

Massenbilanzierung von Wertstoffsortieranlagen unter besonderer Berücksichtigung des Schwankungsverhaltens

Andreas Nickel, Uwe Clausen

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund
Abteilung Entsorgungslogistik

Mass flow analysis of sorting plants

Abstract

The mass flow in sorting plants varies from day to day. This variation is hard to predict, which makes it hard to collect reliable data for mass balances. But mass balances are necessary to evaluate the performance of a sorting plant and to identify potentials for optimization. On hand of a practical example is shown in the following, which statistical principles are valid for a sorting plant and how they can be used to build up a statistically firm mass balance for a sorting plant under particular consideration of the variation of the mass flow.

Abstract deutsch

Der Massendurchsatz von Wertstoffsortieranlagen ist, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Materialqualitäten, starken Schwankungen unterworfen. Durch dieses nur schwer vorhersagbare Schwankungsverhalten wird die Erstellung belastbarer Massenbilanzen mit Stichprobenuntersuchungen in Wertstoffsortieranlagen stark erschwert. Massenbilanzen sind jedoch für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sortieranlagen i. d. R. erforderlich, um darauf aufbauend Planungsentscheidungen bspw. für eine Modernisierung der Anlage oder eine Integration zusätzlicher Trennaggregate ableiten zu können. Im Folgenden wird anhand eines Praxisbeispiels dargestellt, welche mathematisch-statistischen Gesetzmäßigkeiten für die Mengenströme in einer Wertstoffsortieranlage gelten und in welcher Form sie genutzt werden können, um Stichprobenumfänge zu reduzieren sowie Scheingenauigkeiten zu vermeiden und auf diese Weise schnell und mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu einer zu einer belastbaren Massenbilanz zu gelangen.

Keywords

Massenbilanzen, Wertstoffsortieranlage, Stichprobenuntersuchungen, Massenströme

1 Ausgangssituation und Vorgehensweise

Die denkbar zuverlässigste Form der Massenbilanzierung ist die Dauerbeprobung aller Massenströme zwischen den einzelnen Prozessschritten einer Sortieranlage. Auf diese Weise lässt sich ein exaktes Bild der Massenströme innerhalb einer Sortieranlage bestimmen. Diese Vorgehensweise ist aber in den seltensten Fällen praktikabel, da die präzise Erfassung sämtlicher Massenströme durch Verwiegungen mit einem sehr hohen personellen und damit finanziellen Aufwand verbunden und zudem auch aus technischen Gründen (Zugänglichkeit, Gefährdungspotenzial etc.) nicht an allen Stellen in-

nerhalb des Materialflusses möglich ist. Weiterhin limitiert auch die geringe Schüttdichte des zu untersuchenden Materials von z. T. weniger als 40 kg/m^3 bei Mengenströmen von 6 t/h und mehr aufgrund des Volumenfalls die Möglichkeiten einer Dauerbeobachtung. Um trotzdem zu Aussagen über die Verteilung der Massenströme einer Sortieranlage zu gelangen, bspw. um Planungsentscheidungen bezüglich einer Modernisierung der Anlage oder einer Integration zusätzlicher Trennaggregate ableiten zu können, werden i. d. R. Stichprobenuntersuchungen vorgenommen, mit denen die Massenbilanz im Ist-Zustand bestimmt wird.

Grundsätzlich besteht bei diesen Stichprobenuntersuchungen jedoch die Herausforderung, das Schwankungsverhalten der Massenströme einer Wertstoffsortieranlage korrekt abzubilden, welches in Abbildung 1 exemplarisch anhand des Gesamtmengendurchsatzes einer Sortieranlage für Leichtverpackungen dargestellt ist.

