

Potential of Sensor-based Sorting Technology in Landfill Mining

Bastian Küppers, Daniel Vollprecht and Roland Pomberger

During the last years, the topic of landfill mining has gotten more attention. Especially the concept of enhanced landfill mining (ELFM) was tackled in various peer-reviewed papers. Therein the application of advanced technology aims at mining materials from landfilled waste for material recycling and energy usage. One of such advanced technologies are sensor-based sorting (SBS) systems using various types of detectors as near infrared (NIR), x-ray fluorescence and VIS (colour) spectroscopy.

To determine possible applications for SBS in ELFM, the composition of household waste landfills was studied. Additionally the effects of mechanical pre-treatment on material flow composition was taken into consideration. Based on the findings obtained, different material streams within a mechanical treatment plant of an ELFM project were found to show potential for the application of SBS. Especially wind sifter heavy fractions are interesting for such an application due to significant amounts of inerts and high calorific combustible fractions. Latter can be used as potential refused derived fuel (pRDF) and inerts could be utilised as recycling building material if enriched sufficiently. For this sorting task a hyper spectral imaging (HSI) NIR sensor is suitable.

To verify the suitability of HSI-NIR technology for the recognition and classification of ELFM material it was tested with a state of the art sensor-based sorting machine. It was found that in the wave length range of 1000 to 1700 nm a differentiation between inerts, pRDF and impurities as PVC is possible.

Einsatz sensorgestützter Sortierverfahren im Landfill Mining

Bastian Küppers, Daniel Vollprecht und Roland Pomberger

1.	Landfill Mining und Enhanced Landfill Mining im Vergleich	602
2.	Warum sensorgestützte Sortierung?	603
2.1.	Voraussetzungen für den Einsatz von sensorgestützter Sortierung	603
2.2.	Potenzielle Anwendungen für sensorgestützte Sortiersysteme im ELFM	604
2.3.	Einflussfaktor Deponie	605
3.	EBS-Erzeugung im (E)LFM – der aktuelle Wissensstand	605
4.	Fallbeispiel für die Einsatzmöglichkeiten von sensorgestützten Sortiersystemen im ELFM	606
4.1.	Anforderungen an sensorgestützte Sortiersysteme im ELFM	609
4.2.	Auswahl eines geeigneten Detektionsverfahrens	609
4.3.	Praktische Untersuchungen zur Eignung von HSI-NIR-Technologie im ELFM	610
5.	Zusammenfassung	612
6.	Literatur	612

Im Zuge des Horizon 2020 Projekts *NEW-MINE* wird die Thematik Enhanced Landfill Mining (ELFM) erforscht. Ziel ist es herauszufinden ob hochwertige Outputströme mittels tiefergehenden Aufbereitungs- und Sortiertechnologien generiert werden können, sodass der Rückbau von Deponien möglichst kosteneffizient umgesetzt werden kann. Die Notwendigkeit eines solchen Deponierückbaus kann aus unterschiedlichen Gründen gegeben sein:

So kann der Platzbedarf von Deponien einen Beweggrund für den Deponierückbau darstellen. Insbesondere wenn sich die Deponie in einer Gegend mit hohen Grundstückspreisen aufgrund dem Mangel an Bebauungsfläche befindet, kann der Deponierückbau mit dem Ziel der Baulandgewinnung rentabel sein. [2]

Ein weiterer Grund kann in von Deponien ausgehenden Gefahren für Mensch und Umwelt gesehen werden. Dies kann beispielsweise bei wilden Deponien, ohne Multi barrierenkonzept, der Fall sein. In solchen Fällen können austretendes Sickerwasser

und Methanemissionen zu Grundwasserverschmutzung, Belastungen für das Ökosystem und zur Erderwärmung beitragen. So kann entweder eine Umstrukturierung [2] und Erneuerung der Deponie oder der vollständige Deponierückbau notwendig sein. [8, 10, 15]

Die Verknappung von Deponievolumen stellt ebenfalls einen Grund für einen Deponierückbau dar [18]. Sofern dies zukünftig wirtschaftliche ist, könnte ein Deponierückbau betrieben werden, um verwertbare Bestandteile des bereits gefüllten Deponiekörpers zu verwerten und so das genutzte Deponievolumen zu verringern. Auf diese Weise würden neue Ablagerungskapazitäten geschaffen werden. [8]

Letztlich kann auch der Materialwert der deponierten Stoffe selbst Grund für einen Rückbau von Deponien sein. Die Zusammensetzung und damit der Wert des Deponats hängen allerdings von verschiedenen Faktoren wie dem Alter der Deponie, den deponierten Abfallarten, von Land und Region, in denen sich die Deponie befindet, und von der Deponierung vorangegangenen Aufbereitungstiefe ab. [13]

1. Landfill Mining und Enhanced Landfill Mining im Vergleich

Der Deponierückbau aus den genannten Gründen 1-3 ist meist kostenintensiv und kann durch Landfill Mining (LFM) günstiger gestaltet werden, indem durch die Aufbereitung des Deponats verwertbare Outputfraktionen mit positivem Marktwert erzeugt und vermarktet werden. Dabei wurden in LFM-Projekten seit den 1950er Jahren meist vereinfachte Prozessketten verwendet um die mechanische Aufbereitung möglichst kostengünstig zu gestalten. Folglich können auch nur begrenzte Mengen an Deponat mit geringer Qualität zurückgewonnen werden. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass der Fokus selten auf die Rückgewinnung von sekundären Energie-, Eigenschafts- oder Elementrohstoffen gelegt wurde, sondern die Verringerung von Umwelteinflüssen sowie die Sanierung der Deponie Ziel des LFM war. [2]

