum wurden in verschiedenen Konzentrationen bis 40 % in die Polyolefinmatrices eingearbeitet. Bei dem Füllstoff Kreide wurde erwartungsgemäß kein Einfluss auf die Aufladbarkeit beobachtet. Selbst bei hohen Gehalten (40 % Kreide) zeigten PE und PP keine stoffspezifische Aufladbarkeit, sodass keine Separation erfolgen konnte (Abb. 14 a und 14b).

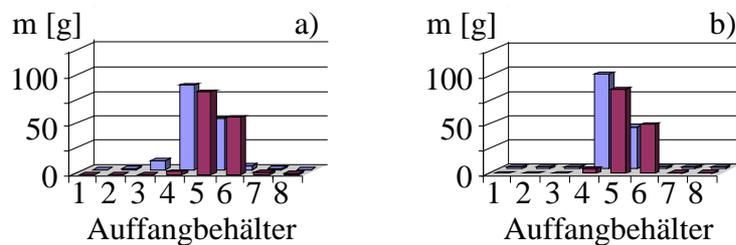


Abb. 14: Einfluss von Kreide auf die elektrostatische Trennung von Modellgemischen

Abb. 14a: Trennergebnis von PE mit 40 % Kreide (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 14b: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 40 % Kreide (■)

Während Kreide kaum Einfluss auf die Aufladung der Polyolefingemische hatte, konnte bei Talkum ein deutlicher Einfluss festgestellt werden. Bereits bei einem Gehalt von 5 % Talkum lud sich die mit Talkum gefüllte Komponente (PE oder PP) negativ auf (Abb. 15a und 15b).

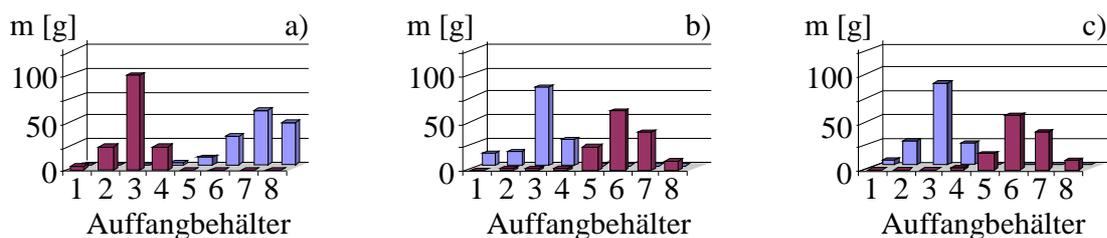


Abb. 15: Einfluss von 5% Talkum auf die elektrostatische Trennung von Modellgemischen

Abb. 15a: Trennergebnis von PE mit 5 % Talkum (■) und ungefüllten PP (■), Aufladung bei einer relativen Luftfeuchte von 25 %

Abb. 15b: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 5 % Talkum (■), Aufladung bei einer relativen Luftfeuchte von 25 %

Abb. 15c: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 5 % Talkum (■), Aufladung bei einer relativen Luftfeuchte von 50 %

⁵⁸ D. Gysau: *Füllstoffe – Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage (2006) Vincentz Network, Hannover, S. 19-63.

⁵⁹ K. Oberbach: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. (1995) Hanser Verlag, Wien.

Aus Abb. 15a ist ersichtlich, dass sich PE mit 5 % Talkum negativ gegen das ungefüllte PP auflädt und sich bevorzugt in den Auffangbehältern 6 bis 8 sammelt. In Abbildung 15b landet das PP mit 5 % Talkum hauptsächlich in den Behältern 6 und 7. Die Aufladung erfolgt also nicht polymerspezifisch sondern *talkumspezifisch*. Auch bei dem Füllstoff Talkum, das den größten Einfluss auf die elektrostatische Aufladung hatte, gab es keinen Unterschied durch die Luftfeuchte (Abb. 15c).

Je höher die Gehalte an Talkum desto besser die Aufladbarkeit und die Separation. Bereits bei einem Gehalt von 5 % Talkum, waren PP/PE-Gemische ohne Vorbehandlung elektrostatisch trennbar, wenn eine der beiden Polyolefinkomponenten talkumgefüllt vorlag. Mit zunehmendem Füllgrad stieg die Sortierkennzahl und damit verbesserte sich der Trenneffekt (vgl. Abb. 15 und 16).

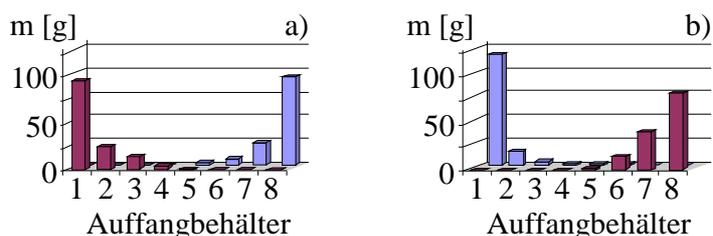


Abb. 16: Einfluss von 20% Talkum auf die elektrostatische Trennung von Modellgemischen

Abb. 16a: Trennergebnis von PE mit 20 % Talkum (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 16b: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 20 % Talkum (■)

6.1.5 Einfluss der Elektronenstrahlvorbehandlung auf gefüllte oder additivierte Modellsysteme (PP/LDPE)

Schwerpunkt in vorangegangenen Arbeiten^[1,2,37] war die Suche nach Vorbehandlungsmöglichkeiten für die Trennung von Polyolefingemischen. Dabei erwies sich eine Vorbehandlung von PE/PP-Gemischen durch Elektronenbestrahlung erfolgreich^[37]. Das stoffspezifische Abklingverhalten der in die Granulate implantierten Elektronen und erzeugten Radikationen führte zur Möglichkeit einer stofflichen Separation im elektrischen Feld des Freifallscheiders. Untersuchungen ergaben, dass der Trennerfolg oder die Trennschärfe durch Kontaminationen nicht beeinflusst wurde^[47]. In diesem Vorhaben galt es zu klären, ob der ladungssteuernde Einfluss von Füllstoffen, Pigmenten und Additiven, die sich im Volumen der Kunststoffe befanden, durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung überkompensiert werden können und dadurch Trennergebnisse, die von der Art und Menge ihrer Füllstoffe unabhängig sind, erhalten werden.

Die Elektronenbestrahlung erfolgte unter atmosphärischen Bedingungen mit dem oben beschriebenen Elektronenbeschleuniger am IPF in Dresden (vgl. Abschn. 6.1.1). Die besten Trennergebnisse konnten nach einer Lagerung über 48 h zwischen Bestrahlung und Elektrosortierung erreicht werden. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden alle Proben in einer Klimakammer bei 25°C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % konditioniert. Zusätzlich wurde an den bestrahlten additivierten bzw. gefüllten PE- und PP-Granulaten mittels ESR-Spektroskopie der zeitliche Abfluss der eingebrachten Elektronen und Radikale über einen Zeitraum von einer Woche verfolgt. Interessant erscheint, dass die eingebrachten Zusatzstoffe ein Abfließen der Ladungen verzögerten. Der Effekt ist bei gefüllten PP-Granulaten gering, bei PE aber sehr deutlich ausgeprägt (Abb. 17).

Erstaunlicherweise war der Einfluss bei 40 % Kreide in PE am höchsten, sodass vermutet werden kann, dass die Elektronenbestrahlung nicht als Vorbehandlung für eine erfolgreiche Trennung ausreichen würde. Trotzdem ließ sich das Gemisch PP/PE + 40 % Kreide, welches

ohne Behandlung nicht trennbar ist, nach einer Elektronenbestrahlung sehr gut trennen (Abb. 18a). Auch wenn sich 40 % Kreide im PP befand, beeinflusste das das gute Trennergebnis nicht (Abb. 18b). Offensichtlich bewirkten die inkorporierten Elektronen und Radikale nicht direkt die elektrostatische Aufladung, sondern erzeugten im Kunststoff eine polymerspezifische Veränderung, die zu der Befähigung der Elektronenaufnahme oder -abgabe bei der Kontaktierung und so zur entsprechenden elektrostatischen Aufladung führten. Da bei den ESR-Messungen keine *Kontaktaufladungen* gemessen werden, können die Ergebnisse der Abklingkurven nicht direkt mit dem Trennmechanismus der Elektrosortierung korreliert werden.

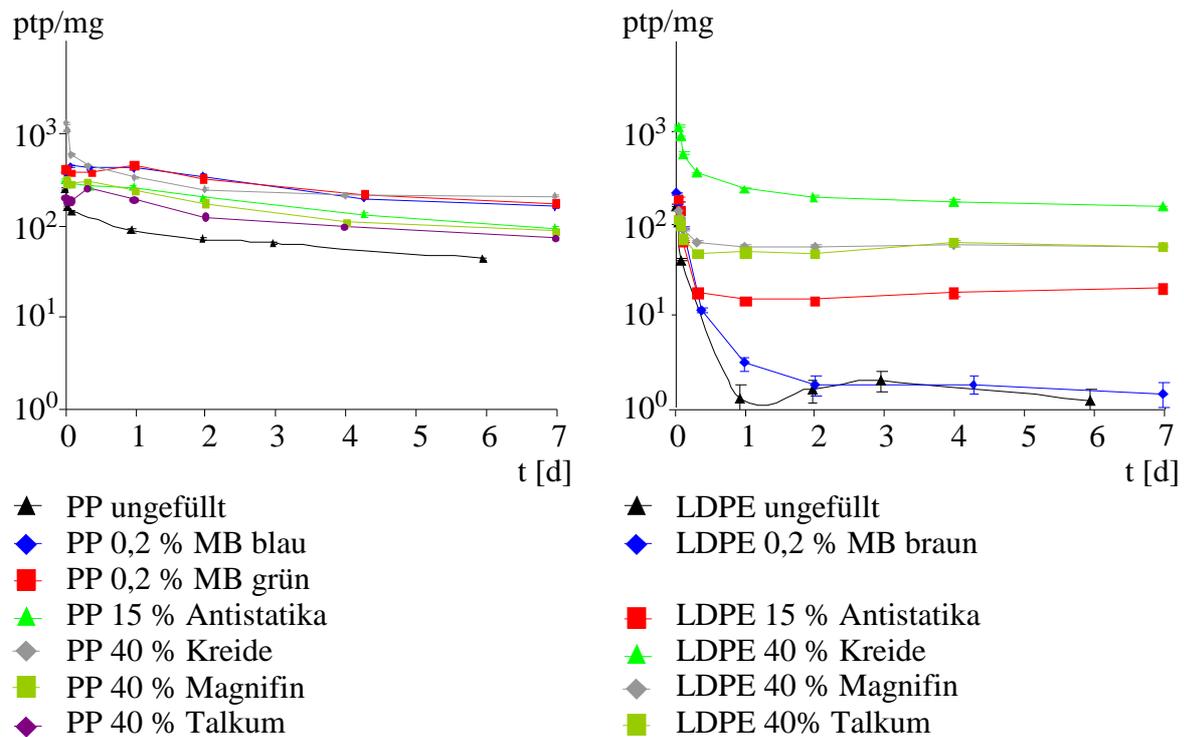


Abb. 17: Der zeitliche Verlauf (t = Lagerzeit nach der Bestrahlung) des Dissipierens von Elektronen und Radikationen, die durch eine Elektronenbestrahlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) in unterschiedlich modifizierte PP-Granulate (a) bzw. LDPE-Granulate (b) eingebracht wurden. Die Bestimmung der relativen Intensität (ptp = Peak-to-peak-Differenz der ersten Ableitung im ESR-Signal) erfolgte mittels ESR-Spektroskopie

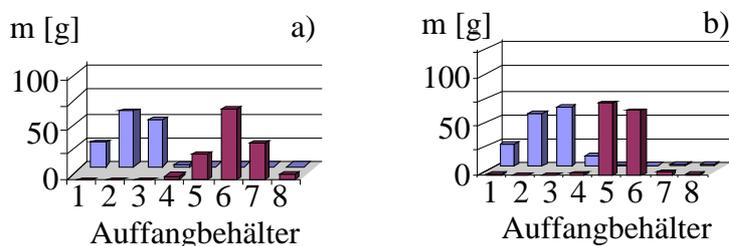


Abb. 18: Elektrostatiche Trennung von Modellmischungen nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und Probenlagerung über 48 h
 Abb. 18a: Trennergebnis von PE mit 40 % Kreide (■) und ungefüllten PP (■)
 Abb. 18b: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 40 % Kreide (■)

Während ohne Elektronenstrahlvorbehandlung pigmentierte Polyolefine nicht sortiert werden konnten, erfolgte nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung eine sortenreine Trennung der pigmentierten (Farbstoffe, Ruß) PE- bzw. PP-Granulate. Dabei luden sich unabhängig von der Art der Farbstoffe PE positiv und PP negativ auf (Abb. 19).

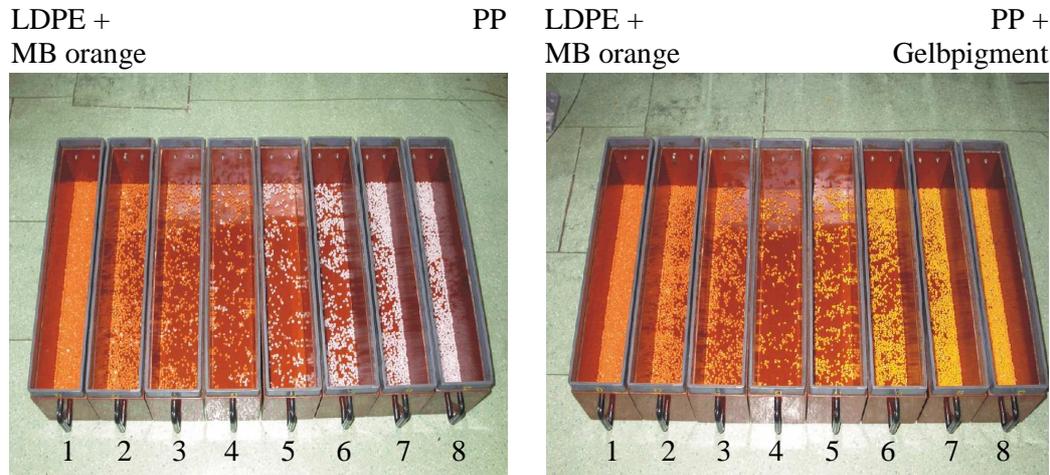


Abb. 19: Elektrostatische Trennung von pigmentierten PE- und PP-Granulaten nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und einer Probenlagerung über 48 h: Trennung von LDPE mit 5 % MB orange und nicht pigmentierten weißen PP (linkes Bild) und Trennung von PP mit 0,5 % Pigmentgelb (Diazopigment) und LDPE mit 5 % MB orange (rechtes Bild)

Allerdings wurden die o.g. Pigmente nur in relativ geringen Konzentrationen in die Kunststoffe eingearbeitet. Flammschutzmittel und Füllstoffe kommen allgemein in wesentlich höheren Konzentrationen vor. Es konnte aber gezeigt werden, dass durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung von PE- oder PP-Granulaten, die 40 % Hydral Coat oder 40 % Magnifin enthielten, gute Ergebnisse bei ihrer Trennung von ungefüllten Polyolefinen erreicht werden konnten (Abb. 20).

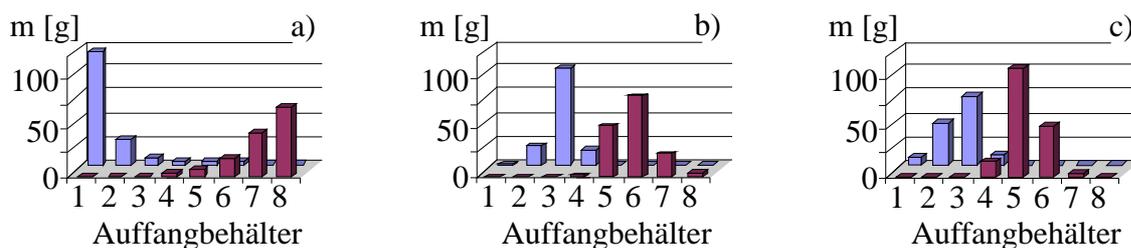


Abb. 20: Einfluss von Flammschutz auf die elektrostatische Trennung von Modellgemischen nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und einer Probenlagerung über 48 h.

Abb. 20a: Trennergebnis von PE mit 40 % $Al(OH)_3$ (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 20b: Trennergebnis von PE mit 40 % $Mg(OH)_2$ (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 20c: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 40 % $Mg(OH)_2$ (■)

Der Einfluss der Flammschutzmittel (zunehmende positive Aufladung) konnte bis zu einem Masseanteil von 40 % mit den gewählten Bedingungen der Elektronenbestrahlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) vollständig kompensiert werden. Bei 65 % Magnifin im PP (35 % PP und 65 % $Mg(OH)_2$) reichten die üblichen Bedingungen der Elektronenbestrah-

lung zwar noch zu einer stoffspezifischen Aufladung aber nicht mehr zu einer Separation mit hoher Trennschärfe (Abb. 21a). Offensichtlich reichte die Anzahl der eingebrachten Elektronen nicht mehr aus, um das elektrische Feld der $Mg(OH)_2$ -Partikel zu kompensieren. Erhöhte man die Gesamtdosis bei der vorbehandelnden Elektronenbestrahlung indem man mehrfach bestrahlte, konnten wieder sehr gute Trennschärfen erreicht werden (Abb. 21b). Durch die Mehrfachbestrahlung summierte sich zwar die Dosis, die milden Bestrahlungsbedingungen garantierten aber das Unterbinden von Abbaureaktionen des PP.

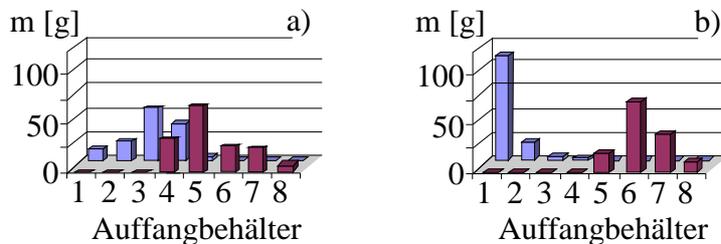


Abb. 21: Einfluss der Elektronenstrahlvorbehandlung auf die elektrostatische Trennung hochgefüllter Polyolefine (ungefülltes PE ■ und PP mit 65 % $Mg(OH)_2$ ■)

Abb. 21a: Trennergebnis nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung mit $E_S=0,6$ MeV bei $I=4,0$ mA; $D=7,5$ kGy

Abb. 21b: Trennergebnis nach Erhöhung der Gesamtdosis auf $D_{\text{summ}} = 5 \cdot 7,5$ kGy = 37,5 kGy

Da Antistatika die Leitfähigkeit der Kunststoffe erhöhen, sollten nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung implantierten Elektronen schneller abfließen. Da wir schon in vorangegangenen Arbeiten ein – im vgl. zum PP – schnelles Abfließen der Ladungen im PE nachgewiesen hatten^[1,2,37], wurde erwartet, dass Antistatika die Tendenz zum erhöhten Ladungsfluss beim PE erhöhen. Daher war auch die Trennung von mit Antistatika gefüllten PE- von ungefüllten PP-Granulaten nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung problemlos möglich (Abb. 22a). Befindet sich das Antistatika im PP bewirkte es dort auch ein schnelles Abfließen von Ladungen, sodass sich mit Antistatika gefüllte PP-Granulate nicht gegen ungefüllte PE-Granulate aufluden und sich daher nicht trennen ließen (Sortiergut fällt als Gemisch in den Auffangbehältern 4 und 5 an, Abb. 22b).

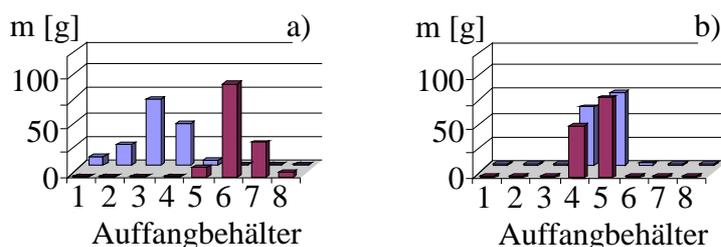


Abb. 22: Einfluss von Antistatika auf die elektrostatische Trennung von Modellgemischen nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und einer Probenlagerung über 48 h

Abb. 22a: Trennergebnis von PE mit 15 % Antistatika (■) und ungefüllten PP (■)

Abb. 22b: Trennergebnis von ungefüllten PE (■) und PP mit 15 % Antistatika (■)

Den größten Einfluss auf das Aufladeverhalten der Polyolefine hatte der Füllstoff Talkum. Bereits 5 % Talkum in PE oder PP bewirkte eine negative Aufladung gegenüber der ungefüllten Komponente. Befindet sich Talkum im PP ist es sowohl ohne als auch mit einer Elektronenstrahlvorbehandlung sehr gut trennbar, da die negative Aufladung des mit Talkum gefüllten PP durch die Elektronenstrahlvorbehandlung erhöht wird. Bei talkumgefüllten PE kann

der ladungssteuernde Einfluss des Talkums bis zu einem Gehalt von 5 % durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung kompensiert werden. Bei mehrfach wiederholter Bestrahlung unter milden Bedingungen wurden gute stoffspezifische Trennungen erreicht (Abb. 23a). Bei Talkumgehalten von > 20 % in PE ist die ladungssteuernde Wirkung des Talkums größer als die Wirkung der Elektronenstrahlvorbehandlung, sodass sich talkumgefülltes PE gegen ungefülltes PP negativ auflädt. Man erhält auch hier eine sehr gute Trennung, die allerdings auf der ladungssteuernden Wirkung des Talkums beruht (Abb. 23b).

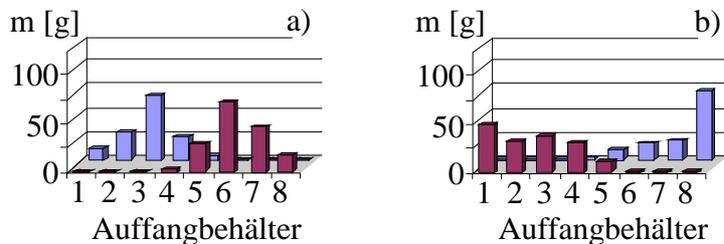


Abb. 23: Einfluss der Elektronenstrahlvorbehandlung auf die elektrostatische Trennung von mit Talkum gefüllten PE-Granulaten nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_s = 0,6 \text{ MeV}$ bei $I = 4,0 \text{ mA}$; $D = 7,5 \text{ kGy}$) und einer Probenlagerung über 48 h.

Abb. 23a: Trennergebnis von PE mit 5 % Talkum (■) und ungefüllten PP (■) nach Erhöhung der Gesamtdosis durch 5-fache Bestrahlung auf $D_{\text{summ}} = 5 \cdot 7,5 \text{ kGy} = 37,5 \text{ kGy}$

Abb. 23b: Trennergebnis von PE mit 20 % Talkum (■) und ungefüllten PP (■)

Zusammenfassend kann man sagen, dass Farbpigmente, Ruß und Kreide keinen Einfluss auf das Auflade- und Trennverhalten von Polyolefinen hatten und nach der Elektronenstrahlvorbehandlung sehr gut und stoffspezifisch getrennt werden konnten. PE und PP mit Flammenschutzmittel Aluminiumhydroxid bzw. Magnesiumhydroxid luden sich positiv gegenüber der ungefüllten Komponente auf, wobei der Einfluss in PE größer war als in PP. Dieser Einfluss konnte durch die Elektronenstrahlvorbehandlung vollständig kompensiert werden, so dass auch hier wieder eine sehr gute stoffspezifische Trennung möglich war. Auch Antistatika in PE störten die guten Trennergebnisse nach der Vorbehandlung nicht. Lediglich bei Antistatika in PP konnte auch nach der Vorbehandlung keine Trennung vom ungefüllten PE erfolgen, da das Antistatika das abfließen der Ladungen im PP bewirkte. Den größten Einfluss auf das Aufladevermögen hatte Talkum. Bereits 5% Talkum bewirkten eine negative Aufladung der talkumgefüllten Komponente gegen das ungefüllte Polyolefin. So war bereits ohne Vorbehandlung eine sehr gute Trennung möglich. Befand sich das Talkum in PP wurde auch nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ein sehr gutes stoffspezifisches Trennergebnis erreicht. Auch talkumgefülltes PE war gut von der reinen Komponente abtrennbar, allerdings ab 20 % Talkum nicht mehr stoffspezifisch. Bei den Untersuchungen mit den Modellpolyolefinen hatte die Luftfeuchte im Freifallscheider keinen signifikanten Einfluß auf das Trennergebnis. Bei der Elektronenstrahlvorbehandlung wurden die besten Ergebnisse erzielt, wenn die Elektronenbestrahlung bei einer relativen Luftfeuchte von 60 % erfolgte.

6.1.6 Trennverhalten von ABS/PS-Granulatgemischen

Voruntersuchungen zur elektrostatischen Trennung von ABS/PS-Gemischen zeigten eine starke Streuung der Ergebnisse infolge der Anwesenheit von Staub und im Gegensatz zu den Polyolefingemischen starke Unterschiede bei unterschiedlichen Luftfeuchten. Durch Waschen und Trocknen der Granulate und das Reinigen der Aufladungseinheit mit deionisiertem Wasser konnte eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt werden. Als Wandmaterial der Aufladeeinheit hatte sich Gold bewährt. Mit gewaschenem und getrocknetem PS und einer

Konditionierung bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 25 % vor der Trennung wurden gute Ergebnisse erreicht^[60]. Tab. 4 zeigt die statistische Analyse zur Auswertung von Versuchen zur Trennung von ABS/PS-Granulatgemischen im Laborfreifallscheider. Die statistischen Größen belegen eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche.

