

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Echtzeitanalytik

Sabine Flamme und Peter Krämer

1.	Grundlagen der Prozessanalytik	630
2.	Sensortechnologien in der Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft ...	632
3.	Echtzeitanalytik von Ersatzbrennstoffen durch NIR-Technik	634
3.1.	Einführende Bemerkungen	634
3.2.	Funktionsweise des Systems	635
3.3.	Beitrag zur Ressourceneffizienz	639
4.	Echtzeitanalytik für metallhaltige Stoffströme	640
4.1.	Einführende Bemerkungen	640
4.2.	Beitrag zur Ressourceneffizienz	640
5.	Fazit und Ausblick	641
6.	Quellen	641

Der Begriff Ressourceneffizienz ist allgemein definiert als *das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür notwendigen Ressourceneinsatz* [25]. Der Nutzen kann dabei sowohl politische, technische, ökologische, ökonomische, soziale und/oder ethische Dimensionen haben [16].

Bei der Aufbereitung und Verwertung von Abfällen respektive Sekundärrohstoffen kann die Ressourceneffizienz durch die Anwendung kontinuierlicher Verfahren der Prozessanalytik gesteigert werden.

Die Möglichkeiten dieser, auch als Echtzeitanalytik bezeichneten Verfahren, werden aufgrund der stetig zunehmenden Leistungsfähigkeit der automatischen Datenverarbeitung immer umfangreicher und – insbesondere bei gleichzeitig steigenden Erlösen aber auch Qualitätsanforderungen – zunehmend attraktiver.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die Grundlagen der Prozessanalytik. Insbesondere werden die Vor- und Nachteile kontinuierlicher und diskontinuierlicher Verfahren gegenüberstellend bewertet. Daran anschließend erfolgt eine zusammenfassende Darstellung relevanter Sensortechnologien, die bereits für die Separation von Sekundärrohstoffen und Abfällen eingesetzt werden und für Anwendungen im Bereich der Echtzeitanalytik grundsätzlich geeignet erscheinen. Abschließend werden anhand von zwei Anwendungsbeispielen die Möglichkeiten des Einsatzes von Echtzeitanalytik verdeutlicht und die Potenziale zur Erhöhung der Ressourceneffizienz aufgezeigt.

1. Grundlagen der Prozessanalytik

Prozessanalytik dient der Überwachung und Steuerung von Verfahrensabläufen. Dabei erfolgt die Messung kontinuierlich über die Zeit, wodurch Informationen über stoffspezifische Größen im Rahmen stoffverändernder Prozesse, d.h. Verfahrensabläufe in Echtzeit bereitgestellt werden können. [22]

Die häufigste Anwendung erfährt die Prozessanalytik im Bereich der Qualitätssicherung, d.h. zur Realisierung definierter Spezifikationen eines Endproduktes im Herstellungsprozess. Ein effektives Qualitätsmanagement sollte hierbei mit einer Klassifizierung des Input beginnen, da der Input die weitere Verarbeitung bestimmt. Im Prozessverlauf kann, insbesondere bei komplexen Aufbereitungsverfahren, jeder Schritt dazu benutzt werden, um die Schwankungen des Produktes und der Qualität der Zwischenprodukte auszugleichen. [6]

Bei der Aufbereitung von Abfällen ist diese Art der Optimierung komplex, da Abfälle in der Regel heterogen zusammengesetzt sind. Diese Variabilität muss in der Prozessführung zur Erreichung einer weitestgehend konstanten Qualität berücksichtigt werden. Im Idealfall erhält man trotz unterschiedlicher Inputqualitäten durch eine adaptive Prozessführung das gleiche Endprodukt.

Die Prozessanalytik hat ihre Ausgangsbasis in der Methodik der analytischen Chemie. Die relevanten Fragestellungen bei der Entwicklung einer analytischen Methode sind [6]:

- Wie erhalte ich eine repräsentative Probe?
- Wie bereite ich die Probe für die Analytik auf?
- Ist eine Abtrennung der zu analysierenden Substanz und der Matrix notwendig?
- Welche Messmethoden sind am besten geeignet?
- Welche Datenverarbeitung und Interpretationsmethodik sind am besten geeignet?
- Wie stelle ich die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit sicher?

Ziel der Prozessanalytik ist, diese Funktionen möglichst in Echtzeit in einem z.T. schwierigen Umfeld zu realisieren. Die Analyse kann grundsätzlich automatisch, manuell, kontinuierlich, diskontinuierlich, invasiv und nichtinvasiv erfolgen. [6]

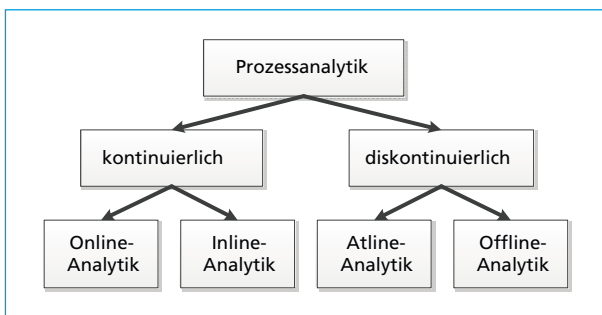


Bild 1:

Differenzierung der Verfahren zur Prozessanalytik

Quelle: Eigene Darstellung nach Kessler, R. W.: Prozessanalytik – Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006

Gemäß Kessler (2006) erfolgt die Differenzierung der verschiedenen Prozessanalytoren durch die Prozessnähe des Analysators [6]. Somit lassen sich im Wesentlichen kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren unterscheiden (Bild 1).

Aktuell erfolgt die Qualitätskontrolle bei der Abfallaufbereitung und -verwertung i.d.R. offline, d.h. es existiert keine direkte physikalische Verbindung zwischen Stoffstrom und Messgerät. Die Offline-Analytik ist dabei durch folgende Prozessschritte gekennzeichnet: Probenahme, Probentransport, Probenaufbereitung respektive -vorbereitung, Messung, Datenauswertung und Verwerfung der Probe.

Die Vor- und Nachteile der Offline-Analytik sind in der Tabelle 1 gegenübergestellt. Im Unterschied zur Offline-Analytik erfolgt die Atline-Analytik mit einem spezifischen Analysator in der Nähe der Produktionstrecke [6].

