



TECHNOLOGIELAND
HESSEN



technologieland-hessen.de



Kreislaufführung und Sekundärrohstoffe

Praxisbeispiele und Potenziale

Zweite, aktualisierte Auflage

Kreislaufführung und Sekundärrohstoffe

Praxisbeispiele und Potenziale

Zweite, aktualisierte Auflage



Vorwort

Jede Volkswirtschaft braucht Rohstoffe. Ihr Abbau ist aber meist mit Umweltbelastungen verbunden; immer öfter stellen Preisschwankungen die Abnehmer vor Probleme, und mitunter kann auch die Verfügbarkeit nicht mehr uneingeschränkt vorausgesetzt werden.

Die Vorteile einer Kreislaufführung einzelner Rohstoffe und einer „Circular Economy“ liegen auf der Hand: Sekundäre Rohstoffquellen können helfen, Preisschwankungen auszugleichen, die Abhängigkeit von Importen zu senken und die Materialkosten zu reduzieren. Und natürlich verursachen sie weniger Emissionen und Umweltschäden.

Die überarbeitete Auflage der Publikation „Stoffkreisläufe in Hessen“ stellt innovative Verfahren und Technologien vor, um Primär- durch Sekundärrohstoffe zu ersetzen. Die Fallbeispiele stammen aus den unterschiedlichsten Branchen und zeigen die breite Anwendbarkeit der vorgestellten Methoden.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Tarek Al-Wazir

Hessischer Minister für Wirtschaft, Energie, Verkehr
und Landesentwicklung

Inhalt

1	Hessen auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft	8
1.1	Politische Rahmenbedingungen – Europa, Deutschland und Hessen	10
1.2	Abfallaufkommen und Abfallverwertung in Hessen	13
1.3	Status quo Abfallverwertung	16
2	Ansatzpunkte für die Praxis	18
2.1	Materialeffizienzberatungen und Investitionsförderungen	18
2.2	Werkzeuge zur Berechnung von Kosten- und Ressourceneinsparungen für KMU	21
3	Fallbeispiele aus der Praxis	22
3.1	Gruppe 1: Baumaterialien	22
3.1.1	Ökobeton aus Hausmüllverbrennungs-Rostasche	22
3.1.2	Herstellung von mineralischen Recyclingbaustoffen	24
3.1.3	Abbruch und Aufbereitung von Beton im Rahmen des Urban-Mining-Konzepts für das Rathaus in Korbach	26
3.1.4	Flexibel, klimafreundlich und kreislauffähig: Massivholzbau mit Cross-Laminated Timber	28
3.2	Gruppe 2: Chemie	30
3.2.1	Geschlossener Kohlenstoffkreislauf durch Methanolgewinnung aus Reststoffen	30
3.2.2	Durch Sauerstoffeintrag optimierte thermische Spaltung von Abfallschwefelsäuren	32
3.2.3	AshDec-Verfahren zum Phosphorrecycling	33
3.3	Gruppe 3: Metalle	34
3.3.1	Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	34
3.3.2	Rückgewinnung von Indium	36
3.3.3	Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle	37
3.3.4	Recycling von Feinmetallen	38
3.4	Gruppe 4: Kunststoffe	40
3.4.1	Hochwertiges Recycling von EPP-Verpackungsabfällen für die Herstellung von Automobilteilen	40
3.4.2	Tracergestützte, flexible Sortiertechnologie für Kunststoffabfälle	42
3.5	Gruppe 5: Start-ups und Dienstleistungen	44
3.5.1	Wiederaufbereitung von IT-Geräten	44
3.5.2	Vermietung von Technikgeräten	46
3.5.3	Recyclbare Pizza-Mehrwegbox mit digitalem Ausleihprozess	48
3.5.4	Einsatz von Altbrot für die Bierherstellung	50
	Technologieland Hessen	52
	Impressum	54
	Weitere Publikationen im Technologieland	58

1 Hessen auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft

Die Vorteile der Kreislaufwirtschaft liegen auf der Hand: Die Erschließung sekundärer Rohstoffquellen hilft, schwankende und teilweise stark steigende Rohstoffpreise auszugleichen, und erhöht die Versorgungssicherheit. Durch das Einsparen von Rohstoffen und Materialien können Unternehmen ihre Kosten senken, gleichzeitig werden primäre Rohstoffe geschont und negative Umwelteffekte reduziert.

Deutschlandweit arbeiten über 310.000 Beschäftigte in rund 11.000 kommunalen und privaten Unternehmen der Kreislaufwirtschaft. Sie erwirtschaften einen Umsatz von rund 85 Milliarden Euro sowie eine Bruttowertschöpfung von rund 28 Milliarden Euro.¹ Die hessische Kreislaufwirtschaftsbranche erwirtschaftet einen Umsatz von fünf Milliarden Euro, die Anzahl der Erwerbstätigen in der Branche wächst in Hessen jährlich um fast zwei Prozent.² Über ein Drittel der Beschäftigten ist im Bereich Abfallbehandlung und -verwertung tätig, rund ein weiteres Drittel im Bereich Abfallsammlung, -transport und Straßenreinigung. Die restlichen Erwerbstätigkeiten teilen sich auf

die Bereiche Technik für die Abfallwirtschaft und Großhandel mit Altmaterial auf.³ Dabei ist anzumerken, dass diese Zahlen hauptsächlich dem Abfallbereich zuzuordnen sind. Die Kreislaufwirtschaft in einem weiteren Sinne, die beispielsweise auch die Produktgestaltung oder neue, zirkuläre Geschäftsmodelle beinhaltet, wie sie auch in dieser Broschüre vorgestellt werden (siehe Kapitel 3.5: „Gruppe 5: Start-ups und Dienstleistungen“), umfasst eine Vielzahl zusätzlicher Unternehmen.

Nach wie vor gibt es viel Potenzial, Stoffkreisläufe in Deutschland wie auch in Hessen zu schließen. Viele Unternehmen kaufen weiterhin ausschließlich Primärrohstoffe und stellen daraus ihre Produkte her, die am Ende der Nutzungsdauer oft in der Verbrennung landen, statt in den Kreislauf zurückgeführt zu werden. Diese lineare Form des Wirtschaftens erwies sich insbesondere in den letzten beiden Jahren als Bremsklotz der inländischen Produktion: Die Verknappung von Rohstoffen und Vorprodukten, teils wegen knapper Transportkapazitäten, beeinträchtigte drei Viertel der Industrieunternehmen.

85 Milliarden Euro

Deutschlandweiter Umsatz der Kreislaufwirtschaft

5 Milliarden Euro

Umsatz der hessischen Kreislaufwirtschaftsbranche

28 Milliarden Euro

Bruttowertschöpfung

Einige für Hessen besonders bedeutende Branchen wurden noch stärker durch die Verknappung belastet, so etwa die Automobilindustrie, die Elektroindustrie und die Maschinenbauindustrie.⁴ Fallbeispiele zur Rückgewinnung von Feinmetallen, Metallen aus Altfahrzeugen und zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien finden sich in Kapitel 3.3 dieser Publikation.

Die Hürden für die Kreislaufführung sind vielgestaltig: Elektroschrott beispielsweise enthält wertvolle Rohstoffe (siehe Fallbeispiel „Rückgewinnung von Indium“), manche aber in so kleinen Mengen, dass die Rückgewinnung nur unter großem Aufwand möglich ist. Zudem sind die Komponenten oft verklebt und eine gesonderte Sammlung erforderlich, was ein Recycling aufwendig und somit unwirtschaftlich macht. Die Vielfalt erschwert oft die sortenreine Trennung: Die Deutschen sortieren zwar vorbildlich ihren Müll, doch angesichts einer Vielzahl verschiedener Kunststofffraktionen, die idealerweise sortenrein vorliegen müssten, sind der häuslichen Trennung Grenzen gesetzt. Innovative Sortiertechnologien können hier Abhilfe schaffen (siehe Fallbeispiel „Tracergestützte, flexible Sortiertechnologie für Kunststoffabfälle“). Dem Einsatz

von Recyclingmaterialien wiederum stehen teils Vorbehalte und Vorgaben entgegen, beispielsweise in Bezug auf den Einsatz von Recyclingkunststoffen im Bereich Lebensmittelverpackungen oder die Eigenschaften von recycelten Baumaterialien. Ermutigende Beispiele gibt es auch in diesen Bereichen in diesem Bericht, siehe das Beispiel einer recycelbaren Pizza-Mehrwegbox und die Fallbeispiele zum Recycling im Baubereich (Kapitel 3.1).

Dennoch, dem Durchbruch der Kreislaufwirtschaft stehen finanzielle, informatorische, politische und technische Hindernisse entgegen. Doch diese Vorzeichen ändern sich gerade: In Europa, Deutschland und Hessen werden die Bedingungen für die Kreislaufwirtschaft verbessert (siehe nächstes Kapitel), und der Wissensstand über die Qualitäten der wiedergewonnenen Materialien wird in zahlreichen Forschungsarbeiten erweitert. Im zweiten Kapitel zeigt diese Publikation Ansatzpunkte für die Praxis auf. Zudem zeigen immer mehr Unternehmen, wie Kreislaufwirtschaft gelingen kann, einige dieser innovativen Fallbeispiele finden sich in Kapitel 3.



Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der Kreislaufwirtschaft

1.1 Politische Rahmenbedingungen – Europa, Deutschland und Hessen

In **Europa** hat die Kreislaufwirtschaft mit dem „**Europäischen Green Deal**“ und dem **Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft** 2020 einen Bedeutungsgewinn erfahren. Der Europäische Green Deal setzt das Ziel, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch abzukoppeln, als ein Kernziel neben das Ziel der Dekarbonisierung bis 2050. Die dazu notwendigen Aktivitäten werden im Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft konkretisiert. Die Produktgruppen, auf die der neue Aktionsplan fokussiert, stehen seit einigen Jahren im Zentrum der europäischen Ressourceneffizienzpolitik: Elektronik und Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), Batterien und Fahrzeuge, Verpackungen, Kunststoffe, Bauwirtschaft und Gebäude sowie Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe. Neu hinzugekommen ist der Bereich Textilien.

Im Vergleich mit früheren Maßnahmen hat der neue Aktionsplan stärker das Produktdesign im Blick, da das Design maßgeblich die Umweltwirkungen eines Produkts bestimmt, einschließlich der Rückführung in den Kreislauf. So sollen Produkte zukünftig langlebiger, leichter reparierbar und besser zu recyceln sein. Eine Schlüsselinitiative, die sogenannte **Sustainable Products Initiative**⁵, wurde am 30. März 2022 vorgelegt. Sie sieht die Überprüfung und Überarbeitung zahlreicher europäischer Regelungen vor und will einen harmonisierten Rahmen für nachhaltige Produkte schaffen. Mit der Initiative legte die Europäische Kommission bereits einen Vorschlag vor, die Ökodesign-Richtlinie⁶ durch die Verordnung **Ökodesign für nachhaltige Produkte** zu ersetzen.⁷

Einige verwandte Maßnahmen wurden schon umgesetzt. So gelten seit März 2021 **Ökodesign-Anforderungen** für 27 Produkte, und die Novellierung der **Regelungen zur Verbringung von Abfällen** vom November 2021 soll dazu beitragen, **europäische Abfälle besser zu recyceln**. Für ausgewählte Produkte und Rohstoffe wurden erste Schritte zur Verbesserung der Kreislaufführung vorgeschlagen: Der Vorschlag für eine Novellierung der Batterieverordnung enthält unter anderem Optionen für die **Anhebung der Sammelziele** für Gerätebatterien, Optionen für die **Recyclingeffizienz und Mindestzyklusquoten**. Ab 2030 sollen Industrie- und Traktionsbatterien einen Mindestgehalt an rückgewonnenem Kobalt, Blei, Lithium und Nickel enthalten.

Bereits im Jahr 2018 wurde überdies die **Abfallrahmenrichtlinie** mit dem **Ziel der Stärkung der Kreislaufwirtschaft** geändert.

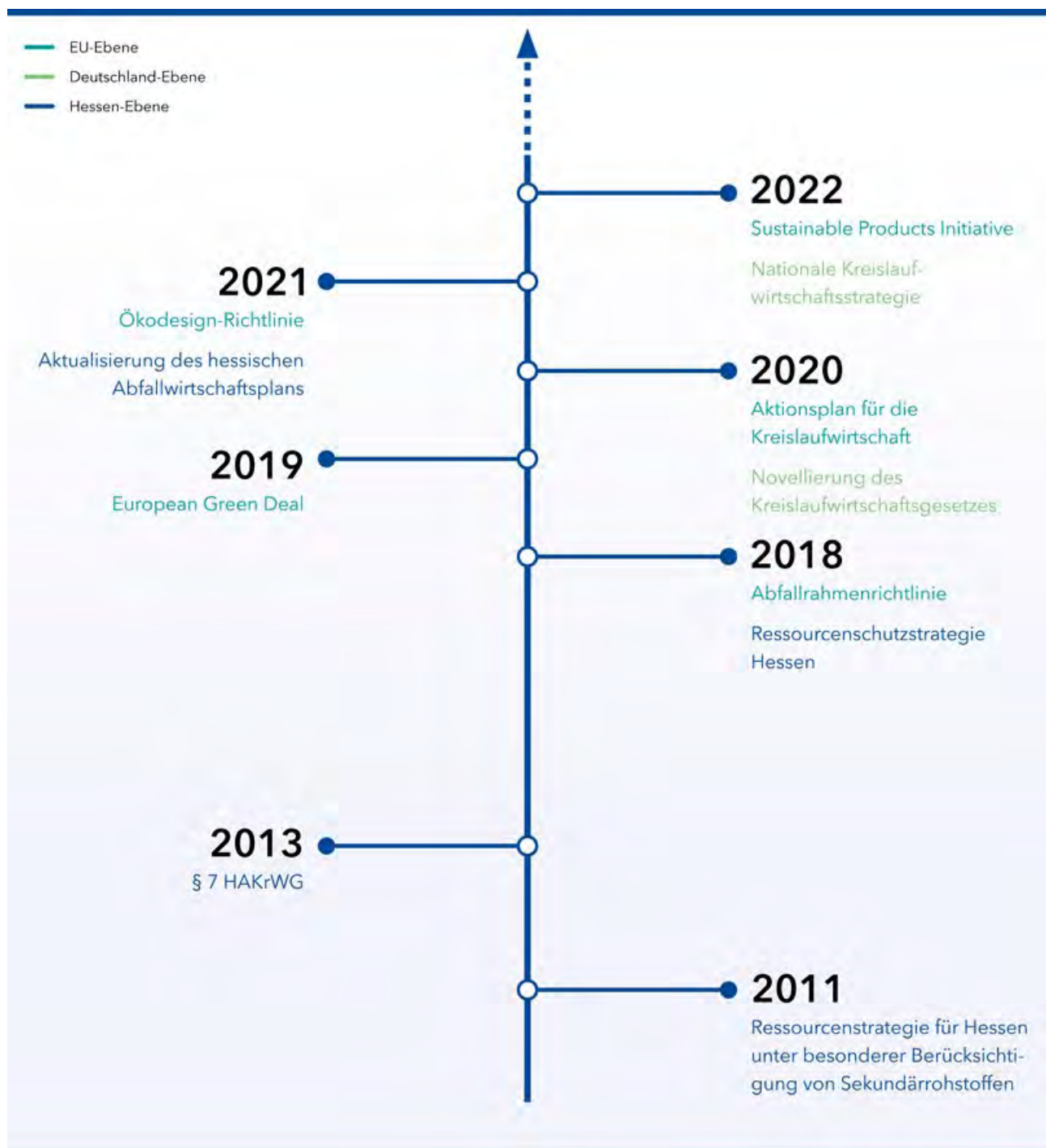
In **Deutschland** wurde diese Änderung durch die **Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes** umgesetzt. Im Zuge der Novellierung änderten sich die Regelungen zur nachhaltigen öffentlichen Beschaffung. Nach § 45 KrWG gilt dies für die öffentliche Beschaffung durch die Behörden des Bundes und ihm unterstehende Bereiche. In Hessen gelten vergleichbare Regelungen nach § 7 HAKrWG. Auch die Regelungen zur Abfallvermeidung, zum Recycling (Recyclingquote für Siedlungsabfälle von 65 Prozent bis 2035) und zur Produktverantwortung wurden verschärft. Noch nicht umgesetzt wurde die durch die Recyclingwirtschaft und Umweltverbände geforderte Einführung einer Mindestzyklusquote oder ein Abfallvermeidungsziel.⁸

Des Weiteren wurde im Jahr 2020 die dritte Fassung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (**ProgRess III**) verabschiedet. Dieses Programm wird alle vier Jahre aktualisiert und bildet ab, welche Maßnahmen die Bundesregierung zur Steigerung der Ressourceneffizienz plant. Neu im jüngsten Programm gegenüber ProgRess II ist, dass die Bedeutung der Ressourceneffizienz für den Klimaschutz betont und prioritäre Maßnahmen festgelegt wurden. Besondere Aufmerksamkeit wurde überdies auf die Themen Digitalisierung und Mobilität gelegt.

In den kommenden Jahren soll laut **Koalitionsvertrag 2021–2025 der primäre Rohstoffverbrauch gesenkt und Stoffkreisläufe sollen geschlossen werden**. Hierzu soll der rechtliche Rahmen angepasst werden, es sollen klare Ziele definiert und abfallrechtliche Vorgaben überprüft werden. Die neue Bundesregierung kündigt eine **Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie** an, in der bisherige rohstoffpolitische Strategien gebündelt werden.

Der Prozess der Schließung von Stoffkreisläufen wird auch in **Hessen** bereits seit vielen Jahren verfolgt; unter anderem um die „Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft hin zu einer versorgungsorientierten Rohstoffwirtschaft, die einen wichtigen Beitrag zur Sicherstellung der Ressourcenversorgung leistet“, zu fördern. Bereits 2011 hat Hessen eine **Ressourcenstrategie für Hessen unter**

besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen in Auftrag gegeben, in der, aufbauend auf einer detaillierten Analyse der bedeutendsten Wirtschaftszweige in Hessen hinsichtlich der Wirtschaftsleistung und des Rohstoffbedarfs, verfügbare Quellen für Sekundärrohstoffe identifiziert wurden.¹⁰



2018 hat das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz seine **Ressourcenschutzstrategie Hessen** vorgelegt.¹¹ In ihr werden Handlungsfelder und Leitplanken vorgestellt. Unter Handlungsfeld VII, „Stoffkreisläufe schließen, Produkte wieder verwenden“, werden drei Hauptziele genannt:

- Ressourcen schonen durch Abfallvermeidung, Wiederverwendung und hochwertiges Recycling
- Den Einsatz von Sekundärrohstoffen stärken und Primärrohstoffe schonen
- Phosphorrückgewinnung in Hessen etablieren

Die Ressourcenschutzstrategie Hessen nennt neben seltenen Erden die Rohstoffe Indium, Platinmetalle, Chrom, Erdöl, Gallium, Germanium, Kobalt, Kupfer, Lithium, Niob, Silber, Tantal, Tellur und Zirkonium als besonders bedeutsam für die hessische Wirtschaft. Des Weiteren wird auf der Webseite des Hessischen Umweltministeriums die Schließung der Kreisläufe der Stoffe Phosphor, Holz und Kunststoffe besonders hervorgehoben.¹² Zur Unterstützung der Ziele nennt die Ressourcenschutzstrategie „Förderung von Modell- und Demonstrationsprojekten, Forschung, Kommunikationsstrategien, staatliche Begleitung von wirtschaftlichen Veränderungsprozessen hin zu einer vollständigen Kreislaufwirtschaft“ als mögliche Maßnahmen der Landesregierung.