Tab. 4: Statistische Kennwerte für die Elektrosortierung von ABS/PS. Die Ergebnisse basieren auf 17 Wiederholungsversuchen^[60] (s = Streuung)

Kennwerte	Mittelwert	s	Min	Median	Max
B [%]	98,6	1,9	91,5	99,3	99,7
Rc _{,1-3} (ABS) [%]	96,2	3,8	83,1	97,3	98,9
Rc _{,6-8} (PS) [%]	88,2	4,4	77,1	89,9	94,2
c ₁₋₃ (ABS) [%]	98,4	1,9	92,7	99,1	99,4
c ₆₋₈ (PS) [%]	99,5	0,2	99,1	99,5	99,8

Bei der Elektrosortierung von ABS/PS-Gemischen lud sich ABS positiv und PS negativ auf (Abb. 24), was der Stellung der beiden Kunststoffe in der triboelektrischen Reihe nach Brück^[12] entspricht. Erklärbar erscheint das Aufladeverhalten nach dem Lewis-Säure-Base-Modell: Die Nitrilgruppe von ABS wirkt aufgrund ihres freien Elektronenpaares am Stickstoff als Elektronenpaardonator (Lewis-Base). Die durch die funktionelle Gruppe bedingte Tendenz zur Elektronenabgabe führt zu einer positiven Nettoladung.

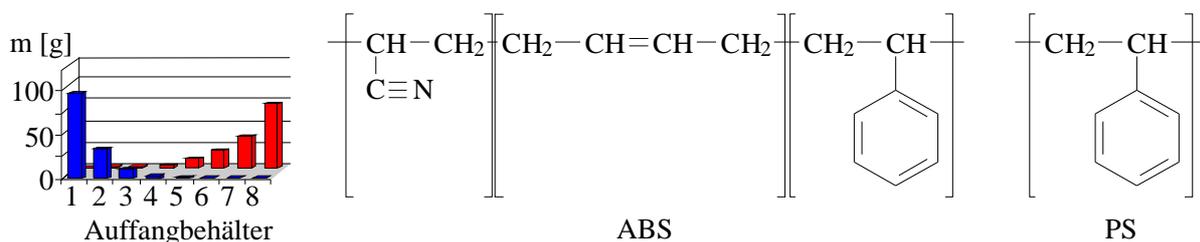


Abb. 24: Elektrostatische Trennung von ABS- (■) und PS- (■) Granulaten im elektrostatischen Freifallscheider. Rechts schematische Strukturformeln von ABS und PS

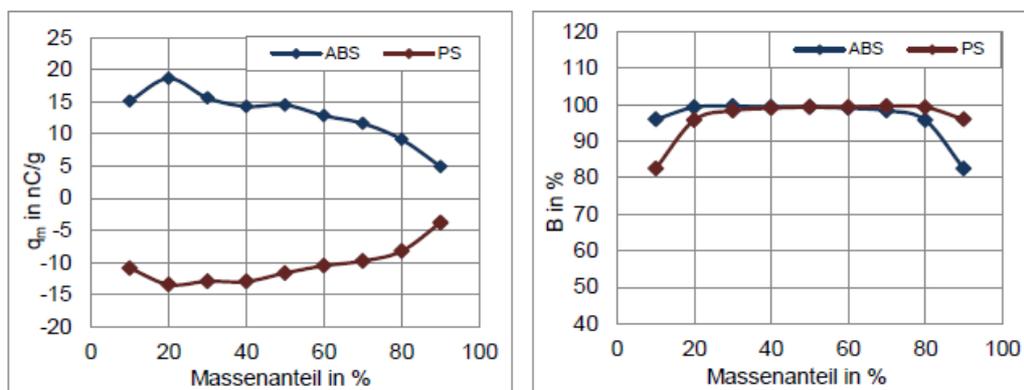


Abb. 25: Beeinflussung der Ladungsverteilung und der Sortierkennzahl B durch variierende Massenanteile von ABS und PS im Gemisch.

⁶⁰ A. Frey: Der Einfluss von Additiven in Kunststoffen aus dem Elektronikschrottbereich auf die Elektrosortierung., Diplomarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2012).

Für die Trennversuche wurden die Mischungsverhältnisse der Granulate zwischen 90 % und 10 % ABS und entsprechend von 10 % bis 90 % PS variiert. Die Ergebnisse in Abb. 25 zeigen hohe Trennerfolge im Bereich von 20 bis 70 % ABS bzw. 80 bis 30 % PS^[60]. Die Sortierkennzahlen lagen durchschnittlich bei 99 % und der Wertstoffgehalt für ABS in den Kästen 1-3 zwischen 97 und 99 %. Der kumulierte Wertstoffgehalt für PS in den Kästen 6 bis 8 wies ebenfalls Werte zwischen 97 und 99 % auf.

6.1.7 Vergleich des Einflusses von Additiven und Füllstoffen in den verschiedenen Kunststoffen

Während sich PE und PP nicht elektrostatisch gegeneinander aufladen und eingebrachte Füllstoffe oder Additive eine Aufladung bewirkten (z.B. bei Talkum), existierten im Stoffsystem ABS/PS schon funktionelle Gruppen – beim ABS fungieren die Nitrilgruppen als potentielle Elektronenpaardonatoren –, die dann mit den eingebrachten Stoffen hinsichtlich des Aufladeverhaltens konkurrieren oder kooperieren können. Eine Vorhersage des Einflusses von Füllstoffen und Additiven auf das Aufladeverhalten von ABS/PS-Granulatgemischen erschien daher schwer möglich.

Der Füllstoff Kreide hatte in PE- und PP-Matrices keinen signifikanten Einfluss auf die elektrostatische Aufladung und Trennung. Bis 20% Kreide war auch in dem System ABS/PS kein Einfluss auf das Aufladeverhalten spürbar. Unabhängig davon, ob sich die Kreide in ABS oder PS befand, ergab sich immer eine gute stoffspezifische Trennung wobei sich ABS positiv und PS negativ aufluden (siehe auch Abb. 26). Erst bei einem Gehalt von 40 % Kreide in PS war keine Trennung mehr möglich, während 40 % Kreide in ABS keinen signifikanten Einfluss auf das Trennverhalten hatte (Abb. 27).

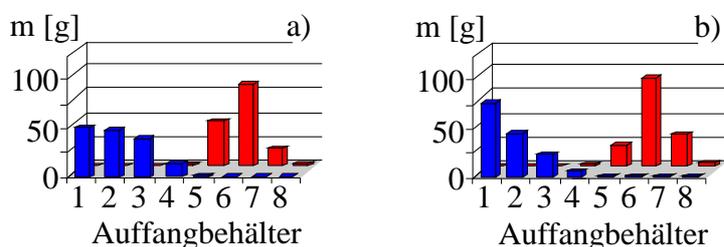


Abb. 26: kein Einfluss von 10% bzw. 20% Kreide in PS auf die elektrostatische Trennung

Abb. 26a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 10 % Kreide (■)

Abb. 26b: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20 % Kreide (■)

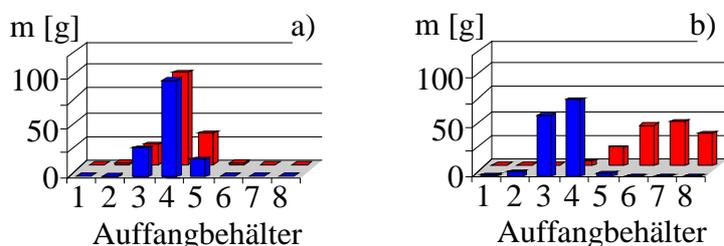


Abb. 27: Einfluss von 40% Kreide auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 27a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 40 % Kreide (■)

Abb. 27b: Trennergebnis von ABS mit 40 % Kreide (■) und ungefüllten PS (■)

Der Füllstoff Talkum verursachte in PE und PP eine negative Aufladung gegenüber der jeweils ungefüllten Komponente. Da sich PS gegen ABS negativ auflud, verstärkt Talkum in PS dieses Verhalten, sodass auch bei einem Gehalt von 40 % Talkum eine sehr gute stoffspezifische Trennung möglich war (Abb. 28a). Befindet sich das Talkum im ABS so reichen 5 % Talkum aus, um eine sortenreine Trennung zu verhindern (Abb. 28b). Erklärbar wird dies dadurch, dass die Nitrilgruppen des ABS, die eine positive Aufladung bewirken, in Konkurrenz zu den Feldern der negativ geladenen Talkumpartikel treten und es so zu einem weitgehenden Ausgleich der Bruttoladung auf der Granulatoberfläche kommt.

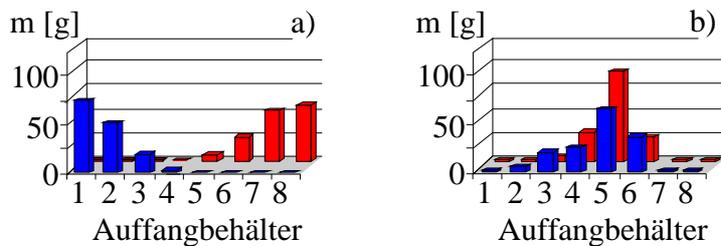


Abb. 28: Einfluss von Talkum auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 28a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 40 % Talkum (■)

Abb. 28b: Trennergebnis von ABS mit 5 % Talkum (■) und ungefüllten PS (■)

Ein ähnliches Verhalten zeigten typische Flammenschutzmittel (bromierte Kohlenwasserstoffe) in PS und ABS. Für die Trennversuche wurden jeweils 20 % Saytex CP-2000 (Tetrabrombisphenol) bzw. 12 % Saytex 8010 (Decabromdiphenylethan) in ABS und PS eingearbeitet. Bekannt war, dass Halogenide eine intrinsische negative Aufladung bewirken und so kooperativ die negative Aufladung von flammenschutzmittelgefüllten PS verstärken sollten. Die gute stoffspezifische Trennung bestätigte dies (Abb. 29).

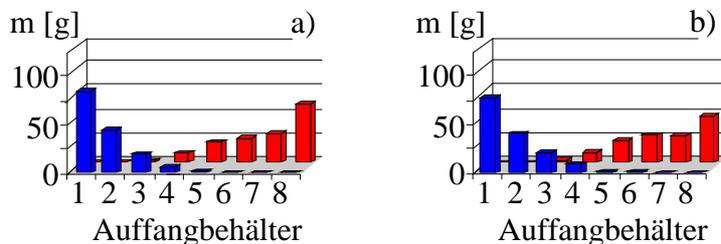


Abb. 29: Einfluss von bromierten Flammenschutzmitteln in PS auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 29a: Ergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 12% Decabromodiphenylethan (■)

Abb. 29b: Ergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20% Tetrabromobisphenol (■)

Wenn sich die Flammenschutzmittel im ABS befinden, konkurrieren die Elektronendonatoreigenschaften, die durch die Nitrilgruppen verursacht werden und die zu einer bevorzugten positiven Aufladung des ABS führen sollten, mit negativen Aufladeigenschaften, die durch die Flammenschutzmittel hervorgerufen werden. Die Konkurrenzsituation unterband im Kontakt mit ungefüllten PS-Granulaten eine stoffspezifische Aufladung der Granulatgemische und verhindert so eine erfolgreiche stoffliche Trennung (Abb. 30). Man erkennt den amphoteren Charakter auch daran, dass sich die Granulate einer Spezies sowohl positiv als auch negativ aufluden und in alle Kästen verteilen.

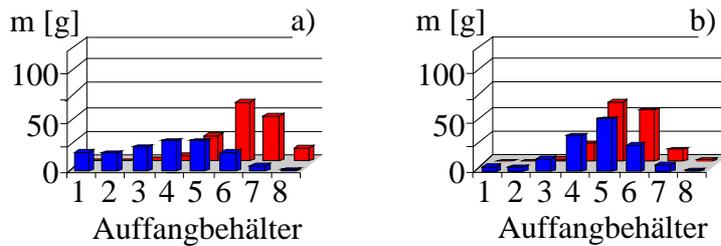


Abb. 30: Einfluss von bromierten Flammschutzmitteln in ABS auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 30a: Ergebnis von ABS mit 12% Decabromodiphenylethan (■) und ungefüllten PS (■)

Abb. 30b: Ergebnis von ABS mit 20% Tetrabromobisphenol (■) und ungefüllten PS (■)

In ABS und PS wurden auch 15 % des Antistatikum Irgastat eingearbeitet. Da Antistatika das Abfließen von Ladungen bewirken sollen, erwartet man, dass sich die Trennung von ABS und PS durch das Irgastat verschlechterte. Erstaunlich war, dass sich in beiden Fällen – ob sich Irgastat im ABS oder im PS befand – zu einer Umkehrung der Polaritäten kam. Es ergaben sich zwar Trennungen, die aber nicht als kunststoffspezifisch anzusehen sind. Das ABS wurde gegen das mit Irgastat gefüllte PS deutlich negativ aufgeladen (Abb. 31a). Unverständlich erscheint, dass sich das ABS mit Irgastat gegen das reine PS leicht negativ auflud (Abb. 31b), obwohl aus den Versuchen mit Irgastat-gefüllten Polyolefinen eine positive Beeinflussung der Aufladung durch das Irgastat nachgewiesen wurde.

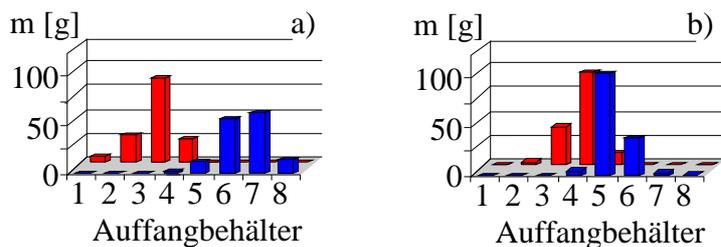


Abb. 31: Einfluss von Antistatika auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 31a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 15 % Irgastat (■)

Abb. 31b: Trennergebnis von ABS mit 15 % Irgastat (■) und ungefüllten PS (■)

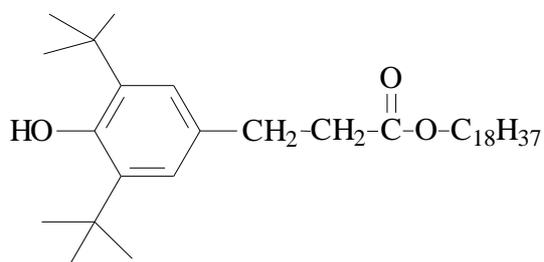


Abb. 32: Strukturformel des UV-Stabilisators Irganox 1076

Da im Allgemeinen in PS und ABS auch UV-Stabilisatoren in geringen Gehalten eingearbeitet werden, wurde der Einfluss von 0,5 % Irganox 1076 (Abb. 32) auf das Aufladeverhalten von ABS und PS untersucht. Die geringe Konzentration ließ keinen signifikanten Einfluss auf das Aufladeverhalten vermuten. Befand sich der UV-Stabilisator im PS, blieb das Aufladeverhalten tatsächlich unverändert (Abb. 33a). In ABS eingebracht bewirkte Irganox 1076 allerdings eine Umkehrung der Polaritäten bei der elektrostatischen Aufladung gegen ungefülltes PS (Abb. 33b).

Die nachgewiesenen Einflüsse der Additive und Füllstoffe im System ABS/PS auf das Aufladeverhalten und auf die Trennerfolge sind wegen den teilweise um die Bruttoladung eines Granularteilchens konkurrierenden Ladungsbildungsmechanismen von Füllstoffen bzw. der Polymermatrizes wesentlich deutlicher ausgeprägt als bei den entsprechenden Polyolefinsystemen. Aus diesem Grunde erschien es notwendig, Vorbehandlungsmethoden zu finden, die die intrinsischen Einflüsse der Füllstoffe bzw. Additive auf das Aufladeverhalten gefüllter Kunststoffe minimieren bzw. kompensieren.

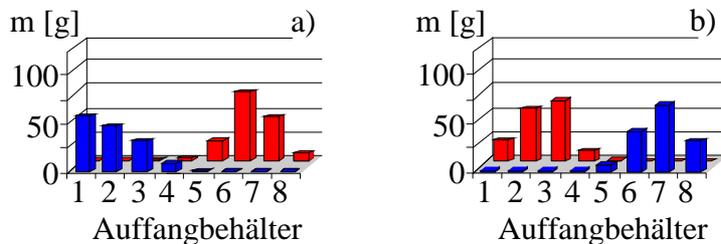


Abb. 33: Einfluss von Irganox 1076 (UV-Stabilisator) auf die elektrostatische Trennung von PS/ABS-Gemischen

Abb. 33a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 0,5 % Irganox 1076 (■)

Abb. 33b: Trennergebnis von ABS mit 0,5 % Irganox 1076 (■) und ungefüllten PS (■)

6.1.8 Vergleich des Trennverhaltens von bestrahlten und unbestrahlten ABS/PS-Granulatgemischen mit Additiven oder Füllstoffen

Für die Trennung von Polyolefingemischen erwies sich eine Vorbehandlung von PE/PP-Gemischen durch Elektronenbestrahlung erfolgreich^[37]. Das unterschiedliche Abklingverhalten der in die PE- bzw. PP-Granulate implantierten Elektronen und erzeugten Radikationen führte nach einer Lagerung von mindestens 24 h zur stofflichen Separation im elektrischen Feld des Freifallscheiders. Eine Erklärung dafür könnten die kristallinen Bereiche im PP sein.

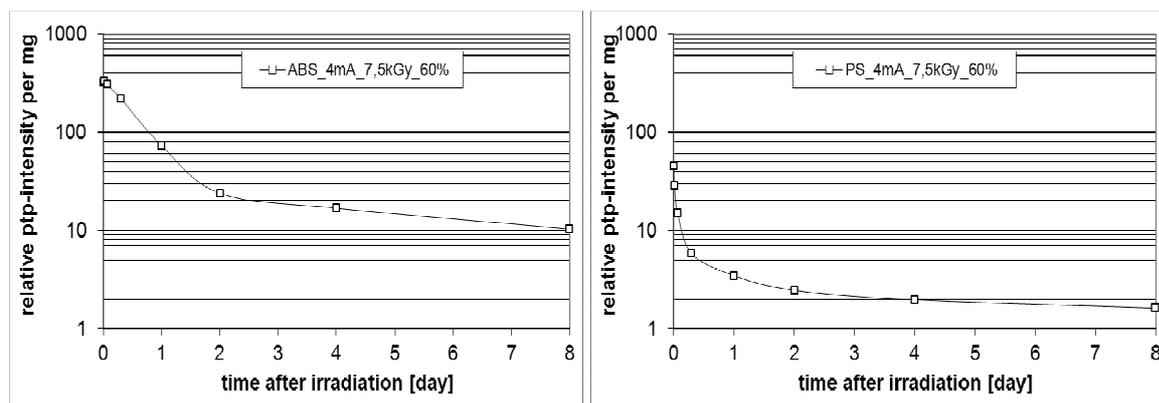


Abb. 34: Der zeitliche Verlauf des Abflusses von eingebrachten Elektronen und Radikationen in ABS (a) und in PS (b) über 8 Tage nach der Elektronenbestrahlung anhand von ESR-Messungen

Allerdings ist bekannt, dass es sich bei PS und ABS um amorphe Polymere handelt, was auch durch eigene Kristallinitätsuntersuchungen bestätigt werden konnte. Dennoch konnten mittels ESR-Spektroskopie über mehrere Tage Unterschiede im zeitlichen Abklingverhalten von elektronenbestrahlten ABS- und PS-Granulaten festgestellt werden. Wie aus Abb. 34 ersichtlich waren im PS bereits nach 8 h nur noch sehr geringe Intensitäten an implantierten Elektronen und Radikationen messbar, während im ABS auch noch nach mehrtägiger Lagerung La-

dungsträger nachweisbar waren. Es erschien daher sinnvoll, elektrostatische Separationen von elektronenbestrahlten ABS/PS-Gemischen 48 h nach ihrer Bestrahlung durchzuführen.

Beim ABS war der Aufladungseffekt der durch eine Elektronenbestrahlung implantierten Elektronen und erzeugten Radikationen wesentlich größer als die durch die Nitrilgruppen bedingte Tendenz zur Elektronenabgabe, sodass sich ABS nach einer Elektronenbestrahlung unter milden Bedingungen ($E_S = 0,6 \text{ MeV}$ bei $I = 4,0 \text{ mA}$; $D = 7,5 \text{ kGy}$) gegenüber PS negativ auflud (Abb. 35b; Abb. 35a zeigt vergleichend das Auflade- und Trennverhalten des Systems ABS/PS ohne Elektronenbestrahlung).

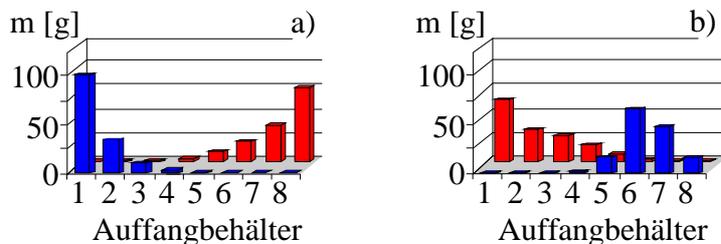


Abb. 35a: Elektrostatische Trennung von ungefüllten ABS- (■) und PS- (■) Granulaten ohne Vorbehandlung

Abb. 35b: Trennergebnis des gleichen Gemischs nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6 \text{ MeV}$ bei $I = 4,0 \text{ mA}$; $D = 7,5 \text{ kGy}$) und einer Probenlagerung über 48 h

Interessant erschien nun, ob der Ladungseffekt, der durch die Elektronenbestrahlung hervorgerufen wird, in der Lage ist, den intrinsischen Ladungseinfluss der eingearbeiteten Additive bzw. Füllstoffe überzukompensieren.

Befand sich der UV-Stabilisator Irganox 1076 in ABS oder PS, wurde das polymerspezifische Trennverhalten durch die Bestrahlung nicht beeinflusst. In beiden Fällen lud sich das ABS (ohne oder mit Stabilisator) nach der Bestrahlung gegenüber dem PS negativ auf (Abb. 36).

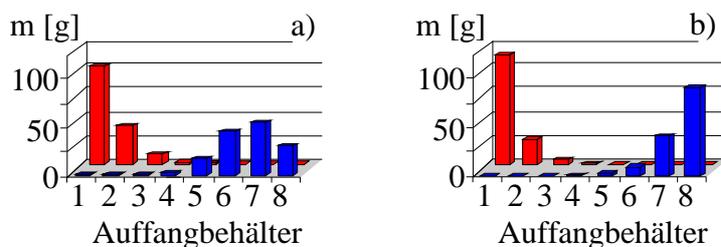


Abb. 36: Kompensation des Einflusses des UV-Stabilisators auf die elektrostatische Trennung durch die Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6 \text{ MeV}$ bei $I = 4,0 \text{ mA}$; $D = 7,5 \text{ kGy}$)

Abb. 36a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 0,5 % Irganox 1076 (■)

Abb. 36b: Trennergebnis von ABS mit 0,5 % Irganox 1076 (■) und ungefüllten PS (■)

Antistatika führten in ABS oder PS ohne Vorbehandlung zur Umkehrung der Polarität (vgl. Abb. 31). Nach einer Elektronenstrahlbehandlung war dagegen eine polymerspezifische Trennung möglich. Abb. 37 zeigt, dass sich unabhängig von dem Füllen mit Antistatika ABS gegen PS nach einer Elektronenbestrahlung negativ auflud.

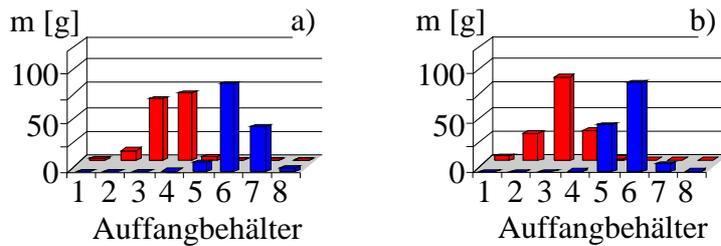


Abb. 37: Kompensation des Einflusses von Antistatika auf die elektrostatische Trennung durch die Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6 \text{ MeV}$ bei $I = 4,0 \text{ mA}$; $D = 7,5 \text{ kGy}$)

Abb. 37a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 15 % Antistatikum (■)

Abb. 37b: Trennergebnis von ABS mit 15 % Antistatikum (■) und ungefüllten PS (■)

Bromierte Flammschutzmittel führen durch ihre Elektronenpaarakzeptoreigenschaften zur negativen Aufladung von neutralen Komponenten. Da sich ungefülltes PS gegen ungefülltes ABS ebenfalls negativ auflud, erschien es interessant, ob eine Elektronenbestrahlung ausreicht, den Einfluss der bromierten Flammschutzmittel ausreichend zu kompensieren. Abb. 39 zeigt, dass der Effekt der Elektronenbestrahlung den ladungsbestimmenden Einfluss des Broms überkompensierte, sodass ABS – wie bei den Versuchen mit ungefüllten Kunststoffgranulatgemischen, die bestrahlt wurden – negativ aufgeladen wurde. Die Flammschutzmittel Decabromodiphenylethan und Tetrabromobisphenol hatten – in ABS eingebracht – ohne Elektronenbestrahlung zu einem ladungsneutralen Verhalten geführt, wodurch keine Abtrennung vom PS möglich war (Abb. 30). Durch die Elektronenstrahlvorbehandlung konnte durch die vorrangig negative Aufladung des ABS gegenüber einer positiven Aufladung des PS eine polymerspezifische Trennung erreicht werden (Abb. 38).