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Offline-Analytik

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Expertenwissen steht zur Verfügung [Kessler] • Vergleichsweise hohe Flexibilität [Kessler] • Einfache Kalibrierung und Wartung durch qualifiziertes Personal [Peters] • Relativ genaue Messungen möglich [Peters] • Im Vergleich zur Echtzeit-Analytik i.d.R. geringere Investitionskosten [Peters] 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ große Zeitlücke zwischen Probenahme und Messung [Peters] • keine direkte Prozesssteuerung möglich [Kessler] • hoher manueller Aufwand, insbesondere für die Probenahme [Peters] • häufig geringe Repräsentativität bei heterogenen Stoff-/Produktströmen [Krämer] • geringe Vergleichbarkeit generierter Ergebnisse bei der Anwendung unterschiedlicher Aufschluss- und/oder Analyseverfahren [Flamme], [Rotter] • <i>Ownership of data</i> nicht gewährleistet [Kessler] • Ressourcenaufwand für Chemikalien, Lösungen, usw. [Krämer]

Quellen:

Flamme, S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Dissertation an der Bergischen Universität – Gesamthochschule Wuppertal; Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 5, Labor für Abfallwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft, Umweltchemie (Hrsg.), Wuppertal, 2002

Kessler, R. W.: Prozessanalytik – Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006

Krämer, P.: Analyse des relevanten Markt- und Wettbewerbsumfeldes für die Weiterentwicklung und Einführung einer nahinfrarot-gestützten Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe. Master-These an der Fachhochschule Münster, Münster, 2011, (unveröffentlicht)

Peters, U.: Messung der relevanten Leitgrößen zur Beobachtung der Fermentation am Beispiel Bier; Dissertation an der TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 1999

Rotter, V. S.: Die Bedeutung einheitlicher Gütekriterien und Analyseverfahren für Ersatzbrennstoffe; In: EBS-Analytik – Anforderung, Probleme, Lösungen; Bilitewski, B.; Werner, P.; Rotter, S.; Hoffmann, G. (Hrsg.), Eigenverlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., Dresden, 2008, S.15-31

Die fehlenden Möglichkeiten zur direkten Qualitätssteuerung, d.h. zur Realisierung definierter Spezifikationen eines Produktes im Herstellungsprozess,

ist einer der relevantesten Nachteile der Offline-Analytik. Aufgrund der Zeitspanne zwischen der Probenahme und dem Vorliegen der Messergebnisse ist ein direkter Einfluss auf die Output-Qualität eines Produktes bei der Aufbereitung und/oder Verwertung i.d.R. nicht mehr möglich.

Die beschriebenen Nachteile können durch die Implementierung von Echtzeitanalytik-Systemen zur kontinuierlichen Messung in Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen eliminiert oder zumindest vermindert werden. Echtzeitanalytik-Systeme können sowohl im Bypass (Online) als auch im Hauptstrom (Inline) installiert sein. Auf die spezifischen Vor- und Nachteile dieser Ausführungsvarianten soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die generellen Vor- und Nachteile der Echtzeitanalytik sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Echtzeitanalytik

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Automatische und (quasi-) kontinuierliche und dadurch schnelle Messung möglich [Peters] • Verfahren ermöglicht eine direkte Prozesskontrolle und -steuerung [Krämer] • Hochspezifischer Analysator [Kessler] • Produktstrom vor Messung konditionierbar (insbesondere bei Online-Analytik) [Kessler],[Peters] 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher apparativer Aufwand [Peters] • Kenntnisse über und Kompensation von Querempfindlichkeiten (z.B. Staub) notwendig [Peters] • Störanfälligkeit durch Probenahme (bei Online-Analytik im Bypass) [Kessler], [Peters] • Geschultes Personal muss zur Behebung von Störungen vorgehalten werden [Kessler] • Wartung und Kalibration sind relativ zeitintensiv und teuer [Kessler]

Quellen:

Kessler, R. W.: Prozessanalytik – Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006

Krämer, P.: Analyse des relevanten Markt- und Wettbewerbsumfeldes für die Weiterentwicklung und Einführung einer nahinfrarot-gestützten Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe. Master-Thesis an der Fachhochschule Münster, Münster, 2011, (unveröffentlicht)

Peters, U.: Messung der relevanten Leitgrößen zur Beobachtung der Fermentation am Beispiel Bier; Dissertation an der TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 1999

Um eine entsprechende kontinuierliche Prozessanalytik bei der Aufbereitung und Verwertung von Abfällen und Sekundärrohstoffen zu etablieren, sind spezifische Sensoren notwendig. Im nachfolgenden Kapitel werden die für die Aufbereitung und Verwertung von Abfällen bzw. Sekundärrohstoffen relevante Sensortechnologien beschrieben und deren Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt.

2. Sensortechnologien in der Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft

Mit der Sensortechnik werden die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie, u.a. Fluoreszenz, Streuung, Reflexion, Absorption und Transmission genutzt. In der Regel besteht eine Sensoreinheit aus Emitter und Detektor, mindestens jedoch aus einem Detektor. Der Detektor misst die Eigenschaften der registrierten Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich.

In der Abfallwirtschaft sind verschiedene Sensortechnologien, z.B. die Nahinfrarot- und Röntgentransmissionstechnik, für die Sortierung von Abfällen etabliert. Durch die Verarbeitung der detektierten Daten mit modifizierten Algorithmen ist grundsätzlich auch eine Analyse von Abfallströmen möglich. Je nach Sensortechnologie unterscheiden

sich die Einsatzgebiete und Möglichkeiten. Durch eine Kombination verschiedener Technologien können die Möglichkeiten verknüpft und erweitert werden. Ein Technologietransfer aus anderen Industriebereichen wie zum Beispiel der Pharma- oder Automobilindustrie ist, aufgrund der spezifischen Eigenschaften z.B. der Heterogenität von Abfall- und Sekundärrohstoffen, nicht möglich.

Hier sind spezifischen und innovative Forschungs- und Entwicklungsansätze notwendig. In der nachfolgenden Tabelle sind Technologien aufgeführt, die in der Abfallwirtschaft Anwendung finden und somit für Echtzeitanalytik-Anwendungen bei der Abfallaufbereitung grundsätzlich in Frage kommen.