Im Gegensatz dazu zielt das Konzept des Enhanced Landfill Minings (ELFM) verstärkt darauf ab Wertstoffe (Waste-to-Material, WtM) und Energie (Waste-to-Energy, WtE) aus den Deponien zu gewinnen. Im Deutschen wird abweichend vom Englischen der Begriff *Landfill Mining* ohnehin nur für verwertungsorientierten Rückbau benutzt. Dazu werden komplexere Prozessketten mit innovativeren Technologien verwendet. Diese ermöglichen es ein höheres Ausbringen der Wertstoffe zu erreichen. Außerdem sollen die vermarktbareren Outputströme höhere Reinheiten aufweisen, wodurch bessere Marktpreise erzielt und so ein ökonomisch besseres Mining möglich sein soll. Studien haben gezeigt, dass ELFM primär durch die Schaffung von Deponievolumen, die Gewinnung von Metallen sowie einer qualitative hochwertigen, brennbaren Fraktion angetrieben wird. [2, 5, 7]

Die Problematik in der Umsetzung von (E)LFM Projekten liegt meist darin begründet, dass die Kosten in der Regel den Erlös übersteigen. Studien zufolge ist der Anreiz für Deponiebetreiber aktuell größer die Deponie zu schließen und in die Nachsorgephase zu überführen als einen Rückbau zu betreiben. Allenfalls einfache LFM-Projekte sind nach aktuellem Stand sinnvoll, nicht aber komplexe ELFM-Projekte. [7]

Wenn sich diese Rahmenbedingungen (gesetzlich, politisch, etc.) ändern, beispielsweise durch den Erlass neuer Direktiven, könnte das Konzept des ELM für Deponiebetreiber attraktiver werden. Die vorliegende Arbeit soll für einen solchen Fall das Potenzial für die Gewinnung möglicher Stoffgruppen/Wertstoffe mittels sensorgestützten Sortierverfahren näher beleuchten.

2. Warum sensorgestützte Sortierung?

Viele Aufbereitungsaggregate zeichnen sich dadurch aus, dass das jeweilige Trennkriterium direkt mit dem der austragenden Kraft verbunden ist. So wird in Magnetscheidern ein Magnetfeld für die Separation von Eisenmetallen genutzt, während beispielsweise Wirbelstromscheider Wirbelströme induzieren um Nichteisen-Metalle abzutrennen. Die Besonderheit von sensorgestützten Sortiersystem (SGS) ist, dass die austragende Kraft nicht direkt an die Materialeigenschaften gekoppelt ist. So ist es möglich Objekte auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung, Form, Farbe oder Dichte mittels Druckluftstößen oder Robotertechnologie vom restlichen Materialstrom abzutrennen. Zudem können mehrere Objekt- und Materialeigenschaften zeitgleich erkannt und für die Klassifizierung sowie den Austrag genutzt werden (Sensorfusion). [1, 4]

Durch den Einsatz von sensorgestützten Sortiersystemen können höherwertige Outputströme aus einem ELM-Prozess generiert werden. Diese können durch ein- oder mehrstufige Sortierschritte (kaskadische Nutzung der SGS) bereits bestehender wertstoffreicher Fraktionen weiter veredelt oder neu erzeugt werden [1]. Auf diese Weise ist es möglich aus bereits bestehenden Kunststoffmischfraktion die einzelnen Kunststoffsorten abzutrennen und sortenreine Kunststofffraktionen zu erzeugen. [7]

2.1. Voraussetzungen für den Einsatz von sensorgestützter Sortierung

Um eine optimale Funktionsweise von SGS zu gewährleisten ist es notwendig das LFM-Material vorzubehandeln. Ein wichtiger Schritt der Vorkonditionierung ist die Trocknung des Deponats, sodass eine anschließende trockenmechanische Aufbereitung möglich ist [3], wobei eine Grobaufbereitung mittels ballistischer Separation bereits vor der Trocknung erfolgen kann [3]. Da SGS ein enges Kornband erfordert, sollten Fein- und Grobkorn als Störstoffe abgetrennt sowie passende Korngrößenbereiche durch eine Vorklassierung erzeugt werden. Die produzierten Korngrößenfraktionen sind an die maschinellen Anforderungen der nachfolgenden Aufbereitungsaggregate anzupassen. Außerdem kann die Klassierung genutzt werden um den Materialstrom in für die Aufbereitung geeignete Volumen- und Massenströme zu unterteilen. Auch die vorgeschaltete Sortierung kann sowohl genutzt werden um Wertstoffe im Materialgemisch anzureichen, als auch um Störstoffe wie leicht flugfähige Stoffe (z.B. Folien) abzutrennen. [12]

Wird die Aufbereitung auf dem Deponiegelände durchgeführt, so müssen die SGS an die nachteiligen Umgebungsbedingungen angepasst sein. Die Aufbereitung kann durch Witterungsbedingungen oder Staub beeinflusst werden, weshalb beispielsweise Verschmutzungen auf Leuchtmitteln zu Betriebsstörungen von SGS oder verminderter Funktionsweise Aggregate bewirken können. [4]

2.2. Potenzielle Anwendungen für sensorgestützte Sortiersysteme im ELMF

Die aktuell in der Abfallwirtschaft verwendeten SGS werden für verschiedene Einsatzgebiete genutzt. SGS könnten im ELMF für dieselben oder ähnliche Anwendungen fungieren. Es ist jedoch zu erwarten, dass die so erzeugten Outputfraktionen aufgrund des stärker verschmutzten Inputmaterials verminderte Qualitäten aufweisen.