2021 wurde die jüngste **Aktualisierung des hessischen Abfallwirtschaftsplans** vorgelegt. Im Plan wird das Ziel der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch betont und eine funktionierende

Kreislaufwirtschaft gemäß der Abfallhierarchie als unverzichtbarer Bestandteil einer erfolgreichen Entkopplung eingeordnet.¹³ Ein übergeordnetes Ziel des Plans stellt dementsprechend die Vermeidung von Abfällen sowohl bei der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung als auch bei Produktion, Handel und Konsum dar. Darüber hinaus sollen die Wiederverwendung und die Getrennterfassung von Wertstoffen bei Ausweitung des Sammlungsangebots gefördert und das Recycling soll gestärkt werden.¹⁴ Die Recyclingquote betrug 2018 bei Haushaltsabfällen 58,4 Prozent. Aufgrund der neuen outputbezogenen Berechnungsmethoden gemäß der europäischen Abfallrahmenrichtlinie wird die Quote fallen – daher bedarf es weiterer Anstrengungen, die Quote dennoch insgesamt zu erhöhen. Ein besonderes Potenzial wird in der Kreislaufführung von Bauabbruchabfällen, insbesondere durch den Einsatz von hochwertigen Recyclingbaustoffen, gesehen.

Überdies sieht auch der **Integrierter Klimaschutzplan Hessen 2025** aus dem Jahr 2017 die Erstellung einer landesweiten Abfallvermeidungsstrategie vor. Als Entscheidungsgrundlage hierfür wurde im Jahr 2020 eine Potenzialstudie zur Abfallvermeidung in Hessen erstellt, in der die aus Klimasicht besonders relevanten Produkt- und Abfallströme aus dem alltagsnahen Konsumentenbereich betrachtet wurden. Insbesondere bei Textilien, Möbeln und Lebensmitteln werden erhebliche Einsparpotenziale von CO₂-Äquivalenten durch abfallvermeidende Maßnahmenpakete gesehen.¹⁵

In Hessen setzt insbesondere das Ausführungsgesetz zum Kreislaufwirtschaftsgesetz (HAKrWG) bereits seit 2013 auf den Wandel zur Kreislaufwirtschaft und verpflichtet unter anderem in § 7 die öffentliche Hand, bei der Gestaltung von Arbeitsabläufen, der Beschaffung oder Verwendung von Material und Gebrauchsgütern, bei Bauvorhaben und bei der Erteilung von Aufträgen zur Förderung der

Kreislaufwirtschaft einzugreifen. Dies erfolgt, indem Erzeugnissen der Vorzug zu geben ist, die

- mit Rohstoff schonenden oder abfallarmen Produktionsverfahren hergestellt sind,
- durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling aus Abfällen hergestellt worden sind,
- langlebig und reparaturfreundlich sind,
- im Vergleich zu anderen Erzeugnissen zu weniger oder schadstoffärmeren Abfällen führen oder
- sich nach Gebrauch in besonderem Maße zur umweltverträglichen, insbesondere energiesparenden Wiederverwendung oder zum Recycling eignen,

sofern diese Maßnahmen keine unzumutbaren Mehrkosten verursachen.¹⁶

1.2 Abfallaufkommen und Abfallverwertung in Hessen

Weitere Entkopplung vom Wirtschaftswachstum, aber auch Stagnation des Gesamtaufkommens

Das Gesamtaufkommen an kommunalen und industriellen Abfällen in Hessen stagnierte zwischen 2013 und 2019 und lag im Jahr 2019 bei 5,76 Millionen Tonnen. Gleichzeitig wuchs die hessische Wirtschaft zwischen 2013 und 2019¹⁷ über 20 Prozent.¹⁸ Auch die Bevölkerung nahm im selben Zeitraum um rund 240.000 Personen zu.¹⁹ Das Gesamtaufkommen konnte also weiter von der wirtschaftlichen Entwicklung entkoppelt werden. Diese

Entkopplung wird unter anderem in der Abfallrahmenrichtlinie (Artikel 29) als zentrales Ziel der Abfallwirtschaft benannt.

Die folgende Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des Gesamtabfallaufkommens²⁰ und des Bruttosozialprodukts in Hessen im Zeitraum 2013 bis 2019.

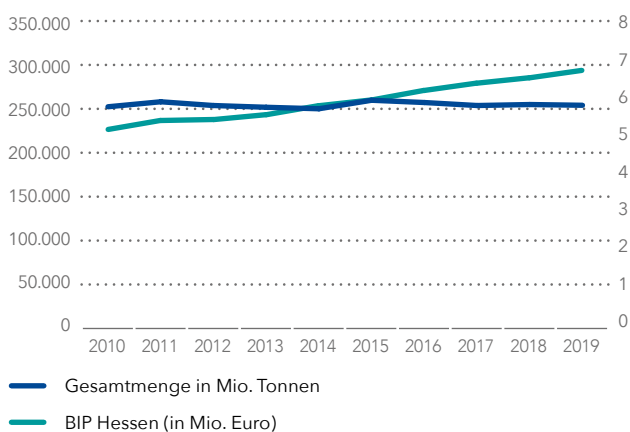


Abbildung 2: Entwicklung des Gesamtabfallaufkommens und des hessischen BIPs (Skala links: Mio. Euro, Skala rechts: Mio. Tonnen)²¹

Das Abfallaufkommen pro Kopf an Haushaltsabfällen betrug im Jahr 2019 455 Kilogramm²³, ein Anstieg von vier Kilogramm zum Vorjahr, der aber hauptsächlich über einen Anstieg der Bioabfälle aufgrund der flächendeckenden Einführung der Biotonne sowie über einen Anstieg des Sperrmülls erklärt werden kann. Insgesamt liegt Hessen damit immer noch deutlich unter den 476 Kilogramm Haushaltsabfällen pro Kopf im Bundesdurchschnitt.²⁴

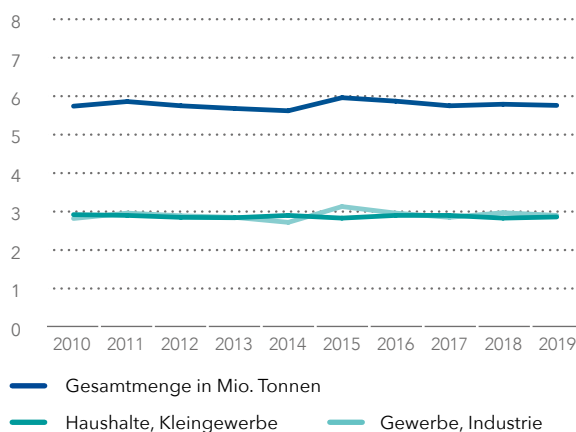


Abbildung 3: Abfallmengen gesamt und aufgeteilt nach „Haushalten, Kleingewerbe“ und „Gewerbe, Industrie“²²

Der genauere Blick in die Abfallmengenbilanzen der letzten Jahre zeigt, dass die Hausmüllmenge in den vergangenen Jahren reduziert werden konnte, was unter anderem auf abfallwirtschaftliche Maßnahmen wie die Ausweitung der Getrenntsammlung zurückgeführt werden kann. Die Mengen von Bioabfällen und Wertstoffen schwankten hingegen. Sperrmüll und Verpackungsabfälle haben in den letzten Jahren eher zugenommen, wobei die größere Sperrmüllmenge möglicherweise mit einer Erhöhung der Anzahl an Wertstoffhöfen zusammenhängt, was es den Bürgerinnen und Bürgern erleichterte, ihren Sperrmüll zu entsorgen.

Gewerbeabfälle und gefährliche Abfälle aus der Industrie konnten zwischen 2015 und 2019 reduziert werden, lagen aber beispielsweise 2013 schon einmal auf einem ähnlichen Niveau wie heute, weshalb es noch unklar ist, ob hier ein Trend vorliegt oder langfristige zyklische Schwankungen die Ursache sind.

Relevante Abfallströme

Die Landespolitik hat, wie zuvor beschrieben, eine Reihe von Rohstoffen als besonders bedeutsam für die hessische Wirtschaft identifiziert und bei den zu schließenden Stoffkreisläufen Phosphor, Holz und Kunststoffe hervorgehoben. Doch in welchen Wirtschaftszweigen fallen relevante

Abfallmengen an? Und welche Wirtschaftszweige fallen im Bundesvergleich besonders ins Gewicht? Die folgende Tabelle umfasst das Abfallaufkommen auf Bundes- und Landesebene, untergliedert nach den 20 Wirtschaftszweigen des Europäischen Abfallverzeichnisses (EAV).

WZ EAV*	Wirtschaftszweig, Abfallkapitel	Bund		Hessen		Anteil von 8,6 Prozent am deutschen BIP (2018) ²⁵
		Befragte Betriebe	Erzeugte Abfallmenge (Tonnen)	Befragte Betriebe	Erzeugte Abfallmenge (Tonnen) ²⁶	Vergleich mit wirtschaftlicher Gewichtung der hessischen Wirtschaft ²⁷
01	Abfälle, die beim Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der physikalischen und chemischen Behandlung von Bodenschätzen entstehen	85	95.400	9	4.943	60 %
02	Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei sowie der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln	4.251	5.959.200	188	136.661	27 %
03	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen, Papier und Pappe	1.269	7.915.900	62	338.788	50 %
04	Abfälle aus der Leder-, Pelz- und Textilindustrie	446	115.800	13	1.920	19 %
05	Abfälle aus der Erdölraffination, Erdgasreinigung und Kohlepyrolyse	128	59.900	3	15	0 %
06	Abfälle aus anorganisch-chemischen Prozessen	3.043	599.100	100	22.037	43 %
07	Abfälle aus organisch-chemischen Prozessen	7.587	1.826.900	293	180.040	115 %
08	Abfälle aus Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung von Beschichtungen (Farben, Lacke, Email), Klebstoffen, Dichtmassen und Druckfarben	9.610	475.100	389	12.059	30 %
09	Abfälle aus der fotografischen Industrie	874	21.900	45	2.790	148 %
10	Abfälle aus thermischen Prozessen	3.064	22.379.500	114	852.462	44 %

Tabelle 1a: Vergleich der Abfallerzeugung zwischen Bund und Hessen 2018

* EAV – Europäisches Abfallverzeichnis | WZ – Wirtschaftszweig

Quellen: Hessen: Tabelle „Abfallerzeugung in Hessen 2018 nach Abfallkapiteln“. Diese enthält die Daten für das Jahr 2018 (letztes Berichtsjahr) entsprechend der Tabelle auf Seite 23 im Statistischen Bericht „Abfallerzeugung in Hessen 2014“. Der Bericht wird nicht mehr veröffentlicht, die Tabelle wurde durch das Hessische Statistische Landesamt zur Verfügung gestellt. Bund: eigene Berechnungen basierend auf Statistisches Bundesamt 2019. Datensatz „Erhebung über die Abfallerzeugung Deutschland. Betriebe, erzeugte Abfallmenge: Deutschland, Jahre, Abfallarten.“ Abrufbar unter: www.govdata.de/suchen/-/details/betriebe-erzeugte-abfallmenge-deutschland-jahreabfallarten. Der Datensatz enthält die Abfallmengen in 1.000 Tonnen und gibt eine Nachkommastelle an. Um die Vergleichbarkeit mit den hessischen Daten zu erleichtern, wurde hier in Tonnen umgerechnet.

3.547.622 Tonnen

Erzeugte Abfallmenge in Hessen

66.605.400 Tonnen

Erzeugte Abfallmenge im Bund

WZ EAV*	Wirtschaftszweig, Abfallkapitel	Bund		Hessen		Anteil von 8,6 Prozent am deutschen BIP (2018) ²⁵
		Befragte Betriebe	Erzeugte Abfallmenge (Tonnen)	Befragte Betriebe	Erzeugte Abfallmenge (Tonnen) ²⁶	Vergleich mit wirtschaftlicher Gewichtung der hessischen Wirtschaft ²⁷
11	Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen; Nichteisenhydrometallurgie	3.554	612.900	106	34.472	65 %
12	Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung sowie der physikalischen und mechanischen Oberflächenbearbeitung von Metallen und Kunststoffen	17.888	5.993.700	418	135.423	26 %
13	Ölabfälle und Abfälle aus flüssigen Brennstoffen (außer Speiseöle und Ölabfälle, die unter Kapitel 05, 12 oder 19 fallen)	11.602	260.000	466	14.389	64 %
14	Abfälle aus organischen Lösemitteln, Kühlmitteln und Treibgasen (außer Abfälle, die unter Kapitel 07 oder 08 fallen)	3.609	50.400	287	4.514	104 %
15	Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (anderweitig nicht genannt)	57.749	3.915.800	1.193	287.605	85 %
16	Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind	21.561	1.259.500	579	119.205	110 %
17	Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten)	33.709	7.100.600	724	881.838	144 %
18	Abfälle aus der humanmedizinischen oder tierärztlichen Versorgung und Forschung (ohne Küchen- und Restaurantabfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen)	2.911	280.200	102	26.463	110 %
19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke	3.597	2.507.400	181	220.808	102 %
20	Siedlungsabfälle (Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen), einschließlich getrennt gesammelter Fraktionen	66.400	5.176.200	1.224	271.190	61 %

Tabelle 1b: Vergleich der Abfallerzeugung zwischen Bund und Hessen 2018

1.3 Status quo Abfallverwertung

Den weiterhin wichtigsten Beitrag zur Gewährleistung der Entsorgungssicherheit leisten die vier Müllheizkraftwerke (MHKW) in Darmstadt, Kassel, Offenbach und Frankfurt. Ihre Gesamtkapazität zur energetischen Verwertung von Siedlungsabfällen beträgt 1.265.359 Tonnen pro Jahr und wurde durch Erweiterungen in den MHKW Kassel, Offenbach und Darmstadt in den vergangenen Jahren um über 100.000 Tonnen pro Jahr gesteigert.

Die genehmigte Gesamtkapazität der fünf Ersatzbrennstoff-Kraftwerke (EBS-Kraftwerke) beträgt 1.388.100 Tonnen pro Jahr, die Kapazität wurde seit 2016 um über 25.000 Tonnen pro Jahr erweitert. Wie der Name andeutet, sind EBS-Kraftwerke auf die Nutzung von Ersatzbrennstoffen ausgelegt. Ersatzbrennstoffe sind mittel- oder hochkalorische aufbereitete Abfallstoffe. Die Kraftwerke sind üblicherweise an Industrieanlagen gekoppelt. Die Werke in Witzenhausen, Korbach, Heringen, Frankfurt und Gießen verwerten aufbereitete Haushaltsabfälle und industrielle Abfälle. Die Anlage im Industriepark Höchst ist die weltweit größte Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlage und kann umliegende Unternehmen sowohl mit Strom als auch mit Wärme und Prozessdampf versorgen. Müllheizkraftwerke und EBS-Kraftwerke zählen zur sogenannten thermischen Abfallbehandlung.

Bioabfälle können derzeit in 15 Vergärungsanlagen mit einer genehmigten Kapazität von insgesamt über 540.000 Tonnen pro Jahr verwertet werden, des Weiteren werden 17 Bioabfallkompostierungsanlagen mit einer Behandlungskapazität von knapp 290.000 Tonnen pro Jahr betrieben, was etwas unter dem Wert von 2015 liegt. Grünabfall kann in neun Grünabfallkompostierungsanlagen verwertet werden. Darüber hinaus sind in Hessen acht Biomasseheiz- und Biomassekraftwerke in Betrieb (genehmigte Kapazität: 523.962 Tonnen pro Jahr).

Auch die Kapazität zur mechanischen Abfallbehandlung hat seit der ersten Auflage dieses Berichts zugenommen: Mittlerweile stehen fünf Anlagen mit einer genehmigten Gesamtkapazität von 585.000 Tonnen pro Jahr zur Verfügung. In den Anlagen werden vor allem Fe-Metalle und Nichteisenmetalle für die stoffliche Verwertung aussortiert. Es werden unter anderem Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und teilweise Sperrmüllfraktionen behandelt. Reststoffe werden als Ersatzbrennstoffe aufbereitet.²⁸

Neben diesen Großanlagen wird in Hessen eine Vielzahl an Abfallbehandlungsanlagen für Kleinstmengen oder spezielle Abfälle betrieben, zum Beispiel im Bereich der Vorbehandlung und Verwertung von Elektroaltgeräten. Einen weitgehend separaten Bereich bilden Anlagen zur Behandlung industrieller Abfälle, insbesondere der in hessischen Industriebetrieben anfallenden gefährlichen Abfälle. Gleichzeitig hat in den vergangenen zehn Jahren auch die Abfallverbrennung deutlich zugenommen (siehe Abbildung 4).

Hierbei handelt es sich jedoch um eine entsorgerbezogene Betrachtung. Die Entsorgungswege der in Hessen angefallenen nicht gefährlichen Abfälle sind unbekannt, da sie nicht dem abfallrechtlichen Nachweisverfahren unterliegen. Die Unternehmen entsorgen mithin nicht ausschließlich hessische Abfälle, sondern auch Abfälle aus anderen Bundesländern und dem Ausland.