Tabelle 3: Auswahl verschiedener in der Ressourcenwirtschaft eingesetzten Sensortechnologien

Sensortechnologie	Wirkprinzipien	Anwendungsmöglichkeiten	Anwendungsbeispiele
Farbkamera	Reflektion, Absorption	Informationen über Form/Geometrie, Abmessungen, Struktur, Farbe, Textur, Position [Bauer]	Trennung von Buntmetallen bei der Metallaufbereitung [Tomra]
Nahinfrarottechnik	Reflektion, Absorption	Identifikation von chemischen Verbindungen (z.B. Kunststoffe, Mineralien, H ₂ O, u.v.m.); Nicht Reflektierende (dunkle) Materialien können nicht detektiert werden [Schropp et. al.]	Echtzeitanalytik von Ersatzbrennstoffen [Krämer, Kölling]; Separation von Materialien (z.B. Kunststoffe, Papier) aus Abfallströmen
Laser-Triangulation	Reflektion	Bestimmung von Entfernungen und Volumina [Beel], [Schockert et. al.]. Je nach Körperform und Oberflächenbeschaffenheit können z.T. bestimmte Bereiche nicht erfasst werden, wodurch es zu Unsicherheiten bei der Volumenbestimmung kommen kann.	Kabel- und Leiterkartensortierung [Beel]
Röntgenfluoreszenz	Fluoreszenz	Bestimmung von Elementen durch charakteristische Fluoreszenzstrahlung, messbare Elemente von Beryllium bis Uran (bei WT-XRF). Bei der Echtzeitanalytik muss sich, aufgrund der Geschwindigkeit des Förderbandes, auf wenige Elemente beschränken werden. [Neubert et. al.]	Separation von Bleiglas bei der Altglasaufbereitung, Separation von Edelmetallen und NE-Metallen [Weiss]
Röntgentransmission	Transmission	Unterscheidung von Materialien anhand ihrer atomaren Dichte. [Köppke et. al.]	Separation flammenschutzmittelhaltiger Kunststoffe [Krämer, Walter]; Separation von Aluminium bei der Aufbereitung von Altautos
Elektromagnetische Induktion	Veränderungen im elektrischen Feld	Erkennen von Metallen durch Magnetfeldänderungen. Differenzierung zwischen Eisenmetallen, Edelmetallen, NE-Metallen möglich. [Klücke et. al.]	Separation von Metallen [Tomra]
Laser-Induced breakdown spectroscopy	Reflektion, Absorption	Identifikation aller Elemente des Periodensystems; Bestimmung von Konzentrationen durch mathematische Anpassung möglich; Aufgrund einer geringen Eindringtiefe erfolgt die Messung lediglich an der Oberfläche. [Gaastra et. al.]	Abreicherung von Mangan (Mn) bei der Aufbereitung von Stahlschrotten [Bohling]

Quellen zu Tabelle 3:

- Bauer, N. (Hrsg.): Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung - Qualitätssicherung in der Praxis. Norbert Bauer, Fraunhofer-Allianz Vision (Hrsg.); Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- Beel, H.: 3D and X-Ray Fluorescence Recognition in the Processing of Primary and Secondary raw materials. In Tagungsband Sensorgestützte Sortierung 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.); S. 67-68, Clausthal-Zellerfeld 2012
- Bohling, C.; John, A.; Feierabend, A.; Cordts, L.: Sorting of Primary and Secondary Raw Material using LIBS Sensors for Accurate Identification; Sensor Bases Sorting 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.); Clausthal-Zellerfeld, 2012
- Gaastra, M.; Küch, C.: Principles of laser-induced breakdown spectroscopy; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 74-87, Aachen 2014
- Klucke, A.; Stangl, S.; Burstaller, M.: 2D-NIR Spektroskopie und materialslektive induktive Metallerkennung im Recycling: Technologie und Praxisbeispiele. In Tagungsband Sensorgestützte Sortierung 2008; Heft 114 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.), S. 55 ff.; Clausthal-Zellerfeld 2008
- Köpcke, M.; Warcholik, M.; Knapp, H.: Principles of X-ray transmission; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 54-63, Aachen 2014
- Krämer, P.; Kölking, M.; Flamme, F.: Nahinfrarotgestützte Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe – Durchführung einer Systemanalyse im großtechnischen Maßstab. Tagungsband der 14. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 16, Flamme et al. (Hrsg.), Münster, 2015, S. 288 ff.
- Krämer, P.; Walter, G.; Flamme, S.; Mans, C.: Aufbereitung von Elektroaltgeräten – Möglichkeiten und Grenzen moderner Sortiersysteme zur Anreicherung hochwertiger Kunststofffraktionen. Müll und Abfall, Erich Schmidt Verlag, Ausgabe 03/2010, Berlin, 2010 S. 127 ff.
- Neubert, K.; Knapp, H.; Fietz, N.: Principles of X-ray fluorescence analysis; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 88-100, Aachen 2014
- Schockert, Y.; Berwanger, M.: Online volumetric flow measurement; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 356-363, Aachen 2014
- Schropp, C.; Raulf, K.; Robben, M.: Principles of near infrared; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 131-140, Aachen 2014; ISBN 978-3-8440-2563-7
- TOMRA Sorting: <https://www.tomra.com/en/solutions-and-products/sorting-solutions/recycling/sorting-equipment/titech-combisense>, Seitenaufwurf: 20/01/2015
- Weiss, M.: REDWAVE XRF – Detection with X-ray Fluorescence, new Applications in Processing; Sensor Bases Sorting 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.); Clausthal-Zellerfeld, 2012

Nachfolgend sind zwei Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Sensortechnologien zur Echtzeitanalytik aufgeführt. Die Beispiele verdeutlichen die Potenziale von Echtzeitanalytik zur Erhöhung der Ressourceneffizienz.

3. Echtzeitanalytik von Ersatzbrennstoffen durch NIR-Technik

3.1. Einführende Bemerkungen

Für die Verwertung von Ersatzbrennstoffen (EBS) aus aufbereiteten Siedlungs- und Produktionsabfällen ist die Qualitätssicherung von herausragender Bedeutung.

Aktuell erfolgt diese durch regelmäßige Beprobung des EBS und chemischer Analytik dieser Proben im Labor (Offline-Analytik). Da die Ergebnisse aus der chemischen Analytik erst mit einer zeitlichen Verzögerung von z.T. mehreren Tagen vorliegen, ist eine Einflussnahme auf den Prozess zur Steuerung der EBS-Qualität nicht mehr möglich.

Nahinfrarottechnik (NIR) ermöglicht die Identifikation von enthaltenen Stoffgruppen, Partikelflächen und Wassergehalten. Durch die Verknüpfung der detektierten Stoffgruppen mit stoffgruppenspezifischen Eigenschaften z.B. Brennwert, Chlor- und Aschegehalt, können für ein Ersatzbrennstoffgemisch diese brennstoffrelevanten Kennwerte in Echtzeit berechnet werden.