Für Metalle, Glas/Keramik, Steine und andere inerte Bestandteile stellt theoretisch die stoffliche Verwertung eine Option dar, sofern störende Materialien, wie heizwertreiche Stoffgruppen, separiert werden können. [13] Für diesen Verwertungsweg müssten jedoch (bundes-)länderspezifische Anforderungen eingehalten werden, was das Recycling solcher Stoffgruppen erschwert. [18]

Zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen (EBS) sind bereits seit einigen Jahren nahinfrarot (NIR)-gestützte Sortiersysteme etabliert. Diese finden unter anderem in Gewerbeabfallaufbereitungs- und mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen Verwendung. Zweck der NIR-Sortierer ist die Erzeugung einer hochkalorischen Fraktion aus Kunststoffen, PPK, Textilien und Holz. Dabei ist es beispielsweise möglich Kunststoffe wie Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET) auszusortieren um geringe Schadstoffgehalte (z.B. Chlor und Antimon) im EBS sicherzustellen. [12]

In mehreren Projekten wurde die WtE-Route für eine hochkalorische Fraktion aus dem (E)ELMF behandelt und als realistische Option eingeschätzt [3]. Eine qualitativ hochwertige WtM-Route wurde auf Grund erhöhter Verunreinigungsgrade der Wertstoffe als nicht erfolgsversprechend angesehen. Es ist anzumerken, dass eine Einstufung der heizwertreichen Fraktion aus dem (E)ELMF als EBS problematisch sein kann. Landespezifisch müssen zum Teil unterschiedliche Grenzwerte eingehalten werden. So sind in Italien beispielsweise Grenzwerte bezüglich drei relevanten Brennstoffeigenschaften einzuhalten: Unterer Heizwert, Chlor- und Quecksilbergehalt. [11, 13]

Je nach rechtlicher Lage muss bei der energetischen Verwertung heizwertreicher Fraktionen aus dem ELMF also bedacht werden, dass das Deponat dauerhaft physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen in der Deponie ausgeliefert ist. Dementsprechend ist zu erwarten, dass die physikalischen und chemischen Eigenschaften der verschiedenen Stoffgruppen Veränderungen unterworfen sind. So sind beispielsweise in deponierten Kunststoffen, im Vergleich zu heute produzierten oder als Abfall anfallenden Kunststoffen, erhöhte Silizium-, Chlor, Aluminium- und Stickstoffgehalte festgestellt wurden. Der gemessene Schwefelanteil im Deponat lag wiederum deutlich unter dem, heutiger Kunststoffe. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass neben der Feuchtigkeit der Anteil an Verschmutzungen sowie der Ascheanteil, auch nach einer Reinigung des Deponats, höher ist als bei normalen Abfällen. Dennoch weisen insbesondere die kunststoffbasierten Abfälle ein hohes Potenzial für die energetische Nutzung auf. [19]

Da Deponieraum immer knapper wird, können in Zukunft beide Verwertungswege, WtM und WtE, eine Option darstellen das bislang genutzte Deponievolumen zurückzugewinnen [18]. Gemäß der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) wäre eine stoffliche Verwertung der energetischen jedoch vorzuziehen.

2.3. Einflussfaktor Deponie

Neben den ökonomischen und rechtlichen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit sich die stoffliche und energetische Verwertung von LFM-Material lohnt, stellt die Zusammensetzung der jeweiligen Deponie einen maßgeblichen Faktor für die Umsetzbarkeit eines (E)LFM-Projekts dar. Hierzu gehört sowohl die gesamtheitliche Betrachtung einer Deponie (Wie viel ist insgesamt von welcher Stoffgruppe enthalten?), sowie das Wissen darüber, wo sich bestimmte Materialien befinden. So könnte bereits der Abbau selbst selektiv durchgeführt werden.

Da Informationen bezüglich dem Aufbau einzelner Deponien und der Verteilung von Stoffgruppen darin immer einzelfallbezogen sind, wird an dieser Stelle der Fokus auf die Zusammensetzung von Deponien, insbesondere von Hausmülldeponien, gelegt. Weil die getrennte Verwertung einer heizwertreichen Fraktion (WtE) und mineralischer Abfälle (WtM) am vielversprechendsten ist, werden diese Stoffgruppen, neben ökonomisch interessanten Fraktionen wie Fe- und NE-Metallen näher betrachtet.

Je nach Ursprung des deponierten Abfalls, Sammelsystem, vorangegangener Aufbereitung und Alter der Deponie schwankt der Anteil des enthaltenen potenziellem EBS (pEBS) erheblich zwischen 20 und 50 %. Der Heizwert einer solchen Fraktion wird teilweise mit 16 bis 20 MJ/kg beziffert. Um dieses Material in der notwendigen Reinheit nutzen zu können sind allerdings modernste Verfahrensschritte notwendig. So kann nach der Separation eines pEBS von den mineralischen Bestandteilen der Deponie eine nass-mechanische Aufbereitung und eine Trocknung des pEBS notwendig sein. Je nach Definition kann auf die gesamte Deponie bezogen ein Feinkornanteil von 50 bis 70 Ma.-% (< 20 bis 30 mm) angenommen werden, während der Gehalt von Inertem bei etwa 10 Ma.-% liegen kann. Der Metallgehalt von Deponien ist meist vergleichsweise gering. [6, 9, 13, 16, 19]

3. EBS-Erzeugung im (E)LFM – der aktuelle Wissensstand

Der Einsatz von LFM-Material als brennbare, heizwertreiche Fraktion wurde nicht nur theoretisch betrachtet, sondern in der jüngsten Vergangenheit auch praktisch erprobt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse stellen wertvolle Informationen für die Erarbeitung eines geeigneten Aufbereitungsschemas des Deponats dar. So hat sich die biologische Trocknung als geeignete Maßnahme zur Vorbehandlung des Deponats gezeigt, sodass der Wassergehalt des Inputmaterials reduziert, Haftkräfte zwischen Partikeln verringert und anschließend inerte Bestandteile von der heizwertreichen Fraktion abgetrennt werden können. [3, 11]

Darüber hinaus stellt die Verbrennung des (p)EBS die praktischste Möglichkeit dar, einen Nutzen (thermische Energie) mit aktuell zur Verfügung stehenden Technologien aus Deponat zu gewinnen. Andere mögliche Technologien, wie Vergasung, Pyrolyse, Hydrierung und stoffliche Verwertung können nur angestrebt werden, wenn eine aufwendigere Vorbehandlung (Reinigung, Trocknung, Zerkleinerung und tiefere Sortierung) erfolgen. [19]