1.265.359 Tonnen

Gesamtkapazität zur energetischen Verwertung von Siedlungsabfällen

585.000 Tonnen

Gesamtkapazität zur mechanischen Abfallbehandlung pro Jahr

In Abfallentsorgungsanlagen entsorgte Abfälle in Hessen 2009 bis 2019 nach Art der Anlage

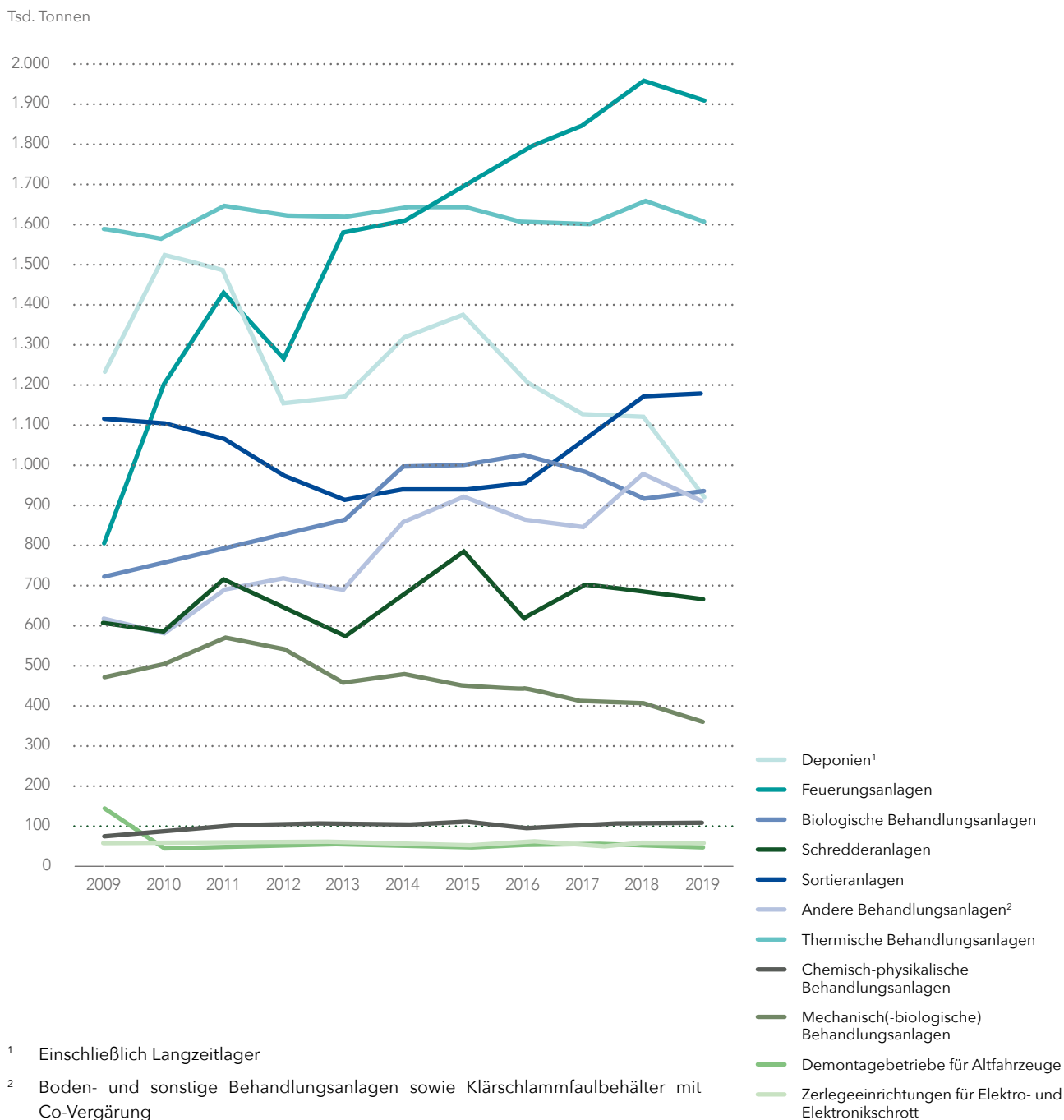


Abbildung 4: In hessischen Abfallentsorgungsanlagen entsorgte Abfälle (aus Hessen, anderen Bundesländern, Ausland) 2009 bis 2019 nach Art der Anlage

Quelle: Hessisches Statistisches Landesamt 2021. Abfallentsorgung in Hessen 2019. Wiesbaden, S. 26. Definitionen im selben Bericht, S. 3: Feuerungsanlagen: Anlagen, in denen Abfälle als Brennstoff oder zu anderen Zwecken Verbrennungsprozessen ausgesetzt werden, z. B. Heizkraftwerke. Hauptzweck der Feuerungsanlagen ist nicht die Beseitigung des Schadstoffpotenzials des Abfalls. Thermische Abfallbehandlungsanlagen: Hauptzweck der Anlage ist die Beseitigung des Schadstoffpotenzials des Abfalls.

2 Ansatzpunkte für die Praxis

Im Folgenden werden konkrete Instrumente vorgestellt, wie Unternehmen erfolgversprechende Ansätze zur Schließung von Stoffkreisläufen identifizieren können. Die Ansätze adressieren die im ersten Kapitel identifizierten Hemmnisse, die im Handlungsbereich von Unternehmen liegen. Sie sollen den Unternehmen helfen, Informationslücken zu schließen, Potenziale zu erkennen und Unterstützung abzurufen.

2.1 Materialeffizienzberatungen und Investitionsförderungen

PIUS – Beratung und Investitionsförderung

Das länderübergreifende **Informationsportal** PIUS²⁹ stellt Informationen, Dokumente und Hilfestellung für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zu den Themen Ressourceneffizienz und Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) zur Verfügung. Dazu gehören unter anderem bundesweite Informationen über Beratungsmöglichkeiten, Förderprogramme und Praxistools.

Eine umfangreiche **Übersicht über nationale und europäische Fördermöglichkeiten** sowie Anlaufstellen zur Erstberatung findet sich hier: www.pius-info.de/service/foerderung-und-beratung. Die Übersicht beinhaltet Informationen zu

- den fördernden Institutionen (welche Institutionen fördern?),
- den Inhalten der Förderprogramme (was wird gefördert?),
- den Adressaten der Förderung (wer wird gefördert?),
- den Fördermechanismen (wie und in welcher Höhe wird gefördert?) und
- den Ansprechpartnern der jeweiligen Institutionen.

Voraussetzungen KMU:



max.

249

Beschäftigte



max.

50 Mio. €

Jahresumsatz

oder



max.

43 Mio. €

Jahresbilanz

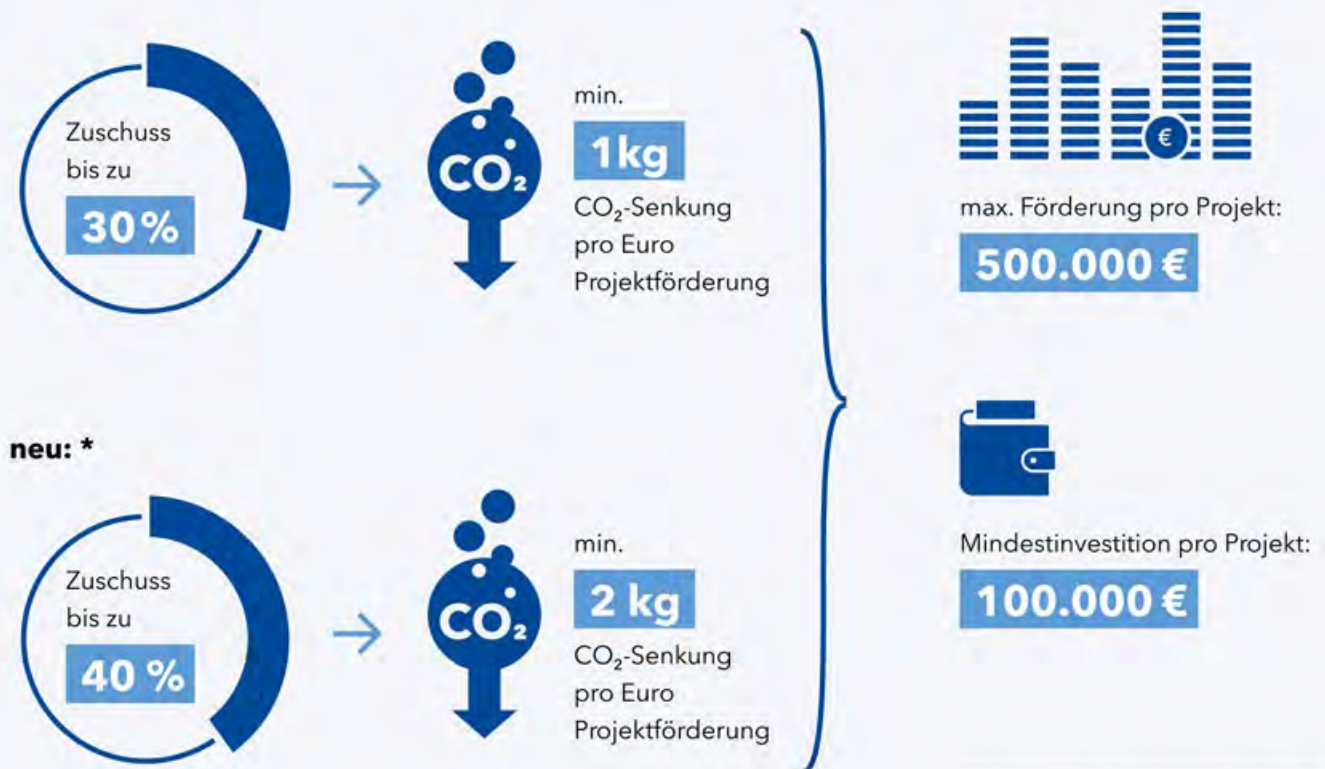
40 Prozent

Zuschuss zu den Investitionskosten

In **Hessen** stehen mit den beiden Programmen PIUS-Beratung und PIUS-Invest landesspezifische Möglichkeiten für Beratung und Investitionszuschüsse zur Verfügung. Die Impuls- und **PIUS-Beratung** dienen dazu, in hessischen Unternehmen unter Einbindung externer Berater und Beraterinnen die betrieblichen Abläufe sowie Energie- und Materialflüsse umfassend zu untersuchen und Optimierungspotenziale zu ermitteln. Dazu werden innerhalb eines Zeitraums von drei Jahren bis zu 12.000 Euro für Beratungsleistungen erstattet, pro Beratungstag maximal 600 Euro (die tatsächliche

Erstattung beträgt maximal 50 Prozent des externen Beratungshonorars). Die so ermittelten Optimierungspotenziale können im Falle größerer benötigter Investitionen, beispielsweise effizientere Produktionsanlagen und -prozesse, durch das Programm PIUS-Invest bezuschusst werden. Unter der Voraussetzung, dass die Prozessinnovationen zur Verbesserung der CO₂-Bilanz der Unternehmen beitragen, können bis zu 40 Prozent der Investitionskosten für die entsprechenden Vorhaben, maximal jedoch 500.000 Euro gefördert werden, siehe: www.pius-invest.de.

Förderung:



*verbesserte Rahmenbedingungen für die Förderperiode ab 2022

Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, siehe Modul 4³⁰) fördert investive Maßnahmen zur energie- und ressourcenbezogenen Optimierung von industriellen und gewerblichen Anlagen und Prozessen. Voraussetzung ist, dass die geplanten Optimierungen dazu beitragen, Energie- oder Ressourceneffizienz zu erhöhen bzw. fossilen Energieverbrauch oder die Nutzung CO₂-intensiver Ressourcen in Unternehmen zu verringern.

Darüber hinaus sind auch finanzielle Aufwendungen für die Erstellung eines Einsparkonzepts sowie die Begleitung der Umsetzung der geförderten Investitionsmaßnahme durch externe Energieberatende förderfähig.

Die Förderung ist technologieoffen. Die maximale Förderhöhe beträgt 15 Millionen Euro pro Investitionsvorhaben bei einer Förderquote von maximal 50 Prozent der förderfähigen Investitionskosten. Gleichzeitig gilt für die Fördereffizienz, dass pro jährlich eingesparter Tonne CO₂ maximal 500 Euro (bzw. 900 Euro für KMU) gefördert werden.

15 Millionen Euro

Maximale Förderhöhe



2.2 Werkzeuge zur Berechnung von Kosten- und Ressourceneinsparungen für KMU

Kostenrechner und Ressourcenchecks des VDI ZRE

Das Kompetenzzentrum Ressourceneffizienz³¹ bietet verschiedene Online- und Offline-Tools für KMU an, um Material und Energie effizienter und damit sowohl kostensparend als auch ressourcenschonend einzusetzen. So ermöglicht der **Kostenrechner**, die mit den Material- und Energieflüssen im Unternehmen verbundenen Kosten zu analysieren und dadurch Einsparpotenziale zu ermitteln. Neben Kostenersparnissen kann diese Analyse auch Investitionsentscheidungen mit Blick auf ressourceneffiziente Anlagen und Prozesse unterstützen. Der modular aufgebaute Kostenrechner kann sowohl online als auch offline (per Zip-Download) verwendet werden, siehe: www.ressource-deutschland.de/instrumente/kostenrechner-tool.

Über sogenannte **Ressourcenchecks** besteht für KMU die Möglichkeit, die eigene Ressourceneffizienz-performance einzuschätzen. Dazu stehen thematisch zugeschnittene Fragenkataloge (technologiespezifisch oder allgemein) zur Verfügung, um in einem ersten Überblick mögliche Einsparpotenziale in Produktionsprozessen und Gebäuden zu erkennen. Nach Beantwortung der Fragen bietet die Auswertung verschiedene Maßnahmen und Methoden an, mit denen KMU ihre Material- und Energieeffizienz weiter verbessern können, siehe: www.ressource-deutschland.de/instrumente/ressourcenchecks.

Ressourceneffizienzrechner

Weitere Werkzeuge zur Steigerung der Ressourceneffizienz in KMU:

- 1) beim Kompetenzzentrum unter www.ressource-deutschland.de/instrumente – zum Beispiel eine Prozesskettenanalyse zur Ermittlung von Einsparpotenzialen in einzelnen Prozessschritten oder ein Innovationsradar zur Identifikation relevanter Technologie- oder Prozessentwicklungen
- 2) über die PIUS-Webseite unter www.pius-info.de/service/tools – vom Abwärmerechner über die Materialflussanalyse bis zum Kostenrechner für Ressourceneffizienz

Circulytics – Online-Tool zur Steigerung der zirkulären Wertschöpfung in Unternehmen

Das kostenfreie Tool Circulytics der Ellen MacArthur Foundation (siehe: www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/circulytics/journey) bietet Unternehmen die Möglichkeit, ihre Performance bezüglich zirkulärer Wertschöpfung zu messen und daraus Ansatzpunkte für die Steigerung der zirkulären Wertschöpfung abzuleiten.

Dazu werden über das Online-Tool verschiedene sektorspezifische Fragen gestellt, welche den Unternehmen helfen sollen, relevante Themen und Indikatoren sowie Zielstellungen und unternehmensintern relevante Ansprechpartner und Ansprechpartnerinnen zu identifizieren.

Der Prozess ist mehrstufig und umfasst zunächst die Datenerhebung innerhalb einer vorgefertigten Vorlage. Die entsprechenden Antworten und Daten sollen erst nach unternehmensinterner Koordination eingegeben werden, um ein abgestimmtes Vorgehen und eine bestmögliche Passung der ermittelten Ansatzpunkte sicherzustellen. Die Daten sind online bis zum 31. August eines Jahres einzureichen, um eine entsprechende Auswertung im laufenden Jahr zu erhalten. Die Auswertung umfasst dann einen übergreifenden Wert zur zirkulären Wertschöpfung sowie eine Untergliederung nach verschiedenen Themen und einen Vergleich mit dem Branchendurchschnitt (wenn eine ausreichende Anzahl Einreichungen in einer Branche vorliegt). Die Bewertungen werden anonymisiert. Das Tool kann jährlich neu benutzt werden.

3 Fallbeispiele aus der Praxis

3.1 Gruppe 1: Baumaterialien

3.1.1 Ökobeton aus Hausmüllverbrennungs-Rostasche

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Universität Kassel (Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik und Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie), KIMM GmbH & Co. KG (Wabern), BAUREKA Baustoff-Recycling GmbH (Kassel), Müllheizkraftwerk Kassel

Einordnung

Die Projektpartner entwickeln ein Verfahren zur Aufbereitung von Rostasche aus der Hausmüllverbrennung. Das gewonnene Material kann Gesteinskörnung und Zement in Beton ersetzen, dadurch werden Schotter und Sand eingespart, CO₂-Emissionen vermieden und Deponieraum wird gespart.

Beschreibung des Verfahrens

Zunächst werden Hausmüllverbrennungsgaschen (HMVA) für unterschiedliche Betriebszustände gewonnen und ihre Materialzusammensetzung sowie ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften charakterisiert. Danach folgt die Abtrennung von Salzen und Metallen, insbesondere des Aluminiums. Hausmüllverbrennungsgaschen enthalten feines metallisches Aluminium, welches sehr reaktiv ist und im Beton zu Wasserstoffbildung und Rissen

führen würde. Diese Aufbereitungsverfahren werden aktuell im Technikumsmaßstab für den Einsatz im Vollmaßstab entwickelt. Ziel ist es, die mineralische Restfraktion so rein zu gewinnen, dass sie im Grob- und Mittelkornbereich als Ersatzgesteinskörnung in Beton eingesetzt werden kann. Die Feinstfraktionen werden noch mal gemahlen, um das Abbindeverhalten zu fördern, denn die wesentliche Innovation liegt in der Nutzung des Feinstkorns als Bindemittelersatz. Durch weitergehende Aufbereitung und Aktivierung soll der Feinanteil der Asche etwa 20 Prozent Zement im Beton ersetzen.

Schließlich werden neue Betonrezepturen entwickelt und daraus Demonstrationsprodukte hergestellt. Im Fokus sind dabei Betonfertigprodukte ohne Stahlbewehrung wie Pflastersteine, Stadtmöbel und Betonblocksteine.

Abschließend werden die Betonprodukte eingehend hinsichtlich bautechnischer Eigenschaften sowie umwelttechnischer Aspekte, wie zum Beispiel des Auslaughaltens, untersucht und bewertet. Zur Bewertung der ökologischen Effekte des gesamten Verfahrens wird eine Ökobilanzierung durchgeführt.

Das Verfahren könnte den Anteil von HMVA, der auf Deponien landet, von derzeit knapp 60 Prozent auf etwa 20 Prozent reduzieren.



Ökonomische und ökologische Vorteile

Das Treibhausgaseinsparpotenzial durch die Verwertung der HMVA beträgt für Deutschland je nach erzielten Ausbringungsraten und substituierter Zementart zwischen 500.000 und einer Million Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr. Der Großteil der Einsparungen ist dabei auf die Substitution von Zement durch die aufbereitete HMVA-Feinfraktion zurückzuführen. Eine Substitution von zehn bis 30 Prozent des Zements durch die aufbereitete HMVA-Feinfraktion reduziert den CO₂-Fußabdruck von Beton von circa 220 Kilogramm CO₂-Äquivalent auf 150 bis 200 Kilogramm CO₂-Äquivalent pro Kubikmeter. Die Abtrennung und das Recycling der Feinmetalle würde in Deutschland zu weiteren Einsparungen von 45.000 bis 90.000 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr führen.

Des Weiteren könnte der Anteil von HMVA, der auf Deponien landet, von derzeit knapp 60 Prozent auf etwa 20 Prozent reduziert werden. Für Deutschland bedeutete dies eine Entlastung der Deponiekapazitäten um zwei Millionen Tonnen jährlich. Zusätzlich würden in gleichem Ausmaß natürliche Rohstoffe (vor allem Sand und Kies) durch die verstärkte Kreislaufführung geschont.