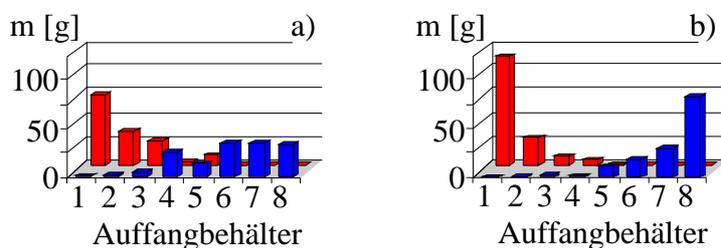


Abb. 38: Kompensation des Einflusses von Flammschutzmitteln auf die elektrostatische Trennung durch die Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S=0,6 \text{ MeV}$ bei $I=4,0 \text{ mA}$; $D=7,5 \text{ kGy}$)

Abb. 38a: Ergebnis von ABS mit 12% Decabromodiphenylethan (■) und ungefüllten PS (■)

Abb. 38b: Ergebnis von ABS mit 20% Tetrabromobisphenol (■) und ungefüllten PS (■)

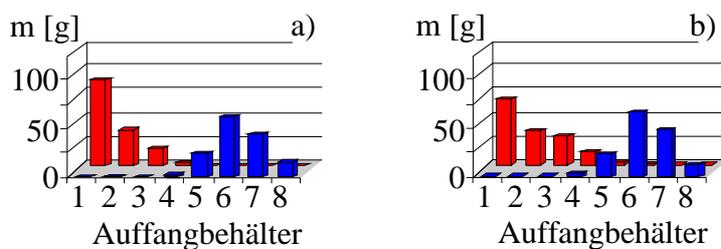


Abb. 39: Kompensation des Einflusses von Flammschutzmitteln auf die elektrostatische Trennung durch die Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S=0,6 \text{ MeV}$ bei $I=4,0 \text{ mA}$; $D=7,5 \text{ kGy}$)

Abb. 39a: Ergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 12% Decabromodiphenylethan (■)

Abb. 39b: Ergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20% Tetrabromobisphenol (■)

Bei Kreide war erst ab einem Massenanteil von 40 % Kreide im PS ein Einfluss des Füllstoffs bemerkbar. So konnte PS mit 40% Kreide nicht mehr gegen reines ABS aufgeladen werden (Abb. 27a). Durch eine Elektronenbestrahlung war es möglich, auch den Einfluss von 40 % Kreide vollständig zu kompensieren, sodass eine polymerspezifische Trennung der Gemische möglich war (Abb. 40). Unabhängig davon, ob Kreide in ABS oder PS enthalten war, lud sich ABS negativ gegen PS auf.

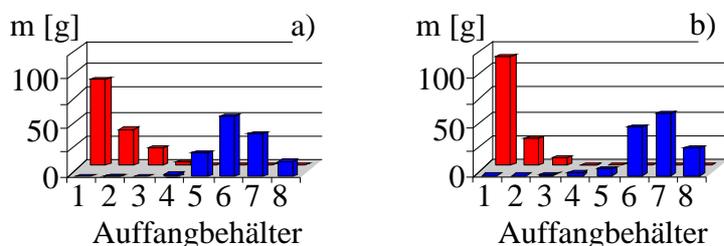


Abb. 40: Kompensation des Einflusses von Kreide auf die elektrostatische Trennung durch die Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S=0,6$ MeV bei $I=4,0$ mA; $D=7,5$ kGy)

Abb. 40a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 40 % Kreide (■)

Abb. 40b: Trennergebnis von ABS mit 40 % Kreide (■) und ungefüllten PS (■)

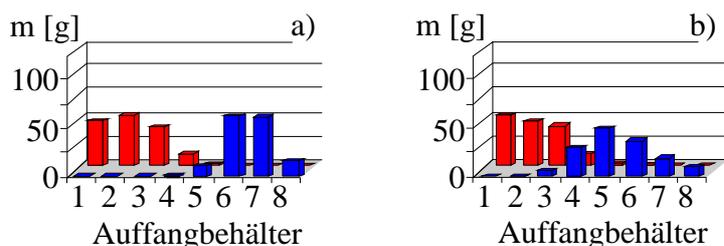


Abb. 41: Elektrostatische Trennung von PS/ABS nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und einer Probenlagerung über 48 h

Abb. 41a: Trennergebnis von ABS mit 40 % Talkum (■) und ungefüllten PS (■)

Abb. 41b: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 5 % Talkum (■)

Wie schon aus den Ergebnissen des Modellsystems PE/PP bekannt, hatte Talkum den größten Einfluss auf das Aufladeverhalten. Auch für die ABS/PS-Gemische konnte dieser ladungsdominierende Einfluss des Talkums bestätigt werden. In PE/PP-Gemischen reichten 5 % Talkum, um die talkumgefüllte Komponente negativ gegen die ungefüllte Komponente aufzuladen (Abb. 15). Auch bei ABS, das mit 5 % Talkum gefüllt vorlag, wurde die gegenüber PS bevorzugt positive Aufladung des ABS aufgehoben, sodass keine Trennung der Gemische möglich war (Abb. 28b). Da sich das ABS nach der Elektronenstrahlvorbehandlung negativ gegen PS auflud, beeinflusste ein Füllen bis 40 % Talkum das Trennergebnis nicht (Abb. 41a). Befand sich allerdings Talkum im PS, war eine Trennung vom ABS ohne Vorbehandlung möglich (Abb. 28a). Die Elektronenstrahlvorbehandlung kompensierte bei PS mit Talkumgehalten um 5 % zwar noch den Einfluss des Talkums auf das Aufladeverhalten (Abb. 41b); bei höheren Füllgraden bestimmten die mit dem Talkum in das PS eingebrachten Ladungen die Bruttoladung der PS-Granulatteilchen. Gemische aus ABS und hochgefüllten PS konnten nach einer Elektronenbestrahlung zwar in guter Qualität getrennt werden, nur lud sich die ABS-Komponente stets positiv gegenüber dem talkumgefüllten PS auf (Abb. 42).

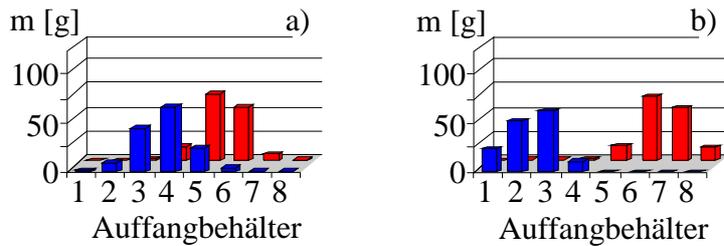


Abb. 42: Elektrostatische Trennung von ABS- (■) und PS- (■) Granulaten nach einer Elektronenstrahlvorbehandlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) und einer Probenlagerung über 48 h

Abb. 42a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20 % Talkum (■)

Abb. 42b: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 40 % Talkum (■)

6.1.9 Untersuchungen zur Stabilität inkorporierter Ladungen

Die additivierten und gefüllten ABS- und PS-Granulate wurden unter den gleichen Bedingungen wie die Polyolefingranulate ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) im *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.* bestrahlt. Das Dissipieren von dabei implantierten Elektronen und Radikationen wurde mit Hilfe von ESR-Messungen über einen Zeitraum von einer Woche verfolgt. Wie bei den Polyolefinen beobachtet, verzögerten die eingebrachten Zusatzstoffe auch bei den ABS- und PS-Granulaten das Abfließen von Ladungen. Der Zusatzstoffbedingte Verzögerungseffekt war beim PP geringfügig, beim PE aber deutlich ausgeprägt (Abb. 17). Im System ABS/PS war der Verzögerungseffekt beim PS wesentlich stärker als beim ABS ausgeprägt (Abb. 43), wobei Kreide – wie schon beim PE – zu den größten Verzögerungseffekten führte (Abb. 43, blaue Kurve).

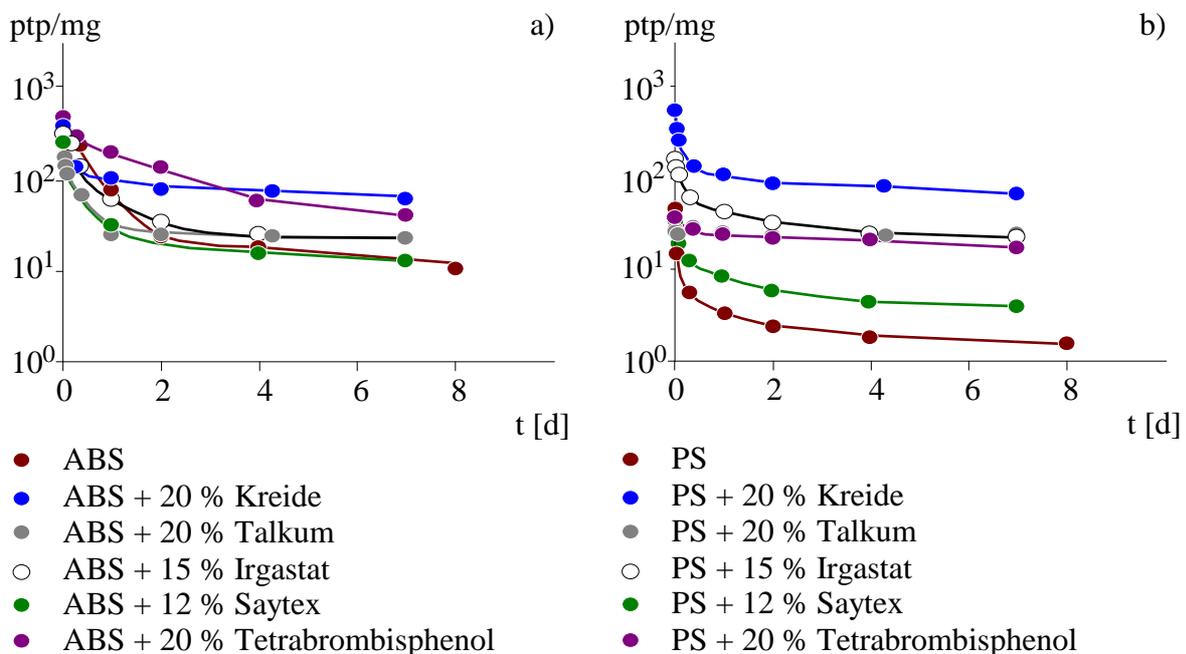


Abb. 43: Der zeitliche Verlauf ($t =$ Lagerzeit nach der Bestrahlung) des Dissipierens von Elektronen und Radikationen, die durch eine Elektronenbestrahlung ($E_S = 0,6$ MeV bei $I = 4,0$ mA; $D = 7,5$ kGy) in unterschiedlich modifizierte ABS-Granulate (a) bzw. PS-Granulate (b) eingebracht wurden. Die Bestimmung der relativen Intensität ($ptp =$ Peak-to-peak-Differenz der ersten Ableitung im ESR-Signal) erfolgte mittels ESR-Spektroskopie

Trotzdem waren die Granulatgemische ABS/PS auch bei Kreidgehalten bis 40 % nach der Elektronenstrahlvorbehandlung polymerspezifisch trennbar. Dabei wurde reines ABS negativ gegen kreidgefülltes PS aufgeladen (Abb. 40a). Die elektrostatische Aufladbarkeit nach der Elektronenbestrahlung korrelierte damit nicht mit den ESR-Abklingkurven der gefüllten und additivierten Kunststoffproben. Die Elektronenstrahlvorbehandlung wirkte sich offensichtlich in komplexer Weise auf das stoffspezifische Aufladeverhalten der Kunststoffe aus. Trotzdem konnten alle ABS/PS-Gemische mit UV-Stabilisator, Flammenschutzmittel, Antistatika und Kreide nach der Behandlung stoffspezifisch getrennt werden. Allerdings war es unmöglich, beim PS den ladungsbestimmenden Einfluss von Talkum durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung zu kompensieren, wenn der Anteil des Talkums 20 % überschritt.

6.1.10 Untersuchungen zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Wie bereits im Abschnitt 6.1.6. beschrieben, wurden reproduzierbare Trennergebnisse mit gewaschenem und getrocknetem PS erreicht, das bei einer relativen Luftfeuchte von 25 % vor der elektrostatischen Aufladung konditioniert wurde. Höhere Luftfeuchten führten beim Trennen von ABS/PS-Gemischen zu schlechteren Ergebnissen. In früheren Arbeiten konnten weder in den Wasserdampfadsorptionskurven von reinem PS^[13,44] noch in Ellipsometrieuntersuchungen zu Quellschichten^[13] Hinweise von Wasseranlagerungen an PS-Oberflächen nachgewiesen werden. Es wurde kein Unterschied zwischen dem Wasseraufnahmevermögen von PS und dem der Polyolefine gefunden. Wie aus der Abb. 44 ersichtlich, nahm PS im Vergleich zu anderen Polymeren nur sehr wenig Wasser auf und zeigte auch keine Quellung, das durch eine ausgeprägte Hysterese zwischen Adsorptions- und Desorptionskurve gekennzeichnet wäre.

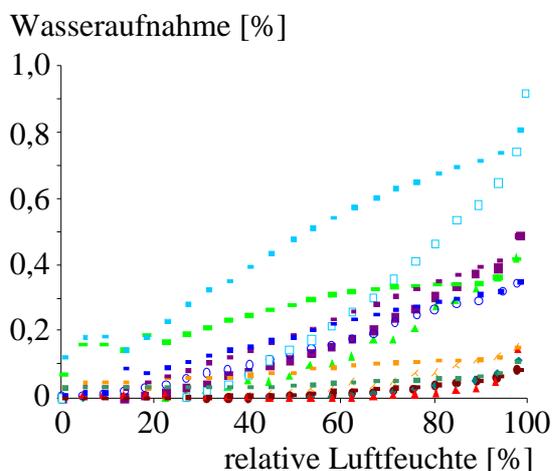


Abb. 44: Wasserdampfadsorption- und Wasserdampfdesorptionsisothermen unterschiedlicher Polymere (▲ PA12 = Polyamid-12; ✕ PET = Poly(ethylenterephthalat); ■ POM = Polyoxymethylen; ● PS = Polystyren; ◆ PVC = Poly(vinylchlorid); ○ PC = Polycarbonat, ▲ PMP = Poly(methylpentan); □ PMMA = Poly(methylmethacrylat)). Die Messungen erfolgten mit einem Sorptionsanalysator IGA-002 (Hiden, Warrington, Großbritannien)

In Abschnitt 6.1.3 wurde der Einfluss von Additiven und Füllstoffen in Polyolefinen auf das Wasseraufnahmevermögen beschrieben. Eine signifikante Erhöhung des Wasseraufnahmevermögens gab es allerdings nur bei 15 % Antistatika bzw. bei 65% Magnifin, das in PE eingearbeitet wurde (Abb. 6). Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 25 % auf 50 % während der Konditionierung in der Aufladeeinheit des Freifallscheiders ergab bei den Polyolefinen

allerdings keine signifikanten Trennunterschiede, auch wenn 15 % Antistatika im PE eingearbeitet war (Abb. 11 b und c).

Der Einfluss der Luftfeuchte scheint zwar bei Polyolefinen unbedeutend zu sein, besitzt aber bei der elektrostatischen Trennung von ABS/PS-Mischungen eine gewisse Rolle. Herr Dr. Köhnlechner (Hamos GmbH, Penzberg) bestätigte, dass es in seiner Anlage starke Probleme mit Kunststoffabfallgemischen gab, die PS enthielten. Passable Trennungen waren dort nur mit frisch getrockneten Proben möglich.

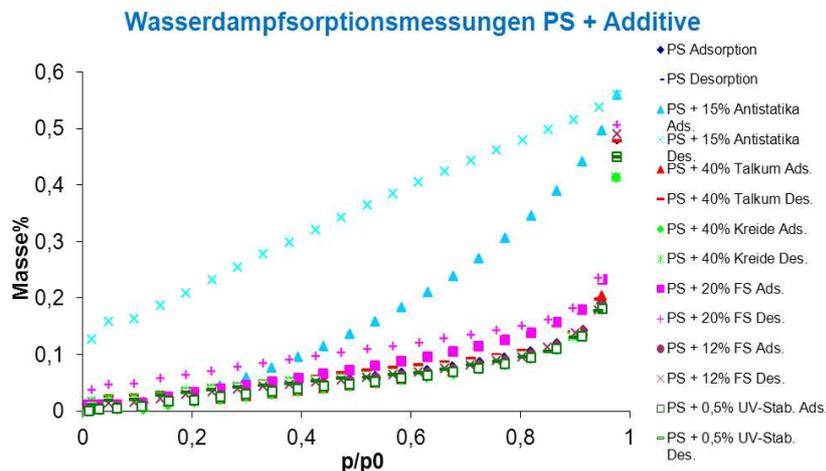


Abb. 45: Wasserdampfadsorptions- (Ads.) und Wasserdampfdesorptionsisothermen (Des.) unterschiedlich gefüllter bzw. additiverter Polystyrene (PS). Die Messungen erfolgten mit einem Sorptionsanalysator IGA-002 (Hiden, Warrington, Großbritannien)

Da die in der Praxis anfallenden Kunststoffabfälle in der Regel additiviert und/oder gefüllt sind, erscheinen die Wasserdampfadsorptions- und Wasserdampfdesorptionsmessungen für additivierte bzw. gefüllte PS-Typen besonders interessant. Abb. 45 zeigt, dass PS mit 15 % Antistatika wesentlich mehr Wasser aufnahm als das ungefüllte PS. Auch ist eine deutliche Hysterese zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme erkennbar. Einmal eingelagertes Wasser (bei höherer Luftfeuchte) wird bei sinkender Luftfeuchte nicht reversibel abgegeben. Es ist anzunehmen, dass über längere Zeit gelagertes PS mit Antistatika eingelagertes Wasser enthält und die übliche Luftkonditionierung in der Aufladeeinheit des Freifallscheiders nicht ausreichend ist, das Wasser abzugeben. Auf diese Weise erklärt sich auch die gute Reproduzierbarkeit bei der Trennung von frisch gewaschenen und getrockneten Proben. Nach dieser Erkenntnis wurden nochmals Trennversuche von ABS/PS-Gemischen mit verschiedenen Inhaltsstoffen durchgeführt, wobei frisch getrocknete PS-Proben verwendet wurden und die Luftfeuchte in der Konditionierungseinheit auf den geringsten Wert eingestellt wurde.

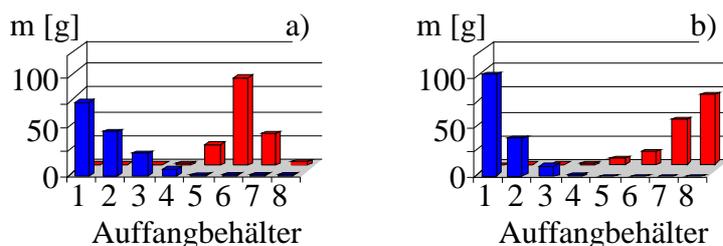


Abb. 46: Elektrostatische Trennung von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20 % Kreide (■)
 Abb. 46a: unter Standardbedingungen bei einer relativen Luftfeuchte von 25 % bei 25 °C
 Abb. 46b: frischgetrocknet bei einer relativen Luftfeuchte von 5 % bei 30 °C

Abb. 46 zeigt, dass die polymerspezifische Trennung durch diese einfache Maßnahme verbessert werden konnte. Der Einfluss von Antistatika in PS oder von UV-Stabilisator in ABS führt auch bei extrem trockenen Proben zu einer Umkehrung der Polaritäten (Abb. 47- Vgl. Abb. 31 a und 33 b). Extreme Trockenheit kann den Einfluss nicht kompensieren, das war nur durch die Elektronenstrahlvorbehandlung möglich.

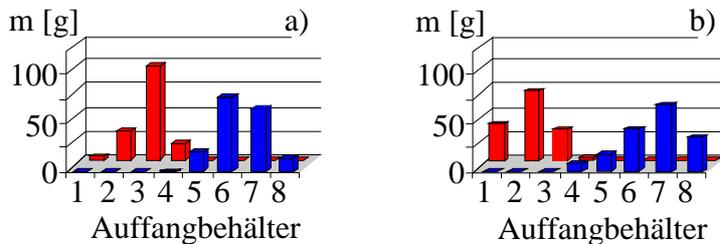


Abb. 47: Elektrostatische Trennung von frisch getrockneten ABS- (■) und PS- (■) Granulaten (relative Luftfeuchte 10 % bei 30 °C)

Abb. 47a: Trennergebnis von ungefüllten ABS (■) und PS mit 15 % Antistatika (■)

Abb. 47b: Trennergebnis von ABS mit 0,5 % UV-Stabilisator (■) und ungefüllten PS (■)

6.2 Entwicklung einer kontinuierlichen Anlage zur Elektrosortierung

Die kontinuierliche Anlage zur Elektrosortierung von Kunststoffen wurde im *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik* der *Technischen Bergakademie Freiberg* entwickelt, konstruiert und gebaut.

6.2.1 Gesamtanlage

Die Versuchsanlage, die in Abb. 48 zu sehen ist, besteht aus einem Trichter mit Schnecken-dosierer (1), der Zellenradschleuse (2), der Aufladungseinheit (3), der Luftaufbereitung, dem Freifallscheider (4), einem in drei Segmente eingeteiltem Transportband (5) und drei Auffangkästen. Die Kunststoffmischung wird in einen Trichter mit Schneckendosierer eingefüllt und in eine Zellradschleuse gefördert, die das Material in die Aufladungseinheit weiter transportiert. Die Zellradschleuse soll verhindern, dass das Material mit der Luft aus der Aufladungseinheit zurück strömt. Die letzte Kammer der Aufladungseinheit ist am Boden mit einem ein Zentimeter breiten, schlitzförmigen Ausgang versehen, von dem aus das Material senkrecht in einen Freifallscheider fällt. Entsprechend ihrer Aufladung werden die Kunststoffgranulatteilchen von den Hochspannungselektroden abgelenkt. Im Idealfall werden die negativ geladenen Partikel zur positiven Elektrode gelenkt und die positiv geladenen zur negativen Elektrode. Im Realfall ist die Trennung nicht so scharf, sodass in der Mitte ein Mischprodukt anfällt, das zum Aufgabetrichter zurückgeführt werden kann. Unter dem Scheider befindet sich ein Transportband, das durch verstellbare Trennwände in drei Segmente eingeteilt ist und damit den kontinuierlichen Abtransport der Trennprodukte in die Auffangkästen realisiert.

Die Luftaufbereitung erfolgt im Nebenraum mit einem Seitenkanalgebläse und einem im Rahmen des Projektes beschafften Adsorbtionstrockner.

Kernstück der Anlage ist die kontinuierliche Aufladungseinheit zur triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen mit der zugehörigen Lufttechnik, die im Rahmen des Projekts entwickelt, konzipiert und gebaut wurde. Es erfolgte ein Neuaufbau der Gesamtanlage, wobei für die Trennung ein vorhandener Elektroscheider und ein Transportband der Fa. Steinert verwendet wurden.

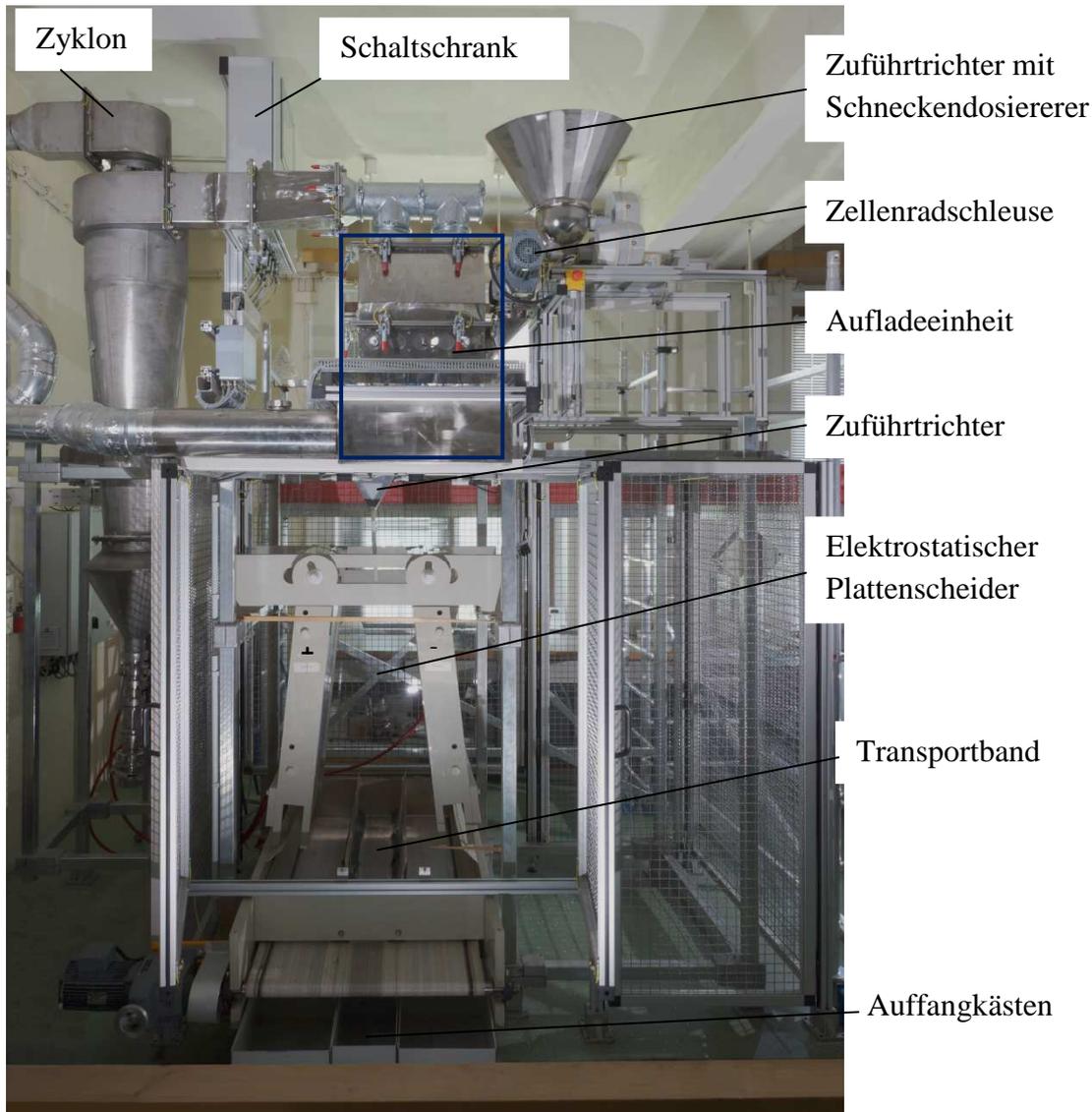


Abb.48: Kontinuierliche Versuchsanlage

6.2.2 Konzeption und Bau der kontinuierlichen Aufladeinheit

Eine kontinuierliche Prozessführung der Elektrosortierung setzt eine kontinuierlich arbeitende Aufladeinheit voraus. Ein Entwurf dieser Aufladeinheit ist in Abb. 49 ersichtlich.