Praktische Versuche zu einer solchen energetischen Verwertung durch Verbrennung haben gezeigt, dass die Eigenschaften von heizwertreichen Fraktionen aus dem LFM starken Schwankungen unterworfen sind. Dies betrifft den Heizwert sowie den Wasser- und Aschegehalt. Bei der Beprobung des Materials wurden untere Heizwerte zwischen 9,2 und 23,9 MJ/kg sowie Aschegehalte von bis zu 49,6 Ma.-% festgestellt. Die erhöhten Aschegehalte wurden auf den hohen Feinanteil, in Form von Anhaftungen in der heizwertreichen Fraktion, zurückgeführt. Der Wassergehalt lag zwischen 9,1 und 30 Ma.-%. Diese Einflussgrößen, sowie der stellenweise hohe Chloranteil haben dazu geführt, dass die Brennstoffeigenschaften des untersuchten Materials als problematisch eingestuft wurden. [14]

Bei der Monoverbrennung der heizwertreichen Fraktion aus dem LFM konnte ein Anstieg der Konzentration von HCl und SO₂ und damit des Bedarfs an Kalkmilch ermittelt werden. Außerdem unterlag die Dampferzeugung starken Schwankungen und die Rosta-sche wiesen feinere Korngrößenverteilungen sowie erhöhte Cl-Gehalte im Eluat auf. Im Reingas wurden lediglich erhöhte Messwerte für HCl festgestellt. Aufgrund dieser und weiterer Versuche konnte erarbeitet werden, dass eine Mitverbrennung des LFM-EBS mit normalem EBS im Verhältnis 1 zu 1 möglich erscheint. Eine Monoverbrennung des nicht vorbehandelten Materials ist jedoch problematisch. [14]

4. Fallbeispiel für die Einsatzmöglichkeiten von sensorgestützten Sortiersystemen im ELMF

Für die nachfolgenden Betrachtungen zu Einsatzmöglichkeiten von SGS im ELMF wird beispielhaft eine Deponie herangezogen. Auf der betreffenden Deponie, der FCC Austria Abfall Service AG in Halbenrain (Österreich), wurde im Jahr 2016 ein LFM-Projekt durchgeführt. Dabei sollten 3.500 Tonnen deponierter Abfall ausgegraben und anschließend biologisch und mechanisch aufbereitet werden, um das Potenzial für weitere

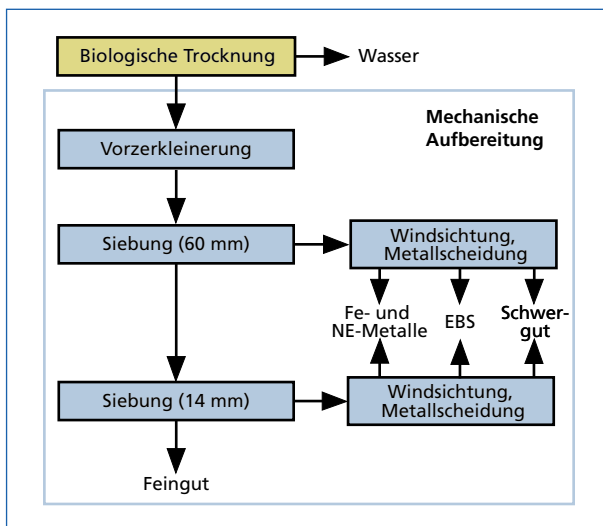


Bild 1:

Schematisches Vorgehen beim LFM-Projekt in Halbenrain

Quelle: García López, C.; Küppers, B.; Clausen, A.; Pretz, T.: Landfill mining. A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. In: Detritus 2 (1), 2018. S. 29

LFM-Aktivitäten mit der mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage(MBA) vor Ort abschätzen zu können. Das Deponiegut wurde hierzu aus einem 20 x 20 x 10 m großen Abschnitt gewonnen und anschließend batchweise in Rottetunneln für drei bis vier Wochen biologisch getrocknet. Die biologische Vorbehandlung war nötig um den Wassergehalt zu senken und die nachfolgende mechanische Aufbereitung zu ermöglichen. Das Vorgehen bei der Aufbereitung ist in Bild 1 dargestellt. [3]

Es wurden zwei Chargen (220 t und 280 t) ausgegraben, behandelt und charakterisiert. Dazu wurden repräsentative Stichproben gemäß LAGA PN 98 vom Input und verschiedenen, prozessrelevanten Stellen genommen. Sämtliche Proben wurden Analysieubungen unterzogen und handsortiert, sodass eine Bewertung des Prozesses, der Inputzusammensetzung und der erzeugten Outputströme vorgenommen werden konnte. Die Inputanalyse hat die in Bild 2 dargestellte Inputzusammensetzung ergeben. [3]

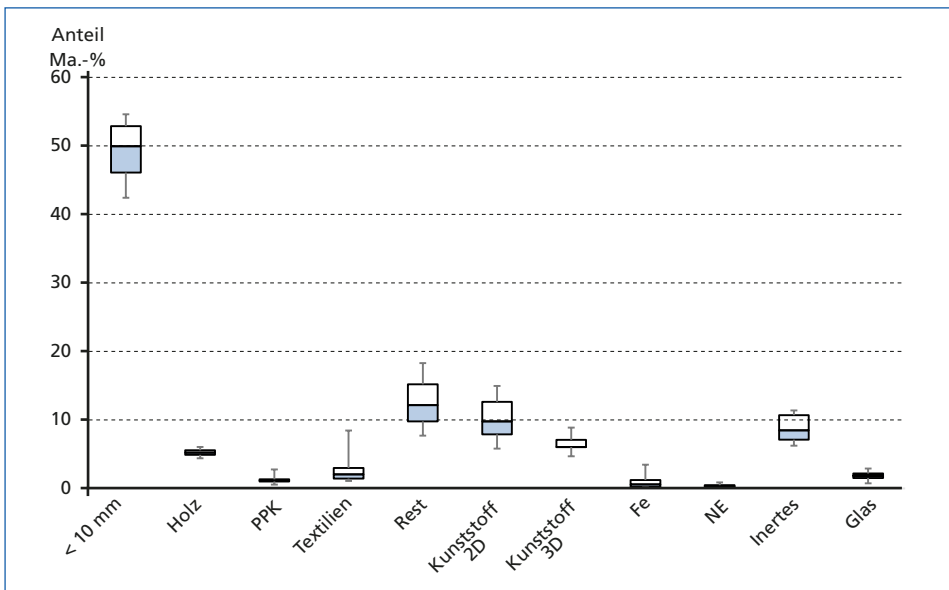


Bild 2: Schwankungsbreite (Quartile) der Inputzusammensetzung im Landfill-Mining-Projekt Halbenrain