Der größte ökonomische Vorteil des Verfahrens besteht in der Einsparung von Entsorgungskosten für HMVA sowie der Kostenreduktion bei der Betonherstellung durch die Zementeinsparungen. Darüber hinaus werden zusätzliche Erlöse im Rahmen der HMVA-Aufbereitung durch die weitergehende Metallabtrennung erzielt. Ökonomische Aussagen zur Umsetzung im großtechnischen Maßstab sind derzeit jedoch noch nicht möglich, da es sich um ein Forschungsvorhaben im Entwicklungsstadium handelt.

Förderung

Förderungen und Beratungen: 250.000 Euro durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Die Unternehmenspartner BAUREKA und KIMM bringen Eigenmittel in das Projekt ein.

» Der Fokus bei der Erschließung und Aufbereitung von Stoffströmen sollte auf Bereichen liegen, in denen ein relevanter Substitutionseffekt durch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen zu erwarten ist. Bei diesem Vorhaben geschieht dies durch die gleichzeitige Substitution von Gesteinskörnung und Zement in Beton. «

» Um Vorbehalte gegen Recyclingmaterialien auszuräumen, muss transparent kommuniziert werden und Bedenken sollten ernst genommen werden. Überdies muss sichergestellt werden, dass keine Schadstoffe aus den Produkten austreten. «

» Betonhersteller haben keine Zulassung als Abfallbehandler, daher bedarf der Einsatz des Ökobetons der Klärung der rechtlichen Frage, wann das Abfallende für die aufbereiteten HMVA-Fractionen eintritt. «

3.1.2 Herstellung von mineralischen Recyclingbaustoffen

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

BAUREKA Baustoff-Recycling GmbH (Kassel),
www.baureka.de

Einordnung

Das untersuchte Verfahren „Herstellung von mineralischen Recyclingbaustoffen“ ist ein Ansatz, um die Verwendung von Naturbaustoffen als Primärinput zu verringern beziehungsweise den Einsatz von Recyclingbaustoffen im Bausektor, der naturgemäß einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren in Deutschland ist, zu erhöhen. Das hier konkret betrachtete Verfahren der BAUREKA GmbH (Gründung 1994, Aufbereitung von 100.000 Tonnen abgebrochener Baustoffe pro Jahr) ist bereits seit mehreren Jahrzehnten im Einsatz; ursprünglich wurde das Verfahren zur Vermeidung von Deponierungskosten eingeführt.

Beschreibung des Verfahrens

Sobald eine wirtschaftlich sinnvoll recycelbare Menge an mineralischen Bauabfällen, wie etwa Ziegel, Straßenabruch und Beton, gesammelt ist, kommt eine Brechanlage zum Einsatz: Diese Anlage besteht in der Regel aus einem Prallbrecher sowie einer nachgeschalteten Siebanlage inklusive Windsichter und dazugehörigen Sortiermöglichkeiten für die nichtmineralischen Bestandteile, wie beispielsweise Holz, Papier oder Kunststoffolie. Des Weiteren gehört zur Anlage ein Magnetscheider, der die Bewehrung aus dem Beton herausholt. Im Anschluss geht das Material in die Glasierungs- beziehungsweise Siebanlage und wird dann je nach Kundenwunsch auf verschiedene Körnungen ausgesiebt, die anschließend, je nach Güte und Beschaffenheit der Recyclingbaustoffe, als Baumsustrat, Straßenbaumaterial oder als Zuschlagstoff für Recyclingbeton verwendet werden können.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Generell ist der Markt des Baustoffrecyclings aufgrund der gleichbleibenden Zusammensetzung des mineralischen Inputmaterials durch vergleichsweise wenig Innovationen gekennzeichnet. Eine entsprechende Recyclinganlage mit einem jährlichen Output von 150.000 bis 200.000 Tonnen geht mit Investitionskosten von circa 2,5 Millionen Euro für die verschiedensten Aufbereitungsanlagen einher. Die niedrigeren laufenden Kosten umfassen Verschleißkosten für Wartung und Reparatur sowie Ausgaben für Personal und Energie, wobei deren jeweiliges Verhältnis zueinander wiederum von der recycelten Materialart beeinflusst wird. Nach circa zehn Jahren hat sich die Anlage amortisiert.

Maßnahme	Investitionskosten	Amortisationszeit
Recyclinganlage mit einem jährlichen Output von 150.000 bis 200.000 Tonnen	2,5 Millionen Euro	Zehn Jahre

Für jede Tonne recycelten Baustoffs muss eine Tonne weniger Primärmaterial am Berg abgebaut oder aus dem Baggersee geschürft werden, wodurch sich auch die indirekten Stoffströme verringern. Die gebietsnahe Aufbereitung von Bauschutt zu Recyclingbaustoffen reduziert darüber hinaus die CO₂-Emissionen. Ökonomische Vorteile durch den Einsatz von Recyclingbaustoffen liegen bei diesem Verfahren in einer Kostenverringerung bei der Materialbeschaffung: Die Preise für Recyclingbaustoffe liegen um circa zehn bis 20 Prozent niedriger als die für neuen, auf Naturbausteinen basierenden Beton. Zudem hat beispielsweise Recyclingschotter ein geringeres Eigengewicht als Naturstein. Zur Verfüllung von einem Kubikmeter benötigt man rund 2,2 Tonnen Basalt, aber nur rund 1,75 Tonnen Recyclingschotter. Somit werden weniger Tonnen Material benötigt. Dies senkt Kosten und Emissionen, unter anderem im Bereich Materialtransport.

Für jede Tonne recycelten Baustoffs muss eine Tonne weniger Primärmaterial abgebaut werden.



Mit der am 1. August 2023 in Kraft tretenden Mantelverordnung, in welcher die Ersatzbaustoffverordnung (EbV) enthalten ist, werden Güte und Qualitätsüberwachung von mineralischen Ersatzbaustoffen weiter an Bedeutung gewinnen. Ziel ist es, die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen

nochmalig zu erhöhen, was zur Schonung von kostbaren Deponieräumen beitragen und zusätzlich ermöglichen wird, dass mehr Recyclingmaterial dem Stoffkreislauf zur Verfügung gestellt wird.

3.1.3 Abbruch und Aufbereitung von Beton im Rahmen des Urban-Mining-Konzepts für das Rathaus in Korbach

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Stadt Korbach (Stadtbauamt), ARGE agn und heimspiel architekten, Universität Kassel (Center for Environmental Systems Research), Bimolab gGmbH

Einordnung

Das Rathaus Korbach, welches im historischen Innenstadtkern liegt, besteht in Teilen schon seit dem 14. Jahrhundert. In den 1970er-Jahren wurde es um einen Anbau erweitert, der sich aus städtebaulicher Perspektive nicht vorteilhaft in das Ensemble der historischen Altstadt einfügte.³² Im Rahmen eines Umbauprojekts wurde der Anbau selektiv zurückgebaut, an gleicher Stelle entsteht ein Neubau. Die beim Gebäudeabbruch gewonnenen Materialien wurden aufbereitet und für den Neubau genutzt. Ein Forschungsprojekt hat den Prozess wissenschaftlich begleitet, analysiert und bewertet.

Beschreibung des Verfahrens

Der erste Schritt des Urban Minings³³ im Baubereich ist die Analyse der in einem Gebäude verbauten Wertstoffe. In einer Inventur müssen Art, Umfang und Verteilung des Materialbestandes erfasst werden. Konkret umfasste dieser Schritt in Korbach eine Bestandsaufnahme, eine Prüfung der Bausubstanz durch Probenentnahme vor dem Abbruch, eine Analyse der Recyclingpotenziale des Bestandes, eine Recherche der Einsatzmöglichkeiten und die Ausarbeitung der Betonklassifizierung des Neubaus sowie die Bilanzierung der potenziellen Sekundärrohstoffe gegenüber den für den Neubau benötigten (Sekundär-)Rohstoffen.

Bevor der selektive Rückbau beginnen konnte, musste der Anbau entkernt und mit Schadstoffen belastete Materialien mussten entfernt werden. Der ehemalige „Rohbauzustand“ war quasi wiederherzustellen. Dann folgte der selektive Rückbau einschließlich der sortenreinen Trennung der mineralischen Abbruchabfälle. Zunächst wurden das innere, nicht tragende Mauerwerk und die Fliesen mithilfe eines Minibaggers und eines Stemmhammers zurückgebaut. Tragende Innenwände, Außenwände, Böden und Decken aus Beton wurden mit Longfrontbaggern abgebrochen. Der Stahlbeton wurde vorzerkleinert und die Bewehrung teilweise vom Beton getrennt. Nach dem Abbruch der sortenreinen mineralischen Massen wurden in einer ortsnahen mobilen Brechanlage die rezyklierten Gesteinskörnungen für den

Neubau produziert. Diese wurden in verschiedenen normgemäßen Qualitäten im Neubau verarbeitet, angefangen bei der Auffüllung des Planums über Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung (R-Beton) für das Tragwerk bis hin zu Sichtbeton-Fertigteilen, die in der Fassade des Neubaus zum Einsatz kamen.

Ökonomische und ökologische Vorteile

In der aktuellen Marktsituation sind die Rückgewinnung von Baumaterialien und der direkte Wiedereinsatz rezyklierten Gesteinskörnung in Beton oft mit Mehrkosten verbunden. Im Falle des Projekts Rathaus Korbach betrugen die Mehrkosten für die Nutzung des R-Betons im Tragwerk circa 0,3 Prozent der Gesamtkosten des Bauvorhabens. Die R-Beton-Fassade schlug mit rund 1,2 Prozent zu Buche. Perspektivisch würde sich der Mehraufwand reduzieren: So ist es aktuell noch relativ schwierig, Unternehmen zu finden, die über die Expertise für ein solches Projekt verfügen. Steigende Primärrohstoffpreise oder eine politisch gestaltete Internalisierung der Umweltkosten von Neubauten und Sanierungen mit Primärrohstoffen könnten den ökonomischen Nachteil jedoch ausgleichen.

Der Baubereich ist für große Mengen CO₂-Emissionen verantwortlich und für den größten abiotischen Ressourcenverbrauch. Beim Abbruch von Gebäuden fallen wiederum große Mengen Material an, die ihrerseits transportiert und entsorgt werden müssen. Der Abbruch und die direkte Wiederverwendung bzw. -verwertung vor Ort gehen mit zahlreichen positiven Umwelteffekten einher: weniger CO₂-Emissionen, weniger Rohstoffabbau, geringerem Transportbedarf und einem höherwertigen Einsatz von Abbruchmaterialien. Aktuell werden in Recyclinganlagen aufbereitete Recyclinggesteinskörnungen noch zu einem Großteil im Straßen-, Wege- und Erdbau eingesetzt (ungebundene Anwendungen).

Bei der Umgestaltung des Rathauses Korbach wurden 6.871 Tonnen Beton und Mauerwerk dem Recycling in einer mobilen Aufbereitungsanlage zugeführt; 5.000 Tonnen Recyclingmaterial wurden als ungebundene Frostschuttschicht und Trageschicht vor Ort verwertet und 1.000 Tonnen für die Erstellung rezyklierten Gesteinskörnung, welche im neuen Beton verarbeitet wurde. Im Vergleich zu konventionellem Beton konnte der Materialfußabdruck auf Produktebene nach einer Studie

der Universität Kassel³⁴ um mehr als 30 Prozent gesenkt werden. Das Potenzial für den Klimaschutz ist allerdings beschränkt, da die Klimagasemissionen von Beton im Wesentlichen auf die Zementherstellung zurückzuführen sind. Durch die ortsnahe Verwertung konnte der Klima-fußabdruck des Betons unter Einsparung von Transport-energie auf Produktebene je nach Expositions-kategorie immerhin um ein bis sieben Prozent reduziert werden.

Förderung

Die bauliche Maßnahme wurde sowohl mit Fördermitteln des Förderprogramms Stadtumbau in Hessen als auch der Stadt Korbach finanziert. Die Entwicklung des Urban-Mining-Konzepts wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) finanziert. Die wissenschaftliche Begleitung wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau gefördert.

» Die Herausforderungen beim Rückbau des Rathausanbaus in Korbach zeigen die Bedeutung des kreislaufgerechten Konstruierens für die Nachnutzung von Baustoffen. So muss die Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Bauwerken bereits in der Planung berücksichtigt werden. Der Neubau für das Rathaus Korbach wurde deshalb im „Urban Mining Design“³⁵ geplant: Auf nicht trennbare Verbundmaterialien und unlösbare Verbindungstechniken wurde weitgehend verzichtet. Alle Details wurden mit dem Urban-Mining-Index³⁶ bewertet und optimiert. «

Normgemäße, aufbereitete
rezyklierte Gesteinskörnung für
Beton

Rathaus Korbach nach der Umgestaltung



3.1.4 Flexibel, klimafreundlich und kreislauffähig: Massivholzbau mit Cross-Laminated Timber

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Kai Laumann Zimmerei- und Bedachungs GmbH (Wettenberg), www.kai-laumann.de

Einordnung

Das Bauunternehmen Laumann hat sich auf den massiven Holzbau mit dem Werkstoff Cross-Laminated Timber (CLT) spezialisiert, welches auch als Brettspertholz bekannt ist. Dabei handelt es sich um mehrschichtige, kreuzweise verleimte Massivholzplatten, die eine hohe Formstabilität und Festigkeit aufweisen. Sie können alternativ zu Beton, Mauerwerk und Stahl eingesetzt werden. Im Unterschied zum klassischen Holzrahmenbau ermöglicht CLT eine massive Holzbauweise, mit der Gebäude mit mehreren Stockwerken errichtet werden können – einschließlich sechsstöckiger Bauten.³⁷ Mit der CLT-Bauweise kann sehr flexibel je nach Nutzungsansprüchen gebaut werden, beispielsweise hat die Firma Laumann bereits Wohngebäude, Schulen, eine Kindertagesstätte, eine Feuerwache, Logistikhallen sowie Büro- und Industriegebäude aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz errichtet.³⁸

Beschreibung des Verfahrens

Die Firma Laumann wirkt bereits in der Planungsphase mit, um Holzbauaspekte frühzeitig zu berücksichtigen. Um den Holzrohbau in kürzester Zeit zu erstellen und dadurch die Kosten des Bauwerks niedrig zu halten, erfolgt eine intensive und detaillierte Werkplanung im Voraus. Dazu werden zunächst alle für die Vorfertigung und Montage relevanten Details dreidimensional als digitales Modell konfiguriert und ein Montageplan wird ausgearbeitet. Anschließend erfolgt die Bestellung beim Sägewerk. Nach der Produktion der CLT-Bauteile werden die Lkw-Lieferungen von der Bauleitung eingeplant und just in time an die Baustelle geliefert. Am gleichen Tag können die Teile von den Zimmerern verbaut werden. Verleimt werden die CLT-Bauteile mit einem ökologischen Klebstoff auf Wasserbasis, der weniger als ein Prozent des Gesamtprodukts ausmacht. Die Holzbauten sind rückbaufähig und wiederverwendbar.

Ökonomische und ökologische Vorteile

CLT-Bauten weisen eine gute Klimabilanz auf, da CO₂ im Baustoff Holz gespeichert wird. Ein Kubikmeter Fichtenholz speichert etwa eine Tonne CO₂. Für den Bau eines Studierendenwohnheims auf dem Uni Campus Friedberg in Frankfurt am Main³⁹ wurden insgesamt 2.900 Kubikmeter heimisches Fichtenholz verbaut. Laut der Firma Laumann können so etwa 2.300 Tonnen CO₂ im Vergleich zum herkömmlichen Massivbau mit Beton und Stahl eingespart werden.

Die massive Holzbauweise mit CLT gewährleistet einen hohen Schallschutz, sehr guten Brandschutz und sommerlichen Wärmeschutz. Ein weiterer wichtiger Vorteil sind die kurzen Bauzeiten der CLT-Bauweise. Der Rohbau kann unabhängig von der Jahreszeit innerhalb weniger Wochen errichtet werden. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung vorgefertigter Bauteile und die genaue Vorausplanung und Abstimmung zwischen Logistik und Montage. Zudem sind keine Trocknungsphasen notwendig, das heißt, der Innenausbau kann nach jedem Bauabschnitt direkt starten. Im Vergleich zum herkömmlichen Massivbau können so einige Monate an Zeit eingespart werden. Insgesamt sind die Kosten vergleichbar mit denen der herkömmlichen Massivbauweise. So sind beispielsweise CLT-Wände in etwa preisgleich zu massiven Stein- oder Glaswänden.

Zukunftsweisend an der CLT-Bauweise ist, dass ein geordneter Rückbau in kurzer Zeit erfolgen kann. Der Grundstock an Holz kann für neue Bauvorhaben wiederverwendet werden. Die Firma Laumann hat zum Beispiel für den Landkreis Gießen mehrere Wohnheime gebaut, die fünf Jahre lang als Unterkunft für Geflüchtete gedient haben. Sie werden aktuell abgebaut und die Holzbau- teile in der Zimmerei aufbereitet. Anschließend werden die CLT-Bauteile des Wohnheims – das Dach, die Fassade sowie die abgeschliffenen Wände – für den Bau von Kindertagesstätten eingesetzt.

Auch bei mehrstöckigen Bauten ist der Rohbau nach Ende der Nutzungsdauer rückbaubar. Falls keine weitere Verwendungsmöglichkeit im Baubereich besteht, kann das CLT zu Briketts oder Hackschnitzeln verarbeitet werden.



Montage der CLT-Wände und -Deckenteile



» Der Planungsprozess ist der Schlüssel für den Erfolg. Holzbauweise muss von Anfang an bedacht werden und folgt zum Teil einer anderen Logik als der klassische Massivbau mit Beton. Hilfreich ist es, sich mit professionellen Planern frühzeitig mit der Aufgabenstellung auseinanderzusetzen – und dabei gegebenenfalls den anvisierten Zeitplan und die Planung der Auftraggeber infrage zu stellen und anzupassen. «

3.2 Gruppe 2: Chemie

3.2.1 Geschlossener Kohlenstoffkreislauf durch Methanolgewinnung aus Reststoffen

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Technische Universität Darmstadt (Fachgebiet Energiesysteme und Energietechnik (EST)), www.tu-darmstadt.de

Einordnung

Gesammelte Verpackungsabfälle aus dem gelben Sack können nach derzeitigem Stand der Technik nicht komplett recycelt werden. Nachdem die Abfälle sortiert und die recyclingfähigen Bestandteile entnommen wurden, verbleibt eine Fraktion an nicht recycelbaren Reststoffen. Es handelt sich um ein Gemisch aus Kunststoffteilen, Kartonagen, Textilien, Holzbestandteilen et cetera. Dieses wird derzeit im Normalfall verbrannt, um zumindest Energie daraus zurückzugewinnen. Jedoch ist der Wirkungsgrad der Energierückgewinnung in elektrischem Strom sehr gering – er liegt bei unter 20 Prozent. Zudem setzt dieser Vorgang große Mengen des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid frei. Das gleiche Problem besteht bei anderen kunststoffhaltigen Abfallströmen, zum Beispiel bei Gewerbeabfällen. Das Fachgebiet Energiesysteme und Energietechnik (EST) der TU Darmstadt erforscht daher, wie aus problematischen Reststoffen chemische Grundstoffe zurückgewonnen werden können.⁴⁰ Ziel dabei ist, einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf zu erreichen, das heißt im Idealfall Ausgangsstoffe für neue Kunststoffe aus den Reststoffen zu gewinnen. Dazu werden verschiedene Vergasungsverfahren erprobt.