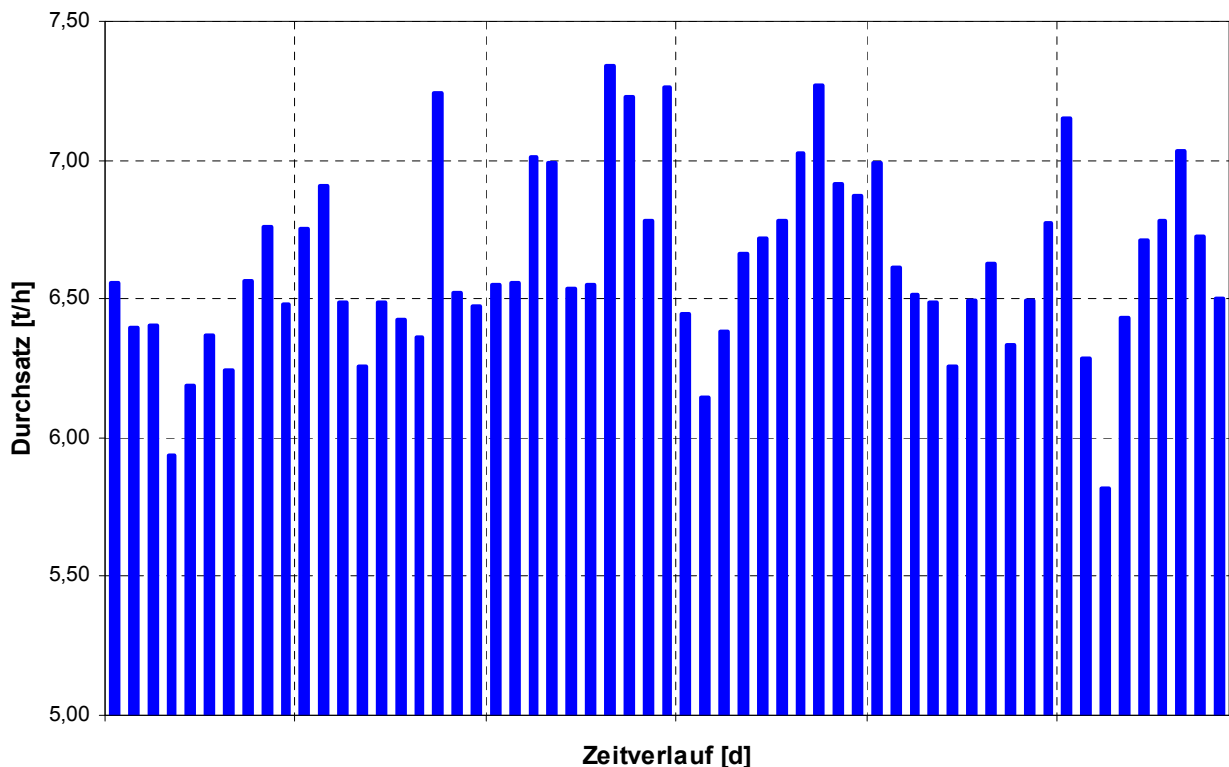


Abbildung 1 Gesamtmassendurchsatz einer Sortieranlage für Leichtverpackungen

Wird dieses Schwankungsverhalten falsch eingeschätzt und eine zu geringe Stichprobenanzahl entnommen, besteht die Gefahr von Scheingenaugkeiten. Scheingenaugkeit bedeutet in diesem Fall, dass die entnommenen Stichprobendaten mit einer scheinbar hohen statistischen Genauigkeit zu Ergebnissen führen, die von den tatsächlichen Werten jedoch stark abweichen können. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2 anhand der Lageparameter »Erwartungswert« und »Standardabweichung« der Mengenströme der o. g. Sortieranlage dargestellt.

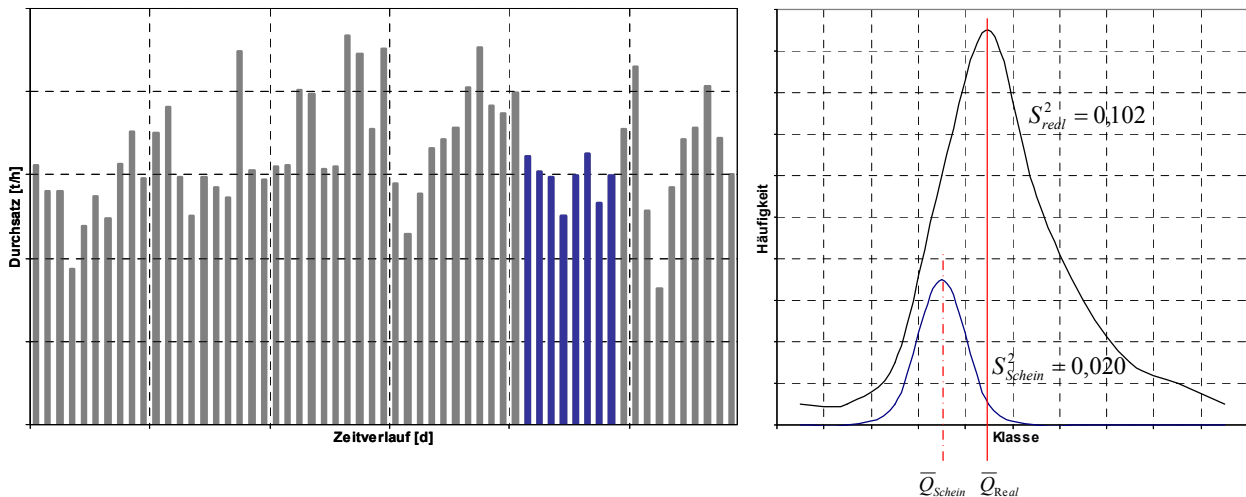


Abbildung 2 Scheingenaugigkeit von Stichprobenuntersuchungen

Um derartige Scheingenaugigkeiten zu vermeiden ist es sinnvoll, Informationen über das Schwankungsverhalten einer Sortieranlage zu gewinnen und diese in die Erstellung der Massenbilanz einfließen zu lassen. Unter dieser Maßgabe wurde am Fraunhofer IML eine vierstufige Untersuchungsmethodik entwickelt, mit der Massenbilanzen in Wertstoffsortieranlagen mit hoher statistischer Sicherheit bei einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand gewonnen werden können.