Quelle: García López, C.; Küppers, B.; Clausen, A.; Pretz, T.: Landfill mining. A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. In: Detritus 2 (1), 2018. S. 29

Es ist ersichtlich, dass die massenbezogen größten Stoffgruppen in Form von Feinkorn (etwa 50 Ma.-%), Rest (etwa 12 Ma.-%), Kunststoff-2D (etwa 10 Ma.-%), Inertes (etwa 9 Ma.-%), Kunststoff-3D (etwa 7 Ma.-%) und Holz (etwa 5 Ma.-%) vorliegen. Die Stoffgruppe *Rest* besteht primär aus Hygieneartikeln, Gummi, Schaumstoff, Silikon, Leiterplatten und undefinierten Bestandteilen und könnte somit zu großen Teilen für die WtE-Route geeignet sein. [3]

Durch die mechanische Aufbereitung vor Ort entstanden verschiedene Stoffströme, die mittels SGS in verschiedene Stoffgruppen weiter aufgeteilt werden könnten:

- Feingut – Da der spezifische Druckluftverbrauch in der sensorgestützten Sortierung mit sinkender Korngröße tendenziell steigt, wird der Einsatz von SGS für die Feingutsortierung nicht als Option betrachtet.
- Fe-/NE-Metallfraktion – Aufgrund der geringen Massenanteile der Metalle am gesamten Input ist eine SGS dieser Outputströme nicht wirtschaftlich.
- Windsichter-Leichtgut – Aufgrund des geringen Flächengewichts und Materialwerts dieser Fraktion (primär bestehend aus Kunststofffolien, PPK, Textilien, Getränke-Leichtverpackungen) ist das Erreichen eines wirtschaftlichen Durchsatzes mit dieser Fraktion auf SGS als unwahrscheinlich anzusehen.
- Windsichter-Schwergut – Dieser Stoffstrom stellt eine Möglichkeit für den Einsatz der SGS dar, da sowohl die Größe des Materialstroms als auch dessen Zusammensetzung (vgl. Bild 3) Potenzial für die Sortierung bieten.
- Grobgut > 200 mm – Aufgrund der Objektgröße der in dieser Fraktion vorliegenden Partikel könnte eine Sortierung mittels Robotik genutzt werden. Da hierbei ein vergleichsweise langsam laufendes Förderband genutzt würde, ist der Leichtgutanteil in dieser Fraktion weniger störend und würde die Sortierung somit nicht durch Relativbewegung auf dem Sortierband beeinträchtigen.

Das Grobgut > 200 mm stellt bezogen auf den Anlageninput einen Anteil von 11 Ma.-% dar. Die Zusammensetzung dieser Fraktion ist Bild 3 zu entnehmen. Sie zeichnet sich durch hohe Anteile an Kunststoffen (flächig und körperförmig), Textilien, Holz sowie der Fraktion *Rest* aus. Durch den geringen Anteil an inerten Bestandteilen ist dieser Stoffstrom somit für die energetische Nutzung geeignet. SGS könnten genutzt werden um Störstoffe wie chlorhaltige Kunststoffe o. ä. abzutrennen. Da durch den Feinanteil von etwa 7 Ma.-% Wasser sowie inerte Bestandteile wie Sand in die Grobgutfraktion verschleppt werden, könnte eine verbesserte Siebung den Heizwert signifikant erhöhen.

Der Anteil der Grobfraktion des Windsichter-Schwerguts (60 bis 200 mm) am gesamten Input liegt bei 7 Ma.-%, während die Mittelfraktion des Windsichter-Schwerguts (14 bis 60 mm, nach Fe- und NE-Abscheidung) 25 Ma.-% ausmacht. Im Vergleich zur Input-Zusammensetzung ist eine Anreicherung von Inertem, Kunststoffe-3D und Holz im Windsichter-Schwergut zu vermerken. Der Anteil der Restfraktion ist annähernd gleichgeblieben. Beide Fraktionen enthalten somit signifikante Mengen an Stoffgruppen, die sowohl für WtM (Inertes) wie auch für die WtE (heizwertreiche Stoffe) geeignet sind. Anzumerken ist, dass das Windsichtert-Schwergut (14 bis 60 mm) zu 36 Ma.-% aus Feinkorn besteht, welches als Anhaftung in diese Mittelfraktion verschleppt wurde. Dieses kann sowohl bei der Sortierung, als auch bei der anschließenden stofflichen oder energetischen Verwertung Probleme hervorrufen. Aus diesem Grund ist eine Abtrennung dieser Fraktion notwendig. Dies kann praktisch umgesetzt werden, indem in das Siebaggregat mit dem Trennschnitt 14 -mm -ein Entlastungsdeck eingebaut wird, sodass eine effektivere Siebung möglich ist. Eine weitere Option ist die Bereitstellung von mehr Siebfläche, sodass eine geringere Schichtdicke auf dem 14 mm Deck ermöglicht wird.