Ein von der TOMRA Sorting GmbH entwickeltes NIR-basiertes Echtzeitanalytik-System wird in Kooperation mit dem IWARU – Institut für Wasser | Ressourcen | Umwelt an der Fachhochschule Münster seit dem Jahr 2010 im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte weiterentwickelt.

3.2. Funktionsweise des Systems

Die Stoffgruppenidentifikation mittels Nahinfrarotspektroskopie basiert auf der Wechselwirkung von Materie und elektromagnetischer Strahlung. Diese versetzt die Moleküle der zu detektierenden Substanz in Schwingung, wodurch ein bestimmter Energiebetrag der Strahlung absorbiert wird [13]. Durch die Aufzeichnung der Absorptionsintensität über die Wellenlänge wird das Spektrum beschrieben [23]. Die Identifizierung erfolgt durch einen automatischen Abgleich der erzeugten charakteristischen Spektren mit im System hinterlegten Vergleichsspektren. Gleichzeitig wird durch das System die Projektionsfläche des identifizierten Partikels berechnet.

In einer integrierten Datenbank werden für die in einem heizwertreichen Stoffstrom enthaltenen charakteristischen Stoffgruppen (PE-Folien, Textilien, Holz, Papier, usw.), Regressionsmodelle zur stoffgruppenspezifischen Massen- und Wassergehaltsermittlung sowie spezifische mittlere Stoffparameter (z.B. Brennwert, Chlorgehalt, biogener Anteil) hinterlegt. In Bild 2 sind die Prozesse zur Berechnung der brennstoffcharakteristischen Eigenschaften eines detektierten Ersatzbrennstoffs dargestellt.

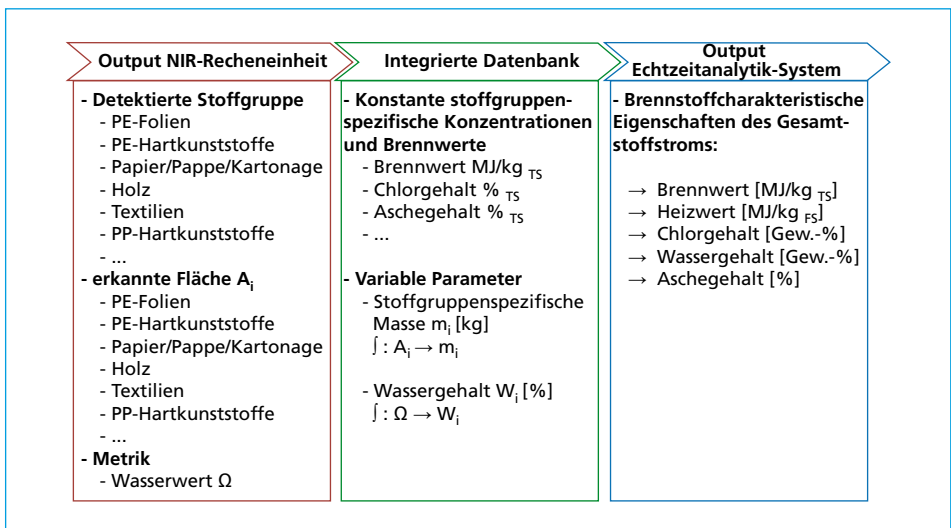


Bild 2: Schematische Darstellung des NIR-basierten Echtzeitanalytik-Systems

Die Gesamtkonzentrationen eines Stoffstroms über einen Zeitraum t werden mit den in der Datenbank gespeicherten mittleren stoffgruppenspezifischen Konzentrationen und Brennwerten und den über die detektierten Projektionsflächen berechneten Massen $[m]$ der jeweiligen Stoffgruppen, nach Gleichung 1 ermittelt.

$$\dot{C} = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot \dot{m}_i)}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i} \quad (1)$$

\dot{c} = Gesamtkonzentration [%] oder Energiegehalt [MJ/kg] über einen Zeitraum t
 c_i = Konzentration [%] oder Energiegehalt [MJ/kg] einer Stoffgruppe i
 \dot{m}_i = Masse einer Stoffgruppe i [kg] über einen Zeitraum t

Der Heizwert $[H_{u,FS}]$ wird mit Gleichung 2 über den Brennwert $[H_{o,TS}]$ und den Wassergehalt berechnet. Die Heizwertberechnung erfolgt nach RAL-GZ 724 gemäß den Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysevorschriften des BGS e.V. [14].

$$\dot{H}_{u,FS} = \dot{H}_{o,TS} \cdot 0,93 \cdot \frac{100 - \dot{W}}{100} = \frac{24,41 \cdot \dot{W}}{1.000} \quad (2)$$

$\dot{H}_{u,FS}$ = Heizwert [MJ/kg] bezogen auf die Originalsubstanz über einen Zeitraum t
 $\dot{H}_{o,TS}$ = Brennwert [MJ/kg] bezogen auf die Trockensubstanz über einen Zeitraum t
 \dot{W} = Wassergehalt [%] bezogen auf die Originalsubstanz über einen Zeitraum t

In Bild 3 ist beispielhaft die Ermittlung von brennstoffrelevanten Daten anhand eines Stoffgemisches dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit ist hier ein Ersatzbrennstoff bestehend aus den zwei Stoffgruppen Papier/Pappe/Kartonage (PPK) und Polyethylen-Folien (PE-Folien) modelliert.

In dem modellierten Beispiel werden durch das NIR-Aggregat 1.457,8 m² PPK und 9.535,4 m² PE-Folien über den Zeitraum t detektiert. Der über die Messung der

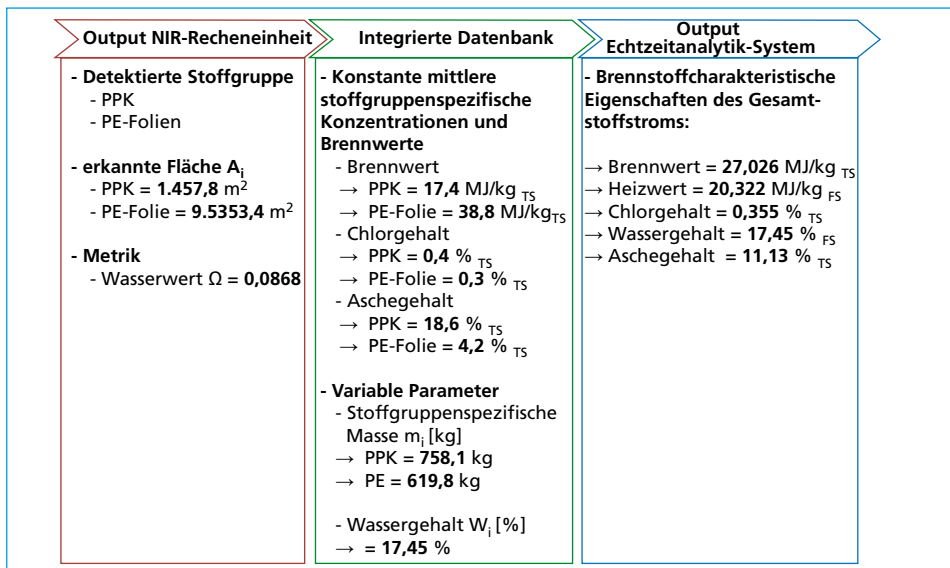


Bild 3: Beispiel zur Ermittlung brennstoffrelevanter Daten in Echtzeit mit Nahinfrarottechnik