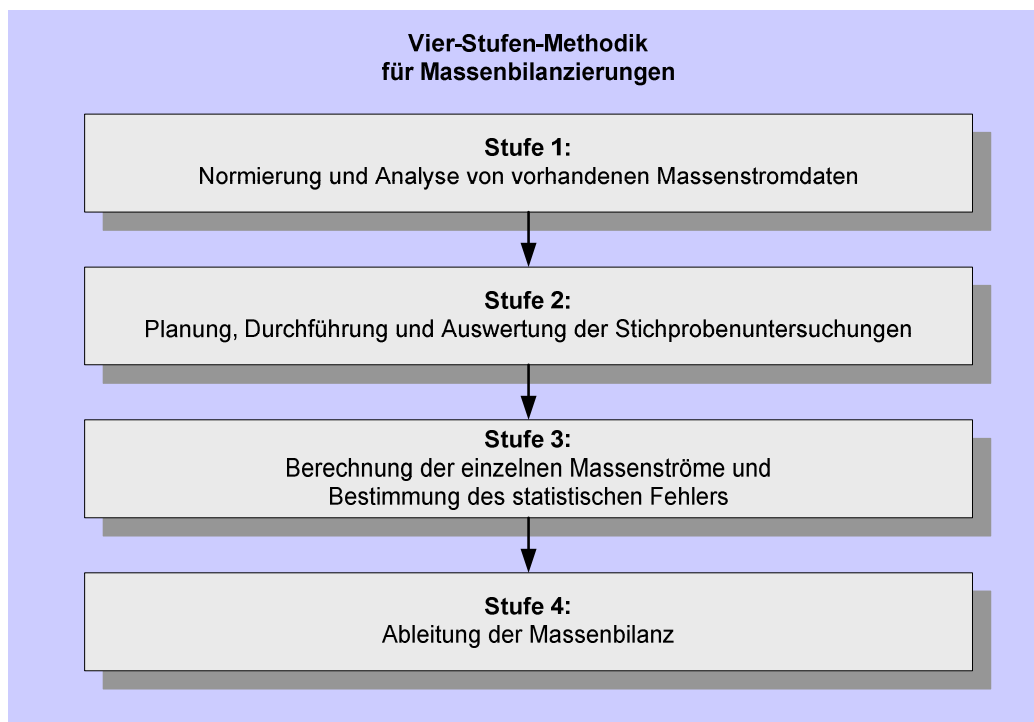


Abbildung 3 Vier-Stufen-Methodik für Massenbilanzierungen

Im ersten Schritt der Methodik werden dabei verfügbare Massenstromdaten, wie z. B. Schichtleistungs- oder Mengenstromnachweise, soweit vorhanden einer ausführlichen mathematisch-statistischen Analyse unterzogen. Das Ergebnis dieser Analyse sind

Abfallforschungstage 2006 www.wasteconsult.de

quantitative Aussagen über Erwartungswerte, Varianzen und Korrelationen der Sortierprodukte, die dazu genutzt werden, die einzelnen Massenströme unter Annahme der Massenerhaltung innerhalb einer Sortieranlage entgegen der Verfahrensrichtung zu berechnen. Von hoher Bedeutung ist dabei, dass auf diese Weise gleichzeitig Informationen gewonnen werden, mit denen das Schwankungsverhalten der Massenströme beschreibbar gemacht werden kann.

In einem zweiten Schritt werden anschließend an denjenigen Stellen, an denen Stoffströme innerhalb der Anlage zusammengeführt werden und daher nicht berechnet werden können, mit Hilfe von Stichprobenuntersuchungen weitere Informationen über die Verteilung der einzelnen Massenströme gewonnen. Dabei wird insbesondere das zuvor identifizierte Schwankungsverhalten bei der Planung und Auswertung der Stichprobendaten berücksichtigt, um die Repräsentativität der Probenahme zu steigern und die Anzahl der benötigten Stichproben zu reduzieren.

Im dritten Schritt lassen sich dann mit Hilfe dieser zusätzlich gewonnenen Daten die Massenströme zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie die zugehörigen statistischen Fehler berechnen und bewerten. Sind die erreichten Genauigkeiten der Untersuchung hoch genug, lässt sich im Ergebnis aus den Einzeldaten eine vollständige Bilanz der Massenströme in der untersuchten Wertstoffsortieranlage ableiten.

2 Grundlagen der Untersuchungsmethodik

2.1 Qualität der vorhandenen Daten

Ausgangspunkt der Untersuchungen bildet, wie beschrieben, die Analyse von vorhandenen Massenstromdaten. Diese Daten entstammen zumeist der Auswertung der täglichen Sortierleistung, d. h. einer Verwiegung der einzelnen Sortierprodukte, auf deren Basis Schichtleistungs- und Mengenstromnachweise erstellt werden, oder einer vergleichbaren Datenbasis. Somit handelt es sich bei diesen Daten um sekundärstatistisches Datenmaterial, die nicht primär für die Massenstromuntersuchung erhoben wurden. D. h., auf die Daten bzw. auf die Form der Datenerhebung kann kein Einfluss mehr genommen werden, sondern die Rahmenparameter, wie bspw. Wiegeverfahren, Mess-toleranzen, Messzeitpunkte oder Form der Dokumentation, müssen als gegeben hingenommen und entsprechend bei der Auswertung berücksichtigt bzw. im Zweifelsfall durch zusätzliche Untersuchungen validiert werden.

Weiterhin ist es notwendig, die Daten zu normieren. Normieren bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Massenstromdaten auf die tatsächlichen Betriebsstunden der Sortieranlage bezogen werden. Ohne eine derartige Vereinheitlichung würden temporäre Betriebsausfälle, wie sie bei einem komplexen technischen System wie einer Wert-

stoffsortieranlage unabdingbar sind, eine nicht bestimmbare Veränderung der Basisdaten bedeuten und somit zu verfälschten Ergebnissen bei der Analyse der vorhandenen Massenstromdaten führen.