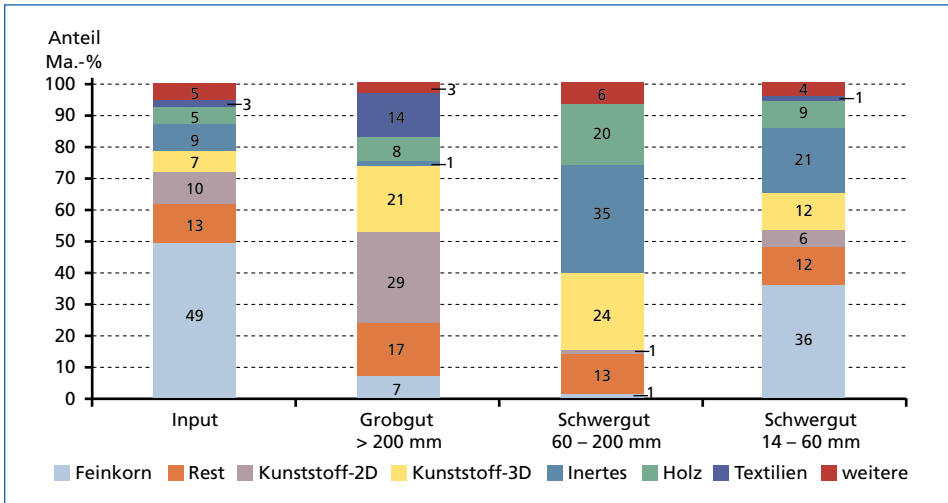


Bild 3: Zusammensetzungen verschiedener Stoffströme im Landfill-Mining-Projekt Halbenrain

Quelle: García López, C.; Küppers, B.; Clausen, A.; Pretz, T.: Landfill mining. A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. In: Detritus 2 (1), 2018. S. 29

4.1. Anforderungen an sensorgestützte Sortiersysteme im ELM

Wie in der Abfallaufbereitung üblich bietet sich auch im ELM der Einsatz von Bandsortierern an. Diese bestehen meist aus einem Förderband, zum Teil mit einem vorgeschalteten Vibrationsförderer, darüber angeordneten Emitt(er)n und Detekt(er)n sowie einer Druckluftdüsenleiste direkt hinter der Umlenkrolle am Ende des Förderbands. Darauf wird der Stoffstrom mit einer Geschwindigkeit von bis zu 3 m/s transportiert, sodass durch den Geschwindigkeitsunterschied zwischen diesem und dem vorgeschalteten Band/Vibrationsförderer eine Partikelvereinzelung erreicht wird. Je nach Anforderungen an Reinheit und Ausbringen kann eine mehrstufige Sortierung (Kaskadenanordnung der Sortieraggregate) notwendig sein. [1]

Wenn besonders großstückige und schwere Partikel sortiert werden sollen, ist der Einsatz von Roboter-Greifern anstelle des druckluftbetriebenen Austrags sinnvoll. Dies kann der Fall sein, wenn das Zerkleinerungsaggregat zu Beginn der Prozesskette mit einem Schutzrost ausgestattet ist oder auf eine Vorzerkleinerung des Deponats verzichtet wird. Mit solchen Greifern können mehrere 1.000 Griffe pro Stunde durchgeführt werden. Da die Effizienz einer solchen Maschine maßgeblich durch Partikelanzahl und -masse begrenzt wird, ist ihr Nutzen stark von der (schwankenden) Korngrößenverteilung des Inputmaterials abhängig.

4.2. Auswahl eines geeigneten Detektionsverfahrens

Wie zuvor erwähnt, kann der Einsatz von SGS im ELM aus zwei Gründen sinnvoll sein:

1. Trennung inerte(r)/mineralischer Bestandteile von organischen bzw. heizwertreichen Stoffgruppen, wie Kunststoffen, Holz, PPK und Textilien

2. Separation von Störstoffen, z.B. PVC oder schwermetallhaltige Bestandteile, aus der heizwertreichen Fraktion mit dem Ziel der Erzeugung eines pEBS

Somit ist das Ziel eine Trennung von Materialien auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung. Dies kann durch verschiedene Detektionsverfahren, wie Röntgenfluoreszenz, Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy und Nahinfrarottechnologie bewerkstelligt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die NIR-basierte Sortierung vorzuziehen. Die Anschaffungskosten eines solchen SGS kann mit 170.000 EUR pro Meter Arbeitsbreite veranschlagt werden. Daher stellen NIR-basierte Sensoren die günstigste und somit sinnvollste Option dar, die Klassifizierung anhand der chemischen Zusammensetzung umzusetzen.

Nahinfrarotsensoren werden in der Abfallwirtschaft meist im Wellenlängenbereich von etwa 1.000 bis 2.500 nm eingesetzt. Halogenlampen können als Emitter genutzt werden, um den Detektionsbereich möglichst gleichmäßig auszuleuchten. Trifft das emittierte Licht auf ein Partikel, so interagiert es mit diesem. Die (selektiv) reflektierte Strahlung wird mit einem Detektor aufgenommen, in ein elektrisches Signal umgewandelt und mittels Algorithmen verarbeitet und ausgewertet. [1, 4]

Viele NIR-Sensoren, die heute in der Abfallwirtschaft eingesetzt werden, sind sogenannte Hyper-Spectral-Imaging (HSI) Sensoren. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie mehrere hundert Banden (Wellenlängenbereiche, die zum Teil wenige Nanometer umfassen) aufzeichnen. Dies ermöglicht die Unterscheidung verschiedener Stoffgruppen und Kunststoffsorten. Es entstehen orts aufgelöst Datensätze (Spektrn), die meist einzeln analysiert werden, um jedes Objektpixel zu klassifizieren. Anschließend ist es möglich Pixelcluster oder ganze Objekte einer Stoffgruppe zuzuordnen. Die Klassifizierung rußgeschwärzter Kunststoffe ist meist jedoch nicht möglich, da deren Spektrum keinen Rückschluss auf die chemische Zusammensetzung des Partikels zulässt. Durch die Verwendung von mittelinfraroter Strahlung soll dies aber zum Teil möglich sein. [1, 4]

4.3. Praktische Untersuchungen zur Eignung von HSI-NIR-Technologie im ELM

Um die prinzipielle Eignung von HSI-NIR-Sensoren für die Detektion und Klassifizierung von Fraktionen aus einem ELM-Prozess zu bewerten wurden Versuche mit Proben aus dem Windsichter-Schwergut des LFM-Projekts in Halbenrain durchgeführt (Vergleiche Bild 3). Um zu ermitteln, ob eine inerte Fraktion für WtM, eine heizwertreiche Fraktion für WtE sowie die Abtrennung von Störstoffen (PVC) aus dem Windsichter-Schwergut möglich ist, wurden diese drei Stoffgruppen zunächst händisch, teilweise unter Zuhilfenahme eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers, voneinander getrennt.