Absorptionsintensität in einem spezifischen Wellenlängenbereich (*Wasserbande*) ermittelte Wasserwert beträgt für das Brennstoffgemisch 0,0868 [-].

Mit Hilfe der in der integrierten Datenbank hinterlegten Regressionsfunktionen werden die Gewichte der beiden Stoffgruppen über die detektierten Projektionsflächen und der Wassergehalt über den Wasserwert berechnet. Die hinterlegten Funktionen wurden im Rahmen umfangreicher Untersuchungen empirisch ermittelt. Die Berechnung der Gesamtkonzentrationen des Stoffstroms erfolgte gemäß den oben beschriebenen Gleichungen. Die Grundlagendaten und (Zwischen-)Ergebnisse sind in Bild 3 zusammenfassend dargestellt.

Das hier beschriebene System zur Echtzeitanalytik basiert auf dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesetz der großen Zahlen, wonach der Mittelwert mit wachsender Anzahl von Messungen gegen den Erwartungswert konvergiert [19].

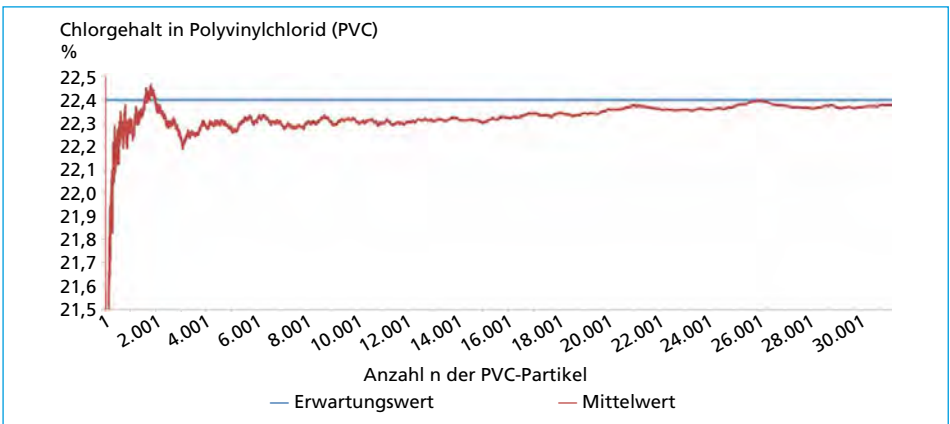


Bild 4: Entwicklung des mittleren Chlorgehaltes mit wachsender Partikelanzahl [n] (Bsp.)

In Bild 4 ist das Prinzip anhand des Chlorgehaltes in Polyvinylchlorid beispielhaft verdeutlicht. In diesem Beispiel wurde ein mittlerer Chlorgehalt von 22,4 Prozent in PVC als Erwartungswert hinterlegt. Der tatsächliche Cl-Gehalt in einem beliebigen PVC-Partikel entspricht nicht zwingend dem Erwartungswert, sondern streut logarithmisch normalverteilt um diesen [7]. Bildet man den Mittelwert des Chlorgehaltes der jeweils gemessenen Partikel, so konvergiert dieser mit wachsender Anzahl der gemessenen Partikel gegen den Erwartungswert (Bild 4).

In dem simulierten Beispiel entspricht der mittlere Chlorgehalt nach etwa 26.000 gemessenen Partikeln etwa dem Erwartungswert. Das dargestellte Beispiel macht deutlich, dass zur Erzielung robuster Ergebnisse ein Mindestdurchsatz (*kritische Anzahl an Messdaten*) notwendig ist.

Auf Basis der bisherigen Untersuchungen konnten darüber hinaus acht Ursachen identifiziert werden, die sich auf die Genauigkeit des Echtzeitanalytik-Systems auswirken. Diese sind in Bild 5 dargestellt.

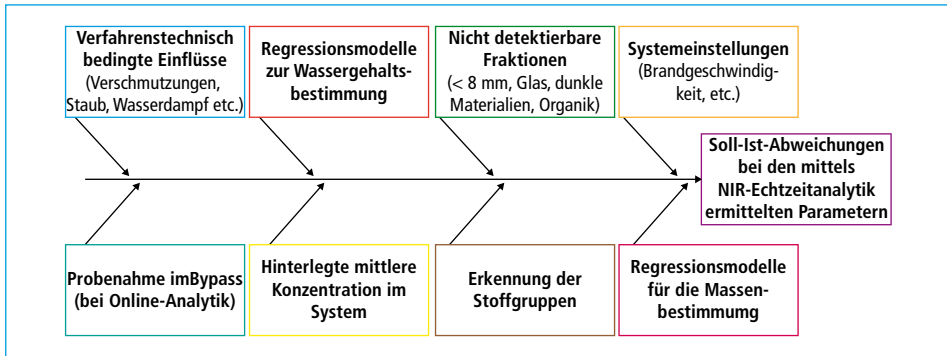


Bild 5: Ursachen die sich auf die Systemgenauigkeit auswirken

Quelle: Krämer, P.; Kölling, M.; Flamme, F.: Nahinfrarotgestützte Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe – Durchführung einer Systemanalyse im großtechnischen Maßstab. Tagungsband der 14. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 16, Flamme et al. (Hrsg.), Münster, 2015, S. 288 ff.