Die bisher genutzten Aufladeinheiten, wie Wirbelschichtapparaturen und Schwingtöpfe, arbeiten diskontinuierlich: Ein aufgegebenes Granulatgemisch wird über eine festgelegte Zeit (z.B. 4 min) tribomechanisch beansprucht und dann in das elektrostatische Feld des Freifallscheiders überführt. Vorversuche haben gezeigt, dass die Aufladezeit der Granulatgemische, d.h. die Zeit der tribomechanischen Beanspruchung der Teilchen, nicht beliebig kurz gewählt werden kann^[2,15]. Aufladezeiten zwischen 3 und 5 min erscheinen für viele Kunststoffgranulatgemische optimal^[15].

Für die kontinuierliche Prozessführung wurde das bewährte Prinzip der tribomechanischen Aufladung in der Wirbelschicht beibehalten. Die Aufladeinheit wurde als kontinuierliche Wirbelschicht ausgelegt, in der die Granulate vom Aufgabeort bis zum Eintritt in das elektrostatische Feld des Freifallscheiders einen bestimmten Weg zurücklegen müssen und damit einer angemessenen mittleren Verweilzeit unterliegen. Es wird der fünffache Durchsatz der

diskontinuierlichen Anlage angestrebt (300 g bei 4 min Aufladedauer), das entspricht 10,8 kg/h. Die Aufladeeinheit der diskontinuierlichen Anlage besteht aus einem Zylinder, der sich nach oben zu einem quaderförmigen Trichter erweitert. Bei der kontinuierlichen Anlage wurde die Grundform beibehalten, jedoch der zylindrische Teil durch Hintereinanderschalten von fünf Kammern in einen Quader umgewandelt. Damit ergibt sich eine Anströmfläche von 864 cm², für eine mittlere Wirbelgeschwindigkeit von 5,5 m/s wird ein Luftdurchsatz von 1710 m³/h benötigt.

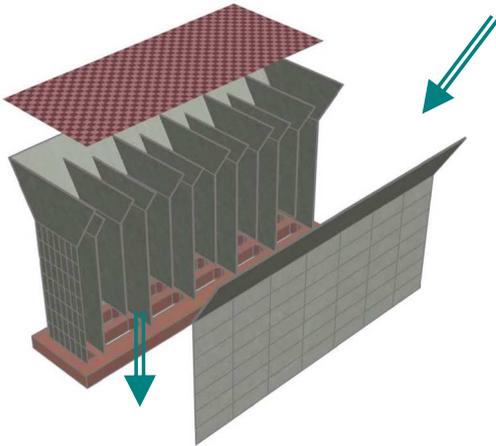


Abb. 49: Entwurf der kontinuierlichen Aufladeeinheit

Der Transport der Granulate erfolgt durch strömende Luft mit verändertem Druckverlust. Zusätzlich eingeleitete Luftströme über einen Anströmboden sorgen für eine Verwirbelung, sodass Partikel/Partikel-Kontakte zur Aufladung der Granulate über die vorgesehene Länge führen. Der Querschnitt der Prozesskammer wird nach oben deutlich aufgeweitet. Dadurch sinkt die Anströmgeschwindigkeit in der Prozesskammer (in den einzelnen Segmenten) stark ab. Auf diese Weise soll eine gerichtete Wirbelbewegung erzeugt werden. Die Einteilung in verschiedene Segmente kann zu einer intensiveren Verwirbelung der Granulate und zu einer Erhöhung ihrer mittleren Verweilzeit beitragen.

Entsprechend dieser Konzeption wurde die im Folgenden beschriebene Aufladeeinheit gebaut. Sie stellt den Prozessraum dar, in dem die Aufladung und der Transport der Partikel in einer kontinuierlichen Wirbelschicht erfolgen. Sie besteht aus fünf Kammern, welche durch Bleche getrennt sind und jeweils einzeln durch die darunter liegenden Anströmkammern (AK1-5) mit Luft durchströmt werden. Die Menge an zugeführter Luft kann durch Irisblenden, die den Querschnitt gleichmäßig verengen, für jede Kammer gesondert eingestellt werden.

Der Weg des Luftstroms und der Materialfluss durch die einzelnen Anlagekomponenten sind in Abb. 50 zu sehen. Der Luftstrom wird im Kreislauf gefahren. Durch ein Gebläse wird ein Unterdruck erzeugt, Luft aus der Umgebung über den Adsorptionstrockner angesaugt und über den Hauptanströmkasten der Aufladeeinheit zugeführt. Der Prozessraum wird oberhalb und unterhalb von Lochblechen begrenzt, die als An- bzw. Abströmboden bezeichnet werden und dazu dienen, das Material im Prozessraum zu halten. Der Querschnitt des Prozessraumes ist nach oben erweitert. Dadurch sinkt die Luftgeschwindigkeit, wodurch die fluidisierten Teilchen absinken und zurück in die Wirbelschicht fallen.

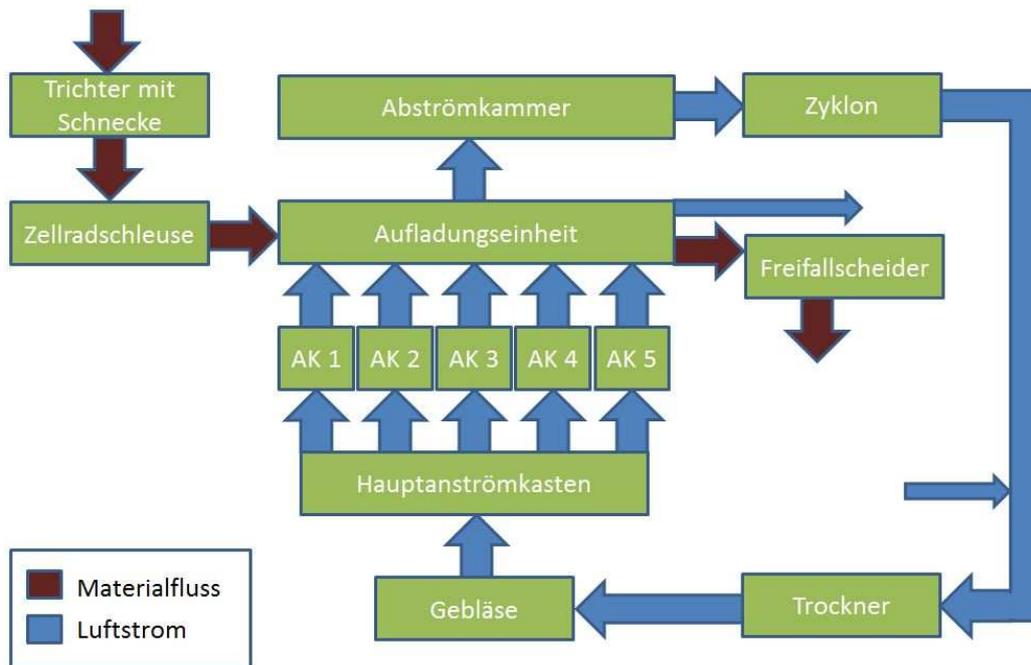


Abb. 50: Vereinfachtes Fließschema der Anlage



Abb. 51: Aufladeeinheit, Unterteil

Die Luft wird über einen Zyklon zurück zum Trockner geleitet. Ein Teil des Luftstromes gelangt über den Materialaustrag in Kammer 5 in den Elektroscheider.

Die Aufladungseinheit ist aus zwei Teilen gefertigt, die durch Schnappverschlüsse verbunden werden. Damit wird eine einfache Reinigung bei Produktwechsel gewährleistet. In Abb. 51 ist der untere Teil mit den Luftanschlüssen und Drucksensoren ersichtlich. Durch Einbau unterschiedlich langer Bleche in die Kammern der Aufladungseinheit kann der Transport der Partikel und damit die Verweilzeit für die Aufladung gesteuert werden. Vier verschiedene Blechanordnungen sind in Abb.52 ersichtlich.

Als Wandmaterial für die kontinuierliche Aufladungseinheit wurde Aluminium verwendet. In der diskontinuierlichen Aufladeeinheit werden verschiedene Wandmaterialien für eine optimale Trennung untersucht. Erweist sich für bestimmte Stoffsysteme ein Wandmaterial als günstig, wird auch die kontinuierlich arbeitende Aufladeeinheit damit ausgekleidet. Die Wahl der Wandmaterialien erscheint insbesondere für Kunststoffgemische interessant, die aus einer

armen und aus einer reichen Kunststofffraktion zusammengesetzt sind. In diesem Fall herrscht für die reiche Fraktion ein Überschuss an typgleichen Stoßpartnern, sodass sich diese Fraktion bipolar^[18] auflädt und im Trennprozess der armen Fraktion zu sortiert würde. Ist das Wandmaterial bzw. die Einbauten aus dem Material der armen Fraktion, erhöht sich durch die Partikel/Wand-Kontakte die scheinbare Anzahl der Stoßpartner der ärmeren Komponente, sodass die Wahrscheinlichkeit einer bipolaren Aufladung zurückgedrängt wird.

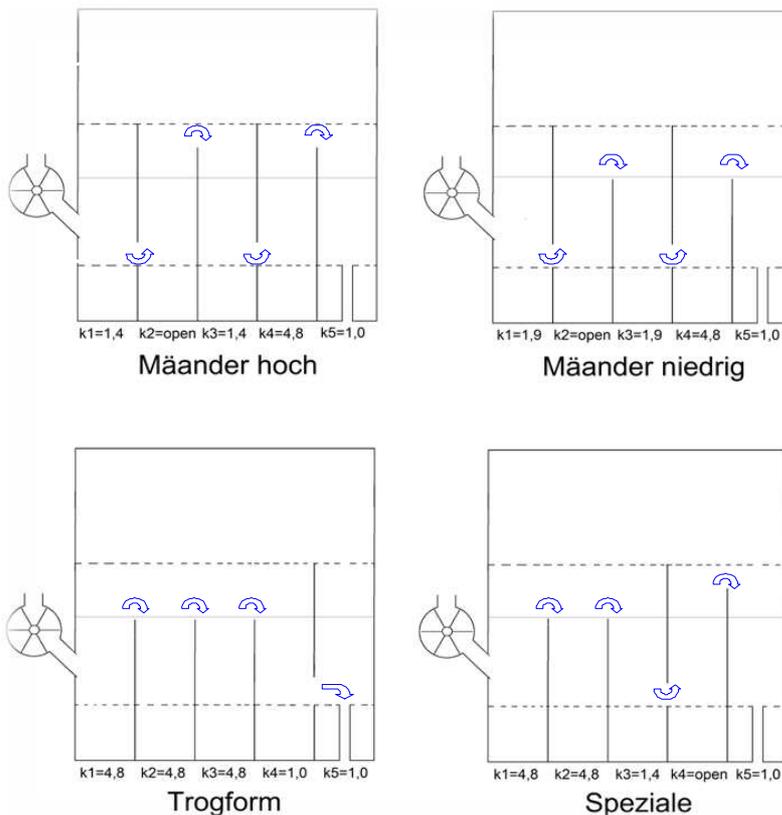


Abb.52: Mögliche Anordnung der Bleche und resultierender Transportweg

6.2.3 Messtechnik

Für den Betrieb der kontinuierlichen Anlage mit Material müssen die Granulate durch die Aufladeeinheit transportiert werden. Dadurch unterliegen sie einer mittleren Verweilzeit in der Wirbelschicht. Der Transport der Granulate kann durch die Einzelanströmung der fünf Kammern reguliert werden. Dazu mussten die Einstellungen der Luftvolumenströme und die Luftgeschwindigkeiten zur Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Wirbelschicht ermittelt und die entsprechenden Drucksensoren ausgelegt werden. Dies sowie die Untersuchungen zur Verweilzeit der Partikel in der Aufladeeinheit anhand verschiedener Parameter von Material und Anlage waren Gegenstand einer Masterarbeit^[3]. Die Ergebnisse werden im Folgenden in Auszügen wiedergegeben.

Ermittlung der Druckdifferenzen und Auslegung der Drucksensoren

Gleichung (5) gibt den Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz Δp und der Luftgeschwindigkeit u , der Dichte des Mediums ρ_F und dem Strömungsbeiwert ζ wieder:

$$\Delta p = \frac{\rho_F}{2} \cdot u^2 \cdot \zeta \quad (5)$$

Es wurden zwei Möglichkeiten genutzt, die Druckdifferenzen in der Anlage zu bestimmen: ein Analogiemodell zur Elektrotechnik und die Messung der Luftgeschwindigkeiten.

Eine Simulation des Strömungsverhaltens der Anlage wurde mithilfe eines bereits vorhandenen Elektroanalogiemodells durchgeführt. Anwendung fand hierfür die Software *MultiSim* (National Instruments) als grafische Benutzerschnittstelle zum Quellcode der Schaltungssimulation SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Im Modell werden die Luftgeschwindigkeiten u_i in Ströme I_i und die Druckdifferenzen Δp_i in Spannungen U_i umgewandelt. Der elektrische Widerstand R_i beschreibt den Strömungswiderstand ζ_i : Dabei ist $U = I \cdot R$ in Analogie zu Gleichung (5). Das Elektroanalogiemodell ist in Abb. 53 dargestellt. Dabei handelt es sich um ein statisches Modell. Turbulenzen werden nicht erfasst, aber es erlaubt erste Hinweise auf Veränderungen der Druckdifferenzen bei Veränderungen von Blendeneinstellungen und Blechanordnungen.

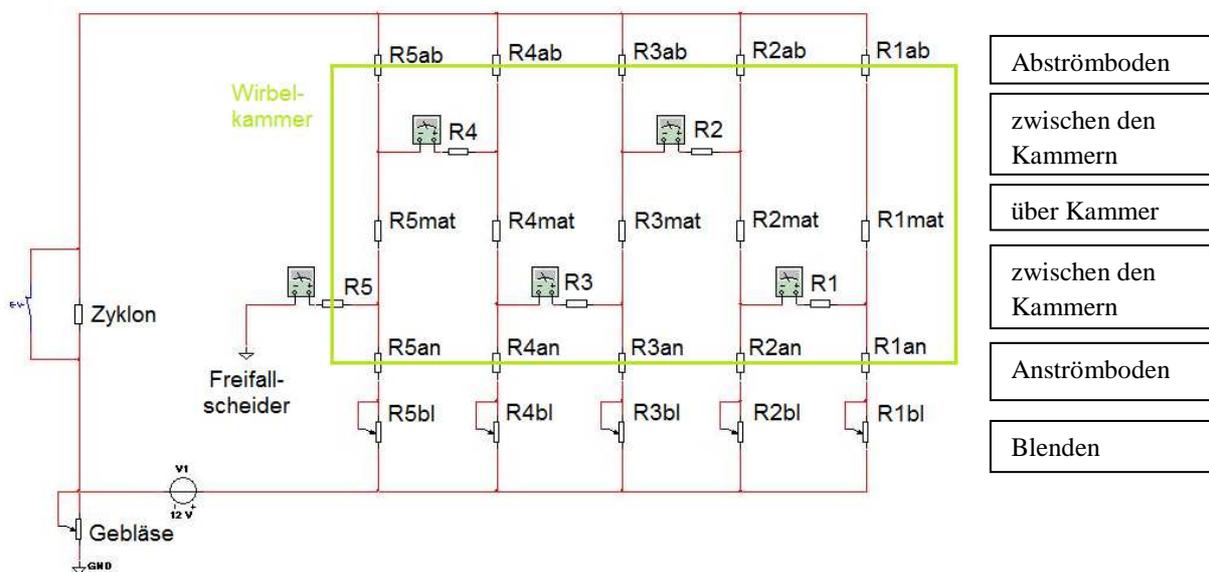


Abb. 53: Schaltbild des Elektroanalogiemodells

Für eine genaue Ermittlung der Luftströme ist die praktische Bestimmung unumgänglich. Dazu wurden die Differenzdrücke mit einem U-Rohrmanometer und die Luftgeschwindigkeiten hinter den Blenden mit einem Flügelrad gemessen, variiert wurden Gebläseleistung und Blendenöffnung für die Blechanordnung Mäander hoch.

Zur Ermittlung der Druckdifferenzen und Luftgeschwindigkeiten an den Blenden werden für das Gebläse die Frequenzumrichter-Einstellungen 4 V, 7 V und 10 V gewählt und die Blendenöffnungen dazu mit $k = 1,0$; $k = 1,4$; $k = 2,9$ und $k = \text{open}$ kombiniert. Diese Verknüpfungen ergeben 64 Versuchsreihen. Die Messwerte für die Luftgeschwindigkeiten sind in Abb. 54 über der Spannung des Frequenz-Umrichters des Gebläses aufgetragen.

Es zeigt sich, dass die Luftgeschwindigkeit mit der Erhöhung der Gebläseeinstellung zunimmt und das bei geöffneten Blenden die Geschwindigkeiten an den Blenden von Blende 1 zu Blende 5 abnehmen. Für kleinere Blendenöffnungen ist dieser Trend nicht mehr zu erkennen, was auf verstärkte Turbulenzen aufgrund des erhöhten Widerstands zurückzuführen ist. Die Verengung der Blenden scheint aber eine Verschiebung der Luftströme in Richtung der hinteren Anströmröhre zur Folge zu haben.

$$\dot{V} = v_L \cdot A \quad \text{mit} \quad A = \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad (6)$$

Über die Luftgeschwindigkeit v_L und den Strömungsquerschnitt A kann nach Gleichung (6) der Luftvolumenstrom \dot{V} berechnet werden.

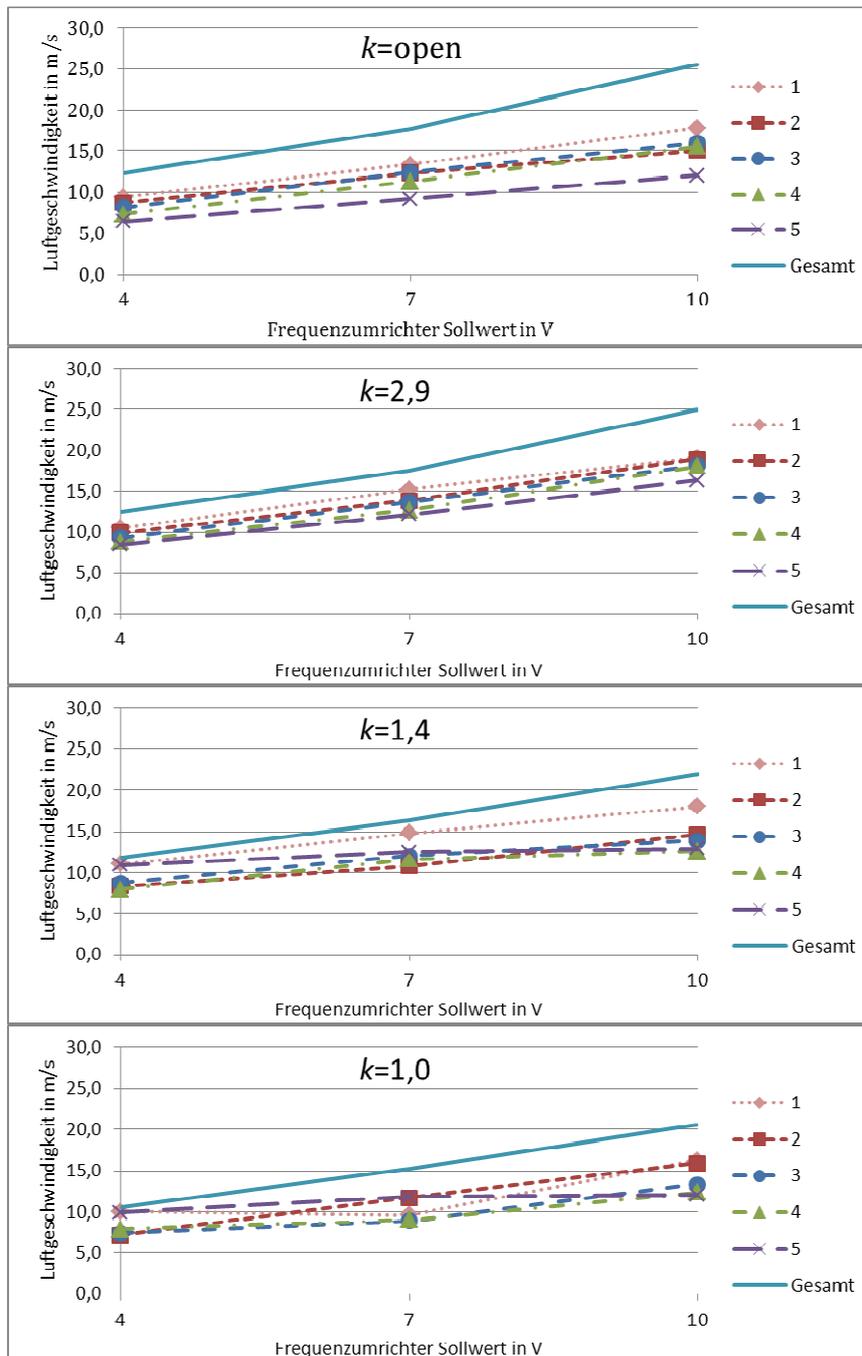


Abb.54: Luftgeschwindigkeiten an den Blenden

Für die Untersuchungen an der Aufladeeinheit werden nur die vordere Kammer mit den Messstellen 1 und 3 und die hintere Kammer mit den Messstellen 4 und 6 betrachtet, da hier die Extrema vermutet werden. Messstelle 1 und 4 liegen am Abströmboden an, Messstelle 2 und 5 am Anströmboden. Die Druckdifferenzen zwischen den Böden werden durch die Messstellen 3 und 6 erfasst und dienen bei den Materialversuchen zur Ermittlung des Differenzdrucks über der Wirbelschicht.

Die nachfolgenden Diagramme (Abb. 55) zeigen die Differenzdruckverläufe über der Einstellung des Frequenz-Umrichters des Gebläses. Aus den Daten geht hervor, dass die höchsten

Druckdifferenzen an den Anströmböden der Aufladungseinheit erzeugt werden. Diese sind dabei stark abhängig von der gewählten Blenden- und der Gebläseeinstellung. Der Vergleich der Kurven der Messstelle 5 zeigt, dass das Schließen des Austrags zum Freifallscheider die Druckdifferenz über dem Anströmboden der letzten Kammer nur gering verändert. Da die Punkte jedoch auf Einzelmessungen beruhen, kann dieser Unterschied nicht quantifiziert werden. Auf die Druckdifferenz des darüber liegenden Abströmbodens hatte das Öffnen bzw. das Schließen des Austrags zum Freifallscheider keinen bedeutenden Einfluss.