Beschreibung des Verfahrens

In der modularen Ein-Megawatt-Pilotanlage an der TU Darmstadt wird Synthesegas aus nicht recycelbaren Verpackungsabfällen hergestellt. Im ersten Schritt wird dafür die geschredderte Reststofffraktion des gelben Sacks in einen Reaktor mit einer Leistung von 0,5 bis einem Megawatt eingebracht. Dieser ist über zehn Meter hoch und hat einen Innendurchmesser von 400 Millimetern. In dem Reaktor werden die Reststoffpartikel unter Einsatz von Sauerstoff bei Temperaturen von etwa 900 Grad Celsius vergast. Polymerketten (Kohlenwasserstoffe) werden oxidiert zu Kohlenmonoxid (CO) und molekularem Wasserstoff (H₂).

Im nächsten Schritt wird das entstandene Synthesegas gereinigt, um unerwünschte Bestandteile im Gasgemisch zu entfernen (z. B. Staube, Chlor- und Schwefelverbindungen). Dafür wurde eine Synthesegasreinigungsanlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Wichtig ist, dass das Synthesegas zunächst sehr schnell von 900 Grad Celsius auf 300 Grad Celsius heruntergekühlt wird.

Andernfalls würden CO und H₂ reagieren und langkettige Kohlenwasserstoffe (Teere) bilden, die nicht für die spätere Synthese zur Verfügung stehen und außerdem wichtige Teile der Anlage verstopfen können (z. B. Messstellen). Dafür kommt ein spezieller Rohsynthesegaskühler zum Einsatz. Anschließend erfolgen mehrere Reinigungsschritte, unter anderem eine Warmgasentstaubung, die Entfernung von Chlor (da beispielsweise Kunststoffabfälle aus PVC chlorhaltig sind) und eine Sauer gaswäsche.

Am Ende des Prozesses entsteht ein hochreines Synthesegas, bestehend aus CO und H₂. Dieses wird in einem eigenen Versuchsstand über Katalysatoren geleitet. Hier reagieren die beiden Stoffe zum Endprodukt Methanol. Für diese Basischemikalie gibt es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, unter anderem lassen sich daraus neue Kunststoffe herstellen.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Das Verfahren ermöglicht eine Verwertung von Reststoffen, die nicht für ein mechanisches Recycling geeignet sind. Auch im Vergleich zur Verbrennung dieser Reststoffe lassen sich so Treibhausgasemissionen einsparen. Unter Hinzunahme von Elektrolysewasserstoff aus erneuerbaren Energien lässt sich die Methanolausbeute sogar noch steigern und es wird praktisch der komplette Kohlenstoff im Kreislauf gehalten, sodass dadurch kein Kohlenstoffdioxid emittiert wird. Das Produkt Methanol kann als Ausgangsstoff für die Herstellung neuer Kunststoffe genutzt werden. Dadurch könnte der Einsatz von Erdöl, der für die Herstellung von reinen Kunststoffen benötigt wird, entfallen.

Die Synthesegasreinigungsanlage wurde Anfang 2021 an der TU Darmstadt in Betrieb genommen. Mit ihr wurde erstmalig die komplette Verfahrenskette in einem semiindustriellen Maßstab demonstriert. Die Skalierung der Prozesskette ergibt, dass für ein solches Verfahren im Industriemaßstab ein Gesamtwirkungsgrad von mindestens 75 Prozent (Kaltgaswirkungsgrad sogar 85 Prozent) erreicht werden kann. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens lässt sich konstatieren, dass es bei den aktuellen Marktpreisen für Methanol (Stand Januar 2022; 505 Euro pro Tonne Methanol) bereits heute wirtschaftlicher ist als die übliche Herstellung von Methanol aus fossilen Einsatzstoffen. Bei einer in den nächsten Jahren zu erwartenden steigenden CO₂-Bepreisung kann sich der preisliche Vorteil noch signifikant erhöhen.



Dach und Turm der Synthesegasreinigungsanlage

Förderung

Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz bezuschusst und erhält Fördermittel der Europäischen Union über das Programm Horizont 2020.

» Von der TU Darmstadt wurde auch ein „Carbonate Looping“ entwickelt, um CO_2 aus dem Abgasstrom abzuscheiden und daraus Methanol zu gewinnen. Hier gibt es viele denkbare Anwendungsfälle für Industrieprozesse (z. B. Chemieindustrie, Zementherstellung). Unternehmen könnten auf diese Weise ihren Treibhausgasausstoß reduzieren und Kohlenstoff in Form des Wertstoffs Methanol binden. «

3.2.2 Durch Sauerstoffeintrag optimierte thermische Spaltung von Abfallschwefelsäuren

Anbieter der Technologie

Messer SE & Co. KGaA (Bad Soden/Krefeld),
www.messergroup.com

Einordnung

Die Grundidee des Recyclings von stark verunreinigten Schwefelsäuren basiert auf dem Prinzip der thermischen Spaltung. Die Messer-Gruppe mit einem Umsatz von 3,2 Milliarden Euro und rund 11.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern hat ein Verfahren entwickelt, das durch die Einbringung von Sauerstoff die thermische Spaltung von Altschwefelsäure optimiert.

Beschreibung des Verfahrens

Bei der thermischen Spaltung wird die Abfallschwefelsäure in einem endothermen Prozess bei einer Temperatur von etwa 1.000 Grad Celsius in die Bestandteile Schwefeldioxid, Wasserdampf und Sauerstoff aufgetrennt. Das Schwefeldioxid wird wieder der Schwefelsäureproduktion zugeführt und somit recycelt. Nichtflüchtige Verunreinigungen können auf diese Weise beseitigt werden.

Durch die Zuführung von Sauerstoff als Oxidationsmedium wird der Stickstoffballast der Luft reduziert und kann durch schwefeldioxidhaltiges Prozessgas ersetzt werden, um eine höhere Spaltrate und damit verbunden eine höhere Produktion von Schwefelsäure zu erreichen. Betriebs- und Energiekosten verringern sich. Die von Messer angebotene Anlagentechnik erlaubt die Einbringung von Sauerstoff in eine Vielzahl unterschiedlicher Spaltreaktoren unter verschiedensten Produktionsbedingungen. Bereits bei einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration von 21 auf 23 Prozent konnte eine Leistungssteigerung des Aufbereitungsprozesses von etwa zehn Prozent festgestellt werden. Grundsätzlich ist eine Steigerung von bis zu 40 Prozent je nach Anlagentyp möglich. Die mit der Sauerstoffzuführung verbundene erhöhte Prozesstemperatur ist für die meisten Anlagen in diesem Bereich unproblematisch. Die Prozessparameter für die thermische Spaltung ändern sich nur in geringem Maße.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz schreibt eine umweltfreundliche Entsorgung, bevorzugt Rückführung, von Schwefelsäuren in den Produktionsprozess vor – die in der Vergangenheit betriebene Verklappung ist nicht mehr möglich. Die Betriebskosten für den Sauerstoffeintrag in den Oxidationsprozess belaufen sich im Wesentlichen auf die Kosten für die Bereitstellung des Gases. Investitionen für eine Anlage zum Eintrag von Sauerstoff in den Prozess lassen sich auf 100.000 bis 150.000 Euro beziffern. Mit einer Amortisation durch den höheren Ertrag an regenerierter Schwefelsäure ist je nach örtlichen Gegebenheiten innerhalb von drei bis sechs Monaten zu rechnen.

Maßnahme	Investitionskosten	Amortisationszeit
Anlage zum Eintrag von Sauerstoff	100.000 bis 150.000 Euro	Drei bis sechs Monate

Aus Umweltsicht sind insbesondere der verminderte Einsatz von Primärschwefelsäure und der Verzicht auf umweltschädliche Entsorgungsverfahren zu nennen. Eine effizientere Kreislaufführung kann erreicht werden, wobei weniger Energie pro Einheit zum Einsatz kommt.

Tanks mit Verdampfern für die Sauerstoffversorgung



3.2.3 AshDec-Verfahren zum Phosphorrecycling

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Metso Outotec GmbH (Oberursel),

www.mogroup.com

Einordnung

Die Metso-Outotec-Gruppe mit rund 15.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von 3,9 Milliarden Euro hat ein Verfahren zum Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen entwickelt. Im Vergleich zu alternativ eingesetzten nasschemischen Verfahren fallen deutlich geringere Mengen an Schwermetallabfällen an.

Beschreibung des Verfahrens

Das AshDec-Verfahren setzt in der Gesamtprozesskette nach der Verbrennung des Klärschlammes an. Nach Zugabe eines Natriumadditivs zur Asche wird die resultierende Mischung auf eine Temperatur von circa 900 Grad Celsius erhitzt. Dadurch entsteht vorwiegend die pflanzenverfügbare Phosphatverbindung CaNaPO_4 anstelle der vorher vorherrschenden Ca-, Al- und Fe-Phosphate, die nicht pflanzenverfügbar sind. CaNaPO_4 war Hauptbestandteil des sogenannten Rhenania-Phosphats, welches bis in die 1980er-Jahre als Dünger verwendet wurde und allen Kriterien zur Pflanzendüngung entspricht. Durch die vorherrschenden reduzierenden Bedingungen gehen bei der erhöhten Temperatur flüchtige Schwermetalle in die Gasphase über, wodurch die Konzentration von Schwermetallen im Dünger verringert wird. Dieser Prozess kann optional durch Zugabe von Trockenschlamm als Reduktionsmittel in die Mischung verstärkt werden.

Pro Tonne Klärschlammasche entstehen circa 40 Kilogramm trockenes Schwermetallkonzentrat, das einer Entsorgung zugeführt werden muss. Diese Menge liegt weit unterhalb der Abfallmengen von alternativ eingesetzten nasschemischen Verfahren. Dagegen liegt die Nährstoffkonzentration im Dünger unterhalb der in Europa üblicherweise verwendeten Düngemittel, sodass der Umgang mit und das Aufbringen des Recyclingdüngers aufwendiger sind. In anderen Teilen der Welt sind jedoch Düngemittel mit vergleichbaren Nährstoffkonzentrationen erfolgreich im Einsatz.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Das Investitionsvolumen für eine Anlage für die Behandlung von 15.000 Tonnen Asche pro Jahr liegt bei etwa 15 Millionen Euro. Die laufenden Kosten betragen etwa einen Euro pro Kilogramm P_2O_5 und 2,30 Euro pro Kilogramm Phosphor, was unterhalb des üblichen Marktpreises liegt. Aufgrund der nicht gegebenen direkten Vergleichbarkeit mit Primärdüngern ist die Erlöserwartung derzeit noch unklar. Auch durch die hohe Volatilität des Rohphosphatpreises, der in den vergangenen zehn Jahren zwischen 45 und 430 US-Dollar pro Tonne lag, ist eine direkte Abschätzung der Wirtschaftlichkeit schwer möglich. Der langfristige Trend ist jedoch positiv.

Entscheidender als die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind jedoch die verschärften Vorschriften zur Klärschlammbehandlung: Die novellierte Klärschlammverordnung von 2017 schränkt die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm ab 2029 stark ein, gleichzeitig werden Klärschlammherzeuger verpflichtet, Phosphor zurückzugewinnen. Dieser Umstand wird zukünftig zu einem hohen Bedarf an geeigneten Aufbereitungsverfahren führen. Darüber hinaus hat die europäische Sachverständigengruppe für technische Beratung bezüglich der ökologischen/biologischen Produktion (EGTOP) empfohlen, kalzinierte Phosphate (wie das AshDec-Produkt) als Düngemittel in der Biolandwirtschaft zuzulassen.

Aus Umweltsicht ist das Verfahren gegenüber der Gewinnung von Rohphosphaten als vorteilhaft zu beurteilen. Phosphor ist nicht substituierbar und die weltweiten Vorräte gehen zurück. Der Abbau wird daher energieintensiver werden. Des Weiteren enthalten Rohphosphate sedimentären Ursprungs zunehmende Mengen an Cadmium und Uran. Bei einer an die Klärschlammverbrennung angeschlossenen AshDec-Phosphorrecyclinganlage könnte der Energiebedarf des Prozesses teilweise durch die bei der Klärschlammverbrennung erzeugte heiße Asche gedeckt werden, die Transportwege im Phosphorkreislauf reduzieren sich und die Belastungen durch Cadmium oder Uran sind deutlich geringer.

Maßnahme	Investitionskosten	Amortisationszeit
Anlage für das Processing von 15.000 Tonnen Asche pro Jahr	Ca. 15 Millionen Euro	>10 Jahre (abhängig von den möglichen Erlösen für Rezyklatdünger)

3.3 Gruppe 3: Metalle

3.3.1 Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Duesenfeld GmbH (Wendeburg),
 www.duesenfeld.com

Einordnung

Die Duesenfeld GmbH hat ein neues Verfahren zum umweltschonenden Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus E-Fahrzeugen entwickelt. Die Recyclingeffizienz beträgt über 90 Prozent. Im Vergleich zu herkömmlichen pyrometallurgischen Verfahren werden pro Tonne recycelter Batterien 4,8 Tonnen CO₂ eingespart – und sogar 8,1 Tonnen im Vergleich zur primären Rohstoffgewinnung.

Beschreibung des Verfahrens

In einem ersten Schritt werden die Batteriesysteme (Battery Packs) aus den E-Fahrzeugen elektrisch tiefenentladen und anschließend kurzgeschlossen, um die Sicherheit des Prozesses zu gewährleisten. Die durch die Tiefenentladung zurückgewonnene elektrische Energie der Batterien wird ins eigene Stromnetz eingespeist, womit die Recyclinganlagen betrieben werden. Daraufhin werden die Battery Packs manuell demontiert, um Gehäuse und Deckel (Aluminium, Stahl und Kunststoff) sowie verschiedene Verbindungen von den Batteriemodulen und -zellen zu trennen.

Die freigelegten Module und Zellen werden dann maschinell weiterverarbeitet. Sie werden in einem Schredder in Stickstoffatmosphäre zerkleinert, als Prozessprodukt erhält man ein vom Elektrolyt feuchtes Batteriegranulat. Das feuchte Granulat enthält die Batterierohstoffe Kupfer, Aluminium, Graphit, Mangan, Kobalt und Kunststoffe sowie der Elektrolyt mit dem Leitsalz Lithium.

Das Batteriegranulat wird anschließend bei niedriger Temperatur und Unterdruck getrocknet. Der Elektrolyt verdampft, kann ausdestilliert werden und wird in Reinform ohne Verunreinigungen wiedergewonnen. Das getrocknete Batteriegranulat wird durch verschiedene Trennverfahren separiert. Als eines der Endprodukte entsteht die Schwarzmasse, ein trockenes feinpulvriges Gemisch aus der Elektrodenbeschichtung der Lithium-Ionen-Batterie. Die Schwarzmasse enthält die wertvollen Metalle Kobalt, Nickel, Mangan, Lithium und Graphit. Nach diesem mechanischen Recyclingschritt erreicht Duesenfeld bereits eine Recyclingquote von 72 Prozent.

Die Rohstoffe der trockenen Schwarzmasse werden daraufhin in verschiedenen chemischen Extraktionsschritten aufgetrennt. Nach diesem hydrometallurgischen Recycling in Verbindung mit der mechanischen Aufbereitung sind über 90 Prozent der Rohstoffe zurückgewonnen.

Ökonomische und ökologische Vorteile

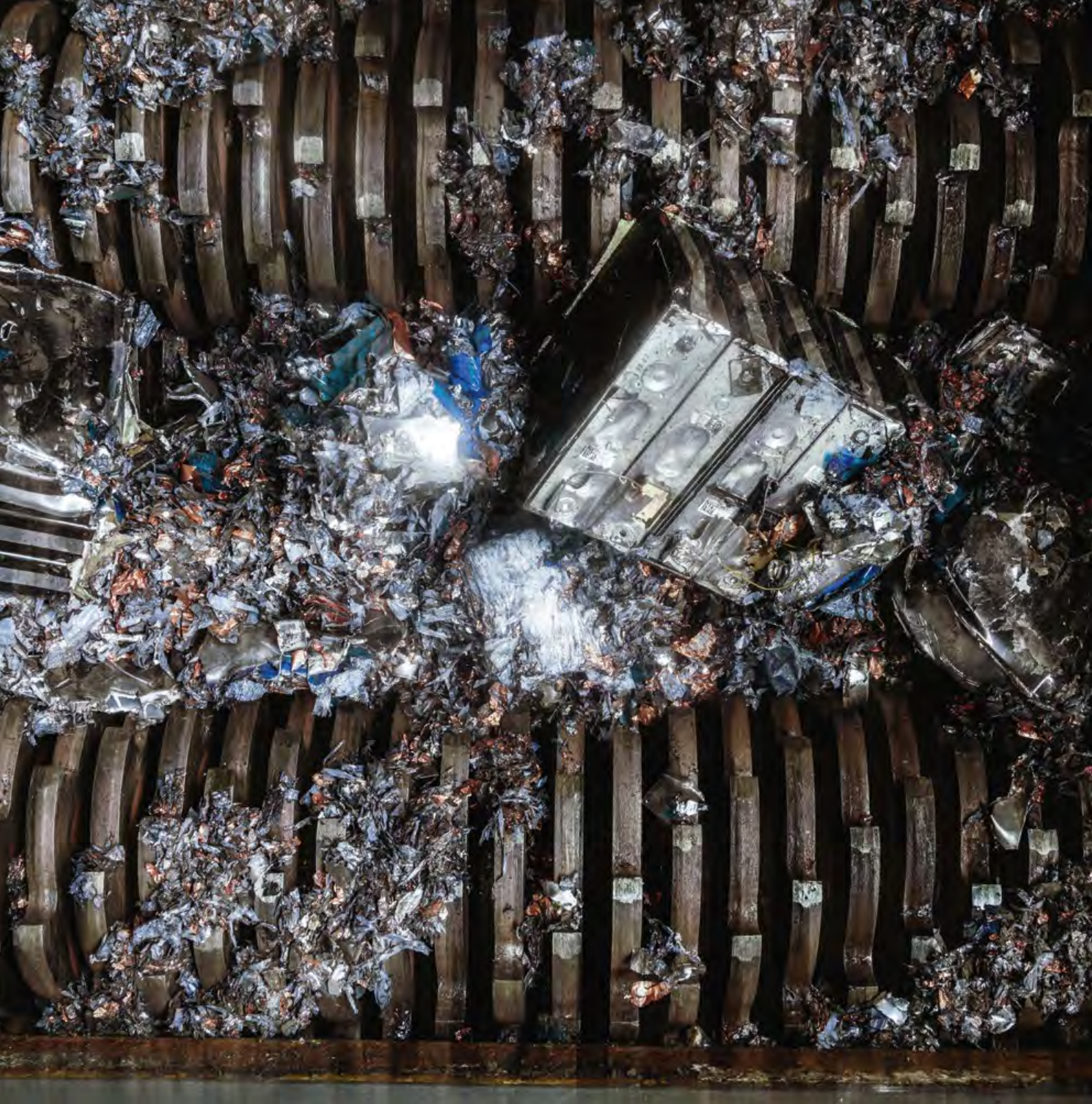
Das Duesenfeld-Recyclingverfahren bietet eine Reihe von ökologischen Vorteilen, die sich auch in ökonomische Vorteile übersetzen:

Der Verzicht auf das bisher übliche Einschmelzen spart Energie und damit auch Geld und CO₂-Emissionen ein. Hochöfen müssen überdies nahezu kontinuierlich laufen, da die Anlaufzeiten lang sind. Die Duesenfeld-Anlage kann bei Bedarf abgeschaltet werden.