Ein Großteil der in Bild 5 beschriebenen Einflüsse werden durch die Wirkprinzipien von Nahinfrarotstrahlung verursacht. So erfolgt aufgrund der vergleichsweise geringen Eindringtiefe von NIR-Strahlung lediglich eine Detektion der Materialoberflächen. Hierdurch kann es u.a. bei sehr saugfähigen Stoffgruppen zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Wassergehalte kommen. Des Weiteren werden elektromagnetische Strahlen durch schwarze Materialien vollständig absorbiert. Aus diesem Grund ist der Anteil sehr dunkler Materialien im Ersatzbrennstoff möglichst gering zu halten, da diese nicht detektiert werden können. Dies gilt grundsätzlich auch für Materialien für die keine Vergleichsspektren hinterlegt sind. Das aktuell verwendete System erkennt Partikel ab einer Korngröße von etwa 8 mm, somit kann der Feinanteil < 8 mm ebenfalls nicht direkt detektiert und beschrieben werden.

Weitere Auswirkungen auf die Genauigkeit ergeben sich durch die Verfahrenstechnik, d.h. die Einbindung des Systems in einer Anlage. So sind negative Einflüsse auf die Messung durch Staub und Wasserdampf zu vermeiden und Systemparameter wie z.B. die Bandgeschwindigkeit optimal anzupassen. Erfolgt die Messung in einem Bypass, ist darüber hinaus die Repräsentativität des separierten Teilstroms zu gewährleisten.

Nicht zuletzt müssen die in der Datenbank hinterlegten stoffgruppenspezifischen Parameter repräsentativ sein um eine möglichst hohe Genauigkeit des Systems zu erzielen.

Bei detaillierten Untersuchungen einiger dieser Einflussfaktoren (in Bild 5 unterstrichen) konnten systematische Abweichungen belegt werden. Aus diesem Grund wurde die Hypothese aufgestellt, dass bei vergleichbaren Ersatzbrennstoffen und gleichen lokalen Rahmenbedingungen (Durchsatz, Korngröße, usw.), ebenfalls systematische Abweichungen bei den mittels NIR-Technik ermittelten Parametern zu erwarten sind. Diese These konnte im Rahmen großtechnischer Untersuchungen mit Ersatzbrennstoffen aus LVP-Sortierresten belegt werden (vgl. [11]). Somit ist es möglich durch eine Anpassung der hinterlegten Gleichungen die Soll-Ist-Abweichungen bei den mittels NIR-Echtzeitanalytik ermittelten Parametern zu minimieren [11]. Die Abweichungen von Echtzeit- zu Laboranalytik, die sich mit den optimierten Gleichungen für die großtechnisch untersuchten Stoffströme ergeben, sind für die verschiedenen brennstoffrelevanten Parameter in Bild 6 dargestellt.

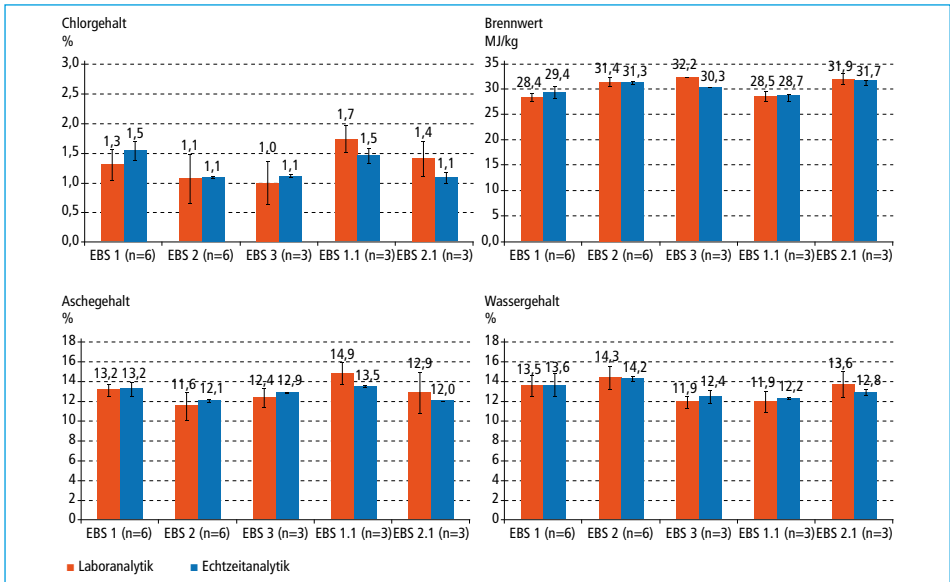


Bild 6: Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse von Echtzeit- und Laboranalytik mit optimierten Gleichungen

Quelle: Krämer, P.; Kölling, M.; Flamme, F.: Nahinfrarotgestützte Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe – Durchführung einer Systemanalyse im großtechnischen Maßstab. Tagungsband der 14. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 16, Flamme et al. (Hrsg.), Münster, 2015, S. 288 ff.

Wie man dem Bild entnehmen kann, ist es möglich mit NIR-Echtzeitanalytik vergleichsweise genaue Ergebnisse zu erzielen. So sind die Abweichungen beim Brennwert (o. rechts) relativ gering. Die maximale Differenz beträgt 1,9 MJ/kg (EBS 3). Auch die berechneten Wassergehalte (u. rechts) weisen vergleichsweise geringe Unterschiede auf. Hier liegt die maximale Differenz bei 0,8 Prozent-Punkte (EBS 2.1). Die Abweichungen beim Parameter Aschegehalt (u. links) sind ebenfalls als marginal zu bewerten. Die größte Differenz beträgt hier 1,4 Prozent-Punkte (EBS 1.1).

Beim Chlorgehalt beträgt die maximale Abweichung 0,3 Prozent-Punkte (EBS 2.1). Die im Vergleich zu den Parametern Brennwert, Asche- und Wassergehalt starke Streuung der Chlorwerte ist auf den Effekt zurückzuführen, dass die Chlorfrachten sich nicht über die verschiedenen Stoffgruppen relativ gleichmäßig verteilen, sondern im Wesentlichen durch die Stoffgruppe (PVC) generiert werden.

Durch weitergehende Berechnungen der Parameter über enthaltene Stoffgruppenanteile in Verbindung mit mittleren stoffgruppenspezifischen Konzentrationen, werden die Ergebnisse der Echtzeit- und Laboranalytik weiter validiert (Methode der fraktionierenden Charakterisierung).

3.3. Beitrag zur Ressourceneffizienz

Durch eine direkte Messung der Brennstoffqualität ist es möglich, den Brennstoff bei der Produktion besser an die Vorgaben des Verwerters anzupassen. Echtzeitdaten zur Brennstoffqualität bieten die Möglichkeit, den Aufbereitungsprozess effizienter zu

steuern, wodurch Abfälle minimiert, die Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen gesteigert und Energie eingespart werden kann.