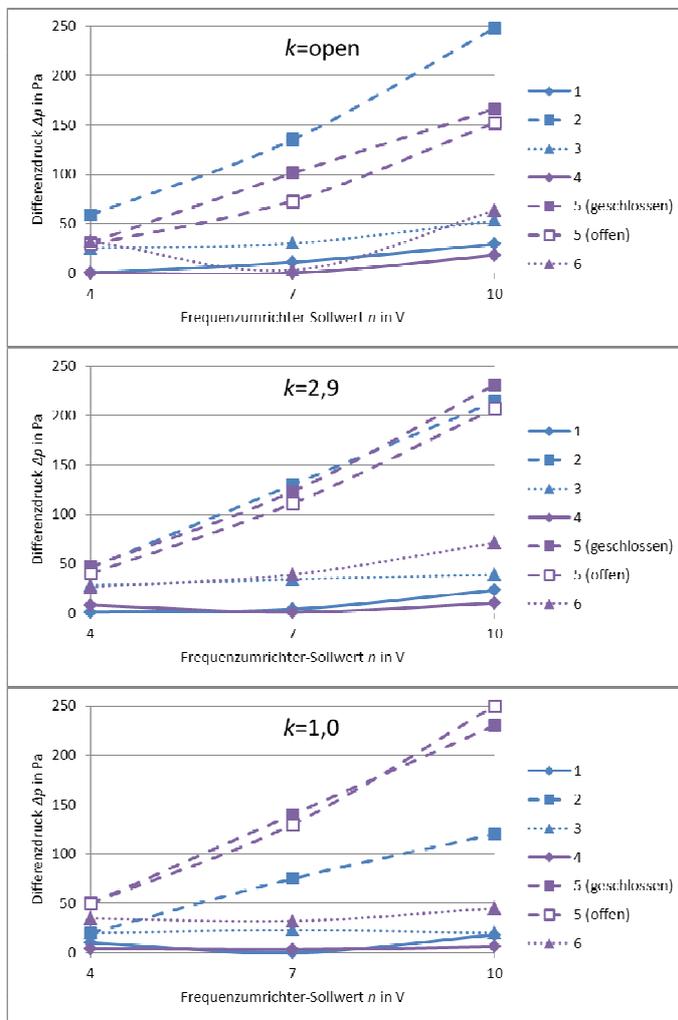


Abb. 55: Differenzdrücke an der Aufladungseinheit

Die geringsten Druckdifferenzen der Aufladungseinheit liegen am Abströmboden vor, wobei die Druckdifferenzen der vorderen und der hinteren Kammer nur wenig voneinander abweichen und kaum mit der Erweiterung der Blendenöffnung und der Erhöhung der Gebläseeinstellung zunehmen.

Die Druckdifferenzen in der Kammer, also zwischen den Lochblechen, verändern sich nur wenig mit dem Wechsel der Blendeneinstellung und der Gebläsestärke und sind nicht ohne weiteres für den Fall des Materialtransports vorherzusagen; es ist auch kein Trend nachzuweisen. Die Druckdifferenzen über der Kammer liegen jedoch über denen des Abströmbodens und für die untersuchten Sollwerte des Frequenz-Umrichters des Gebläses unter denen des Anströmbodens.

Beim Vergleich der Diagramme fällt auf, dass die Druckdifferenzen am Anströmboden vor allem von der Blendeneinstellung abhängen. Während die größte Druckdifferenz für die ge-

öffneten Blenden an der Kammer 1 vorliegt, entsteht für eine Blendeneinstellungen von $k = 1,0$ die höchste Druckdifferenz am Anströmboden der Kammer 5. Die Voruntersuchungen belegen, dass die Blenden- und Gebläseeinstellungen vornehmlich Einfluss auf die Differenzdrücke am Anströmboden haben. Anhand der Ergebnisse konnten die 25 im Schaltbild (Abb. 53) gekennzeichneten Widerstände an der Anlage mit geeigneten Differenzdrucksensoren ausgelegt werden.

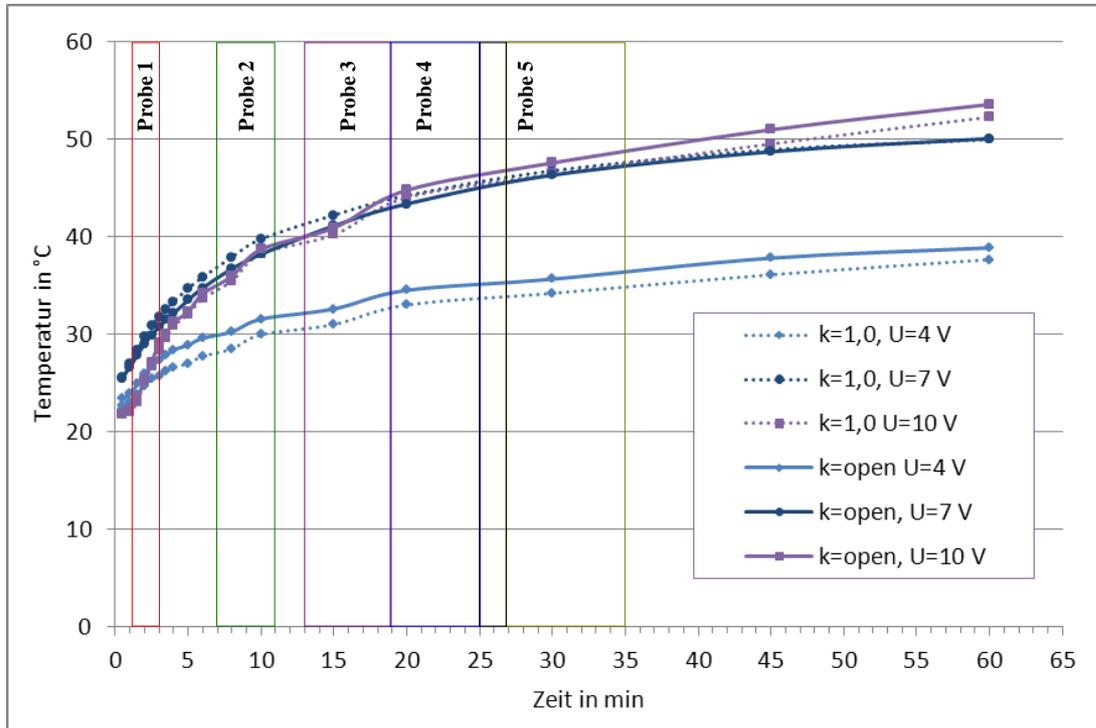


Abb. 55: Temperaturverlauf für die Blechanordnung Mäander hoch

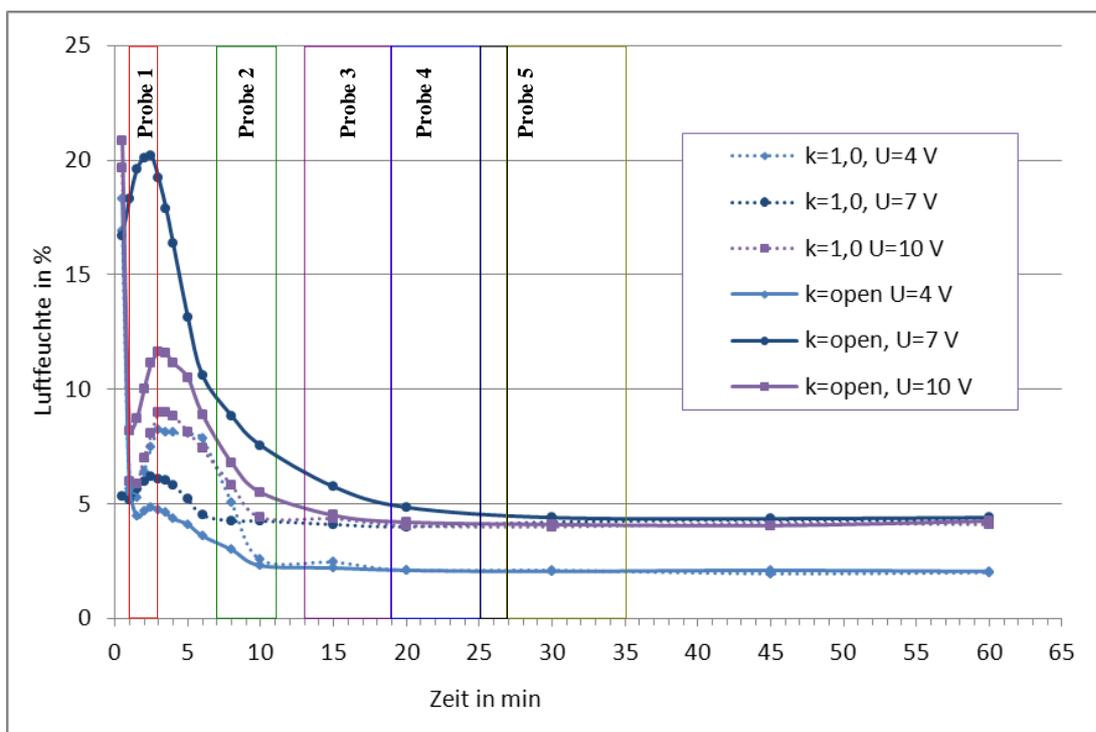


Abb. 56: Luftfeuchteverlauf für die Blechanordnung Mäander hoch

Luftkonditionierung

In der diskontinuierlichen Anlage können Temperatur und Luftfeuchte definiert eingestellt werden. Für die kontinuierliche Anlage ist dieser Aufwand zu hoch. Es ist bekannt, dass Luftfeuchten die elektrostatische Trennung stark beeinflussen können^[34]. In vielen Fällen ist es günstig bei möglichst niedriger relativer Luftfeuchte zu arbeiten. Mit dem im Rahmen des Projektes beschafften Adsorbtionstrockner kann die Luftfeuchte herabgesetzt werden.

Der Trockner besteht aus einem Trocknerrad, einem Gebläse und einer Elektroheizung. Das Trocknerrad besitzt vielzählige, axial verlaufende Kanäle. Die Oberfläche dieser Kanäle ist mit Silicagel beschichtet, welches die Luftfeuchte binden kann.

Das Trocknerrad wird auf einer Hälfte vom Luftstrom der Anlage durchströmt. Die andere Hälfte wird entgegengesetzt von einem Luftstrom durchsetzt, der der Regenerierung des Silicagels dient. Die Prozessluft und die Regenerationsluft sind durch Dichtungen voneinander getrennt. Während des Betriebs des Trockners durchläuft das Trocknerrad einen Zyklus mit drei Zonen. Die Adsorptionszone wird dabei von der Prozessluft durchströmt und nimmt deren Luftfeuchte auf. Dem rotierenden Rad wird diese Luftfeuchte in der Regenerationszone wieder entzogen. In der Regenerationszone werden die Kanäle des Trocknerrads von dem Regenerationsluftstrom durchsetzt. Dieser wird zuvor von dem Gebläse angesaugt und mit der Elektroheizung erhitzt. Die heiße Luft lässt das am Silicagel befindliche Wasser kondensieren und nimmt die entstehende Feuchte nach außen mit. In einer dritten Zone kann das Silicagel abkühlen, bevor es in der Adsorptionszone wieder für die Aufnahme von Luftfeuchte zur Verfügung steht. Dieser Zyklus dauert circa eine halbe Stunde. Damit der Trockner konstante Bedingungen aufzeigt, muss dieser den ersten Zyklus vollständig durchlaufen haben.

Die Versuchsreihen der Klimauntersuchungen setzten sich aus der Variation der Gebläseleistung, der Blendeneinstellung, der Fahrweise und der Trocknereinstellung zusammen. Für alle Klimamessungen wurde ein Hygrometer in Anströmrohr 3 nach der Blende plaziert.

In Abb. 55 und 56 sind die zeitlichen Verläufe von Temperatur und Luftfeuchte für eine Trocknereinstellung von 120 °C dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Temperatur innerhalb der ersten 20 min um ca. 20 K auf über 40 °C ansteigt. Die Temperatur ist von der Einstellung des Gebläses abhängig, denn je höher der Luftstrom, desto schneller erhitzt sich die Anlage und desto höher ist auch die Endtemperatur ($T_{U=4}[t=75\text{ min}] = 41\text{ °C}$; $T_{U=10}[t=75\text{ min}] = 57\text{ °C}$). Die Veränderung der Blendeneinstellungen hat kaum Einfluss. Bei geöffneten Blenden kann jedoch von einer besseren Durchströmung ausgegangen werden. Dadurch wird der Umlauf der Luft begünstigt, sodass sich diese schneller aufheizt. Nach ca. 60 min Betriebszeit ist die Temperatur stationär.

Die Luftfeuchtekurven durchlaufen am Anfang ein Maximum, da die Luft zunächst noch das Silicagel durchströmt, welches erst im nächsten Zyklus wieder Luftfeuchte aufnehmen kann. Je höher die Gebläseeinstellung ist, desto höher ist die Endfeuchte ($\varphi_{U=4}[t=15\text{ min}] = 2\%$, $\varphi_{U=10}[t=15\text{ min}] = 4,5\%$). Nach den ersten 15 Betriebsminuten liegen die Feuchten jedoch alle unter einem Wert (5 bis 10 % relativer Luftfeuchte), unter dem dessen Veränderung keinen Einfluss mehr auf die triboelektrische Aufladung hat.

Fazit der Klimauntersuchungen ist, dass sowohl die Anlagentemperatur als auch die Luftfeuchte von der Häufigkeit und Dauer des Anlagenbetriebs abhängen. Allerdings werden nach einer Anlaufzeit von 30 min stationäre Bedingungen erreicht.

6.2.4 Verweilzeituntersuchungen

Ausgehend von den Materialeigenschaften der hier untersuchten Kunststoffe wurden jeweils Lockerungspunkt und Austragspunkt für die Wirbelschicht abgeschätzt. Experimentelle Bestimmungen mithilfe einer Fluidisierungsapparatur waren nur im Bereich der festen Schütt-

schicht möglich. Danach kam es zu Gasdurchbrüchen und die Grenzpunkte der Wirbelschicht konnten nicht bestimmt werden. Durchsatzmessungen mit den verschiedenen Kunststoffen zeigten, wodurch der Transport der Granulate beeinflusst wird. Schließlich wurden am Beispiel von Polystyren die Verweilzeitverteilungen in Abhängigkeit von der Blechanordnung, der Gebläseleistung und dem Schneckendurchsatz bestimmt.

Versuchsmaterialien

Für die Untersuchungen wurden zunächst weitgehend reine Standardgranulate eingesetzt. Die wesentlichen Eigenschaften enthält Tab. 5.

Tab. 5: Ausgewählte Eigenschaften der Kunststoffe (ρ = Dichte; ψ = Kornformfaktor gewählt; x_{32} = Sauter-Durchmesser; x_{50} = mittlere Partikelgröße; S_V = volumenspezifische Oberfläche; PA6 = Polyamid-6; PET = Poly(ethylenterephthalat); POM = Polyoxymethylen; PVC = Poly(vinylchlorid); PMMA = Poly(methylmethacrylat)

Kunststoff	ρ [kg/m ³]	Ψ	x_{32} [mm]	x_{50} [mm]	S_V [m ² /m ³]	Gefüge
ABS _{rund}	1020	0,93	3,69	3,87	1628	amorph
ABS _{zylindrisch}	970	0,88	4,72	4,70	1270	
PA6 _{rund}	1000	0,99	4,27	4,21	1405	teilkristallin
PA6 _{zylindrisch}	1000	0,88	4,49	4,97	1337	
PE _{rund}	900	0,90	5,56	5,52	1080	teilkristallin
PE _{zylindrisch}	900	0,76	5,04	5,36	1191	
PET _{zylindrisch}	1390	0,93	3,53	3,69	1700	amorph/ teilkristallin
PMMA _{zylindrisch}	1180	0,78	3,65	4,31	1645	amorph
POM _{rund}	1310	0,93	3,60	3,62	1667	teilkristallin
PP _{rund}	860	0,97	4,38	4,52	1369	teilkristallin
PP _{zylindrisch}	850	0,86	3,80	4,03	1580	
PS _{zylindrisch}	1020	0,88	3,26	3,62	1839	amorph
PS _{zylindrisch} Tracer	1000	0,93	4,03	4,15	1488	
PVCl _{insenförmig}	1310	0,89	5,25	5,57	1142	amorph

Die Partikelgrößen wurden fotooptisch mit der Haver CPA 4-2 am *Institut für Aufbereitungsmaschinen der Bergakademie Technische Universität Freiberg* bestimmt. Die Dichtemessung erfolgte pyknometrisch.

Fluidisierbarkeit

Grundlage für die Aufladung und den Transport der Kunststoffpartikel durch die Aufladungseinheit ist eine ausgeprägte Wirbelschicht. Dafür sind der Lockerungspunkt und der Austragspunkt maßgebend. Der Lockerungspunkt muss mindestens erreicht werden, um die Partikel in Bewegung zu halten und somit eine Aufladung durch die dabei erzeugten Kollisionen zu ermöglichen. Die Austragsgeschwindigkeit muss überschritten werden, um den Transport der Teilchen von einer Kammer der Aufladungseinheit zur nächsten zu gewährleisten.

Der theoretischen Ermittlung der Wirbelschichtkennwerte liegt die Berechnung der Einzelkornanströmung zugrunde. Die *obere Grenze* der Wirbelschicht ist direkt von der Sinkgeschwindigkeit der kleinsten Partikel abhängig, weil diese am langsamsten sedimentieren. Eine Luftgeschwindigkeit, welche größer als diese ist, führt zum Austrag der kleinsten Teilchen.

Für die Versuche in der Aufladungseinheit ist diese Geschwindigkeit dann von Interesse, wenn das Material in der Wirbelschicht verweilen und nicht ausgetragen werden soll. Die Sinkgeschwindigkeit u_{Sink} berechnet sich nach der folgenden Gleichung^[61]:

$$u_{\text{Sink}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_F} \cdot \frac{x_i \cdot g}{c_w(\text{Re})}} \quad (7)$$

Die Sinkgeschwindigkeit u_{Sink} ist eine Funktion der Fluidichte ρ_F , der Feststoffdichte des Partikels ρ_S , der Partikelgröße x_i , der Erdbeschleunigung g und dem Widerstandsbeiwert c_w . Die Stoffdaten für Luft sind dem VDI Wärmeatlas^[62] entnommen. Für den Widerstandsbeiwert werden die Reynolds-Zahl^[63] (Gleichung 8 und 9) sowie die Archimedes-Zahl^[14] (Gleichung 10) benötigt.

$$\text{Re}_{\text{Austrag, BERANEK}} = \frac{1,74 \text{ Ar}}{31,3 + \sqrt{\text{Ar}}} \quad (8)$$

$$\text{Re}_{\text{Austrag, MARTIN}} = 18 \left[\sqrt{1 + \frac{\text{Ar}^{0,5}}{9}} - 1 \right]^2 \quad (9)$$

$$\text{Ar} = \frac{x_i^3 \cdot g}{\nu_F^2} \cdot \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F} \quad (10)$$

Die Reynolds-Zahlen (Re) liegen für beide Berechnungen im Newtonschen Bereich, der für $\text{Re} > 1000$ definiert ist. Der Strömungsbeiwert wird für diesen Bereich mit $c_w=0,44$ angenommen. Damit kann die Sinkgeschwindigkeit nach Gleichung (7) berechnet werden. Die Ergebnisse befinden sich in den Anlagen 1 und 2. Die kleinsten Teilchen ($x_i = x_{10}$) werden also theoretisch mit einer Luftgeschwindigkeit über 10-12 m/s ausgetragen. Die *untere Grenze* der Wirbelschicht ist für die Versuche von entscheidender Bedeutung. Sie entspricht der Geschwindigkeit am Lockerungspunkt u_L und kann nach folgenden Varianten berechnet werden:

- Berechnung nach Wen und Yu
- Berechnung nach Ergun
- Ermittlung mit dem Reh-Diagramm

Für die Berechnung nach Wen und Yu wird die Reynolds-Zahl am Lockerungspunkt bestimmt und über diese auf die Lockerungsgeschwindigkeit u_L (Gleichung 11) geschlossen. Die Reynolds-Zahl wird hierbei mittels einer empirischen Formel (Gleichung 12)^[63] aus der Archimedes-Zahl (Gl. 10) bestimmt. Für die Partikelgröße x_i wird der Sauterdurchmesser x_{32} (Tab. 5) verwendet.

$$u_L = \frac{\text{Re}_{L, \text{WEN/YU}} \cdot \nu_F}{x_{32}} \quad (11)$$

$$\text{Re}_{L, \text{WEN/YU}} = \sqrt{33,7^2 + 0,048 \cdot \text{Ar}} - 33,7 \quad (12)$$

⁶¹ S. Glüer: *Formelsammlung Mechanische Verfahrenstechnik*. (2006).

⁶² Verein Deutscher Ingenieure: *VDI Wärmeatlas*., Springer Verlag Berlin und Heidelberg, 10. Auflage (2006).

⁶³ H.W. Heschel; M. Gräbner: *Fluid-Feststoff-Systeme – Formel- und Stoffdatensammlung*. Freiberg (2010).

Ergun zieht zur Berechnung der Wirbelpunktgeschwindigkeit die Lockerungsporosität hinzu und legt folgende Gleichung (13) zugrunde^[63]:

$$u_L = \sqrt{\left[\frac{300}{7} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_L) \cdot v_F}{x_{32}} \right]^2 + \frac{\varepsilon_L^3}{1,75} \cdot \frac{\rho_P - \rho_F \cdot g}{\rho_F} \cdot x_{32} - \frac{300}{7} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_L) \cdot v_F}{x_{32}}} \quad (13)$$

Die Porosität am Lockerungspunkt ε_L kann mit der Gleichung (14) von Wen und Yu^[64] aus der Sphärizität durch Lösen der kubischen Gleichung (15) berechnet werden. Der Wadell-Faktor Ψ ist aus der fotooptischen Analyse der Materialien bekannt.

$$\frac{1 - \varepsilon_L}{\varepsilon_L^3} \approx 11 \cdot \Psi^2 \quad (14)$$

$$0 = (11 \Psi^2) \varepsilon_L^3 + \varepsilon_L - 1 \quad (15)$$

Die Porosität am Lockerungspunkt beträgt für das runde ABS 39 %. Die Lockerungsgeschwindigkeit, die daraus bestimmt werden konnte, liegt unter 1 m/s. Die Differenzen zwischen der Berechnung nach Wen und Yu und der Berechnung nach Ergun sind gering (vgl. Anlage 3 und 4).

Mit dem Zustandsdiagramm nach Reh (vereinfacht in Abb. 58 dargestellt) kann man Gas-Feststoff-Systeme charakterisieren und die Existenz der Wirbelschicht nachweisen. Das Diagramm in dem der reziproke Widerstandswert der Einzelteilchen $1/c_W$ über der Reynolds-Zahl aufgetragen ist, zeigt den Schüttbereich, den Wirbelschichtbereich und den Bereich der pneumatischen Förderung. Zur Bestimmung wurde von einer konstanten Archimedes- und Beranek-Zahl ausgegangen.

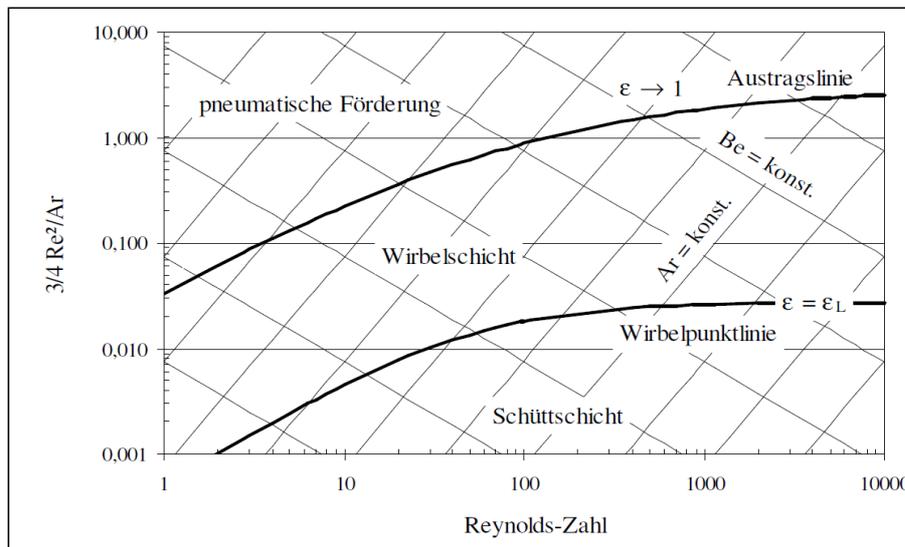


Abb. 58: Zustandsdiagramm nach Reh^[14]

Die Bestimmung der wirbelschichtbegrenzenden Reynolds-Zahlen, erfordert wiederum die Archimedes-Zahl analog Gleichung 10. Um die Wirbelschichtberechnung zu vereinfachen, wurde zunächst auf ein für runde Partikel allgemein gültiges Reh-Diagramm zurückgegriffen.

⁶⁴ E. Németh: Triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg (2003), S. 136.

Durch Einzeichnen des K-Wertes, dem Kehrwert der Archimedes-Zahl, in ein Reh-Zustandsdiagramm, welches für nahezu monodisperse Partikelschüttungen gültig ist, können aus dem Schnittpunkt der Wirbelpunktlinie (WP), mit der aus der Archimedes-Zahl bestimmten Geraden, die Reynolds-Zahl Re_L am Lockerungspunkt und mit dem Schnittpunkt der Austragslinie, mit der Archimedes-Geraden, die Reynolds-Zahl Re_A am Austragspunkt ermittelt werden. Aus den Reynolds-Zahlen berechnen sich die Lockerungsgeschwindigkeit u_L und die Austragsgeschwindigkeit u_A ^[64] nach:

$$u_L = \frac{Re_L \cdot v_F}{x_{32}} \quad (16)$$

$$u_A = \frac{Re_A \cdot v_F}{x_{32}} \quad (17)$$

Für ABS rund ergeben sich z. B. bei 20 °C für die Lockerungsgeschwindigkeit 1,04 m/s und für die Austragsgeschwindigkeit 9,97 m/s.

Die Ergebnisse der Lockerungsgeschwindigkeitsberechnung nach Wen und Yu und Ergun weichen nur wenig von dem Lockerungspunkt des Reh-Diagramms ab. Neben der Ermittlung für 20 °C erfolgt auch eine Aufstellung der theoretischen Wirbelschichtgrenzen für die maximale Anlagentemperatur von 60 °C. Da die Viskosität der Luft mit Zunahme der Temperatur steigt, wird der Transport zusätzlich erschwert. Die Austragsgeschwindigkeiten sind bei 60 °C daher um ca. 2 m/s höher. Die Lockerungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich jedoch kaum in Abhängigkeit von der Temperatur und betragen nur etwa 1 bis 2 m/s.