Darüber hinaus entfernt Duesenfeld in einem Zwischenschritt Fluorid aus dem Stoffgemisch, wodurch die Bildung von Fluorwasserstoff oder gar Flusssäure ausgeschlossen wird. Da keine unerwünschten chemischen Stoffe in dem Prozess entstehen, reduziert Duesenfeld gleich mehrfach Betriebskosten: Zum einen ist keine Abgasnachbehandlung (Gaswäsche) für die mechanische Aufbereitung nötig, wodurch auf teure Anlagen verzichtet werden kann und die Betriebskosten massiv reduziert werden, zum anderen ist der administrative Aufwand des Unternehmens niedriger, da verschiedene Genehmigungs- und Überprüfungsverfahren entfallen.

Für neue Partner bietet Duesenfeld Lizenzmodelle zur Nutzung des patentierten Verfahrens zur mechanischen Aufbereitung an. Mit dem Erwerb einer Lizenz kann eine Anlage nach den jeweiligen Kundenwünschen errichtet und betrieben werden.

Die Zwischenprodukte können dann in Standardbehältern transportiert werden, wodurch sich die Lkw-Transportkapazitäten um das Siebenfache erhöhen. Die Transportkosten und die CO₂-Emissionen verringern sich entsprechend.⁴¹ Im Falle einer Ausweitung des Emissionshandels würden sich der niedrigere Energieaufwand im Prozess und im Transport zusätzlich positiv auf die unternehmerische Bilanz auswirken.



Die Batterien werden geschreddert.

Förderungen und Beratungen

Duesenfeld ist aus zwei durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsprojekten - LithoRec I und II - hervorgegangen. Der Gründer von Duesenfeld war an diesen Projekten beteiligt und hat in der Folge das Unternehmen mit aufgebaut.

» Als Marktvorreiter hatte Duesenfeld zunächst mit mangelnder Nachfrage zu kämpfen. Unternehmen kaufen standardmäßig Rohstoffe und wussten mit dem Produkt Schwarzmasse zunächst nichts anzufangen. Mittlerweile wächst der Markt rasant – aber im Falle sehr innovativer Produkte lohnt die frühzeitige Bewerbung, um den Markt vorzubereiten. «

3.3.2 Rückgewinnung von Indium

Anbieter der Technologie

Electrocycling GmbH (Goslar), www.electrocycling.de

Einordnung

Indium gilt in der Europäischen Union als kritischer Rohstoff,⁴² der sich durch knappe und konzentrierte Reserven sowie eine hohe wirtschaftliche Bedeutung auszeichnet. Überdies ist Indium bis heute nur schwer zu substituieren.

Einer der Hauptanwendungsbereiche von Indium sind LCD-Flachbildschirme. Vor dem Hintergrund stetig steigender Einsatzzahlen von Flachbildschirmen in unterschiedlichsten Anwendungen ist die Rückgewinnung von Indium aus Altprodukten daher einer der zentralen Ansatzpunkte zur Schließung externer Stoffkreisläufe. Die technische Rückführbarkeit zeigt sich dabei deutlich an den internen Stoffkreisläufen: Während Indium aus Produktionsabfällen zu 70 Prozent zurückgewonnen wird, liegt die Quote bei externen Kreisläufen noch immer bei praktisch null.

Beschreibung des Verfahrens

Für die Rückgewinnung des Indiums aus Flachbildschirmen ist die Separierung der sogenannten Indiumzinnoxid-Schicht notwendig: Die LCD-Anzeige besteht jeweils aus zwei dünnen Glasscheiben, auf denen Indiumleiterbahnen aufgebracht sind. Kern des Verfahrens ist daher die Trennung dieser Glasscheiben, ohne dass die quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung dabei beschädigt wird. Durch eine Separierung der LCD-Anzeigen während des Zerlegeverfahrens wird eine Voranreicherung des Indiums erreicht. Von ausgang rund zwölf Gramm pro Tonne im Gesamtgerät kann dann bereits eine Konzentration von etwa 190 Gramm pro Tonne vorliegen. Für die Indiumrückgewinnung wurden beispielsweise durch die Firma Umicore Laugeverfahren mit anschließenden ionenselektiven Prozessen entwickelt.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Die Rentabilität der Indiumrückgewinnung aus Flachbildschirmen entscheidet sich in erster Linie an der Arbeitszeit: Die manuelle Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung ist arbeitsintensiv, da diese Geräte sehr komplex in ihrem Aufbau und die zu demontierenden Komponenten nur schlecht zugänglich sind.

Die Zerlegung eines dieser Geräte dauert mit geschultem Fachpersonal 15 bis 20 Minuten. Um die Gehäusenhälften zu öffnen, müssen teilweise bis zu 30 Schrauben gelöst werden. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Zerlegeverfahren entwickelt, die für eine schnellere und wirtschaftlichere Verarbeitung von LCD-Bildschirmgeräten geeignet sind. Als Ergebnis wurden eine Pilotanlage zur teilautomatisierten Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung und eine Anlage zur Zerlegung von Geräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung errichtet, mit denen die Verfahren überprüft und weiterentwickelt werden.

In der Anlage werden jährlich bis zu 80.000 Tonnen Elektro- und Elektronikaltgeräte recycelt. Dabei werden Metalle – wie Stahl, Kupfer und Indium –, aber auch Kunststoffe und Glas rückgewonnen.



3.3.3 Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle

Anbieter der Technologie

Wolfgang Kaerger Umweltberatung (Essen),
wolfgang.kaerger@icloud.com

Einordnung

Jährlich werden in Deutschland circa 3,3 Millionen Pkw abgemeldet (2019), davon werden circa 460.000 Fahrzeuge in Deutschland verwertet. 2019 wurde eine Recyclingquote von knapp 93,6 Prozent erreicht und damit die EU-weit vorgegebene Quote von 95 Prozent erstmals verfehlt. Die gewichtsbasierten Quoten zeigen nicht, dass insbesondere elektronische Bauteile bisher nur unzureichend separiert und einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden. In den nächsten Jahren wird der Einsatz neuer Materialien weiter zunehmen und der Ausstattungsgrad in Kraftfahrzeugen wachsen. Möglicherweise spiegelt der leichte Rückgang der Recyclingquote bereits heute diese Verschiebung wider. Insgesamt steigt das Potenzial zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen mit wirtschaftsstrategischer Bedeutung und Umweltrelevanz aus den zukünftigen Altfahrzeugen.

Beschreibung des Verfahrens

Kern des Verfahrens ist eine vertiefte manuelle Demontage von Altfahrzeugen, die sich nicht wie bisher auf Autoersatzteile beschränkt, sondern auch gezielt elektronische Bauteile erfasst. Aufgrund der Grenzen der Schredder- und Postschreddertechniken erscheint die manuelle – bei

Bedarf zerstörende – Demontage der edel- und sondermetallhaltigen Komponenten aus Altfahrzeugen als vielversprechende Variante, die weitgehende Rückgewinnung der zunehmenden Menge an strategischen und umweltrelevanten Metallen zu realisieren. Neben etwa 20 bis 30 Kilogramm Kupfer und mehreren Gramm Platin oder Palladium im Katalysator enthalten Fahrzeuge neuerer Baujahre beispielsweise etwa drei Gramm Silber und 0,3 Gramm Gold – überwiegend in Leiterplatten, zum Beispiel in Steuergeräten. Für alle diese Rohstoffe und Komponenten bestehen etablierte industrielle Rückgewinnungsverfahren, die Herausforderung besteht in der Identifikation und Lokalisierung in unterschiedlichen Altfahrzeugen.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Die Wirtschaftlichkeit und die Rückgewinnungsrate an kritischen und umweltrelevanten Metallen hängen von einer geeigneten Kombination der Behandlungsschritte der Altfahrzeug- und Komponentenverwertung ab. Im Rahmen des UBA-Forschungsprojekts ORKAM wurde eine Demontageroutine entwickelt, bei der sich nach Entfernung von störenden Teilen die Separation und Verwertung in allen oder den meisten untersuchten Fällen wirtschaftlich für den Inverter, die Start-Stopp-Komponente, die Motorsteuerung, die Getriebe-Steuerung, das Infotainment und die Lambdasonden rechnet.^{43, 44}



3.3.4 Recycling von Feinmetallen

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Umicore AG & Co. KG (Hanau, Anlagenstandort: Hoboken, Belgien), www.umicore.com

Einordnung

Umicore Precious Metals Recycling hat ein Verfahren zur Rückgewinnung von Feinmetallen entwickelt, um beispielsweise die Metalle aus Erneuerbare-Energien-Technologien (Elektronik, Brennstoffzellen, Lithium-Ionen-Batterien) und vielen anderen Anwendungen zurück in den Kreislauf zu führen. Durch komplexe, aufeinander abgestimmte Kombinationen aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessen kann eine große Bandbreite an Metallen mit hohen Ausbeuten und Feinmetallreinheiten zurückgewonnen werden.

Beschreibung des Verfahrens

Zunächst kommen auf der Inputseite viele (edel)metallhaltige Materialien an, unter anderem Leiterplatten, Katalysatoren, Brennstoffzellenkomponenten und edelmetallhaltige Rückstände aus der Hüttenindustrie, darunter auch verschiedene Bauteile von Erneuerbare-Energien-Technologien. Die eingehenden Materialien werden beprobt und auf ihren Metallgehalt hin analysiert. Diese Informationen stellen die Basis für die Prozesssteuerung und die Vergütung der Lieferanten dar.

Dann werden die Materialien nach produktionsoptimalen Kriterien vermischt und einem spezialisierten Hochofen zugeführt, der mit einer sehr leistungsfähigen Abgasreinigung und Energierückgewinnung ausgerüstet ist. Der Hochofen hat eine Kapazität von über 1.000 Tonnen am Tag und bis zu 500.000 Tonnen im Jahr. Bei rund 1.200 Grad Celsius wird der Materialmix aufgeschmolzen, wobei die dazu nötige Energie zu großen Teilen über den Organikanteil aus dem eingehenden Material genutzt werden kann.

Verschiedene Metalle, die als Oxide vorliegen, werden im Hochofenprozess reduziert (d. h., das Sauerstoffatom wird abgetrennt) und damit in eine metallische Phase gebracht. Es entstehen zwei Phasen: eine schwere metallische Phase (geschmolzenes Kupfer mit weiteren einlegierten Metallen) und eine leichte darauf schwimmende oxidische Phase (Schlacke).

Kupfer dient in diesem Prozess als Sammlermetall: Es hat die Eigenschaft, verschiedene Edelmetalle zu binden. Ist eine ausreichende Konzentration Kupfer- und Edelmetallgemisch erreicht, lässt man das flüssige Metall aus dem Hochofen abfließen. Dieses sogenannte Werkkupfer wird granuliert, gemahlen und dann nasschemisch weiterverarbeitet. Aus der entstehenden kupferhaltigen Lösung wird reines Kathodenkupfer auf elektrochemischem Weg abgeschieden. Die im Löserückstand verbleibenden Edelmetalle (Silber, Gold, Platin, Palladium, Rhodium, Iridium und Ruthenium) und weitere Spurenmetalle werden an die Edelmetallscheidung weitergeleitet. Dort erfolgt eine komplexe nasschemische Verfahrenskombination zur Trennung der Edelmetalle voneinander und ihrer anschließenden Raffination zu hochreinen Feinmetallen.

Die Schlacke wird einem zweiten Hochofenprozess zugeführt. In diesem Prozess dient Blei als Sammlermetall, um weitere Metalle zu extrahieren. Aus diesem Strom erfolgt anschließend in der Sondermetallscheidung die Rückgewinnung und Raffination von Indium, Selen und Tellur, über weitere Schritte werden Feinblei, Antimon, Zinn, Wismut und Arsen gewonnen.

Die Restschlacke ist weitgehend metallfrei und kann als Baustoff und Zuschlagstoff in der Betonindustrie verwendet werden.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Der ökologische Fußabdruck der Rückgewinnung der Metalle durch solche modernen Recyclingverfahren ist deutlich kleiner als der Fußabdruck der bergbaulichen Gewinnung. Die Metallkonzentration in den recycelten Materialien ist um ein Vielfaches höher als im Bergbau, so enthält zum Beispiel eine Tonne Golderz im Durchschnitt weniger als fünf Gramm Gold, eine Tonne Computer-Leiterplatten hingegen rund 100 Gramm Gold. Überdies muss das Erz oft aus großen Tiefen abgebaut und Erze oder Metalle müssen über große Distanzen transportiert werden. Des Weiteren kann, wie beschrieben, eine Vielzahl an Metallen gemeinsam im Recyclingprozess gewonnen werden. Eine Ökobilanz aus dem Jahr 2008 ergab, dass über das Recyclingverfahren jährlich etwa eine Million Tonnen CO₂-Äquivalent im Vergleich

zur bergbaulichen Gewinnung eingespart werden kann. Darüber hinaus sind auch der Wasserverbrauch und der Flächenverbrauch sowie der damit verbundene Effekt auf die Biodiversität um ein Vielfaches geringer.

Die eingehenden Materialien haben einen positiven Wert (die Lieferanten erhalten eine Vergütung), die daraus gewonnenen Metalle werden in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Die Nachfrage und Preise der (Edel-)Metalle insbesondere für Zukunftstechnologien sind in den vergangenen Jahren teils stark gestiegen, wodurch sich auch die Wirtschaftlichkeit des Metallrecyclings weiter verbessert hat.

Förderung

Einzelne Prozessschritte wurden im Laufe der Zeit über europäische und nationale Forschungsprojekte optimiert.

» Umicore ist aus einem im 19. Jahrhundert gegründeten Bergbaukonzern hervorgegangen. Ab den 1990er-Jahren erfolgte der Umbau zu einem Unternehmen mit dem Fokus auf Recycling und Materialtechnologien. Statt aus eigenen Bergbauaktivitäten kann heute durch das Metallrecycling ein signifikanter Anteil des Metallbedarfs für die Umicore-Produkte gedeckt werden. Das bestehende metallurgische Know-how und eine tiefe Kenntnis der Metallmärkte sind eines der Fundamente des Unternehmenserfolgs. «



Gewinnung von 17 Feinmetallen, gezeigt hier der Goldabstich

3.4 Gruppe 4: Kunststoffe

3.4.1 Hochwertiges Recycling von EPP-Verpackungsabfällen für die Herstellung von Automobilteilen

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

General-Industries Deutschland GmbH (Kassel), zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb,
www.general-industries.de

Einordnung

Expandiertes Polypropylen (EPP) ist ein leichter, sehr fester Werkstoff und wird häufig als Verpackungsmaterial für den Transport von Autoteilen eingesetzt. Einweg-Umverpackungen (z. B. für importierte Batteriezellen) sorgen derzeit für ein hohes Volumen an EPP-Abfällen in

der Automobilindustrie. Hinzu kommen Mehrwegbehälter aus EPP, die am Ende ihres Nutzungszyklus ebenfalls als Abfall anfallen. Die hohen Transportkosten für das leichte und voluminöse EPP-Material stellen eine Herausforderung für ein stoffliches Recycling dar. An dieser Problemlage setzt General-Industries Deutschland an. Die Firma hat ein Verfahren entwickelt, um EPP-Abfälle kosteneffizient zur Recyclinganlage zu transportieren und daraus sekundäres EPP von hoher Qualität zu erzeugen. Dieses kann für die Herstellung neuer Automobilteile eingesetzt werden.

EPP-Abfälle werden in der Anlage von General-Industries Deutschland zu hochwertigem Granulat recycelt.



Beschreibung des Verfahrens

Im ersten Schritt werden die EPP-Abfälle an dem Ort, an dem sie anfallen, verdichtet. Dafür wird ein mobiler Kompaktor eingesetzt. Um die technischen Werte des Kunststoffs zu erhalten, wird bei der Kompaktierung eine bestimmte Temperaturspanne eingehalten. Anschließend werden die kompaktierten Blöcke zur Recyclinganlage transportiert. Dort werden die EPP-Abfälle zunächst nach verschiedenen Qualitätsklassen sortiert. Im nächsten Schritt werden sie mithilfe eines Extruders und eines Filters granuliert. Um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, wurde die Extrusionsanlage so optimiert, dass trotz des geringen Gewichts des EPP ein relativ hoher Output erzielt werden kann. Ein spezieller Schmelzfilter entfernt Fremdstoffe (z. B. Etiketten). Anschließend erfolgt eine Homogenisierung des Materials, um eine einheitliche Charge des sekundären Rohstoffs herzustellen. Am Ende des Recyclingprozesses wird das erzeugte Sekundärmaterial im Labor auf Schlüsselkriterien (z. B. Schmelzflussindex, Kerbschlag) überprüft.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Mit dem Verfahren ist es General-Industries Deutschland (GID) gelungen, den Transportweg zur Recyclinganlage kosteneffizient und CO₂-optimiert zu gestalten. Durch die Verdichtung können 22 Tonnen pro Lkw transportiert werden – anstelle von lediglich 1,2 Tonnen unverdichtetem EPP pro Lkw-Ladung. Dadurch können die Transportkosten erheblich reduziert werden. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für das Recycling von EPP-Abfällen, welches andernfalls nicht wirtschaftlich wäre. Gleichzeitig fallen auf diese Weise weniger Treibhausgase beim Transport der EPP-Abfälle an.

Durch das Verfahren werden EPP-Abfälle in einen geschlossenen Kreislauf gebracht und zu einem hochwertigen Werkstoff recycelt. Ein Produkt daraus ist in enger Zusammenarbeit mit dem Materialhersteller JSP International SARL entstanden. GID liefert das Rezyklat, welches JSP zu 25 Prozent für die Herstellung von neuwertigem EPP-Material für die Automobilindustrie einsetzt. Die Verwendung des Sekundärmaterials reduziert den Bedarf nach neuen Kunststoffen und schont dadurch die natürlichen Ressourcen. Gleichzeitig können

im Vergleich zur Produktion von Neuware zwölf Prozent an Treibhausgasen eingespart werden.⁴⁵ Das EPP mit 25 Prozent Rezyklatanteil erreicht die gleichen technischen Werte wie Neuware und kann sogar für die Herstellung sicherheitsrelevanter Fahrzeugbauteile genutzt werden. Dazu muss das gewonnene Sekundärmaterial den Spezifikationen der Fahrzeughersteller entsprechen. Dies erreicht GID durch die differenzierte Sortierung der EPP-Abfälle nach Qualitätskriterien und die Qualitätskontrolle des Rezyklats durch Labortests.