Bei der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen kann z.B. das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärbrennstoffen über die Bestimmung von Heizwert, Asche- und Chlorgehalt, optimal eingestellt werden. Hierdurch lässt sich der Einsatz von Primärbrennstoffen minimieren und die Ressourceneffizienz ebenfalls steigern.

4. Echtzeitanalytik für metallhaltige Stoffströme

4.1. Einführende Bemerkungen

Durch den zunehmenden Einsatz von hochfunktionellen und für Deutschland wirtschaftsstrategisch wichtigen Metallen ist zu erwarten, dass anthropogene Lagerstätten zukünftig eine höhere Relevanz für die Rohstoffversorgung haben werden. Gleichzeitig führt u.a. neues Produktdesign zu steigenden Wertstoff- und Störstoffkonzentrationen in Konzentraten und Rückständen aus der Aufbereitung, welche bestehende metallurgische Prozessrouten (primär und sekundär) in Ausbeute sowie Energie- und Rohstoffeinsatz negativ beeinflussen.

Eine optimale metallurgische Prozesssteuerung erfordert einen ganzheitlichen Charakterisierungsansatz für sekundäre Rohstoffe, welcher bisher nur in aufwendigen Einzelanalysen umgesetzt wird. Aus diesem Grund plant das IWARU – Institut für Wasser | Ressourcen | Umwelt an der Fachhochschule Münster in einem Projektkonsortium die Entwicklung eines aus mehreren Sensoren bestehendes Echtzeit-Analytik-Systems zur Charakterisierung von metallreichen Stoffströmen. Die Charakterisierung orientiert sich dabei an den Spezifikationen und Informations-Bedürfnissen der nachgelagerten metallurgischen Prozesse (Fe- und NE-Metallurgie) und beinhaltet Angaben

- über den Gehalt an Stahl, Aluminium und Kupfer, mit den jeweils charakteristischen Legierungen,
- über die Gehalte an edelmetallhaltigen Wertstoffträgern und Nebenmetallen mit wirtschaftsstrategischer Bedeutung,
- über nichtmetallische Störstoffe (Organik, Keramik und Glas) und
- zu physikalischen Daten wie Korngrößenverteilung, Stückgewichte, Kornformen.

Gekoppelt mit empirischen Daten, die das Stoffinventar im Input des Aufbereitungsprozesses und die Ergebnisse aus empirischen Schmelzversuchen berücksichtigen, soll die Charakterisierung um nicht direkt detektierbare Inhaltstoffe und eine metallurgische Bewertung erweitert werden.

4.2. Beitrag zur Ressourceneffizienz

Durch die Entwicklung eines effizienten Systems zur Echtzeitanalytik metallhaltiger Stoffströme kann die Separation werthaltiger Fraktionen (insbesondere Edelmetalle) und die Kreislaufführung von Legierungselementen (Nickel, Wolfram, Tantal, Neodym, usw.)

optimiert und Verluste dieser Ressourcen minimiert werden. Echtzeitanalytik kann so zu einer Verbesserung des funktionalen Recyclings und somit zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz beitragen.

5. Fazit und Ausblick

Der Einsatz von Sensortechnologien in der Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen und gehört heute in vielen Bereichen zum Stand der Technik (Tabelle 3). Derzeit werden diese Technologien insbesondere zum Sortieren von Materialien eingesetzt. Durch eine intelligente Verknüpfung der mittels Sensoreinheit generierten Daten mit materialspezifischen empirisch erhobenen und/oder mit von weiteren Sensortechnologien ermittelten Daten, können zusätzliche Informationen berechnet und bereitgestellt werden.

Diese in Echtzeit bereitgestellten Informationen lassen sich nutzen, um Prozesse effizient zu steuern. Hierdurch können Materialausbeuten/-qualitäten verbessert, Energie eingespart und Abfällen minimiert werden.

Mögliche Auswirkungen von Echtzeitanalytik-Technologien auf die verschiedenen Dimensionen der Ressourceneffizienz sind in Tabelle 4 beschrieben.

Dimension	Beispiel für Ressourceneffizienz
Technische	Die Möglichkeiten zur Prozesssteuerung und -kontrolle vermindern stoffstrombedingte Anlagenstillstände und führen zu einem optimalen Anlagendurchsatz.
Ökonomische	Durch eine optimierte (dynamische) Abfallaufbereitung können Erlöse für Sekundärrohstofffraktionen erhöht und/oder Abfälle zur Beseitigung vermindert werden.
Ökologische	Durch die verbesserte Aufbereitung von Abfällen und Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen können Energie- und Primärrohstoffe eingespart werden.
Soziale	Händische Sortierungen und Qualitätskontrollen bei der Aufbereitung von Abfällen können durch den Einsatz von Echtzeitanalytik-Systemen weiter minimiert werden.
Politische	Durch eine effiziente Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen kann der Import aus Ländern mit niedrigen Sozial- und Umweltstandards sowie die Importabhängigkeit insgesamt reduziert werden.

Tabelle 4: Mögliche Auswirkungen der Echtzeitanalytik auf die verschiedenen Dimensionen der Ressourceneffizienz

Wie der vorliegende Beitrag verdeutlicht, existieren bereits vielversprechende Ansätze zur Echtzeitanalytik von Abfall- und Sekundärrohstoffen. Zukünftig sind weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet zu erwarten.

6. Quellen

- [1] Bauer, N. (Hrsg.): Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung - Qualitätssicherung in der Praxis. Norbert Bauer, Fraunhofer-Allianz Vision (Hrsg.); Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- [2] Beel, H.: 3D and X-Ray Fluorescence Recognition in the Processing of Primary and Secondary raw materials. In Tagungsband Sensorgestützte Sortierung 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umweltechnik (Hrsg.); S. 67-68, Clausthal-Zellerfeld 2012