Um zu überprüfen, ob die Trennung der erzeugten Stoffgruppen mittels HSI-NIR-Sortierung möglich ist, wurden Versuche an einem Versuchsstand für sensorgestützte Erkennung und Sortierung durchgeführt. Dabei wurde mit einem Nahinfrarotsensor (Modell: EVK-Helios-G2-NIR1) Strahlung im Wellenlängenbereich 990 nm bis

1.680 nm erfasst. Die spektrale Auflösung des Sensors liegt bei 3,18 nm, wobei die Ortspixelbreite 1,60 nm beträgt. Da der Sortierstand als Schurrensortierer ausgeführt ist, können die Rutschgeschwindigkeit und somit die Ortspixelgröße variieren. Die Bildfrequenz des Zeilensensors liegt bei 476 Hz mit einer Belichtungszeit von 1.800 μ s. Bei den durchgeführten Versuchen betrug die Kantenlänge eines Ortspixels in Bewegungsrichtung stets weniger als 1,6 mm.

Zur erfolgreichen Differenzierung zwischen den verschiedenen Kunststoffen und mineralischen Anteilen im LFM-Material – insgesamt über 2.000 Objekte – mussten die in Bild 4 dargestellten Spektren im Algorithmus für die Klassifizierung hinterlegt werden.

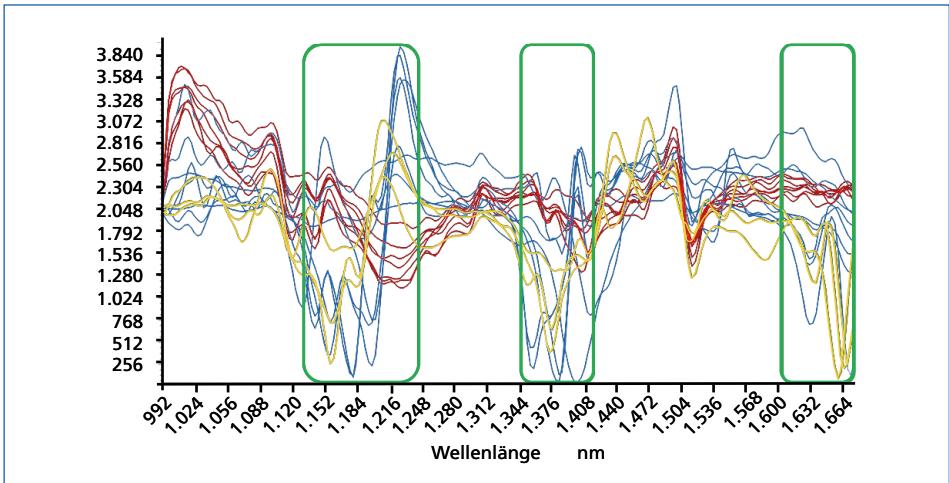


Bild 4: Spektrale Informationen zur Differenzierung zwischen Mineralik (rot), pEBS (blau) und PVC (gelb); Dargestellt: 1. Ableitung, geglättet und normiert; grün markiert die Wellenlängenbereiche mit den charakteristischen Banden der Stoffgruppen

Die sieben rot dargestellten Spektren sind verschiedenen inerten Materialien (Beton, Bimsstein und Ziegelstein) zugehörig. Blau markiert sind acht Spektren charakteristisch für Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und Holz. Die drei gelben Spektren werden zur Erkennung von PVC benötigt. Die Klassifizierung rußgeschwärzter Kunststoffe auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung ist mit diesem Algorithmus nicht möglich, da die Datengrundlage (Intensität und Ausprägung des Rohspektrums) bzgl. dieser Partikel nicht ausreichend für eine Klassifizierung ist.

Für die Differenzierung zwischen Mineralik, pEBS und PVC werden die in Bild 4 grün markierten Bereiche genutzt, da diese die charakteristischen Banden der zu unterscheidenden Stoffgruppen enthalten. Über 99 % der untersuchten Partikel (Ausnahme: rußgeschwärzte Kunststoffe) konnten korrekt klassifiziert werden. Somit ist die Verwendung von NIR-gestützten Sortiersystemen zur Unterscheidung von Mineralik und pEBS im ELM möglich. Ebenso kann PVC mithilfe der genutzten NIR-Technik von anderen Kunststoffen unterschieden werden.

5. Zusammenfassung

Das Horizon 2020 Projekt New-Mine beschäftigt sich mit der Thematik des Enhanced Landfill-Minings (ELFM). Dieses unterscheidet sich vom klassischen Landfill-Mining (LFM) durch den Einsatz von innovativen Technologien und komplexeren Prozessketten mit dem Ziel der Erzeugung höherwertiger Outputströme. Ein Teil dieser Forschungsaktivitäten zielt darauf ab, das Potenzial des Einsatzes sensorgestützter Sortieraggregate zu ermitteln.