Für das Verfahren hat GID etwa 1,2 Millionen Euro in die Recyclinganlage investiert sowie 20 mobile Verdichter angeschafft (ca. 80.000 Euro pro Stück). Die Amortisationszeit beläuft sich auf maximal zehn Jahre, könnte jedoch nach aktuellen Schätzungen deutlich kürzer ausfallen aufgrund der im Europäischen Green Deal angekündigten Maßnahmen wie der Einführung von Rezyklatquoten.

Förderung

Das Verfahren wurde vom Land Hessen im Rahmen des Programms PIUS-Invest gefördert.⁴⁶

www.technologieland-hessen.de/Pius-Foerderung

» Es ist wichtig, nicht den Mut zu verlieren und nicht aufzugeben, wenn Widerstände von Herstellern oder möglichen Partnern kommen. Es lohnt sich, Zeit und Energie zu investieren, um sich mit dem Thema Kreislaufwirtschaft auseinanderzusetzen – so konnte auch die Recyclingfirma GID, die schon viel Expertise im Bereich Kreislaufwirtschaft hatte, noch deutlich ihre Verfahren optimieren. «

3.4.2 Tracergestützte, flexible Sortiertechnologie für Kunststoffabfälle

Verfahrensentwickler und Praxisanwender

Polysecure GmbH (Freiburg), www.polysecure.eu

Einordnung

Um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft aufzubauen und hochwertige Sekundärmaterialien zu gewinnen, ist es für viele Abfallströme notwendig, die Qualität der Sortierung zu verbessern. Eine innovative Lösung bietet das Start-up Polysecure. Das Unternehmen hat ein Tracergestütztes Sortierverfahren entwickelt, mit dem insbesondere Kunststoffabfälle verlässlich nach definierbaren Fraktionen sortiert werden können. Dabei kommen fluoreszierende Tracer (gering konzentrierte Additive) zum Einsatz, die sehr hohe Detektionsquoten und dadurch reine Sortierfraktionen ermöglichen. Ferner können zum Beispiel Leichtverpackungen mit Tracer-Based-Sorting (TBS) in zahlreiche definierbare Kategorien sortiert werden. Dadurch wird es möglich, alle Verpackungen zu trennen, die für ein besseres Recycling getrennt werden sollten. Zudem können aufgrund der hohen Sortierreinheit Sekundärmaterialien von höherer Qualität gewonnen werden.

Beschreibung des Verfahrens

Zentraler Bestandteil des Verfahrens ist, dass Kunststoffverpackungen mit spezifischen Fluoreszenz-Traceern ausgestattet werden. Alle zu unterscheidenden Spezifikationen (z. B. PET-Food-Bottles, PET-Food-Trays, PET-Nonfood, PET-Food-Multilayer) können durch unterschiedliche Tracer verlässlich differenziert werden. Die Tracer sind außerhalb der Sortieranlagen komplett unsichtbar. Im Sortierverfahren regt ein Laserlicht die Fluoreszenz der Tracer an. Eine Kamera misst die Farbe der Fluoreszenz, wodurch eindeutig die Sortierfraktion der Verpackung erkannt wird. Anschließend wird der Abfallartikel in der entsprechenden Fraktion abgelegt. Die Tracer sind schnell messbar und wenig empfindlich gegenüber Verunreinigungen und Deformationen.

Werden die üblichen Sortierschritte weitestgehend durch den einen TBS-Sortierschritt ersetzt, so spricht man von „TBS complete“. Dabei werden im Unterschied zu herkömmlichen Sortierverfahren die Abfallartikel zunächst vereinzelt. Jede Verpackung wird einzeln detektiert und anschließend einer Fraktion zugeordnet. Dieser Prozess ist vergleichbar mit der Briefsortierung nach Postleitzahlen. Für Verpackungen ergibt sich eine verlässliche Sortierung in definierbare, sortenreine Fraktionen (z. B. 40 je Hauptpolymer).

Ferner entwickelt Polysecure derzeit mit ZEISS ein Verfahren, bei dem für jedes Abfallobjekt neben dem Tracer zugleich weitere Eigenschaften gemessen werden (via Nahinfrarot, künstliche Intelligenz, ggf. Wassermarke). Dadurch kann der Verpackungsstrom noch besser sortiert und das Polysecure-Verfahren unabhängig von der Festlegung einer Standard-Detektionstechnologie eingesetzt werden. Mit dem Verfahren können Betreiber von Sortieranlagen daher schon heute mit hoher Präzision, Flexibilität und Skalierbarkeit sortieren und dem CO₂-effizienten mechanischen Recycling wesentlich mehr und reinere Vorsortierungen zuführen.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Das TBS-Verfahren bietet eine höhere Qualität der Sortierung von Leichtverpackungen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik. Ein zentraler Vorteil des Verfahrens ist, dass Kunststoffabfälle kosteneffizient in deutlich mehr Fraktionen sortiert werden können, als es derzeit in gängigen kaskadischen Sortiersystemen möglich ist. Mit TBS kann beispielsweise zwischen Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittel-Verpackungen unterschieden werden oder eine markenspezifische Rücknahme von Verpackungen ermöglicht werden. Die Sortierkosten des Verfahrens betragen dabei 200 bis 300 Euro pro Tonne Durchsatz.

Durch die höhere Sortierqualität können höhere Quoten beim stofflichen Recycling erzielt werden. Nach eigenen Schätzungen der Firma Polysecure wäre mit dem TBS-Verfahren weltweit statt heute zehn Prozent durchaus eine Recyclingquote von 50 Prozent für Kunststoffabfall möglich. Beim Verpackungsrecycling ließe sich zusammen mit einem konsequenten Design for Recycling durchaus eine verwertungsbezogene Recyclingquote von 70 Prozent erreichen. Hierdurch ließen sich viel mehr Frischkunststoffe substituieren, wodurch weniger Klimagase emittiert würden. Deutschlandweit ließen sich durch die Anwendung des TBS-Verfahrens auf Verpackungen jährlich schätzungsweise bis zu zwei Millionen Tonnen CO₂ einsparen.

Das Verfahren ist einfach skalierbar. Zudem ermöglicht es, flexibel weitere Fraktionen in ein Sortiersystem aufzunehmen. So besteht auch die Option, etablierte Sortiersysteme mit einem TBS-Schritt zu ergänzen, um die Reinheit der sortierten Fraktionen zu erhöhen. Beispielsweise können Multilayer-Verpackungen, die in der herkömmlichen Sortierung häufig falsch zugeordnet werden,



Die Tracer-Based-Sorting-Technologie kann es ermöglichen, Verpackungsmüll in zahlreiche unterschiedliche Kategorien zu sortieren und dadurch höhere Recyclingquoten zu erreichen.

durch Tracer markiert und so in Sortieranlagen effektiv abgetrennt werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass Monomaterialströme nicht verunreinigt werden und in reiner Qualität recycelt werden können. Das Verfahren ließe sich auf weitere Stoffströme anwenden, wie zum Beispiel Textilien oder weiße Ware.

Förderung

Für die Entwicklung des Verfahrens erhielt Polysecure Förderung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

» Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft aufzubauen bedeutet, dass viele Beteiligte sich abstimmen müssen. Dabei ist es wichtig, dass Abstimmungen auf der Ebene der Geschäftsführenden stattfinden. «

» Für das junge Unternehmen Polysecure war es sehr wichtig, einen Beirat zu organisieren, der Türen öffnet. «

3.5 Gruppe 5: Start-ups und Dienstleistungen

3.5.1 Wiederaufbereitung von IT-Geräten

Geschäftsmodell

GSD Remarketing GmbH & Co. KG//GreenPanda (Sulzemoos),
www.gsd.eu, www.greenpanda.de

Einordnung

Die GSD Remarketing GmbH ist auf die Aufbereitung und den Verkauf gebrauchter IT-Geräte spezialisiert. GSD verlängert die Lebensdauer von Produkten wie Notebooks, Tablets, Monitoren, PCs und Smartphones und verhindert damit, dass Geräte und einzelne Komponenten, die noch funktionstüchtig sind, vorzeitig entsorgt werden. Die aufbereiteten IT-Geräte kommen in den Wiederverkauf und sind damit eine ökonomisch und ökologisch attraktive Alternative zur Neuanschaffung.

Beschreibung des Verfahrens

GSD kauft gebrauchte IT-Geräte von Leasinggesellschaften sowie großen und mittelständischen Unternehmen. Auf Wunsch werden die Geräte bei den Kunden und Kundinnen abgebaut und abgeholt. Bei GSD werden die Geräte dann einem Audit unterzogen und es wird entschieden, welche Komponenten entsorgt werden und welche Geräte wiederaufbereitet werden. Die gebrauchte Hardware wird technisch überprüft, gereinigt und wiederaufbereitet. Daten werden vollständig gelöscht. Die aufbereiteten IT-Geräte bekommen das von GSD erstellte RETEQ-Siegel. Auf den RETEQ-Geräten befinden sich ausschließlich lizenzierte Original-Microsoft-Betriebssysteme. Zusätzlich sind alle wichtigen Hardware-Treiber für sofortige Inbetriebnahme vorinstalliert.

GSD vertreibt die Geräte hauptsächlich über den IT-Reseller-Kanal an den registrierten IT-Fachhandel und gewerbliche Endkundinnen und -kunden. Privat kann über den Online-Shop „GreenPanda“ gekauft werden. Zudem kann die gewünschte Hardware auf die Bedürfnisse der Kundinnen und Kunden zugeschnitten werden (z. B. mehr Arbeitsspeicher oder eine größere Festplatte) und bekommt eine einjährige Garantie. Seit 2016 ist GSD von der Dekra im Bereich Umweltmanagement nach ISO 14001 und ISO 9001 im Bereich Qualitätsmanagement zertifiziert.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Allein in Deutschland existierten laut einer Schätzung von Statista im Jahre 2020 37,5 Millionen PC-Arbeitsplätze.⁴⁷ Große Unternehmen wechseln ihr IT-Equipment alle vier bis fünf Jahre, meist sind die gebrauchten Geräte gut gepflegt und in einem einwandfreien Zustand. Der Markt für die Wiederaufbereitung ist entsprechend groß und die Nachfrage nach nachhaltigeren, wiederaufbereiteten IT-Produkten ist in den letzten Jahren gestiegen. In der firmeneigenen Produktion von GSD werden pro Jahr hunderttausende ITK-Produkte generalüberholt und einer neuen Nutzerin oder einem neuen Nutzer bereitgestellt.

Auch für die Kundinnen und Kunden bieten sich ökonomische Vorteile, da wiederaufbereitete IT-Geräte im Schnitt deutlich günstiger sind. Mit dem Verkauf ausgemusterter Hardware setzen Unternehmen gebundenes Kapital für nicht mehr benötigte Ressourcen frei. Privatkundinnen und -kunden profitieren im Gegenzug von jener aufbereiteten und robusteren Business-Hardware.

Außer über die ökonomischen Potenziale verfügen wiederaufbereitete IT-Geräte über eine wesentlich bessere ökologische Bilanz: Ein 14-Zoll-Standardlaptop hat einen Fußabdruck von etwa 300 Kilogramm CO₂, was den Treibhausgasemissionen einer Autofahrt von fast 1.200 Kilometern entspricht. Fast 80 Prozent dieser Emissionen werden während der Herstellungsphase erzeugt, allein ein von vier auf sechs Jahre verlängerter Produktlebenszyklus reduziert die Emissionen schon um 30 Prozent.⁴⁸ Die Reduktion des Neukaufs von IT-Geräten reduziert darüber hinaus den Rohstoffabbau einer Vielzahl teils kritischer Rohstoffe, wie beispielsweise Kupfer, Bauxit, Gold und Zinn. Darüber hinaus hat die Herstellung von IT-Geräten einen beträchtlichen Wasserfußabdruck und nicht zuletzt geht die Entsorgung – Stichwort Elektroschrott-Verschiffung nach Afrika – oft mit erheblichen negativen Umwelteffekten einher.



Die gebrauchte Hardware wird technisch überprüft, gereinigt und wiederaufbereitet.



Bei Drohnen wechseln die Nutzerinnen und Nutzer besonders häufig, da sie meistens nur für einen kurzen Zeitraum gebraucht und entsprechend gemietet werden: im Durchschnitt sieben Mal.

3.5.2 Vermietung von Technikgeräten

Geschäftsmodell

Grover Tech, Inc. (Berlin), www.grover.com

Einordnung

Grover ist Europas größte Miet-Commerce-Plattform für Elektronikgeräte. Das Start-up aus Berlin vermietet Technikgeräte an Privat- und Geschäftskunden. Das Sortiment umfasst 4.000 unterschiedliche Geräte vom Smartphone und Laptop über Spielekonsolen und VR-Brillen hin zu E-Rollern und Haushaltsgeräten.

Beschreibung des Geschäftsmodells

Kundinnen und Kunden entscheiden sich für ein Produkt (z. B. Computer oder Handy) und dafür, wie lange sie es nutzen wollen. Sie zahlen eine monatliche Gebühr, die sich nach dem Produkt und der Mindestmietdauer richtet (wahlweise einen, drei, sechs oder zwölf Monate und länger). Je länger die gewählte Mindestmietdauer, desto günstiger wird die Monatsmiete. Inkludiert ist hier die Versicherung „Grover Care“: Im Schadensfall übernimmt Grover 90 Prozent der Reparaturkosten. Nachdem die Mindestmietdauer abgelaufen ist, können die Kundinnen und Kunden das Produkt zurückschicken, weiter mieten oder kaufen. Für den Kauf gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder werden die Geräte so lange gemietet, bis sie gegen Zahlung eines symbolischen Euro gekauft werden können, oder die verbleibenden Mietzahlungen werden in einer Zahlung beglichen.

Werden die Geräte zurückgeschickt, überprüft Grover die Geräte, reinigt sie und löscht sämtliche Daten. Bei Bedarf werden Reparaturen durchgeführt. Das Produkt geht danach zurück in den Bestand und wird dann weitervermietet. Wenn Produkte nicht reparierbar oder in schlechtem Zustand sind, dann werden sie, oder zumindest nutzbare Einzelteile, weiterverkauft.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Die ökologischen Vorteile des Geschäftsmodells ergeben sich aus der Verlängerung der Lebensdauer der Produkte und der höheren Anzahl an Nutzerinnen und Nutzern pro Produkt. Dadurch können Neukäufe und die Entstehung von Elektroschrott reduziert werden. Die Produkte werden zum Großteil zwischen vier- und sechsmal weitergegeben, also deutlich häufiger als Produkte, die gekauft werden (ein- bis zweimal). Wie viele Personen ein Produkt nutzen, unterscheidet sich je nach Gerät. So haben Kameras und Drohnen eine höhere Anzahl von Mieterinnen und Mietern als der Durchschnitt – und werden meistens auch kürzer gemietet. Produkte, die sich für Kundinnen und Kunden nicht dauerhaft bewähren oder nur kurzfristig benötigt werden, landen so nicht in Kellern oder Schubladen und langfristig im Müll, sondern werden wieder zurückgegeben und weitervermietet.

Bisher hat Grover ungefähr 600.000 Produkte zirkuliert, einschließlich Drohnen, E-Scootern und Haushaltsgeräten. Das Geschäftsmodell „mieten statt kaufen“ kann sehr gut skaliert werden. Im Zuge der Überarbeitung der europäischen Ökodesign-Richtlinie und des dazugehörigen Rechts auf Reparatur wird sich das Arbeitsumfeld für Grover weiter verbessern. Der Zugang zu Ersatzteilen und Bauplänen wird die Reparatur von zurückgenommenen Geräten vereinfachen.

» Die Attraktivität des Produkts muss im Vordergrund stehen, wenn man damit Erfolg haben möchte. «

3.5.3 Recyclbare Pizza-Mehrwegbox mit digitalem Ausleihprozess

Verfahrensentwickler und Praxisanwender
 rezeat GmbH (Kassel), www.rezeat.de

Einordnung

Das Start-up rezeat hat ein appbasiertes, pfandfreies Poolsystem für Pizza-Mehrwegboxen entwickelt. Damit möchte das Unternehmen eine nachhaltige Alternative zu Einwegverpackungen für den Außer-Haus-Verzehr sowie für Lieferdienste anbieten. In Deutschland landen jährlich etwa 50.000 Tonnen an Pizzakartons im Müll.⁴⁹ Die meisten sind nicht recyclingfähig und gehören nicht ins Altpapier, da sie mit Speiseresten und Fetten verunreinigt sind. Gewöhnliche Pizzakartons haben daher in der Regel einen einzigen Umlauf. Mit seiner komplett kreislauffähigen Pizza-Mehrwegbox trägt das Start-up dazu bei, Müll zu vermeiden, die Mehrwegquote zu erhöhen und Einweg nach und nach aus dem System zu verbannen.

Beschreibung des Geschäftsmodells

Im ersten Schritt gehen Gastronomiebetriebe eine Partnerschaft mit rezeat ein. Dafür registrieren sie sich in der Systempartner-App und bekommen ein bestimmtes Kontingent an Mehrwegboxen zur Verfügung gestellt. Bei Bedarf vermittelt rezeat eine spezielle Industriespülmaschine, um die Boxen effizient zu reinigen. Neben einer Systempartnergebühr von 29 Euro pro Monat zahlen die Gastronomiebetriebe eine Nutzungsgebühr für jede Ausleihe der Mehrwegboxen, welche mit 29 Cent in etwa dem gleichen Preis entspricht wie ein herkömmlicher Einweg-Pizzakarton aus Pappe.

Kundinnen und Kunden, welche die Mehrwegbox nutzen möchten, registrieren sich ebenfalls in einer App. Für sie ist die Ausleihe von rezeat-Mehrwegboxen kostenlos, solange sie die Boxen innerhalb von 14 Tagen bei einem beliebigen Partnerrestaurant zurückgeben. Falls dies nicht geschieht, wird über die App eine Gebühr für die Mehrwegbox berechnet.

Jede Box und jedes Kundenkonto trägt einen individualisierten QR-Code; beide Codes werden bei der Ausleihe gescannt. Dadurch ist die Box vorübergehend im Bestand der Kundin bzw. des Kunden eingetragen. Bestellen Kundinnen und Kunden online oder telefonisch, können sie alternativ auch einen persönlichen Liefercode eintragen oder durchgeben.