2.2 Statistische Gesetzmäßigkeiten der Massenströme

2.2.1 Verteilungsart der Massenströme

Bei der Untersuchung von komplexen technischen Systemen durch statistische Methoden wird in der Literatur häufig eine Normalverteilung unterstellt. In der Abfallwirtschaft gilt die Annahme der Normalverteilung dagegen oft nur näherungsweise: Stoffkonzentrationen sind oft rechts-schief verteilt (Log-Normalverteilung), Güterzusammensetzungen folgen oftmals einer stark schiefen J-Verteilung. Wird jedoch eine Summe aus einer großen Anzahl an Einzeleinflüssen betrachtet, konvergiert die beobachtete Zufallsvariable nach dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik gegen die Standardnormalverteilung, auch wenn die einzelnen Verteilungen selbst nicht normalverteilt sind. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Zufallseinflüssen, die auf die Massenströme einer Wertstoffsortieranlage einwirken, ist daher davon auszugehen, dass auch das Schwankungsverhalten der Massenströme mit guter Näherung einer Normalverteilung unterliegen wird. Liegt tatsächlich eine Normalverteilung vor, kann aufgrund der Symmetrieeigenschaften dieser Verteilungsart der Untersuchungsaufwand deutlich reduziert werden.

2.2.2 Korrelation der Massenströme

Zwischen den einzelnen Bestandteilen der Massenströme liegen zahlreiche physikalisch-chemische Wechselwirkungen in Form von Verwicklungen, Anhaftungen, Überlagerungen etc. vor, die letztlich auch den Gesamtmassenstrom beeinflussen. Von wesentlicher Bedeutung ist jedoch, dass es sich hierbei nicht um systematische, sondern um zufällige Beeinflussungen handelt, die im Rahmen der statistischen Analysen berücksichtigt werden können. Mathematisch lässt sich diese Zufälligkeit bei Vorliegen einer Normalverteilung durch eine multiple Korrelationsrechnung belegen, mit der die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Massenströmen quantifiziert werden können. Liegt keine oder nur eine schwache Korrelation vor, können die einzelnen Massenströme getrennt voneinander betrachtet und untersucht werden, was zu erheblichen Einsparungen bei der Beprobungsplanung und -durchführung führt, da die Wechselwirkungen nicht in Form von aufwändigen faktoriellen Versuchsplänen untersucht und in der Bestimmung der Massenbilanz berücksichtigt werden müssen.

Andererseits ist zu erwarten, dass zwischen den einzelnen Massenströmen und dem Gesamtmassendurchsatz der Sortieranlage ein linearer Zusammenhang besteht, d. h.

bei einem niedrigen Gesamtmassendurchsatz sind auch alle einzelnen Massenströme im statistischen Mittel entsprechend verringert und umgekehrt. Liegt eine entsprechend hohe Korrelation vor, kann dies ausgenutzt werden, um die Repräsentativität der Stichprobennahme zu erhöhen, da das Schwankungsverhalten der Massenströme berechenbar wird und durch geeignete Korrekturfaktoren berücksichtigt werden kann.

3 Darstellung und Validierung der entwickelten Untersuchungsmethodik

3.1 Darstellung der Untersuchungsmethodik

3.1.1 Analyse der vorhandenen Massenstromdaten

Die Analyse der vorhandenen Massenstromdaten mit statistischen Verfahren geschieht in drei Schritten:

- Eliminierung von Ausreißern
- Nachweis der Verteilungsart
- Bestimmung der Korrelationen

Bei der explorativen Analyse von Datensätzen empfiehlt es sich, Messwerte, die vergleichsweise entfernt vom übrigen Datenkörper liegen, zunächst einer gesonderten Betrachtung durch so genannte Ausreißertests zu unterziehen. Die Einschätzung, wann ein Wert als Ausreißer zu betrachten ist, wird anhand dessen getroffen, was bei einer Normalverteilung als untypisch anzusehen ist. Im Rahmen der hier dargestellten Methodik wird dazu die »Ausreißerregel nach Tukey« verwendet, die sich zum einen durch eine einfache Handhabung und zum anderen durch eine genügend große Sicherheit bei der Identifikation von Ausreißern auszeichnet.

Die Anpassung des theoretischen Verteilungsmodells der Normalverteilung an die vorliegende empirische Häufigkeitsverteilung geschieht dann nachfolgend in zwei Schritten: Zunächst werden die noch unbekanntes Lageparameter der Normalverteilung aus den vorliegenden empirischen Massenstromdaten geschätzt. Für das angenommene Verteilungsmodell einer Normalverteilung eignet sich dabei aufgrund der guten Handhabbarkeit und Güte der Ergebnisse am besten die Maximum-Likelihood-Methode (ML-Methode). Allgemein basiert die Maximum-Likelihood-Methode darauf, für jeden Parameterwert des angenommenen theoretischen Häufigkeitsmodells die Wahrscheinlichkeit der konkret vorhandenen Stichprobe zu berechnen. Der ML-Schätzer ist dann gerade derjenige Parameter, bei dessen Vorliegen die beobachtete Stichprobe am wahrscheinlichsten ist. Im zweiten Schritt bedarf es nach der Schätzung der Lageparameter der

Überprüfung der Anpassungsgüte, d. h. der Untersuchung, inwieweit die Hypothese der Normalverteilung auch tatsächlich korrekt war. Hierzu dienen verschiedene Signifikanztests, mit denen die Eignung von Verteilungsmodellen objektiv beurteilt wird. Bei einer positiven Beurteilung liegen dann im Ergebnis der Analyse die Erwartungswerte und die Standardabweichungen für die einzelnen Verteilungsfunktionen der Sortierprodukte vor.