Für PVC ist die Austragsgeschwindigkeit am höchsten, für PP und PS am geringsten, was vor allem auf die Unterschiede in Dichten und Partikeldurchmesser zurückzuführen ist. Die Austragsgeschwindigkeit ist für den Transport durch die Aufladungseinheit von entscheidender Bedeutung. Nur wenn diese überschritten wird, bewegen sich die Teilchen auch durch die Anlage. Um den Transport für alle Materialien über den Temperaturbereich von 20 bis 60 °C zu garantieren, sollte nach Reh eine Anströmgeschwindigkeit von 15 m/s gewährleistet sein.

Transport durch die Aufladungseinheit

Der Transport durch die Aufladungseinheit wurde mit den im Abschnitt 6.2.4 beschriebenen Versuchsmaterialien untersucht. Dazu wurden die hohe Mäanderform der Blechanordnung und die höchste Gebläsestufe gewählt. Für eine gute Durchströmung des Mäanders wurden die Blenden 1 und 3 auf $k = 1,4$, die Blende 2 auf $k = open$, die Blende 4 auf $k = 4,8$ und die Blende 5 auf $k = 1,0$ eingestellt. Für die Versuche wurde gewaschenes Material benutzt. Zuerst wurde der Anlagendurchsatz analysiert. Um den Einfluss der Aufladung auf den Transport zu überprüfen wurden eine PP/PE Mischung verwendet, die sich – wie oben beschrieben – neutral verhält und ABS, das sich gegen sich selbst auflädt^[14]. Es wurden jeweils drei Versuche gefahren, wobei der an der Schnecke eingestellte Durchsatz mit dem Austrag aus der Aufladeeinheit verglichen wurde. Zwischen den Versuchen wurde die Aufladeeinheit entleert. Bei den Versuchen wurde für beide Materialien festgestellt, dass die Austragswerte nicht mit dem eingestellten Durchsatz übereinstimmen und von Versuch zu Versuch abnehmen. Zu beobachten war, dass sich die Materialien an den Plexiglasscheiben (PMMA = Poly(methylmethacrylat)) der Aufladungseinheit, die für die Beobachtung der Vorgänge im Innern vorgesehen waren, anlagern, was auf die Aufladung der Materialien gegen PMMA zurück zu führen ist. Die verstärkte Aufladung von PP und PE gegen PMMA ist auf deren Position in der triboelektrischen Reihe zurückzuführen, denn nach Brück^[12] stehen PP und PMMA als auch PE und PMMA weiter auseinander als ABS und PMMA. Um diese Einflüsse ausschließen zu können, wurde die Anlage komplett mit Aluminium ausgekleidet, sodass der Kontakt der Ma-

aterialien mit den PMMA-Scheiben verhindert wird. Des weiteren wurde die Aufladeeinheit geerdet.

Aus Abb. 59 geht hervor, dass nach diesen Maßnahmen der Austrag des PP/PE-Gemisches nahezu konstant bleibt, aber nicht mit dem Schneckendurchsatz übereinstimmt. Beim ABS nimmt der Austrag ab. Der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte wurde überprüft und weitgehend ausgeschlossen^[3].

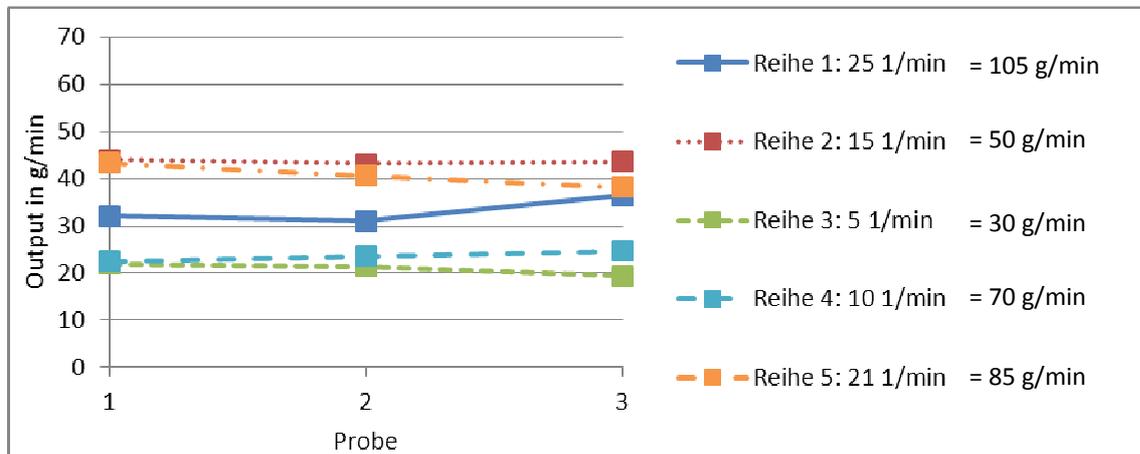


Abb. 59: Output der geerdeten Anlage mit Auskleidung für das PP/PE-Gemisch

Die Untersuchungen mit weiteren Materialien (Tab. 6) führten zu der Beobachtung, dass die Kornform den Durchsatz beeinflusst. Für runde und linsenförmige Materialien nimmt der Austrag ab, wohingegen der Austrag für zylindrische oder quaderförmige Materialien mit dem Schneckendurchsatz übereinstimmt. Die Ursachen konnten noch nicht vollständig aufgeklärt werden, sie wurden in unterschiedlichen Materialeigenschaften oder in unterschiedlichem Anströmverhalten gesehen. Für die folgenden Untersuchungen wurden deshalb umgeformte zylindrische Granulate verwendet.

Tab. 6: Ergebnisse der Durchsatz-Untersuchungen der Einzelkomponenten^[3] (x_{32} = Sauter-Durchmesser; ρ = Dicht; PA6 = Polyamid-6; PET = Poly(ethylenterephthalat); POM = Polyoxymethylen; PVC = Poly(vinylchlorid); PMMA = Poly(methylmethacrylat); qu = quaderförmig; zy = zylindrisch; lf = linsenförmig; k.A. = keine Angaben verfügbar)

Einzelkomponenten	POM (rund)	PMMA (qu)	PA6 (rund)	PA6 (zy)	ABS (rund)	ABS (zy)	PS (zy)	PE (rund)	PE (zy)	PP (rund)	PP (zy)	PET (zy)	PVC (lf)
Lewis-Säure-Parameter ^[8]	0,6	0,52	0,69	0,69	k.A.	k.A.	0,27	0	0	0	0	0,47	1,54
Lewis-Base-Parameter ^[8]	0,49	0,55	1,06	1,06	k.A.	k.A.	0,3	0	0	0	0	0,68	0,76
Beobachtung: Austrag	abnehmend	konstant	abnehmend	konstant	abnehmend	konstant	konstant	leicht abnehmend	konstant	leicht abnehmend	konstant	konstant	abnehmend
ρ [kg/m ³]	1310	1180	1000	1000	1020	970	1020	900	900	860	850	1390	1310
Kornformfaktor	0,96	0,83	0,95	0,89	0,95	0,91	0,89	0,93	0,91	0,97	0,88	0,94	0,91
X_{32} [mm]	3,60	3,65	4,27	4,49	3,69	4,72	4,03	5,56	5,04	4,38	3,80	3,53	5,25
Abschlagmethode	heiß	kalt	heiß	kalt	heiß	kalt	kalt	heiß	kalt	heiß	kalt	kalt	heiß

Verweilzeit

Die Verweilzeituntersuchungen wurden mit zylinderförmigen PS-Granulaten durchgeführt. Als *Tracer* wurde blaues PS benutzt. Mittels Impulsmarkierung können die Verweilzeiten für die verschiedenen Einstellungen bestimmt werden. Um die für eine erfolgreiche Sortierung erforderliche Zielverweilzeit zu bestimmen, wurden zunächst an der diskontinuierlichen Anlage Untersuchungen mit einem Gemisch aus zylindrischem ABS und PS zum Einfluss der Aufladungszeit durchgeführt. Die Trennkurven sind unter Angabe der Sortierkennzahl B in Abb. 60 dargestellt.

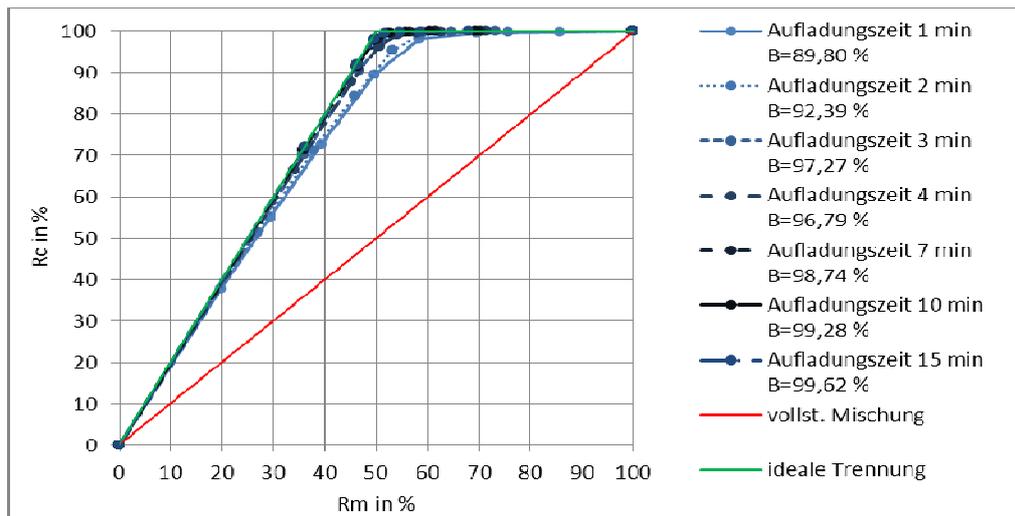


Abb. 60: Sortierkurven für ABS/PS

In Abb. 60 ist zu erkennen, dass sich das Sortierergebnis mit zunehmender Aufladungsdauer verbessert. Nach einer Aufladungszeit von 10 min wird eine ideale Trennung erreicht. In der Praxis sind so lange Aufladungszeiten nicht erforderlich, weil eine Mittelfraktion entsteht, die dem Aufgabegut wieder zugemischt werden kann. Zur Optimierung der Verweilzeit werden die vier verschiedenen Blechanordnungen in Abb. 52, mit jeweils zwei bis drei verschiedenen Gebläseeinstellungen und zwei unterschiedlichen Schneckendurchsätzen untersucht. Die Ergebnisse beruhen auf Dreifachmessungen. Die Einstellungen der Blenden orientierte sich maßgeblich an der Blechanordnung, da diese den Transportweg, und damit verbunden, die in der Kammer benötigte Anströmgeschwindigkeit bestimmen. Wichtig ist, dass die Luftmenge, welche sich auf die fünf Anströmkammern aufteilt, ausreichend ist, um das Material zu transportieren. Eine Trogform mit vier Kammern ist mit den vorhandenen Anlagenkomponenten daher nicht möglich.

Das Grundmaterial wird in den Trichter des Schneckendosierers aufgegeben. Nachdem die Anlage angefahren ist, wird die Schnecke gestartet und ein stationärer Output abgewartet, bevor das *Tracermaterial* direkt in die Zellradschleuse gegeben wird. Mit dem Einfüllen der *Tracer* beginnt gleichzeitig der Abzug am Ausgang der Aufladungseinheit. Das Material wird in zehn Fraktionen in Abständen von 30 s abgefangen, sodass nach fünf Minuten der Abzug abgebrochen wird.

Nach jeder Versuchsreihe wird die Anlage geöffnet und entleert, damit eventuell in der Anlage verbliebene *Tracer* die nachfolgenden Versuchsreihen nicht verfälschen. Das abgezogene Material wird anschließend geklaubt und die *Tracermassen* in den einzelnen Fraktionen bestimmt. Die bestimmten Massenanteile aus jeweils drei Versuchsreihen werden für die einzelnen Fraktionen und Versuchsparameter gemittelt und die Summen- und die Häufigkeitsfunktionen (Gleichung 18 und 19) gebildet.

$$S_g(t) = \frac{c_i(t)}{c_i(0)} = \mu_i(t) \quad (18)$$

$$H_g(t) = \frac{dS(t)}{dt} = \frac{\mu_i(t)}{\Delta t} \quad (19)$$

Aus der Summenverteilung wird die mittlere Verweilzeit bestimmt. Die mittlere Verweilzeit ist an dem Punkt zu finden, an welchem die Fläche über der Summenfunktion dem Integral unter der Summenkurve entspricht (Gleichung 20)^[65]. Dabei wird die Fläche unter der Kurve vom kleinen Abszissenwert zum großen Abszissenwert aufaddiert und die Fläche über der Kurve entgegengesetzt aufsummiert. Hierfür wird eine vereinfachte Bestimmung nach Gleichung 21 angewendet.

$$A_1 = A_2 \quad (20)$$

$$A_{i-1} + \Delta t \cdot S(t) = A_{i+1} + \Delta t(1 - S(t)) \quad (21)$$

Die mittlere Verweilzeit τ kann auch als Mittelwert der Häufigkeitsverteilung definiert sein, dann berechnet sie sich nach Gleichung 22.

$$\tau = \sum (H(t_i) \cdot \Delta t_i \cdot t_i) \quad (22)$$

Die mit dem Flächenverfahren bestimmten, mittleren Verweilzeiten sind in Tab. 7 aufgeführt.

Tab. 7: Mittlere Verweilzeiten τ der Verweilzeituntersuchungen

Einstellung			$\tau(A_1(S(t)) = A_2(S(t)))$ [min]	$\tau(H(t))$ [min]
Mäander hoch	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	0,5	0,83
Mäander hoch	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0,5	0,76
Mäander hoch	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	0	0,53
Mäander hoch	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0	0,52
Trog	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	3,0	3,09
Trog	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	2,0	2,04
Trog	$U = 9 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	1,5	1,92
Trog	$U = 9 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	1,0	1,32
Trog	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	0,5	0,86
Trog	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0,5	0,79
Mäander niedrig	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	0,5	0,89
Mäander niedrig	$U = 8,5 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0,5	0,93
Mäander niedrig	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	0	0,51
Mäander niedrig	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0	0,51
Speziale	$U = 9 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	2,0	2,39
Speziale	$U = 9 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	1,5	1,60
Speziale	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 52 \text{ g/min}$	1,0	1,32
Speziale	$U = 10 \text{ V}$	$\dot{m} = 167 \text{ g/min}$	0,5	0,98

⁶⁵ K. Kraume: *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Verlag Springer Vieweg, Berlin (2012), S. 117-130.

Die höchsten, mittleren Verweilzeiten werden mit der Trog- und der Spezialform erreicht. Allerdings neigen diese Varianten zum Versacken der Kammern. Etwa ein Drittel der zugeführten Masse, als auch der *Tracer*, wird nicht in der vorgesehenen Zeit am Ausgang aufgefangen. Jeder Fraktion fehlen von den 52 g/min zugeführten Material ca. 16 g/min. Auch für eine Einstellung $U = 9 \text{ V}$ und $\dot{m} = 52 \text{ g/min}$ wird ein Verlust von über 5 % verzeichnet. Bei der Variante Spezial mit $U = 9 \text{ V}$ und einem Schneckendurchsatz von 52 g/min traten Verluste in Höhe von durchschnittlich 16 % auf.

Ein sicherer Transport mit konstantem Durchsatz ist mit der hohen Mäanderform gewährleistet.

Um die erforderlichen hohen Anströmgeschwindigkeiten auch für größere Granulate zu erzielen, wurden auf den Abströmboden drei Bleche aufgebracht. Dadurch wurde die Abströmfläche um 25 % verkleinert.

6.3 Trennversuche an der kontinuierlichen Anlage

6.3.1 Versuchsmaterialien

Die Voruntersuchungen an der Aufladeeinheit haben gezeigt, dass die Kornform der Kunststoffe entscheidenden Einfluss auf den Transport durch die Aufladeeinheit hat. Bisher konnte nur mit zylindrischen, kaltabgeschlagenen Partikeln ein konstanter Transport durch die Anlage erreicht werden. Deshalb wurden die, für die Erprobung der Anlage vorgesehenen Kunststoffe PA6, PVC, ABS, und PS umgeformt. Für die Untersuchungen standen zylindrische Granulate mit einer Länge von 6 mm und einem Durchmesser von 4 mm zur Verfügung (Abb. 61). Aus den Voruntersuchungen waren noch die Standardprodukte (ABS Terluran GP 22 natur und PS 158 K) sowie umgeformte kleinere Granulate von ABS und PS (Länge 3 mm, Durchmesser 2 mm) vorhanden, sodass auch der Einfluss der Partikelgröße betrachtet werden konnte.



Abb. 61: Granulate der Kunststoffe PA6, PVC, ABS und PS

6.3.2 Referenzuntersuchungen an der diskontinuierlichen Anlage

Mit den im Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Granulaten sowie zwei kommerziellen Produkten (ABS Polyflam RABS 90000 UV 5 und PS Polyflam HSF 36), die eine Größe von ca. 2,5 mm x 1,5 mm hatten, wurden Trennversuche an der diskontinuierlichen Anlage durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Referenzmessungen unter idealisierten Bedingungen, die maximal zu erzielen sind. Für die Versuche wurden die Standardbedingungen gewählt:

Aufladungsdauer: 4 min
 Relative Luftfeuchte: 22-25 %
 Temperatur: 30 °C
 Mischungsverhältnis: 1:1

Die Ergebnisse der Trennungen sind in den Abb. 62 für ABS/PS und in Ab. 63 für PA6/PVC dargestellt, Das Ausbringen in den einzelnen Kästen charakterisiert den hohen Trennerfolg für beide Mischungen.

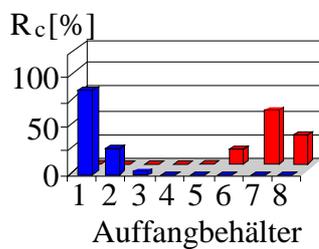


Abb. 62: Trennergebnis von zylinderförmigen ABS (■) und PS (■)

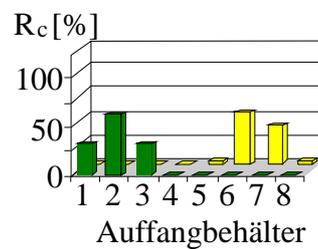


Abb. 63: Trennergebnis von zylinderförmigen PA6 (■) und PVC (■)

Tab. 8: Trennergebnisse an der diskontinuierlichen Anlage

Mischung Ladung	Rc ₁₋₃ [%]	c ₁₋₃ [%]	Rc ₆₋₈ [%]	c ₆₋₈ [%]	B [%]
ABS _z ⁺ / PS _z ⁻	99,5	99,7	98,6	99,9	99,9
PA6 _z ⁺ / PVC _z ⁻	98,8	99,6	95,9	99,6	99,2
ABS _z ⁺ / PS _{T20} ⁻	98,9	99,5	97,2	99,7	99,3
ABS ⁺ / PS ⁻	96,3	99,7	92,4	99,7	99,6
ABS ⁺ / PS _{kom} ⁻	99,5	99,8	97,1	99,8	99,8
ABS _{kom} ⁺ / PS ⁻	96,4	98,8	87,3	99,7	99,1
ABS _{kom} ⁺ / PS _{kom} ⁻	94,3	99,6	92,1	99,8	99,4

Auch für die umgeformten Granulate wurden die im Abschnitt 6.1.6 beschriebenen Ergebnisse bestätigt. ABS lud sich positiv auf und fiel in den Auffangbehältern 1 bis 3 an. PS lud sich entsprechend negativ auf und wurde in die Kästen 6 bis 8 gesammelt. PA6 und PVC stehen – verglichen mit ABS und PS – in der triboelektrischen Reihe noch weiter auseinander. Hier wurde PA6 positiv und PVC negativ aufgeladen. Die kompletten Trennergebnisse für alle untersuchten Mischungen sind Tab. 8 zusammengefasst. In der ersten Spalte sind die Mischungskomponenten und ihre jeweilige Aufladung ersichtlich. Die Spalten 2 und 3 enthalten die Wertstoffausbringen (Rc₁₋₃) und die Gehalte für die positiv geladenen Komponenten

ten (c_{1-3}). Die Spalte 4 und 5 zeigen die Wertstoffausbringen ($R_{c_{6-8}}$) und die Gehalte für die negativ geladene Komponenten (c_{6-8}).

Die Sortierkennzahl B in der letzten Spalte charakterisiert den Gesamttrennerfolg. Der Füllstoff Talkum (Zeile 3) verstärkt die negative Aufladung von PS und führt dadurch zu einer sehr guten Trennung. Neben den umgeformten Granulaten wurden auch die Standardprodukte in Zeile 4 und kommerzielle Produkte untersucht. Bei den kommerziellen Produkten handelt es sich um ein flammgeschütztes, stoßfestes PS (Polyflam HSF 36) und ein flammgeschütztes, gefärbtes ABS mit UV-Stabilisator (Polyflam RABS 90000 UV 5 lichtgrau), also Produkte, die mehrere Zusatzstoffe enthalten. Die Produkte wurden sowohl gegen die reine Standardkomponente als auch gegeneinander aufgeladen (Tab. 8, Zeile 5-7). Bei allen drei Varianten wurde eine sehr gute Trennung erreicht.

6.3.3 Ergebnisse erste Testphase

Die kontinuierliche Arbeitsweise der Aufladeeinheit wurde zunächst anhand der Trennung von ABS/PS- und PVC/PA6-Modellgemischen mit einem Mischungsverhältnis von 1:1 getestet. Das Modellsystem ABS/PS wurde an der diskontinuierlichen Anlage umfangreich untersucht und zeigte sehr gute Trennergebnisse. Der Einfluss von Füllstoff wurde mit der Mischung von ABS und PS mit 20 % Talkum untersucht. Das Modellgemisch PVC/PA6 bietet sich an, weil PVC und PA6 an den entgegengesetzten Enden der triboelektrischen Reihe stehen und sich somit bei Kontaktierung sehr gut gegeneinander aufladen und trennen lassen.

ABS/PS

Die ersten Versuche wurden mit einer ABS/PS-Mischung durchgeführt. Für die Blechanordnung wurde die Mäanderform gewählt. 2,5 kg der Kunststoffmischung wurden in den Aufgabetrichter eingefüllt und der Schneckendosierer gestartet. Nach einer Verweilzeit von ca. 4 min in der Aufladeeinheit fielen die ersten Granulate in den Elektroscheider. Dabei trat sowohl beim Übergang von der Aufladeeinheit in den Scheider als auch beim Auftreffen auf das Förderband sehr viel Spritzkorn auf. Des Weiteren kam es zu einer breiten Streuung der Produkte, sodass der Hauptanteil als Mischfraktion anfiel. Deshalb wurde bei diesen Versuchen nur die Reinheit der an den Elektroden anfallenden Trennprodukte analysiert. Die Ergebnisse sind Tab. 9 zusammengefasst.

Tab 9: Kontinuierliche Anlage: erste Ergebnisse ABS/PS

Versuchsnummer	U (positive Elektrode) [kV]	U (negative Elektrode) [kV]	Granulatgröße [mm]	c_{ABS} [%]	c_{PS} [%]
1	+72	-72	6 × 4	91,0	71,1
2	+50	-50	6 × 4	80,1	72,1
3	+30	-60	6 × 4	84,8	77,4
4	+25	-50	6 × 4	82,4	76,9
5	+72	-72	3 × 2	92,0	92,4
6	+40	-80	6 × 4	70,7	66,9
7	+72	-72	6 × 4	76,8	73,1

Es ist zu erkennen, dass im Bereich der Elektroden eine Trennung stattfindet, die jedoch noch nicht befriedigend ist. Eine Variation der Elektrodenspannung bringt gegenüber der Standardeinstellung (± 72 kV) keine Verbesserung. Auch eine Veränderung des Elektrodenabstandes (Versuche 6 und 7) führte zu schlechteren Ergebnissen. Nur mit den kleineren Granulaten

wird die Reinheit der Trennprodukte erhöht. Ursache für die schlechte Trennung können eine ungenügende Aufladung oder der schlechte Übergang von der Aufladeeinheit in den Scheider sein. Für eine weitere Aufklärung wurde nur der reine Kunststoff PS aufgegeben und nach Passieren des Scheiders in den acht Faradaykästen aus der diskontinuierlichen Anlage aufgefangen, um anschließend die Ladung zu messen. Die Breite des Förderbandes entspricht dabei der Gesamtbreite der acht Kästen. Obwohl die Ladungsmessung durch den Übergang vom kontinuierlichen Scheider zur Messstelle am diskontinuierlichen Scheider mit Messfehlern (Ladungsabfluss) verbunden ist, lässt das Ergebnis in Tab. 10 wesentliche Schlussfolgerungen zu.

Tab. 10: Ergebnisse der Ladungsmessung von PS

	Auffangkasten							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Q [nC]	-13,5	-17,2	-34,2	-64,3	-4,6	-3,5	-2,8	-7,5
m [g]	48,33	61,7	59,6	58,9	59,1	26,9	27,7	24,1

Alle, über der gesamten Bandbreite aufgefangene PS-Teilchen sind negativ aufgeladen. Das bedeutet, dass die Aufladung in der kontinuierlichen Wirbelschicht funktioniert, aber die anschließende Trennung nicht gelingt. Das gleiche gilt für das positiv geladene ABS. Der Übergang von der Aufladeeinheit in den Elektroscheider und der Abtransport der Trennprodukte musste optimiert werden.