Um mögliche Anwendungen im (E)LFM zu ermitteln, wurde die Zusammensetzung von Hausmülldeponien betrachtet. Diese Untersuchungen haben ergeben, dass die Erzeugung einer Fraktion für stoffliches Recycling (WtM) sowie einer Fraktion für die energetische Nutzung (WtE) durch sensorgestützte Sortiersysteme (SGS) möglich ist. Für stoffliches Recycling bieten sich vor allem mineralische Bestandteile wie Ziegel und Beton an, während für die WtE-Route Kunststoffe, PPK, Textilien und Holz geeignet sind. Daher ist die Unterscheidung sowie Separierung mineralischer und organischer Bestandteile das primäre Ziel der sensorgestützten Sortierung. Darüber hinaus stellt das Abtrennen von Störstoffen (z.B. PVC) aus dem potenziellen EBS (pEBS) eine zweite Einsatzmöglichkeit dar.

Diese Sortierung ist nur im Anschluss an eine entsprechende Vorkonditionierung (z.B. Trocknung, Klassierung und Windsichtung) sinnvoll. NIR-basierte Sortiersysteme bieten sich für die Unterscheidung der beschriebenen Stoffgruppen an. Um die prinzipielle Eignung eines solchen System zu überprüfen, wurden Versuche mit LFM-Material an einem NIR-basierten Sortiersystem durchgeführt. Das dazu benötigte Inputmaterial wurde durch die Beprobung eines Windsichter-Schwerguts aus einem österreichischen LFM-Projekt gewonnen. Die enthaltenen Partikel wurden in die Stoffgruppen Mineralik, pEBS und PVC (Störstoff) unterteilt. Anschließend konnte mithilfe eines sensorgestützten Sortiersystems gezeigt werden, dass die prinzipielle Differenzierung zwischen den Stoffgruppen möglich ist.

Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Union, die das Projekt NEW-MINE im Rahmen des Rahmenprogramms für Forschung und Innovation H2020 unter der Fördervertragsnummer 721185 fördert, sowie den Firmen Binder &Co und EVK Kerschhaggl für die Unterstützung im Bereich der sensorgestützten Sortierung.

6. Literatur

- [1] Beel, H.: Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.: Berliner Recycling- und rohstoffkonferenz 2017. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 175 191
- [2] Danthurebandara, M.; van Passel, S.; Vanderreydt, I.; van Acker, K.: Assessment of environmental and economic feasibility of Enhanced Landfill Mining. In: Waste management (New York, N.Y.) 45. 2015. S. 434–447

- [3] García López, C.; Küppers, B.; Clausen, A.; Pretz, T.: Landfill mining. A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. In: *Detritus* 2 (1), 2018. S. 29
- [4] Gundupalli, S.; Hait, S.; Thakur, A.: A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 60. 2017. S. 56–74
- [5] Jones, P.; Geysen, D.; Tielemans, Y.; van Passel, S.; Pontikes, Y.; Blanpain, B.: Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery. A critical review. In: *Journal of Cleaner Production* 55. 2013. S. 45–55
- [6] Kaartinen, T.; Sormunen, K.; Rintala, J.: Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. In: *Journal of Cleaner Production* 55. 2013. S. 56–66
- [7] Kieckhäfer, K.; Breitenstein, A.; Spengler, T.: Material flow-based economic assessment of landfill mining processes. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 60. 2017. S. 748–764
- [8] Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.: Landfill mining. A critical review of two decades of research. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 32 (3). 2012. S. 513–520
- [9] Mönkäre, T.; Palmroth, M.; Rintala, J.: Characterization of fine fraction mined from two Finnish landfills. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 47 (Pt A). 2016. S. 34–39
- [10] Mor, S.; Ravindra, K.; de Visscher, A.; Dahiya, R.; Chandra, A.: Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation. A case study. In: *The Science of the total environment* 371 (1-3). 2006. S. 1–10
- [11] Passamani, G.; Ragazzi, M.; Torretta, V.: Potential SRF generation from a closed landfill in northern Italy. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 47 (Pt B). 2016. S. 157–163
- [12] Pretz, T.; Julius, J.: Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 60 (7-8). 2008. S. 105–112
- [13] Quaghebeur, M.; Laenen, B.; Geysen, D.; Nielsen, P.; Pontikes, Y.; van Gerven, T.; Spooren, J.: Characterization of landfilled materials. Screening of the enhanced landfill mining potential. In: *Journal of Cleaner Production* 55. 2013. S. 72–83
- [14] Rotheut, M.; Quicker, P.: Energetic utilisation of refuse derived fuels from landfill mining. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 62. 2017. S. 101–117
- [15] Sormunen, K.; Ettala, M.; Rintala, J.: Detailed Internal Characterisation of Two Finnish Landfills by Waste Sampling. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28. 2008.
- [16] Wanka, S.; Münnich, K.; Fricke, K.: Landfill Mining - Wet mechanical treatment of fine MSW with a wet jigger. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 59. 2017. S. 316–323
- [18] Wörrle, J.: Immer mehr Bauabfälle: Deponien am Limit. In: *DeutscheHandwerksZeitung*. 2018.
- [19] Zhou, C.; Fang, W.; Xu, W.; Cao, A.; Wang, R.: Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. In: *Journal of Cleaner Production* 80. 2014. S. 80–86

Ansprechpartner



Bastian Küppers, M.Sc.

Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Franz-Josef-Straße 18

8700 Leoben, Österreich

+43 3842 402-5117

bastian.kueppers@unileoben.ac.at



Ass. Prof. Dipl.-Min. Dr. rer. nat. Daniel Vollprecht

Montanuniversität Leoben

AG-Leiter Deponie, Altlast, Schlacke

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Franz-Josef-Straße 18

8700 Leoben, Österreich

+43 3842 402-5110

daniel.vollprecht@unileoben.ac.at



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger

Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Franz-Josef-Straße 18

8700 Leoben, Österreich

+43 3842 402-5150

roland.pomberger@unileoben.ac.at

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

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Thomas Pretz, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-47-3 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2019
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Claudia Naumann-Deppe, Sarah Pietsch,
Janin Burbott-Seidel, Ginette Teske, Roland Richter,
Cordula Müller, Gabi Spiegel
Druck: Universal Medien 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 Funksendung, 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.