Abschließend wird die Korrelation der einzelnen Mengenströme untersucht: Die Korrelation zweier unabhängiger Zufallsvariablen X und Y ist stets Null, d. h. zwei unabhängige Zufallsvariablen sind stets unkorreliert. Umgekehrt kann aber i. A. nicht aus der Unkorreliertheit von X und Y deren Unabhängigkeit gefolgert werden. Allerdings gilt speziell, dass zwei unkorrelierte normalverteilte Zufallsvariablen auch unabhängig sind. Daher ist im Normalverteilungsfall die Korrelation ein Maß für die Stärke der Abhängigkeit zweier Zufallsvariablen. Als Schätzer für die Korrelation zweier Massenströme wird im Rahmen der Untersuchungsmethodik der Pearson'scher Korrelationskoeffizient verwendet. Die Abhängigkeitsstruktur der mehrdimensionalen Datensätze wird dabei auf die paarweisen Abhängigkeitsstrukturen zurückgeführt und in Form einer Korrelationsmatrix dargestellt und ausgewertet.

3.1.2 Planung, Durchführung und Auswertung der Stichprobenuntersuchungen

Neben der Auswertung der vorhandenen Massenstromdaten stellt die Datengewinnung durch Stichprobenverfahren die zweite wesentliche Datenquelle zur Quantifizierung der Massenbilanz dar. Hierbei handelt es sich um primärstatistisches Datenmaterial, das gezielt für den vorliegenden Anwendungsfall erhoben wird, so dass eine Planung der Datengewinnung möglich ist. Ziel der Stichprobenuntersuchungen ist es, mit einem möglichst geringen Untersuchungsaufwand eine repräsentative Aussage über einzelne Massenströme innerhalb der zu untersuchenden Sortieranlage zu bekommen.

Die Stichproben werden innerhalb der Sortieranlage an denjenigen Stellen entnommen, an denen eine Berechnung der Massenströme nicht möglich ist. In der Praxis hat es sich dabei als sinnvoll erwiesen, grundsätzlich zuerst diejenigen Massenströme zu untersuchen, die erwartungsgemäß den geringsten Durchsatz aufweisen. Auf diese Weise können Ungenauigkeiten, die auf zu geringe Größen der Einzelproben in Relation zum Gesamtmassenstrom zurückzuführen sind, vermieden werden womit die Repräsentativität der Probenahme steigt.

Weiterhin wird der zuvor beschriebene Zusammenhang zwischen dem Gesamtmassenstrom und den einzelnen Massenströmen ausgenutzt, um die Güte der Stichprobenuntersuchungen zu erhöhen und Scheingenauigkeiten zu vermeiden. Dies geschieht durch die Anwendung eines Korrekturzahlverfahrens, bei dem die entnommenen Stichproben nicht isoliert, sondern im Kontext des Schwankungsverhaltens der Sortieranlage betrachtet werden. Die verwendete Korrekturzahl gibt dabei das Verhältnis zwischen

dem Erwartungswert des Gesamtmassenstroms und dem tatsächlichen Massenstrom des jeweiligen Untersuchungstages wieder. Sie stellt also eine Maßzahl dar, in wie weit das Massenstromverhalten der Sortieranlage am jeweiligen Untersuchungstag vom statistischen Normalzustand abweicht. Mit dieser Korrekturzahl werden dann alle Messwerte des jeweiligen Untersuchungstages multipliziert, bevor die Daten in die weitere statistische Auswertung eingehen. Auf diese Weise wird die Varianz der Stichprobennahme reduziert, so dass der Erwartungswert der Stichprobe erheblich schneller gegen den tatsächlichen Erwartungswert konvergiert als im unkorrigierten Fall.