Als erste Maßnahme wurde ein runder Trichter zwischen Aufladeeinheit und Elektroscheider angebracht, der für eine zentrale Aufgabe in der Mitte zwischen den Hochspannungselektroden sorgt.

Tab. 11: Ergebnisse der Trennung ABS/PS mit rundem Trichter

Versuchsnummer	U (positive Elektrode) [kV]	U (negative Elektrode) [kV]	Granulatgröße [mm]	c_{ABS} [%]	c_{PS} [%]
1	+72	-72	3 × 2	93,4	93,8
2	+30	-60	3 × 2	87,3	91,3

Damit konnte die Reinheit der Produkte geringfügig verbessert werden (Tab. 11). Das Wertstoffausbringen von PS liegt dabei bei 30 % und von ABS bei nur 10 %. Der runde Trichter ist nicht geeignet. Deshalb wurde für die weiteren Versuche der Trichter von der diskontinuierlichen Anlage, der eine linienförmige Aufgabe in den Scheider ermöglicht, und die 8 Auffangkästen für den Produktaustrag verwendet. In Abb. 64 ist das Ausbringen in diesen acht Auffangkästen für die größeren Granulate dargestellt.

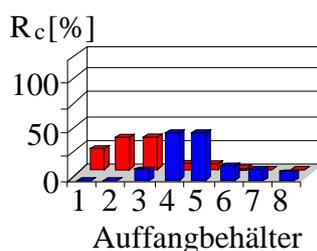


Abb. 64: Ausbringen von ABS (■) und PS (■) in den acht Auffangbehältern

Fasst man jeweils die äußeren Kästen als Wertprodukt auf, so ergibt sich für PS (zwei Auffangbehälter) ein Wertstoffausbringen von 58,7 % mit einer Reinheit von 96,2 % und für ABS (drei Auffangbehälter) ein Wertstoffausbringen von 18 % mit einer Reinheit von 88,8 %. Das war für die größeren Granulate schon eine Verbesserung, reicht jedoch für eine sortenreine Trennung nicht aus.

PA6/PVC

Die Untersuchungen wurden mit einer Mischung von PA6 und PVC fortgesetzt, weil diese beiden Kunststoffe in der triboelektrischen Reihe weiter auseinanderstehen als ABS und PS und damit eine bessere Trennung erwarten ließen. In Abb. 65 sind die Ergebnisse für das Ausbringen von PVC und PA6 dargestellt.

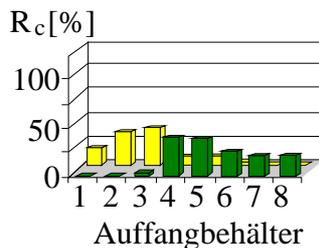


Abb. 65: Ausbringen von PA6 (■) und PVC (■) in den acht Auffangbehältern

Das PVC lud sich negativ auf und wurde vorwiegend in den Auffangbehältern 1 bis 3 ausgebracht. PA6 lud sich positiv auf, verteilte sich jedoch breiter auf den Auffangbehältern 4 bis 8. Eine Veränderung der Elektrodenspannung (höhere Spannung der negativen Elektrode -60 kV und geringere Spannung der positiven Elektrode +30 kV) führte nicht zu einer stärkeren Auslenkung von PA6 und damit zu einem höheren Wertstoffausbringen $R_{c, PA6}$ (Tab. 12).

Tab. 12: Ausbringen und Reinheit von PVC (Kasten 1-2) und PA6 (Kasten 6-8)

Versuchsnummer	U (positive Elektrode) [kV]	U (negative Elektrode) [kV]	$R_{c,PVC}$ [%]	c_{PVC} [%]	$R_{c,PA6}$ [%]	c_{PA6} [%]
K1	+72	-72	49	98,5	40	97
K2	+30	-60	52,6	98,6	12	89

Die nächsten Versuche dienten dazu, den Anlagendurchsatz zu bestimmen. Bei den Einstellungen Gebläse 90 %, Austrag offen, Trichter befestigt, wurden weitere kontinuierliche Versuche durchgeführt. Dabei wurden nur drei Produkte aufgefangen und das Mittelprodukt vom ersten Durchlauf wurde erneut aufgegeben (Tab. 13). Beim ersten Durchlauf wurden 2 kg der Mischung PVC/PA6 aufgegeben. Nach einer Verweilzeit von 4 min kam das Material am Elektroscheider an und nach weiteren 10 min war der Versuch beendet. Es wurden 1740 g aufgefangen, der Rest war Spritzkorn bzw. blieb in der Aufladeeinheit zurück. Der angestrebte Anlagendurchsatz von 10 kg/h wurde erreicht; die Trennung und das Ausbringen der Produkte war jedoch mit $R_{m,PVC} = 13,5 \%$ und $R_{m,PA6} = 9 \%$ unbefriedigend. Deshalb wurde das Mittelprodukt erneut aufgegeben. Durch die Rückführung des Mittelproduktes konnte das Ausbringen um 10 % gesteigert werden. Insgesamt war das Masseausbringen wesentlich geringer als bei den Versuchen K1 und K2 in Tab. 12. Ursache könnte der Trichter zwischen Aufladeeinheit und Elektroscheider sein. Er war bei den Versuchen in Tab.12 nur provisorisch angebracht und dadurch leicht geneigt. Das führte möglicherweise zu einem Abbremsen

des Materials beim Eintritt in den Elektroscheider. Durch das Ausrichten und die Befestigung des Trichters wird das Material mit zu großer Geschwindigkeit dem Elektroscheider zugeführt. Ursache ist die hohe Luftgeschwindigkeit beim Austritt aus der Aufladeinheit. Die Ergebnisse wurden in einem zweiten Versuch bestätigt.

Tab. 13: Versuch K6 mit Rückführung des Mittelproduktes PVC/PA6

	Erster Durchlauf	R_m [%]	Zweiter Durchlauf	gesamt [g]	R_m [%]	c [%]
PVC	235 g	13,5	184 g	418 g	24,7	97,5
PA6	171 g	9,8	129 g	300 g	17,8	86,8
Mischung	1334 g	76,7	968 g	968 g	57,9	
gesamt	1740 g	100,0	1281 g	1686 g		
t	10 s		7,5 s			
\dot{m} in kg/h	10,4		10,2			

ABS/PS mit Füllstoff

Als dritte Variante wurde eine ABS/PS-Mischung getestet, wobei das PS 20 % Talkum als Füllstoff (PS_{T20}) enthielt (eine Mischung, die sich in der diskontinuierlichen Anlage ebenfalls sehr gut trennen ließ). Auch hier wurde zunächst nur die Aufteilung der Produkte in den acht Auffangbehältern betrachtet. In Abb. 66 ist ein ähnliches Ergebnis wie bei der Trennung von PVC/PA6 (vgl. Abb. 65) zu erkennen.

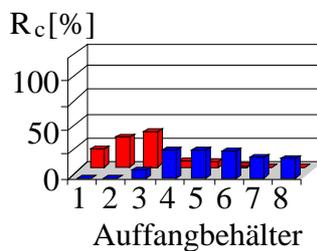


Abb. 66: Ausbringen von ungefüllten ABS (■) und PS mit 20 % Talkum (■) in den acht Auffangbehältern

Tab. 14: Versuch K7 Trennung ABS/PS_{T20} mit Rückführung des Mittelproduktes

	Erster Durchlauf	R_m [%]	Zweiter Durchlauf	gesamt [g]	R_m [%]	c [%]
PS_{T20}	102 g	11	71 g	173 g	20,3	95
ABS	75 g	8	40 g	115 g	13,4	86,1
Mischung	774 g	81	566 g	566 g	66,3	
gesamt	951 g	100	677 g	855 g	100,0	
t	5,8 s		4,2			
\dot{m} in kg/h	10,4		9,7			

Die negativ aufgeladene Komponente PS_{T20} reichert sich stark an der positiven Elektrode an, während sich die positiv geladene Komponente breit verteilt. Im Folgeversuch mit dem gerichteten Zylinder und drei Auffangbehältern ergaben sich die in Tab. 14 aufgeführten Daten. Auch hier waren ein geringes Masseausbringen und ein hoher Anteil in der Mischfraktion festzustellen. Die Reinheit der Produkte ist ebenfalls mit den Ergebnissen von PVC und PA6 vergleichbar.

Schlussfolgerungen

Die bisherigen Versuche zeigen an verschiedenen Materialien ähnliche Ergebnisse:

- Die Verweilzeit in der Aufladeeinheit beträgt unter den Bedingungen Mäanderform, Gebläse 90 % und Schnecke 0,7 ca. 4 min und ist für die Aufladung der verschiedenen Kunststoffe ausreichend.
- Der geplante Durchsatz von 10 kg/h wird erreicht.
- Die Luftgeschwindigkeit, die für den Transport der Partikel benötigt wird, ist am Austritt der Aufladeeinheit viel zu groß, deshalb fallen die Granulate mit zu hoher Geschwindigkeit in den Elektroscheider.
- Damit wird die Beschleunigungskraft wesentlich größer als die auslenkende elektrische Kraft und die Teilchen treffen hauptsächlich in der Mitte auf.
- Zusätzlich entsteht beim Auftreffen ein hoher Spritzkornanteil.
- Für den Übergang von der Aufladeeinheit in den Elektroscheider ist eine Vorrichtung z.B. Trichter erforderlich, die das Kunststoffgemisch gezielt in den Elektroscheider einleitet.
- Außerdem ist eine Optimierung des Überganges von der Aufladeeinheit zum Elektroscheider, des Elektroscheiders selbst und der Auffangvorrichtung erforderlich.
- Als erste Maßnahme werden Einbauten in den Trichter zur Beruhigung des aufgeladenen Materials eingebracht.

Konstruktive Änderungen am Zuführtrichter für den Elektroscheider

In den Zuführtrichter (Abb. 67) wurden zwei Leitflächen zum Abbremsen der Partikel eingebaut und die obere Öffnung wurde mit einem Siebbelag abgedeckt, wobei der Austragsschlitz der Aufladeeinheit genau mit der Öffnung des Siebbelages übereinstimmt.

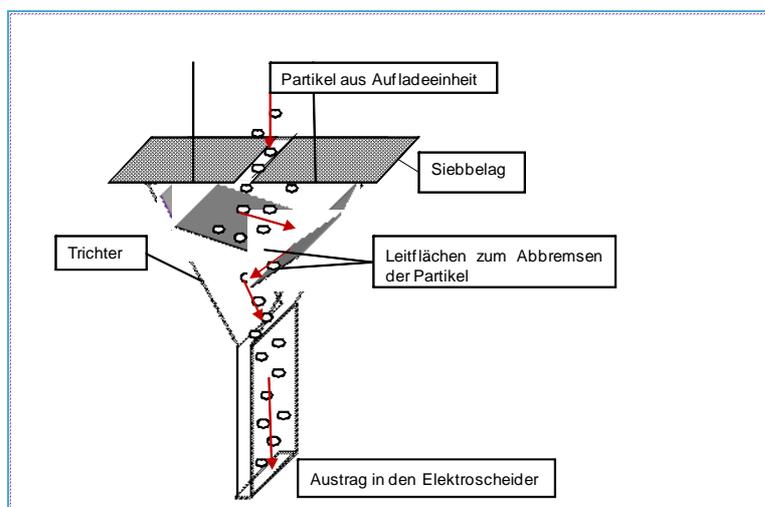


Abb. 67: Konstruktive Veränderungen am Trichter zwischen Aufladeeinheit und Elektroscheider

Die geladenen Partikel treten mit hoher Geschwindigkeit aus dem Austragsschlitz der Aufladeeinheit und werden auf der ersten Leitfläche abgebremst. Die abprallenden Partikel werden vom Siebbelag zurückgehalten, gleichzeitig kann aber die Luft über die Sieböffnungen entweichen. Durch die zweite Leitfläche und die Trichterwand werden die Partikel weiter abgebremst, sodass sie schließlich im freien Fall dem Elektroscheider linienförmig zu geführt und entsprechend ihrer Ladung zu den Elektroden ausgelenkt werden.

6.3.4 Ergebnisse zweite Testphase

Aus den Ergebnissen der ersten Testphase ging auch hervor, dass nicht das gesamte aufgegebene Material zurückgewonnen wurde. In der Aufladeeinheit gibt es Toträume in denen geringe Materialmengen liegen bleiben und nicht weitertransportiert werden.

Deshalb wurde vor den weiteren Untersuchungen jeweils 1 kg von dem zu trennenden Gemisch durch die Anlage geschickt und die Ablagerungen in der Anlage belassen. Das entspricht im praktischen Betrieb einer Einfahrphase. Anschließend erfolgten die Versuche mit 2 kg Material. Es wurden wiederum die drei Mischungen PA6/PVC, ABS/PS und ABS/PS_{T20} mit den größeren zylindrischen Granulaten untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 15 ersichtlich. Spalte 2 enthält die Masseaufteilung der Produkte in den 3 Auffangkästen und Spalte 3 den Prozentualen Anteil (Masseausbringen). Auch hier wird die Gesamtmasse von 2 kg noch nicht vollständig erreicht.

Tab. 15: Trennergebnisse von PA6/PVC-, ABS/PS- und ABS/PS_{T20}- Granulatgemischen nach konstruktiven Veränderungen.

	Masse [g]	R _m [%]	R _c [%]	c [%]	\dot{m} [kg/h]
Versuch K8					
PVC	634,9	34,1	67,9	99,66	
PA6	775,9	41,7	83,4	98,8	
Mischung	449,9	24,2			
gesamt	1860,2	100,0			8,6
Versuch K9					
PS	383,9	22,9	45,7	99,6	
ABS	789,2	47,2	94,3	98,4	
Mischung	500,3	29,9			
gesamt	1673,4	100,0			9,2
Versuch K10					
PS _{TS20}	452,0	29,2	58,4	99,4	
ABS	769,1	49,6	98,3	99,0	
Mischung	328,2	21,2			
gesamt	1549,3	100,0			8,9
Versuch K11					
PS	1058	21,6	43,1	99,8	
ABS	2281	46,5	93	98,8	
Mischung	1566	31,9			
gesamt	4905	100,0			11,2

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Vorherigen (Tab. 11, 13, 14) so wird deutlich, dass durch die konstruktiven Veränderungen für alle 3 Mischungen sowohl die Reinheit der Produkte als auch das Wertstoffausbringen gesteigert werden konnten. So steigt z. B. das Masseausbringen von PVC ohne Rückführung von 13,5 % auf 34,1 % und von PA6 von 9 % auf 41,7 %. Es entstehen jeweils zwei Produkte hoher Reinheit wie in der diskontinuierlichen Anlage.

Beim Versuch K11 wurde eine größere Menge (5 kg) durchgesetzt. Hier zeigte sich, dass die Anlage auch über eine längere Zeit stabil lief und die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar waren, wenn man Versuch K9 und Versuch 11 vergleicht. Durch eine Rückführung des Mittelproduktes (wie es bei technischen Prozessen üblich ist) bei Versuch K11 kann das Wertstoffausbringen von PS auf 50 % und von ABS auf nahezu 100 % gesteigert werden.

Schließlich wurden auch noch kommerzielle Granulate getestet, die mehrere Zusatzstoffe enthielten (Tab. 16). Leider waren diese Granulate nur in wesentlich kleinerer Partikelgröße erhältlich.

Tab. 16: Trennergebnisse mit kommerziellen Granulaten

	Masse [g]	R _m [%]	R _c [%]	c [%]	\dot{m} [kg/h]
Versuch K13					
PVC	564,7	31,3	62,6	96,7	
PA6	521,5	29	57,9	98,2	
Mischung	716,1	39,7			
gesamt	1801,3	100,0			10
Versuch K16					
PS	661	33,1	61	92,1	
ABS	360	18	33,6	93,1	
Mischung	974	48,9			
gesamt	1995	100,0			8,6
Versuch K17					
PS	352,2	17,7	32,8	92,7	
ABS	186,7	9,4	16,6	88,4	
Mischung	1448,9	72,9			
gesamt	1987,8	100,0			9,2

Beim Versuch K13 wurde das ungefüllte ABS (runde Form, $x_{50} = 3,87$ mm) mit dem wesentlich kleineren kommerziellen PS (Polyflam HSF 36) gemischt. Die Trennergebnisse sind deutlich schlechter als in der diskontinuierlichen Anlage (vgl. Tab.8). Das Gleiche gilt, wenn das kommerzielle ABS (Polyflam RABS 90000 UV 5) mit dem ungefüllten PS (zylindrische Form, $x_{50} = 3,62$ mm) gemischt wird. Hier wurden nur noch 33,6 % vom ABS ausgebracht. Das schlechteste Ergebnis zeigt sich, wenn beide kommerziellen Produkte getrennt werden. Das deutet darauf hin, dass nicht die Zusatzstoffe im Füllstoff das Trennergebnis bestimmen, sondern die Partikelgröße. Die kleinen Partikel wurden offensichtlich nicht genügend abgebremst und traten mit zu hoher Geschwindigkeit in den Elektroscheider ein. Deshalb stieg auch mit abnehmender Partikelgröße der Anteil in der Mittelfraktion. Für solche Produkte sind noch weitere Optimierungen erforderlich. Bei den technischen Recyclingprodukten han-

delt es sich meistens um *geschredderte* Produkte mit Partikelgrößen im Bereich von 5 bis 10 mm, mit denen diese Probleme nicht auftreten.

Damit steht im Institut der MVT/AT der TU Freiberg eine kontinuierlich arbeitende Versuchsanlage zur Elektrosortierung zur Verfügung mit der verschiedene Kunststoffe getrennt werden können. Die neu entwickelte kontinuierlich arbeitende Wirbelschicht ist zur Aufladung der Kunststoffe geeignet. Der Elektroscheider und das Transportband wurden aus einer älteren Anlage übernommen und sollten noch weiter optimiert werden. Ebenso sollte der Übergang von der Aufladeeinheit zum Elektroscheider noch weiter verbessert werden.

7 Verwendung der Zuwendungen

Das Projekt wurde von Wissenschaftlern, Technikern, Diplomanden und studentischen Hilfskräften von den Forschungsstellen *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik* der *Technischen Universität Bergakademie Freiberg* und dem *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.* bearbeitet.

Die Zuwendungen wurden – entsprechend des aufgestellten Finanzierungsplans – vorzugsweise als Personalmittel und zum Aufbau einer neu entwickelten kontinuierlichen Anlage zur Elektrosortierung sach- und termingerecht verbraucht. Zur Abstimmung der Projektbeteiligten und zur Präsentation der Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen (vgl. Abschnitt 12) wurde ein kleiner Teil der Zuwendungen zur Kostendeckung der notwendigen Dienstreise verwandt.

Für die erfolgreiche Projektarbeit waren nicht nur Recherche- und Entwicklungsarbeiten zum Stand der Technik und zum Aufbau der kontinuierlich arbeitenden Anlage zur Elektrosortierung notwendig, sondern auch die Ausarbeitung und Auswertung der Versuchspläne, die *Compoundierung* der Granulate und ihre umfassende Charakterisierung, die Vorbehandlung der Granulatgemische durch Elektronenbestrahlungen und die Durchführung der zahlreichen Trennversuche notwendig. Dabei hatten die Versuche zur Sortierung binärer Granulatgemische zum Einen die Aufgabe, die Versuchsbedingungen und die Wirkprinzipien der Scheider zu optimieren, zum Anderen wurden grundlegende Ergebnisse zum Auflademechanismus und seiner Beeinflussung durch Füllstoffe bzw. Additive erhalten.

8 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Da der Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf das Aufladeverhalten unterschiedlicher Kunststofftypen und damit der Einfluss dieser Stoffe auf die Trennerfolge bei der Elektrosortierung bislang weitgehend unbekannt war, sind die erzielten Projektergebnisse von großer Bedeutung für die Anwender der Elektrosortierung von Kunststoffen. Die Kenntnis, dass Zuschlagstoffe in den Matrices unterschiedlicher Kunststoffe das Aufladeverhalten beeinflussen oder dominieren können, dient zweifellos der Qualitätssicherung beim Kunststoffrecycling. Problematischer erschien dabei, dass beim industriellen Einsatz der Elektrosortierung zum Kunststoffrecycling häufig Kunststoffgemische unbekannter Zusammensetzung und wechselnder *Chargen* sortiert werden müssen. Da unter technischen Bedingungen eine genaue analytische Bestimmung der Zusammensetzung der jeweils zu trennenden Stoffgemische weder anstrebenswert noch möglich ist, haben wir uns im Rahmen dieses Forschungsvorhabens insbesondere auch mit der Suche nach Vorbehandlungsmethoden beschäftigt, die die intrinsischen Beiträge von Füllstoffen bzw. Additiven zur Bruttoaufladung der Granulate kompensieren und so eine polymerspezifische Trennung ermöglichen sollten. Trennprobleme, die bei einigen Kunststoffgemischen aufgrund sehr hoher Füllgrade mit mineralischen Füllstoffen auftraten und die trotz Vorbehandlungsmaßnahmen nicht behoben werden konnten, würden in der Praxis durch eine – einer Elektrosortierung vorgeschalteten – Schwimm-Sink-Trennung nicht auftreten. Neben den Untersuchungen zur ladungssteuernden Wirkung von Additiven

und Füllstoffen, wurden auch die bekannten Wirkungen variierender Luftfeuchten und die An- bzw. Abwesenheit von Feinstaub auf das Aufladeverhalten und damit auf die Trennqualität erneut beleuchtet. Interessant erscheint hier, dass sonst weitgehend unpolare Kunststoffe durch ihre Additivierung bzw. durch ihr Füllen Wasser adsorptiv binden können, sodass bei erhöhten relativen Luftfeuchten ein zusätzliches Fließen von Ladungen anzunehmen ist.

Die grundlegenden Ergebnisse zur Ladungssteuerung durch Additive bzw. Füllstoffe wurden zur Trennung von Kunststoffgemischen auf eine kontinuierlich arbeitende Anlage zur Elektrosortierung übertragen (*Scaling-up*). Dies eröffnete nicht nur eine neue Möglichkeit zum Nutzen der Elektrosortierung im technischen Maßstab, es zeigte vielmehr, dass die vielfältigen Prozessparameter unabhängig von der Zusammensetzung der zu sortierenden Kunststoffe beherrschbar sind und prinzipiell stoffliche Trennungen in guter Qualität ermöglichen. Dies gilt allerdings nur, wenn geeignete Vorbehandlungen der Kunststoffgemische intrinsische Beiträge von Additiven bzw. Füllstoffen (in der technischen Praxis meist unbekannter Art und Menge) kompensieren.

9 Wirtschaftlicher Nutzen für kmU

Die werkstoffliche Wiederverwertung von Kunststoffabfällen ist inzwischen – neben dem vielfach erklärten politischen Ziel – zweifellos auch eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Aufgabe geworden, die zukünftig nicht nur in Deutschland und Europa mit Enthusiasmus, förderpolitischen und legislativen Maßnahmen verfolgt wird. Historisch gewachsen haben sich in Deutschland insbesondere klein- und mittelständische Unternehmen nicht nur beim eigentlichen werkstofflichen Kunststoffrecycling engagiert, es gibt seit einigen Jahren klein- und mittelständische Maschinen- und Anlagenbauer, die sich auf die Konstruktion und den Bau von Maschinen und Anlagen zum Kunststoffrecycling spezialisiert haben und deren Produkte weltweit gefragt sind. Hierzu gehört auch der Bau von Komplettanlagen zur Elektrosortierung. Die hier tätigen Unternehmen betreiben neben ihren maschinenbauorientierten Unternehmen auch Unternehmen zur Kunststoffsortierung, sodass gelöste Probleme beim Sortieren unmittelbar ihre technische Umsetzung erfahren können.

Das Forschungsvorhaben hatte – letztlich durch die Mitglieder des *Projektbegleitenden Ausschusses* befördert – praxisbekannte Probleme der Elektrosortierung aufgegriffen und grundlegend mit dem Ziel untersucht, ein vertieftes Verständnis für die Beeinflussung der Aufladbarkeit von Kunststoffen durch typische Additive und Füllstoffe zu erhalten. Ziel war es auch, aus den gewonnenen Kenntnissen eine Strategie zur Kompensation von kooperativ oder konkurrierend wirkenden Einflüssen zwischen der ladungssteuernden Wirkung der Kunststoffmatrizes, den eingebrachten Füllstoffen bzw. Additiven und prozessbeteiligten Stoffen (z.B. Rest- und Luftfeuchte) zu finden. Mit dem Erreichen der Projektziele wird insbesondere den klein- und mittelständischen Unternehmen ein Werkzeug in die Hand gegeben, Ursachen für Probleme beim Trennen von praxisrelevanten Kunststoffgemischen gezielt nachzugehen und diese Probleme in verallgemeinernder Art und Weise zu beseitigen.