- [3] Bohling, C.; John, A.; Feierabend, A.; Cordts, L.: Sorting of Primary and Secondary Raw Material using LIBS Sensors for Accurate Identification; Sensor Bases Sorting 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.); Clausthal-Zellerfeld, 2012
- [4] Flamme, S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Dissertation an der Bergischen Universität – Gesamthochschule Wuppertal; Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 5, Labor für Abfallwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft, Umweltchemie (Hrsg.), Wuppertal, 2002
- [5] Gaastra, M.; Küch, C.: Principles of laser-induced breakdown spectroscopy; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 74-87, Aachen 2014
- [6] Kessler, R. W.: Prozessanalytik – Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006
- [7] Ketelhut, R.: Choranalytik in heizwertreichen Fraktionen – nicht mehr (als) nötig!; Müll und Abfall, ESV Erich Schmidt Verlag, Ausgabe 01/2008, S. 25 ff.
- [8] Klucke, A.; Stangl, S.; Burstaller, M.: 2D-NIR Spektroskopie und materialelektive induktive Metallerkennung im Recycling: Technologie und Praxisbeispiele. In Tagungsband Sensorgestützte Sortierung 2008; Heft 114 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.), S. 55 ff.; Clausthal-Zellerfeld 2008
- [9] Köpcke, M.; Warcholik, M.; Knapp, H.: Principles of X-ray transmission; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 54-63, Aachen 2014
- [10] Krämer, P.: Analyse des relevanten Markt- und Wettbewerbsumfeldes für die Weiterentwicklung und Einführung einer nahinfrarotgestützten Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe. Master-Thesis an der Fachhochschule Münster, Münster, 2011, (unveröffentlicht)
- [11] Krämer, P.; Kölking, M.; Flamme, F.: Nahinfrarotgestützte Echtzeitanalytik für Ersatzbrennstoffe – Durchführung einer Systemanalyse im großtechnischen Maßstab. Tagungsband der 14. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 16, Flamme et al. (Hrsg.), Münster, 2015, S. 288 ff.
- [12] Krämer, P.; Walter, G.; Flamme, S.; Mans, C.: Aufbereitung von Elektroaltgeräten – Möglichkeiten und Grenzen moderner Sortiersysteme zur Anreicherung hochwertiger Kunststofffraktionen. Müll und Abfall, Erich Schmidt Verlag, Ausgabe 03/2010, Berlin, 2010 S. 127 ff.
- [13] Marquardt, J.: Nah-Infrarot-Spektroskopie für die schnelle Polymeranalytik und die zerstörungsfreie Evaluierung von Materialeigenschaften. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br., 2003; <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/1272/>
- [14] N.N.: Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysevorschriften, Stand: 2012, Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e. V. (BGS e.V.), Münster, 2012
- [15] Neubert, K.; Knapp, H.; Fietz, N.: Principles of X-ray fluorescence analysis; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 88-100, Aachen 2014
- [16] Nippa, M.: Herausforderungen der Bewertung von Ressourceneffizienz. Vortrag auf dem r³-Kickoffmeeting, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Freiberg, April 2013, URL: http://www.r3-innovation.de/mediathek/r3/pdf/r3_kickoff/4_Nippa_r3_Kickoff.pdf
- [17] Peters, U.: Messung der relevanten Leitgrößen zur Beobachtung der Fermentation am Beispiel Bier; Dissertation an der TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 1999
- [18] Rotter, V. S.: Die Bedeutung einheitlicher Gütekriterien und Analyseverfahren für Ersatzbrennstoffe; In: EBS-Analytik – Anforderung, Probleme, Lösungen; Bilitewski, B.; Werner, P.; Rotter, S.; Hoffmann, G. (Hrsg.), Eigenverlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., Dresden, 2008, S. 15-31

- [19] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. 13. aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [20] Schockert, Y.; Berwanger, M.: Online volumetric flow measurement; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 356-363, Aachen 2014
- [21] Schropp, C.; Raulf, K.; Robben, M.: Principles of near infrared; Sensor Technologies: Impulses for the Raw Material Industry. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung, Pretz, T.; Quicker, P.; Wotruba, H. (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, S. 131-140, Aachen 2014; ISBN 978-3-8440-2563-7
- [22] Schwedt, G.: Analytische Chemie – Grundlagen, Methoden und Praxis. Zweite, vollständig überarbeitete Auflage; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008
- [23] Skrabal, P. M.: Spektroskopie – Eine methodenübergreifende Darstellung vom UV- bis zum NMR-Bereich; UTB Verlag, Stuttgart 2008
- [24] TOMRA Sorting: <https://www.tomra.com/en/solutions-and-products/sorting-solutions/recycling/sorting-equipment/titech-combisense>, Seitenaufruf: 20/01/2015
- [25] VDI-Richtlinie: VDI 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2014
- [26] Weiss, M.: REDWAVE XRF – Detection with X-ray Fluorescence, new Applications in Processing; Sensor Bases Sorting 2012; Heft 128 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (Hrsg.); Clausthal-Zellerfeld, 2012

Recycling und Rohstoffe



Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann • Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

CD Recycling und Rohstoffe, Band 1 und 2

ISBN: 978-3-935317-51-1
Erscheinungsjahr: 2008/2009
Preis: 35,00 EUR

Recycling und Rohstoffe, Band 2

ISBN: 978-3-935317-40-5
Erscheinungsjahr: 2009
Hardcover: 765 Seiten
Preis: 35,00 EUR

Recycling und Rohstoffe, Band 3

ISBN: 978-3-935317-50-4
Erscheinungsjahr: 2010
Hardcover: 750 Seiten, mit farbigen Abbildungen
Preis: 50,00 EUR

Recycling und Rohstoffe, Band 4

ISBN: 978-3-935317-67-2
Erscheinungsjahr: 2011
Hardcover: 580 Seiten, mit farbigen Abbildungen
Preis: 50,00 EUR

Recycling und Rohstoffe, Band 5

ISBN: 978-3-935317-81-8
Erscheinungsjahr: 2012
Hardcover: 1004 Seiten, mit farbigen Abbildungen
Preis: 50,00 EUR

Recycling und Rohstoffe, Band 6

ISBN: 978-3-935317-97-9
Erscheinungsjahr: 2013
Hardcover: 711 Seiten, mit farbigen Abbildungen
Preis: 50,00 EUR

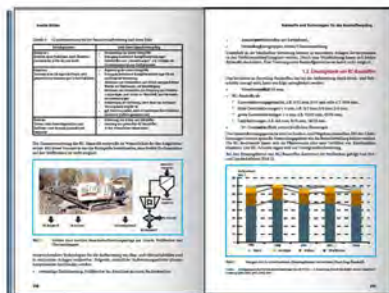
Recycling und Rohstoffe, Band 7

ISBN: 978-3-944310-09-1
Erscheinungsjahr: 2014
Hardcover: 532 Seiten, mit farbigen Abbildungen
Preis: 50,00 EUR

175.00 EUR
statt 320.00 EUR

Paketpreis

CD Recycling und Rohstoffe, Band 1 und 2
Recycling und Rohstoffe, Band 2 bis 7



Bestellungen unter www.vivis.de
oder

Dorfstraße 51
D-16816 Nietzwerder-Neuruppin
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 8

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,
Max Müller, Cordula Müller
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.