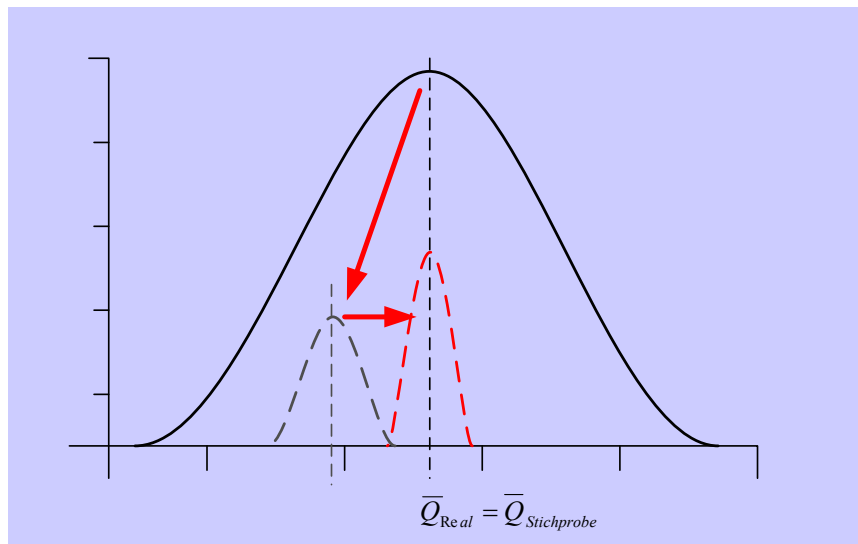


Abbildung 4 Grundprinzip des Korrekturzahlverfahrens

Die Anwendung des beschriebenen Korrekturzahlverfahrens ist jedoch nur zulässig, solange keine Ausreißer im statistischen Sinne „künstlich“ zu repräsentativen Werten transformiert werden, sondern nur die Elemente der tatsächlichen Normalverteilung, für die die oben beschriebenen Gesetzmäßigkeiten gelten. Stichproben, die an Tagen durchgeführt werden, die statistisch als Ausreißer zu bezeichnen sind, sind grundsätzlich als ungültig zu deklarieren und müssen von den weiteren Auswertungen ausgeschlossen werden.

3.1.3 Quantifizierung der Massenbilanz und Analyse des statistischen Fehlers

Aufgrund der gewählten Form der indirekten Bestimmung der Massenströme ist zunächst zu beachten, dass schon die Ausgangsdaten auf der Auswertung von Daten beruhen, die durch ein zufälliges, d. h. stochastisches Verhalten charakterisiert sind, die also mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden sind. Diese Unsicherheit pflanzt sich fort, wenn auf Basis der vorhandenen Informationen auf die unbekanntes Massenströme rückgeschlossen wird. Eine Methode, das Problem zu linearisieren und damit näherungsweise den mittleren Fehler der indirekten Bestimmung zu ermitteln, ist das Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß. Auf diese Weise wird der statistische Fehler

berechnet, der durch die Anwendung der indirekten Bestimmung der Massenströme gemacht wurde. Wird dieser Fehler im Vergleich zu den direkt bestimmten Massenströme überproportional groß, sind an den entsprechenden Stellen zusätzliche Stichprobenuntersuchungen, um die indirekt ermittelten Werte zu verifizieren.

Auf Basis der ermittelten Massenstromdaten wird dann abschließend die Gesamtmassenbilanz der untersuchten Sortieranlage berechnet und stellt im Ergebnis alle Massenströme zwischen den einzelnen Prozessschritten im statistischen Normalzustand dar. Statistischer Normalzustand heißt in diesem Zusammenhang, dass die bestimmten Werte die jeweils höchste Auftretenswahrscheinlichkeit haben und damit einen Zustand der betrachteten Sortieranlage beschreiben, der einem eingeschwungenen und stabilen Betriebszustand, der als sinnvoller Ausgangspunkt für weitere Planungsüberlegungen verwendet werden sollte, ausreichend nahe kommt.

3.2 Anwendung im Praxisversuch

3.2.1 Spezifizierung des Anwendungsfalls

Bei der Wertstoffsortieranlage, die im konkreten Anwendungsfall betrachtet wurde, handelt es sich um eine Sortieranlage für Leichtverpackungen mit einer Kapazität von ca. 25.000 Jahrestonnen, die den Verpackungsabfall von ca. 1.000.000 Einwohner einer teils ländlich geprägten Region in einem trockenmechanischen, teilautomatisierten Verfahren in acht verschiedenen Wert- und Reststofffraktionen sortiert. Zum Untersuchungszeitpunkt wurde die Anlage an fünf Tagen pro Woche mit jeweils zwei Schichten pro Tag betrieben.

Für die Analyse vorhandener Massenstromdaten konnte auf die Schichtleistungsnachweise von insgesamt 66 Arbeitstagen zurückgegriffen werden, was einem Betrachtungszeitraum von drei Monaten entspricht. In den Schichtleistungsnachweisen werden die täglichen Leistungsdaten der Sortieranlage bezogen auf die einzelnen Sortierfraktionen dokumentiert, um den monatlichen Mengenstromnachweis erstellen zu können. Dabei wurde neben der Anzahl der verpressten Ballen pro Sortierfraktion und deren Gewicht auch die tatsächliche Betriebsdauer der Anlage dokumentiert, so dass eine Normierung der Daten auf Betriebsstunden möglich war.

Für die Stichprobenuntersuchungen wurden insgesamt 26 Probenahmestellen identifiziert, wobei aufgrund des gewählten Verfahrens der indirekten Massenstrombilanzierung nur an drei Stellen aus dem bewegten Abfallstrom Proben entnommen werden mussten. An diesen Messpunkten wurden mit Hilfe der Mitarbeiter der Sortieranlage die zu verwiegenden Proben direkt von den Förderbändern entnommen, wobei Einschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit der Mitarbeiter in Kauf genommen werden mussten. Die übrigen 23 Probenahmestellen befanden sich im Bereich der Sortierkabine

bzw. bei der Vorsortierung und konnten ohne weitere Restriktionen organisatorischer oder technischer Art beprobt werden.

3.2.2 Ergebnisse der Anwendung

Im ersten Schritt der Anwendung wurde zunächst die Annahme der Normalverteilungsfunktion als Verteilungsmodell für das Schwankungsverhalten der Massenströme überprüft. Neben der Visualisierung im Histogramm wurden dabei insbesondere die Quantile-Quantile-Plots der einzelnen Verteilungen für den Nachweis ausgewertet. Gemeinsam mit der Analyse des Variationskoeffizienten sowie des zentralen Schwankungsintervalls konnte auf diese Weise die Annahme der Normalverteilung eindeutig bestätigt werden, wie in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt ist.