Die Forschungsergebnisse können somit hauptsächlich in den Fachgebieten *Rohstoffe* (Aufbereitung primär genutzter Kunststoffprodukte zur sekundären Nutzung), *Werkstoffe* (Einsatz von Recycling-Kunststoffen als Werkstoffe), *Verfahrenstechnik* (Entwicklung von Verfahren zur Vorbehandlung und Separation von Gemischen) genutzt werden. Die Wirtschaftszweige *Chemische Industrie* und *Herstellung von Kunststoffwaren* sind die Hauptnutzer der Forschungsergebnisse. Aber auch der *Maschinenbau* kann von den Forschungsergebnissen profitieren, da hier insbesondere klein- und mittelständische deutsche Unternehmen Anlagen zum maschinellen und automatisierten Kunststoffrecycling bauen und weltweit exportieren. Unter diesem Aspekt sind auch die Entwicklung und der Aufbau einer kontinuierlich arbeitenden Anlage zur Aufladung von Kunststoffgranulaten in einer Wirbelschicht und zur nachfolgenden Elektrosortierung von potentiell Interesse für klein- und mittelständische Maschinen-

bauunternehmen. Anhand der aufgebauten Anlage wurde allgemeingültig gezeigt, welche Parameter zum Betreiben einer solchen Anlage bestimmt werden müssen, wie diese gewonnenen Parameter zum optimalen Auslegen und Betreiben der Anlage zu verknüpfen sind und durch welche konstruktiven Schritte dies in ein technisch realisierbares Produkt überführt werden kann.

Seitens der klein- und mittelständische Unternehmen, die sich mit Kunststoffrecycling beschäftigen, besteht ein hohes wirtschaftliches Interesse an trocken arbeitenden Technologien zum Recycling. Dies gilt insbesondere für ABS/PS-Abfallgemische, die in großen Mengen in der Elektro-, Elektronik-, Kommunikations- und Konsumgüterproduktion sowie im Fahrzeugbau anfallen. Die Ergebnisse des Projekts tragen hier zur Qualitätsverbesserung und zur Qualitätssicherung bei. Auch andere Branchen, die sich mit der stofflichen und energetischen Wiederverwertung von Kunststoffabfällen befassen, können von den erzielten Ergebnissen, speziell zu den gefüllten und mit Additiven ausgestatteten Kunststoffen profitieren.

10 Innovativer Beitrag der Ergebnisse zu industriellen Anwendungsgebieten

Die sortenreine Trennung von Kunststoffgemischen durch ein kontinuierliches, im Trockenen arbeitendes und damit preiswertes technisches Verfahren war bisher nur teilweise gelungen. Im Rahmen des Projekts wurden die triboelektrische Aufladung und der Separationsprozess der aufgeladenen Kunststoffgemische im elektrostatischen Feld eines Freifallscheiders erfolgreich auf eine Anlage übertragen, die eine kontinuierlich arbeitende Prozessgestaltung ermöglicht. Die Elektrosortierung ist neben der infrarotgestützten Sortierung das einzige automatisiert arbeitende Sortierverfahren, das eine Separation von Kunststoffgemischen im Trockenen, d.h. nicht in einer Fest/Flüssig-Verteilung erlaubt. Die neue Anlage ermöglicht ein Trennen größerer Stoffströme von *geschredderten* Produkten. Das *Schreddern* vor dem Separationsschritt hat den Vorteil, dass durch Kleben, Schweißen, *Crimpen* oder Schnappverbindungen gefügte Kunststoff/Kunststoff-Verbindungen getrennt und sortiert werden können.

Kunststoffe, die in Gebrauchsgütern Anwendung finden, sind fast ausnahmslos gefüllt und additiviert. Unsere Ergebnisse zeigten, dass im Gegensatz zu oberflächlichen Verunreinigungen und Kontaminationen der zu trennenden Kunststoffgranulate, Füllstoffe, Pigmente und Additive eine signifikante Wirkung auf das Aufladeverhalten haben können, besonders im System ABS/PS. Durch eine Elektronenstrahlvorbehandlung war es möglich die ladungssteuernden Einflüsse der Additive bzw. Füllstoffe in den ABS/PS-Gemischen zu kompensieren und eine polymerspezifisch Trennung in guter Qualität sicherzustellen.

11 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Das Vorhaben wurde von einer Reihe klein- und mittelständischer Unternehmen durch die Mitarbeit im *Projektbegleitenden Ausschuss* unterstützt. Dabei wurden Firmen verschiedener Branchen, die sich auf Produkte und Technologien für das Recycling von Kunststoffabfällen spezialisiert haben, vereint. Besonders die Firma Hamos GmbH hat uns bei der Skalierung des Labor-Freifallscheiders auf technologisch relevante Maßstäbe verfahrenstechnisch beratend zur Seite gestanden. Die Firma Hamos GmbH war und ist sehr interessiert an den Ergebnissen, besonders den Erkenntnissen zu den Einflüssen von Additiven und Füllstoffen. Auch die anderen Firmen, die sich mit der Aufbereitung und Trennung von Kunststoffgemischen sowie der Weiterverarbeitung von Recyclaten beschäftigen, waren sehr interessiert an den Ergebnissen. Als Anwender von Separationsverfahren sind diese Firmen nicht nur mit den praxisrelevanten Problemen der Kunststoffsortierung sondern auch mit den zukünftigen Erwartungen politischer Entscheidungsträger und gesetzlichen Vorschriften zur stofflichen Wiederverwertung von Kunststoffabfällen vertraut.

Des Weiteren war im *Projektbegleitenden Ausschuss* ein überregional bedeutsames Transferzentrum für die stoffliche Wiederverwertung von Kunststoffabfällen vertreten. Durch seine Öffentlichkeitsarbeit und wissenschaftlichen Veranstaltungen wurde und wird gewährleistet, dass die wissenschaftlichen Projektergebnisse einem breiten Kreis von Interessenten aus der Industrie und öffentlichen Einrichtungen zur Verfügung stehen.

Forschungsergebnisse wurden fortlaufend den Mitgliedern des *Projektbegleitenden Ausschusses* vorgestellt und von ihnen ausführlich diskutiert. Potenziell interessierte Unternehmen wurden bei Tagungen gezielt angesprochen, sodass weitere Firmen während der Projektlaufzeit in den *Projektbegleitenden Ausschuss* eingebunden werden konnten.

Die Projektleiter hielten akademische Lehrveranstaltungen an den Technischen Universitäten Bergakademie Freiberg und Chemnitz, in denen die Projektergebnisse an Studenten in verallgemeinerter Form weitergegeben wurden.

Weiterhin ist geplant die Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften, wie z.B. CIT, Aufbereitungstechnik, Journal of Electrostatics, Progress in Colloid and Polymer Science, durch Tagungsteilnahmen (Berg- und Hüttenmännischer Tag, Aufbereitung und Recycling, Kunststoffrecycling in Sachsen, Technomer) und dem Internet (Homepages der beteiligten Forschungseinrichtungen) zu veröffentlichen. Einige Forschungsergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Tagungen bereits präsentiert (Abschnitt 12).

Zur Langen Nacht der Wissenschaft am 06.07.2012 wurde das Projekt am *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.* Dresden vorgestellt. Dafür wurde ein Kurzfilm gedreht, der die Elektrosortierung von Kunststoffen und das Wirkprinzip der elektrostatischen Aufladung anschaulich erklärt.

Mit dem Ende des Vorhabens wird eine Demonstrationsanlage zur Vorführung vor Studenten und interessierten Fachleuten zur Verfügung stehen. Diese Anlage kann dann auch in der Lehre zur Durchführung von Studien- und Diplomarbeiten genutzt werden. Mit der Anlage bieten sich auch Ansätze für weiterführende Entwicklungsarbeiten mit neuen Stoffsystemen.

12 Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Vorträge:

V. Albrecht; E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; F. Simon: *Electrostatic separation to sort and recycle plastic wastes*. Annual Meeting of the Polymer Processing Society, 04.07-08.07.2010, Banff (Kanada).

F. Simon; V. Albrecht; E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker: *Mixed plastic wastes sorted by electrostatic separation*. 8th European Congress of Chemical Engineering, 25.09.-29.09.2011, Berlin.

V. Albrecht; E. Reinsch; U.A. Peuker; F. Simon: *Fundamentals of the electrostatic separation of mixed plastic wastes*. The 7th International Conference on Applied Electrostatics, 17.09.-19.09.2012, Dalian (VR China).

E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; F. Simon; U. Gohs; B. Kretzschmar; V. Albrecht: *Kunststoffrecycling – Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Elektrosortierung und Kompensationsmöglichkeiten durch geeignete Vorbehandlungen*. Technomer 2013, 14.11.-15.11.2013, Chemnitz

Poster:

V. Albrecht; F. Simon; U. Gohs; M. Gabriel; E. Reinsch; U.A. Peuker: *Einfluss von Additiven, Füllstoffen und Verunreinigungen auf die Elektrosortierung von Kunststoffabfällen*, Polymeric Materials 2010, 15.09.-17.09.2010, Halle.

V. Albrecht; F. Simon; U. Gohs; U.A. Peuker; E. Reinsch: *Electrostatic separation of polyolefin mixtures*, Polywheel 2010 – First International Symposium on Polymer Modification with High Energy Electrons, 24.11-26.11.2010, Dresden.

V. Albrecht; F. Simon; U. Gohs; R. Kretzschmar; E. Reinsch; U.A. Peuker: *Influence of additives and fillers on the electrostatic separation of polyolefin mixtures*. Eurofillers 2011 – 9th Meeting of the Eurofillers International Conference, 21.08.-25.08.2011, Dresden.

A. Frey; E. Reinsch; U.A. Peuker; V. Albrecht; F. Simon: *Der Einfluss von Füllstoffen und Additiven in Kunststoffen auf die Elektrosortierung*. Tagung Aufbereitung und Recycling 09.11.-10.11.2011, Freiberg.

E. Reinsch; A. Frey, A.; U.A. Peuker; V. Albrecht; F. Simon: *Die Anwendung der Elektrosortierung beim Recycling von gefüllten und additivierten Kunststoffen*. ProcessNet-Jahrestagung 10.09.-13.09.2012, Karlsruhe.

V. Albrecht; F. Simon; C. Zschech; B. Kretzschmar, B.; E. Reinsch; A. Frey; U.A. Peuker: *Influence of additives and fillers on the electrostatic separation of ABS/PS mixtures*. Polymeric Materials 2012, 12.09.-14.09.2012, Halle.

V. Albrecht; F. Simon; C. Zschech; U. Gohs; B. Kretzschmar, B.; E. Reinsch; U.A. Peuker: *Influence of fillers on the electrostatic separation of several polymer mixtures*, Eurofillers 2013 – 10th Meeting of the Eurofillers International Conference, 25.08.-29.08.2013, Bratislava (Slovakische Reublik).

Beiträge in Tagungsbänden:

V. Albrecht; F. Simon; U. Gohs; M. Gabriel; E. Reinsch; U.A. Peuker: *Einfluss von Additiven, Füllstoffen und Verunreinigungen auf die Elektrosortierung von Kunststoffabfällen*. Polymeric Materials 2010, 15.09.-17.09.2010, Halle, ISBN 978-3-86829-282-4 (2010) 208.

V. Albrecht; F. Simon; C. Zschech; B. Kretzschmar, B.; E. Reinsch; A. Frey; U.A. Peuker: *Influence of additives and fillers on the electrostatic separation of ABS/PS mixtures*. Polymeric Materials 2012, 12.09.-14.09.2012, Halle, ISBN 978-3-86829-517-7 (2012).

E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; F. Simon; U. Gohs; B. Kretzschmar; V. Albrecht: *Kunststoffrecycling – Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Elektrosortierung und Kompensationsmöglichkeiten durch geeignete Vorbehandlungen*. Technomer 2013, 14.11.-15.11.2013, Chemnitz, *im Druck*.

V. Albrecht; E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; U. Gohs; B. Kretzschmar; F. Simon: *Der Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Elektrosortierung von Kunststoffabfällen – Teil 1: Modellmischungen*. Aufbereitungstechnik, *in Vorbereitung*.

V. Albrecht; E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; U. Gohs; B. Kretzschmar; F. Simon: *Der Einfluss von Additiven und Füllstoffen auf die Elektrosortierung von Kunststoffabfällen – Teil 2: ABS/PS-Mischungen*. Aufbereitungstechnik, *in Vorbereitung*.

V. Albrecht; E. Reinsch; R. Schünemann; U. A. Peuker; G. Schubert; K. Husemann; F. Simon: *Elektrosortieren von Kunststoffen*. Übersichtsartikel seitens der Chemie Ingenieur Technik angefragt.

13 Durchführende Forschungsstellen

Nr.	1	2
Forschungsstelle	TU Bergakademie Freiberg Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik	Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.
Adresse	Agricolastraße 1 09599 Freiberg	Hohe Str. 6 01069 Dresden
Leiter der Forschungsstelle	Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker	Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Voit
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker	Dr. rer. nat. Frank Simon

Unterschriften der Projektleiter

Freiberg, den Datum 20.09.2013

Prof. Dr.-Ing. Urs A. Peuker
Projektleiter der Forschungsstelle 1

Dresden, den Datum 20.09.2013

Dr. Frank Simon
Projektleiter der Forschungsstelle 2

Das Forschungsvorhaben 16531.BR1/2 der Forschungsvereinigung DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

14 Formelverzeichnis

A	Fläche	$[A]=$	m^2
Ar	ARCHIMEDES-Zahl	$[Ar]=$	-
B	Sortierkennzahl	$[B]=$	-
Be	BERANEK-Zahl	$[Be]=$	-
c	Konzentration	$[c]=$	-
c_w	Widerstandsbeiwert	$[c_w]=$	-
d	Durchmesser	$[d]=$	m
g	Erdbeschleunigung	$[g]=$	m^2/s
h	Höhe	$[h]=$	m
$Hg(t)$	Häufigkeitsfunktion	$[H(t)]=$	-
K	Kehrwert der ARCHIMEDES-Zahl	$[K]=$	-
k	Blendenöffnungskonstante	$[k]=$	-
m	Masse	$[m]=$	kg
\dot{m}	Massestrom/Durchsatz	$[\dot{m}]=$	kg/h
Ma	MARTIN	$[Ma]=$	-
p	Druck	$[p]=$	Pa
Re	REYNOLDS-Zahl	$[Re]=$	-
Re_A	REYNOLDS-Zahl am Austragspunkt	$[Re_A]=$	-
Re_L	REYNOLDS-Zahl am Lockerungspunkt	$[Re_L]=$	-
R_c	Wertstoffausbringen	$[R_c]=$	%
R_m	Masseausbringen	$[R_m]=$	%
$Sg(t)$	Summenfunktion	$[S(t)]=$	-
s^2	Varianz	$[s^2]=$	
S_V	volumenspezifische Oberfläche	$[S_V]=$	m^2/m^3
t	Zeit	$[t]=$	s
T	Temperatur	$[T]=$	$^{\circ}C$
u	Geschwindigkeit	$[u]=$	m/s
U	Spannung des Frequenzumrichters des Gebläses	$[U]=$	V
u_A	Austragsgeschwindigkeit	$[u_A]=$	m/s
u_L	Geschwindigkeit am Lockerungspunkt	$[u_L]=$	m/s
V	Volumen	$[V]=$	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	$[\dot{V}]=$	m^3/h
v_L	Luftgeschwindigkeit an der Blende	$[v_L]=$	m/s
x	Korngröße	$[x]=$	m
x_{32}	Sauterdurchmesser	$[x_{32}]=$	m
y	Feststoffanteil	$[y]=$	-
η_F	dynamische Viskosität des Fluides	$[\eta_F]=$	Pa/s
ν_F	kinematische Viskosität des Fluides	$[\nu_F]=$	m^2/s
ρ_F	Fluidichte	$[\rho_F]=$	kg/m^3
ρ_S	Feststoffdichte	$[\rho_S]=$	kg/m^3
ε	relatives Zwischenraumvolumen	$[\varepsilon]=$	-
μ	Massenanteil	$[\mu]=$	-

Φ	Feuchte	$[\Phi]=$	-
φ	Anteil der freien Fläche	$[\varphi]=$	-
ζ	Strömungsbeiwert	$[\zeta]=$	-
ψ	WADELL-, Korn-Formfaktor	$[\psi]=$	-

ANHANG 1: Wirbelschichtberechnung nach REH für 20 °C

Material			ABS _{rund}	ABS _{zyl}	PA _{rund}	PA _{zyl}	PE _{rund}	PE _{zyl}	PET _{zyl}
<u>obere Wirbelschichtgrenze=Sinkgeschwindigkeit der kleinsten Partikel</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	$Ar(x_{10})$	-	1,47E+06	2,59E+06	1,63E+06	2,90E+06	3,45E+06	3,47E+06	1,85E+06
REYNOLDS-Zahl nach BERANEK	$Re_{BE}(x_{10})$	-	2,06E+03	2,75E+03	2,17E+03	2,91E+03	3,18E+03	3,19E+03	2,31E+03
REYNOLDS-Zahl nach MARTIN	$Re_{MA}(x_{10})$	-	2,04E+03	2,77E+03	2,16E+03	2,94E+03	3,23E+03	3,24E+03	2,31E+03
Sinkgeschwindigkeit	$u_{Sink}(x_{10})$	m/s	9,38	10,13	9,48	10,43	10,37	10,38	10,81
<u>untere Wirbelschichtgrenze=Lockerungsgeschwindigkeit</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	Ar	-	1,8E+06	3,6E+06	2,7E+06	3,2E+06	5,4E+06	4,0E+06	2,1E+06
Kehrwert der ARCHIMEDES-Zahl	K	-	5,6E-07	2,8E-07	3,7E-07	3,1E-07	1,8E-07	2,5E-07	4,7E-07
Porosität nach WEN/YU	$\varepsilon_L(\psi)$	-	0,40	0,41	0,38	0,41	0,41	0,44	0,40
<i>WEN/YU:</i>									
REYNOLDS-Zahl Lockerungspunkt	Re_L	-	2,4E+02	3,5E+02	3,0E+02	3,3E+02	4,4E+02	3,7E+02	2,6E+02
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	0,99	1,14	1,08	1,12	1,21	1,14	1,15
<i>ERGUN:</i>									
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	0,96	1,14	0,98	1,13	1,19	1,30	1,10
<u>Wirbelschichtberechnung nach REH</u>									
Schnittpunkt mit WP-linie	Re_L	-	250	400	330	400	500	450	300
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,04	1,30	1,18	1,37	1,38	1,37	1,30
Schnittpunkt mit Austragslinie	Re_A	-	2400	3100	3000	3100	4000	3500	2700
Austragsgeschwindigkeit	u_A	m/s	9,97	10,07	10,77	10,58	11,03	10,65	11,72
<hr/>									
Material			PMMA _{zyl}	POM _{rund}	PP _{rund}	PP _{zyl}	PS _{zyl}	PS _{zyl}	PVC _{rund}

ANHANG 1: Wirbelschichtberechnung nach REH für 20 °C

(Tracer)									
<u>obere Wirbelschichtgrenze=Sinkgeschwindigkeit der kleinsten Partikel</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	$Ar(x_{10})$	-	2,24E+06	1,78E+06	2,01E+06	1,40E+06	1,16E+06	1,94E+06	5,93E+06
REYNOLDS-Zahl nach BERANEK	$Re_{BE}(x_{10})$	-	2,55E+03	2,27E+03	2,42E+03	2,01E+03	1,82E+03	2,37E+03	4,18E+03
REYNOLDS-Zahl nach MARTIN	$Re_{MA}(x_{10})$	-	2,57E+03	2,26E+03	2,42E+03	1,99E+03	1,80E+03	2,37E+03	4,31E+03
Sinkgeschwindigkeit	$u_{Sink}(x_{10})$	m/s	10,56	10,52	9,33	8,75	9,02	9,76	12,86
<u>untere Wirbelschichtgrenze=Lockerungsgeschwindigkeit</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	Ar	-	2,0E+06	2,1E+06	2,5E+06	1,6E+06	1,2E+06	2,3E+06	6,7E+06
Kehrwert der ARCHIMEDES-Zahl	K	-	5,0E-07	4,7E-07	3,9E-07	6,1E-07	8,1E-07	4,4E-07	1,5E-07
Porosität nach WEN/YU	$\varepsilon_L(\psi)$	-	0,44	0,40	0,39	0,42	0,41	0,40	0,41
<i>WEN/YU:</i>									
REYNOLDS-Zahl Lockerungspunkt	Re_L	-	2,5E+02	2,6E+02	2,9E+02	2,3E+02	1,9E+02	2,7E+02	4,9E+02
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,07	1,12	1,01	0,92	0,91	1,04	1,43
<i>ERGUN:</i>									
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,21	1,08	0,94	0,95	0,93	1,00	1,41
<u>Wirbelschichtberechnung nach REH</u>									
Schnittpunkt mit WP-linie	Re_L	-	300	300	330	250	210	330	600
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,26	1,28	1,15	1,01	0,99	1,26	1,75
Schnittpunkt mit Austragslinie	Re_A	-	2700	2700	3000	2400	2000	3000	4600
Austragsgeschwindigkeit	u_A	m/s	11,34	11,50	10,50	9,68	9,40	11,41	13,43

ANHANG 2: Wirbelschichtberechnung nach REH für 60 °C

Material			ABS _{rund}	ABS _{zyl}	PA _{rund}	PA _{zyl}	PE _{rund}	PE _{zyl}	PET _{zyl}
<u>obere Wirbelschichtgrenze=Sinkgeschwindigkeit der kleinsten Partikel</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	$Ar(x_{10})$	-	1,06E+06	1,87E+06	1,18E+06	2,09E+06	2,49E+06	2,50E+06	1,34E+06
REYNOLDS-Zahl nach BERANEK	$Re_{BE}(x_{10})$	-	1,74E+03	2,33E+03	1,84E+03	2,46E+03	2,69E+03	2,70E+03	1,96E+03
REYNOLDS-Zahl nach MARTIN	$Re_{MA}(x_{10})$	-	1,71E+03	2,33E+03	1,81E+03	2,47E+03	2,71E+03	2,72E+03	1,94E+03
Sinkgeschwindigkeit	$u_{Sink}(x_{10})$	m/s	10,00	10,81	10,11	11,12	11,05	11,06	11,52
<u>untere Wirbelschichtgrenze=Lockerungsgeschwindigkeit</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	Ar	-	1,3E+06	2,6E+06	2,0E+06	2,3E+06	3,9E+06	2,9E+06	1,5E+06
Kehrwert der ARCHIMEDES-Zahl	K	-	7,7E-07	3,9E-07	5,1E-07	4,4E-07	2,6E-07	3,4E-07	6,5E-07
Porosität nach WEN/YU	$\varepsilon_L(\psi)$	-	0,40	0,41	0,38	0,41	0,41	0,44	0,40
<i>WEN/YU:</i>									
REYNOLDS-Zahl Lockerungspunkt	Re_L	-	2,0E+02	2,9E+02	2,5E+02	2,7E+02	3,7E+02	3,1E+02	2,2E+02
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,04	1,19	1,14	1,17	1,27	1,19	1,20
<i>ERGUN:</i>									
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,00	1,20	1,03	1,19	1,25	1,37	1,16
<u>Wirbelschichtberechnung nach REH</u>									
Schnittpunkt mit WP-linie	Re_L	-	210	330	300	330	400	400	240
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,09	1,35	1,35	1,41	1,38	1,53	1,31
Schnittpunkt mit Austragslinie	Re_A	-	2000	3000	2700	3000	3100	3100	2050
Austragsgeschwindigkeit	u_A	m/s	10,43	12,23	12,17	12,85	10,73	11,83	11,17
<hr/>									
Material			PMMA _{zyl}	POM _{rund}	PP _{rund}	PP _{zyl}	PS _{zyl}	PS _{zyl}	PVC _{rund}

ANHANG 2: Wirbelschichtberechnung nach REH für 60 °C

(Tracer)									
<u>obere Wirbelschichtgrenze=Sinkgeschwindigkeit der kleinsten Partikel</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	$Ar(x_{10})$	-	1,62E+06	1,28E+06	1,45E+06	1,01E+06	8,39E+05	1,40E+06	4,28E+06
REYNOLDS-Zahl nach BERANEK	$Re_{BE}(x_{10})$	-	2,16E+03	1,92E+03	2,04E+03	1,70E+03	1,54E+03	2,01E+03	3,55E+03
REYNOLDS-Zahl nach MARTIN	$Re_{MA}(x_{10})$	-	2,15E+03	1,90E+03	2,03E+03	1,67E+03	1,50E+03	1,99E+03	3,63E+03
Sinkgeschwindigkeit	$u_{Sink}(x_{10})$	m/s	11,26	11,22	9,95	9,33	9,61	10,41	13,71
<u>untere Wirbelschichtgrenze=Lockerungsgeschwindigkeit</u>									
ARCHIMEDES-Zahl	Ar	-	1,5E+06	1,5E+06	1,8E+06	1,2E+06	8,9E+05	1,7E+06	4,8E+06
Kehrwert der ARCHIMEDES-Zahl	K	-	6,9E-07	6,5E-07	5,5E-07	8,5E-07	1,1E-06	6,0E-07	2,1E-07
Porosität nach WEN/YU	$\varepsilon_L(\psi)$	-	0,44	0,40	0,39	0,42	0,41	0,40	0,41
<i>WEN/YU:</i>									
REYNOLDS-Zahl Lockerungspunkt	Re_L	-	2,1E+02	2,2E+02	2,4E+02	1,9E+02	1,6E+02	2,3E+02	4,1E+02
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,12	1,18	1,06	0,95	0,95	1,09	1,50
<i>ERGUN:</i>									
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,27	1,13	0,98	1,00	0,97	1,05	1,49
<u>Wirbelschichtberechnung nach REH</u>									
Schnittpunkt mit WP-linie	Re_L	-	240	240	250	200	180	250	500
Lockerungsgeschwindigkeit	u_L	m/s	1,27	1,28	1,10	1,01	1,06	1,19	1,83
Schnittpunkt mit Austragslinie	Re_A	-	2050	2050	2400	1900	1500	2400	4000
Austragsgeschwindigkeit	u_A	m/s	10,81	10,96	10,54	9,62	8,85	11,46	14,66