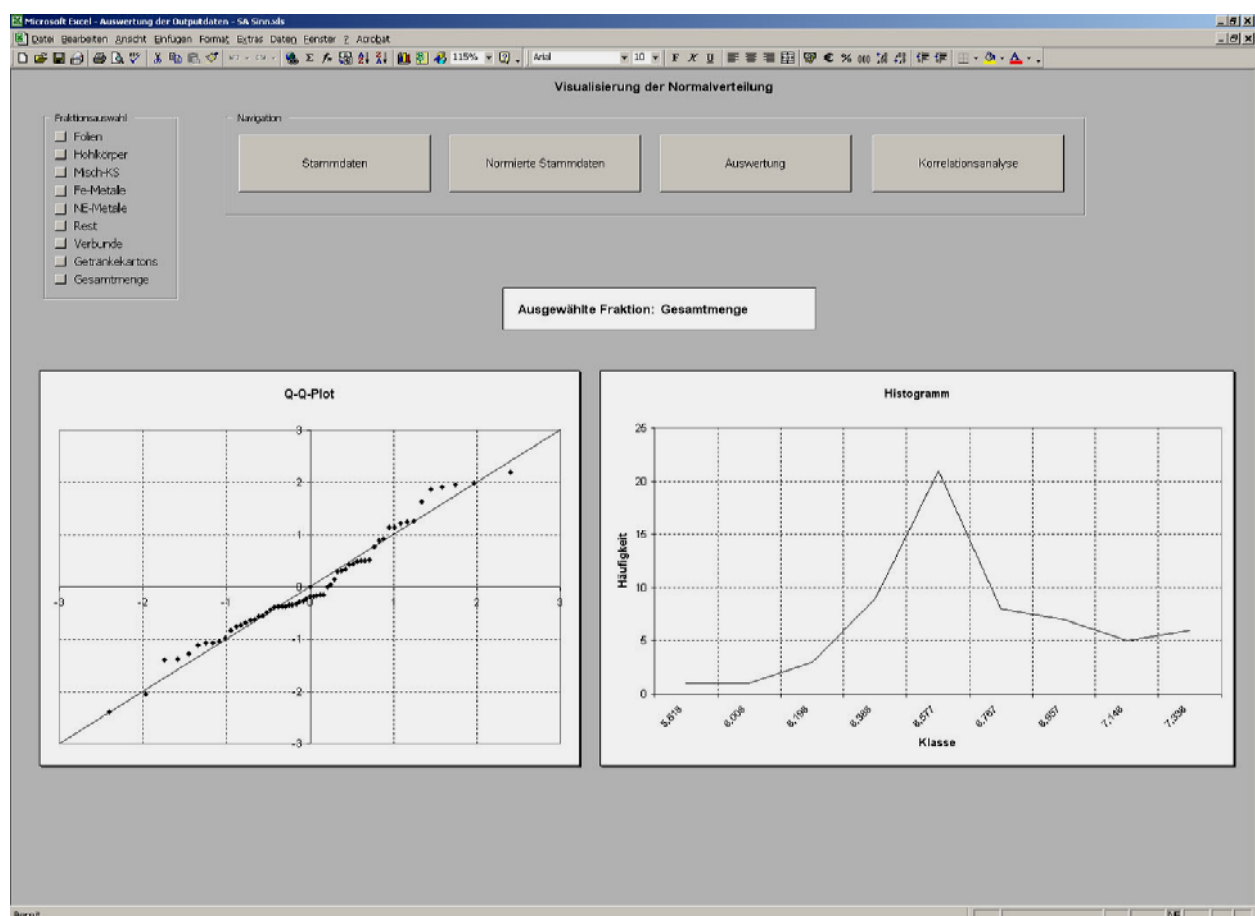


Abbildung 5 Analyse der Verteilungsart

Generell zeigte sich bei der hier durchgeführten explorativen Datenanalyse der Trend, dass sich Massenströme mit einem hohen spezifischen Gewicht wie z. B. Fe-Metalle oder die Restfraktion deutlich robuster in ihrem Schwankungsverhalten zeigen, was sich aufgrund der geringeren Variationskoeffizienten insbesondere durch einen geringeren Bedarf an Stichproben auf den Untersuchungsaufwand bei diesen Massenströmen auswirkt.

Im zweiten Schritt erfolgte der Nachweis der Unabhängigkeit über eine paarweise Betrachtung der empirischen Korrelationskoeffizienten der einzelnen Massenströme. Im vorliegenden Anwendungsfall ergibt sich folgende Korrelationsmatrix für die um statistische Ausreißer bereinigten Massenströme der Sortierprodukte.

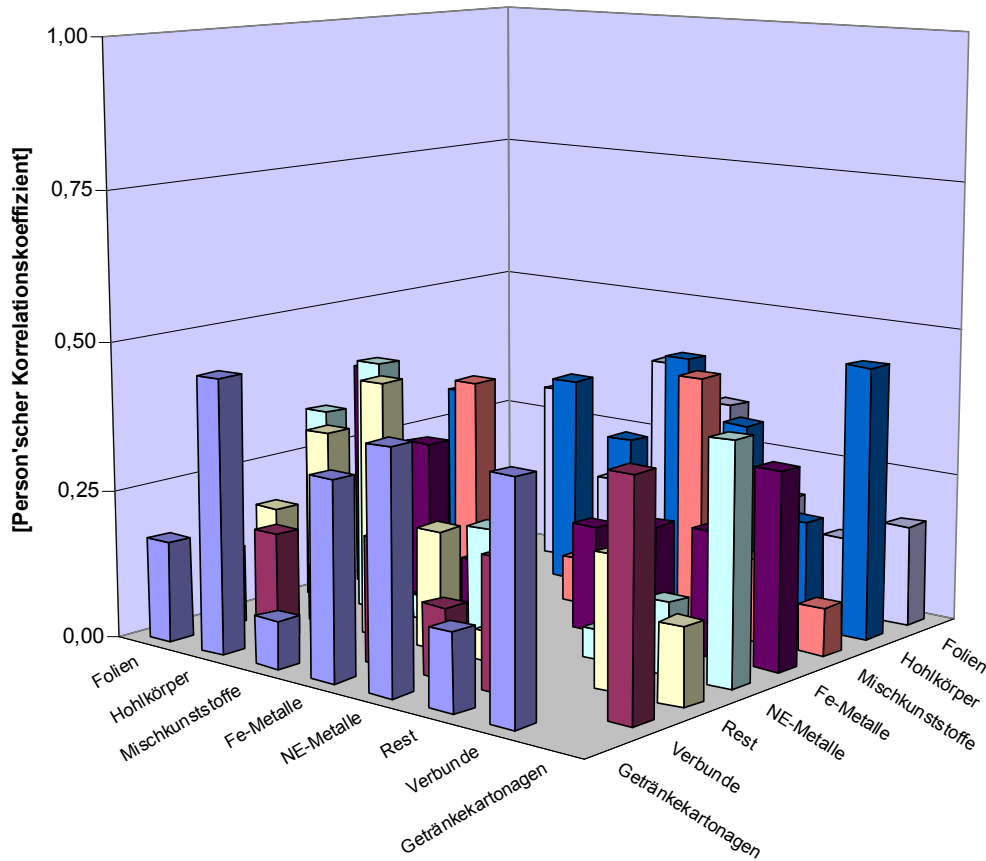


Abbildung 6 Visualisierung der Korrelationsmatrix

Neben der zu erwartenden schwachen Korrelation zwischen NE-Metallen und Getränkekartonagen, die vermutlich auf leichte Unschärfen bei der NIR-Detektion zurückzuführen ist, sind mit lediglich zwei weitere Korrelationskoeffizienten mit einem Wert größer 0,4 vorhanden. Nach *Schlittgen* und *Hartung* sind jedoch Werte für den Korrelationskoeffizienten unterhalb von 0,5 bei empirischen Untersuchungen grundsätzlich als eindeutiger Hinweis für eine Unabhängigkeit zu werten. Darüber hinaus gibt auch die Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Mengenaufkommens einen Anhaltspunkt für einen generellen Zusammenhang zwischen den einzelnen Massenströmen, so dass auf Basis der vorliegenden Daten für die betrachtete Sortieranlage die Annahme der Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Mengenströmen allgemein als erfüllt angesehen werden kann. Hingegen ist mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,78 und 0,94 für den Zusammenhang zwischen dem Gesamtmassenstrom und den einzelnen Massenströmen von einer recht starken Korrelation auszugehen, die die Anwendung des beschriebenen Korrekturzahlverfahrens rechtfertigt.

4 Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Untersuchungsmethodik konnte ein Verfahren entwickelt und in der Praxis erfolgreich getestet werden, mit dem belastbare Massenbilanzen für Wertstoffsortieranlagen unter expliziter Berücksichtigung des Schwankungsverhaltens der Massenströme erstellt werden können. Durch eine konsequente Nutzung der vorliegenden statistischen Gesetzmäßigkeiten konnte der notwendige Untersuchungsaufwand deutlich reduziert und durch die Einbeziehung von Langzeitdaten die Gefahr von Scheingenauigkeiten verringert werden. Im Ergebnis erhält der Betreiber einer Wertstoffsortieranlage Daten über die Verteilung der Massenströme in einem eingeschwungenen und stabilen Betriebszustand der Sortieranlage, die als Ausgangspunkt für weitere Planungsüberlegungen zu verwenden sind.

5 Literatur

- | | | |
|----------------|------|--|
| Nikel, A. | 2005 | Verfahren zur strategischen Planung von Wertstoffsortieranlagen auf Basis methodischer Mengenstromuntersuchungen. Dissertation Universität Dortmund 2005. ISBN 3-89957-032-4 |
| Schlittgen, R. | 2000 | Einführung in die Statistik – Analyse und Modellierung von Daten. 9. Auflage. ISBN 3-486-25465-0 |
| Hartung, J. | 2002 | Handbuch der angewandten Statistik. 13. Auflage. ISBN 3-486-25905-9 |

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Andreas Nickel
Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Abteilung Entsorgungslogistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4
D-44227 Dortmund
Telefon +49 (231) 9743 - 365
Email: andreas.nikel@iml.fraunhofer.de
Website: www.iml.fraunhofer.de