Wenn die Systempartner die Boxen zurückbekommen, reinigen sie diese und stellen sie zur Wiederbefüllung bereit. Die App dient auch dem Tracking der Boxen und ermöglicht ein effizientes Bestandsmanagement – sobald die Bestände bei einem Gastronomiepartner knapp werden, liefert rezeat Boxen nach.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Ab Januar 2023 sind Lieferdienste und Restaurants gesetzlich dazu verpflichtet, eine Mehrwegalternative zu Einwegbehältern für Essen zum Mitnehmen und Bestellen anzubieten. rezeat bietet als eines der ersten Unternehmen schon heute eine nachhaltige und nutzerfreundliche Mehrwegoption speziell für Pizzen. In Kürze wird das Start-up außerdem Mehrwegscheiden für Salate und heiße Gerichte anbieten.

Die Pizza-Mehrwegboxen bestehen aus expandiertem Polypropylen (EPP) und einer kratzfesten Einlegeplatte aus Polypropylen (PP). Sie sind wärmeisolierend, langlebig und widerstandsfähig und überstehen etwa 70 bis 100 Umläufe. Am Ende ihrer Lebensdauer werden die Boxen an rezeat zurückgesendet und von dem Partnerunternehmen General-Industries Deutschland recycelt. Eine Besonderheit der Boxen ist, dass sie 100-prozentig recycelbar sind. Das im Recycling gewonnene Granulat wird wiederverwendet und somit ein geschlossener Materialkreislauf erreicht.



Die Pizza-Mehrwegbox ist wärmeisolierend, hat einen kratzfesten Boden und kann 70- bis 100-mal wiederverwendet werden.

Im Vergleich zu Einwegkartons können durch die Nutzung der Mehrwegboxen Rohstoffe sowie CO₂-Emissionen eingespart werden. Die App zeigt für jeden Nutzer und jede Nutzerin eine Übersicht an, wie viele Einweg-Pizzakartons durch die Wahl der Mehrwegoption bereits eingespart und wie viele Kilogramm an Verpackungsmüll dadurch vermieden wurden. Damit kann das Bewusstsein dafür gestärkt werden, wie viel Müll verursacht wird – und dadurch ein Anreiz gesetzt werden für die Nutzung von Mehrwegoptionen.

Ferner ist es dem Start-up wichtig, die Nutzerinnen und Nutzer zu motivieren, die Boxen zeitnah zurückzugeben – statt sie mehrere Wochen ungenutzt zu Hause zu lagern. Das ist ökologisch sinnvoll, da dadurch insgesamt weniger Boxen bereitgestellt und im Kreislauf gehalten werden müssen.

In einer Pilotphase wurde das Verleihsystem mit Pizzerien in Kassel erprobt. Seit dem Jahr 2022 bietet rezzeat deutschlandweit Mehrwegboxen an.

» Es kann ein Vorteil sein, kreativ zu sein und den Mut zu haben, Neues zu wagen und Dinge auszuprobieren – auch wenn diese (noch) nicht von der Mehrheit als gut angesehen werden. Mit neuen, eigenen Ideen kann man auf dem Markt aus der Masse herausstechen und eine Vorreiterrolle einnehmen. Hilfreich kann es dabei sein, sich zu fragen, was man besser machen kann als andere Firmen, die schon in diesem Bereich aktiv sind, und so eine Nische zu finden. «

3.5.4 Einsatz von Altbrot für die Bierherstellung

Praxisanwender

Knärzje GmbH (Frankfurt am Main), www.knaerzje.de

Einordnung

Das Start-up Knärzje hat ein zertifiziertes Biobier auf den Markt gebracht, bei dessen Produktion ein Teil des Malzes durch Altbrot ersetzt wird. Auf diese Weise kann Altbrot bzw. Überschussware aus Bäckereien vor der Biogasanlage gerettet und höherwertig verwertet werden – aus den Brotresten wird ein Rohstoff für die Bierherstellung gewonnen. In enger Kooperation mit einer Biobäckerei und einer Biobrauerei setzt das Unternehmen Knärzje so die Zero-Waste-Philosophie bei der Bierherstellung um und engagiert sich gegen Lebensmittelverschwendung.

Beschreibung des Verfahrens

Der Kooperationspartner, die Biobäckerei Biokaiser, sammelt Überschüsse und Ausschussware für das Knärzje-Bier in seiner Hauptproduktionsstätte, die in räumlicher Nähe zur Brauerei liegt. In Vorbereitung für den Brauvorgang werden die Brotreste in der Bäckerei getrocknet und gehäckselt. Drei Brotsorten kommen hauptsächlich zum Einsatz, die in der Testphase gute Brauergebnisse eingebracht haben: Roggensauerteig-, Dinkel- und Weizenvollkornbrote. Diese Sorten sind standardmäßig im Sortiment von Biobäckereien zu finden und durch ihren Einsatz kann eine gewisse Geschmackskonsistenz zwischen den Chargen garantiert werden. Am Brautag werden die vorbereiteten Brotreste abgeholt und für den Brauvorgang eingesetzt. Sie ersetzen ein Viertel des normalerweise nötigen Braumalzes. Das Bier wird von der Biobrauerei Bergmann gebraut. Dank Solarpanelen auf dem Dach des Brauereigebäudes kann das Bier klimaneutral produziert werden. Der Produktionsprozess ist identisch mit dem von herkömmlichem Bier. Nach vier Wochen ist das Bier vergoren und wird abgefüllt. Derzeit werden im vierwöchentlichen Rhythmus 100 Hektoliter Knärzje-Bier hergestellt, was 30.000 Flaschen entspricht. Die Firma Knärzje kümmert sich um das Marketing und den Vertrieb.

Ökonomische und ökologische Vorteile

Für die Herstellung des Biers werden aussortierte, einwandfrei genießbare Brotreste in die Lebensmittelproduktion zurückgeführt. Im Vergleich zur herkömmlichen Bierherstellung können so 25 Prozent des Malzes als Frischzutat eingespart werden. Nach eigenen Angaben des Unternehmens kommt dabei rechnerisch eine Scheibe aussortiertes Brot pro Flasche Knärzje-Bier zum Einsatz. Dieses Vorgehen schont die natürlichen Ressourcen und stärkt gleichzeitig die regionale Wertschöpfung. Überdies bietet es den kooperierenden Bäckereien eine Möglichkeit, ökonomischer mit ihren Resten umzugehen und sich eine zusätzliche Einnahmequelle zu verschaffen.

Die Verwendung von Brotresten für die Bierherstellung ist ein gut skalierbares Geschäftsmodell. Backwaren gehören zu den in Deutschland am häufigsten weggeworfenen Nahrungsmitteln und Überschüsse sind in großen Mengen verfügbar. Aufwand und Dauer des Brauprozesses sind identisch mit herkömmlichen Brauverfahren. Brotreste zu verarbeiten ist allerdings mit höherem Aufwand verbunden und dadurch derzeit teurer als die herkömmliche Produktionsweise. Hier stehen für die Firma Knärzje nicht hohe Gewinne, sondern die Lebensmittelwertschätzung und der Aufbau eines zukunftsfähigen Geschäftsmodells im Vordergrund.

Das Bier hat sich als wettbewerbsfähig erwiesen und kann zu vergleichbaren Preisen wie anderes Biobier oder Craftbier angeboten werden. Derzeit ist es deutschlandweit in Alnatura-Supermärkten erhältlich sowie regional in Filialen von Edeka, Rewe und Tegut.

Überschüssige Brotreste kommen beim Brauen des Knärzje-Biers zum Einsatz.



Finanzierung und Beratung

Das Start-up nahm am Mentorenprogramm der Initiative „Farm-Food-Climate“⁵⁰ teil. Die Finanzierung wurde durch Crowdfunding gesichert.

» Unternehmen, die sich gegen Lebensmittelverschwendung einsetzen, stehen vor der Herausforderung, dass Lebensmittelabfälle bzw. -reste stark negativ konnotiert sind. Hier ist es wichtig, ein neues Narrativ zu schaffen und Verbraucherinnen und Verbraucher zu vermitteln, dass ein großer Teil der Lebensmittelreste einwandfrei genießbar ist. Es lohnt sich, an einer rhetorischen Neuauflage zu arbeiten, die Nachhaltigkeit und verantwortungsvollen Konsum mit Genuss in Verbindung bringt. «

Technologieland Hessen

Informieren, beraten, vernetzen: Das Technologieland Hessen unterstützt Unternehmen dabei, zukunftsweisende Innovationen zu entwickeln. Wir entfalten wirtschaftliche Potenziale, machen technologische Spitzenleistungen sichtbar und profilieren damit Hessen als Technologie- und Innovationsstandort. Umgesetzt wird das Technologieland Hessen von der Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag des Hessischen Wirtschaftsministeriums.

Unsere Angebote umfassen:

- Vernetzung von Akteuren, Kooperationsvermittlung
- Fach- und Informationsveranstaltungen
- Themenspezifische Publikationen
- Newsletter und Magazin „Technologieland Hessen“
- Beratung und Förderung
- Messebeteiligungen und Außenwirtschaftsförderung

Um mit den aktuellen technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen Schritt zu halten, ist es wichtig, sowohl einzelne Technologien im Auge zu behalten als auch Synergien zu erkennen. In fachspezifischen Innovationsfeldern bildet das Technologieland Hessen deshalb unterschiedliche Schwerpunkte ab.

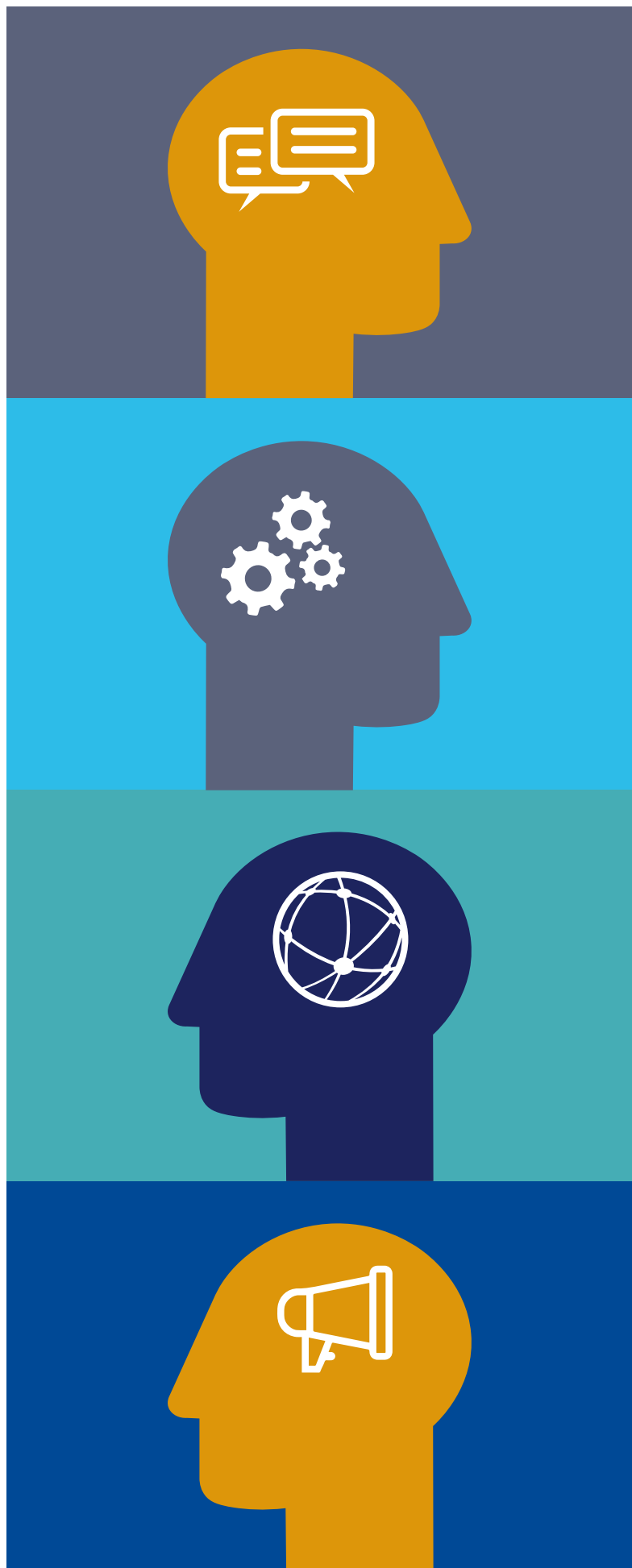
Innovationsfeld Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien

Im Innovationsfeld Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien informieren, beraten und vernetzen wir zu folgenden Themen:

Unsere Angebote umfassen:

- Ressourceneffizienz und Produktionsintegrierten Umweltschutz (PIUS)
- Umwelttechnologien
- Kreislaufwirtschaft und umweltgerechtes Design

Ressourceneffiziente Verfahren und Umwelttechnologien sind nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern zunehmend ein Wettbewerbsfaktor. Sie helfen dabei, Rohstoffe einzusparen sowie weniger CO₂-Emissionen und Abfälle zu erzeugen. Das spart Kosten und schont die Umwelt. Wir unterstützen den Wandel hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft und sind Ansprechpartner für Anbieter und Anwender entsprechender Technologien. Nutzen Sie unsere Angebote und bringen Sie sich mit Ihren eigenen Ideen ein. Wir freuen uns auf den Dialog mit Ihnen!



Ihre Ansprechpartner und Ansprechpartnerinnen

im Technologieland Hessen,
Innovationsfeld Ressourceneffizienz
& Umwelttechnologien:



Dr. Felix Kaup
Projektleiter

Tel.: +49 611 95017-8636
felix.kaup@htai.de



Dagmar Dittrich
Projektmanagerin

Tel.: +49 611 95017-8645
dagmar.dittrich@htai.de



Olga Grasmück
Projektmanagerin

Tel.: +49 611 95017-8386
olga.grasmueck@htai.de

Hessen Trade & Invest GmbH
Konradinallee 9 | 65189 Wiesbaden
www.htai.de | www.technologieland-hessen.de

Impressum

Auftraggeber

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Wohnen
Kaiser-Friedrich-Ring 75, 65185 Wiesbaden
www.wirtschaft.hessen.de

Herausgeberin

Hessen Trade & Invest GmbH
Technogieland Hessen
Konradinerallee 9, 65189 Wiesbaden
Tel.: +49 611 95017-85
E-Mail:
info@htai.de
info@technogieland-hessen.de
www.htai.de
www.technogieland-hessen.de

Redaktion

Dr. Felix Kaup, Hessen Trade & Invest GmbH
Olga Grasmück, Hessen Trade & Invest GmbH
Sebastian Hummel, Hessisches Ministerium für
Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

Design & Realisierung

NONMODO Designagentur UG (hb) & Co.KG
www.nonmodo.de

Text

Ecologic Institute gemeinnützige GmbH
www.ecologic.eu

Stand der Informationen und Zahlen:
August 2022

Druck

Druckerei Print Pool GmbH, Taunusstein / Neuhoof
Auflage: 500



Quellen

- 1 Prognos AG et al. 2020. Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020, S. 5.
- 2 Ebd., S. 113.
- 3 Ebd., S. 113.
- 4 Statistisches Bundesamt 2022. Lieferengpässe bremsen Industrie und treiben Preise. Link: www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/lieferketten.html;jsessionid=2E6CE3FF321B775C06B8AC595B8E79A3.live712 (abgerufen am 15.03.2022).
- 5 Europäische Kommission 2022. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions. On making sustainable products the norm, COM(2022) 140 final, Brüssel. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Studie (April 2022) lag die deutsche Übersetzung der Mitteilung der Kommission noch nicht vor.
- 6 2009/125/EC.
- 7 Siehe Vorschlag, Annex und einige ergänzende Dokumente unter Europäische Kommission 2022a. Proposal for Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Link: www.ec.europa.eu/environment/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en (abgerufen am 06.04.2022).
- 8 Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I, S. 212), das zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I, S. 3436) geändert worden ist; Recycling magazin 2020. Kreislaufwirtschaftsgesetz: Erste Kritik. Link: www.recyclingmagazin.de/2020/02/12/kreislaufwirtschaftsgesetz-erste-kritik (abgerufen am 10.02.2022).
- 9 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) 2015. Abfallwirtschaftsplan Hessen. Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle, Wiesbaden, S. 5.
- 10 ATZ Entwicklungszentrum und Technische Universität München, Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie 2011. Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. Abschlussbericht für das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- 11 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2018. Ressourcenstrategie Hessen. Wiesbaden.

- 12 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ohne Datum). Lebensgrundlage Ressourcenschutzstrategie. Link: www.umwelt.hessen.de/Nachhaltigkeit-und-Ressourcenschutz/Ressourcenschutzstrategie (abgerufen am 10.02.2022).
- 13 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2021. Abfallwirtschaftsplan Hessen. Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle, Wiesbaden, S. 4.
- 14 Ebd., S. 8.
- 15 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2020a. Potentialstudie. Abfallvermeidung in Hessen. Potentiale und mögliche Maßnahmen. Durchgeführt durch Ökopol und Isiconsult, Hamburg/Berlin 2020, S. 53.
- 16 Das hessische Ausführungsgesetz zum Kreislaufwirtschaftsgesetz (HAKrWG) vom 06. März 2013 (GVBl., S. 80), zuletzt geändert am 03. Mai 2018 (GVBl., S. 82), enthält in § 7 eine mit dem § 45 KrWG des Bundes vergleichbare Regelung.
- 17 Anmerkung: Die Abfallmengenbilanz 2020 weist das Gesamtabfallaufkommen methodisch abweichend von den Jahren davor aus, daher wurde hier als letztes Bezugsjahr 2019 in die Darstellung aufgenommen. Die qualitative Einordnung der Abfallmengenbilanz 2020 wurde jedoch berücksichtigt.
- 18 Statista2022.BruttoinlandsproduktvonHessenbis2020. Link: www.de.statista.com/statistik/daten/studie/5016/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-von-hessen-seit-1970 (abgerufen am 10.02.2022).
- 19 Statista 2022a. Einwohnerzahl in Hessen von 1960 bis 2020. Link: www.de.statista.com/statistik/daten/studie/155150/umfrage/entwicklung-der-bevoelkerung-von-hessen-seit-1961 (abgerufen am 10.02.2022).
- 20 Anmerkung: Das tatsächliche Gesamtaufkommen liegt höher als die hier ausgegebene Abfallmenge, u. a. da Elektronik- und Elektroaltgeräte, die unmittelbar vom Handel zurückgenommen und einer Verwertung zugeführt werden, nicht in der Abfallmengenbilanz enthalten sind und auch nur Gewerbeabfälle und Bauabfälle dokumentiert sind, die den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern überlassen werden. Siehe Abfallmengenbilanz 2019, S. 6.
- 21 Abfallmengenbilanzen der Jahre 2010 – 2019 des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden.
- 22 Ebd.
- 23 Statistik Hessen 2020. Haushaltsabfälle nahmen 2019 zu – Umfassender Überblick in der Abfallmengenbilanz 2019. Link: www.statistik.hessen.de/press/pressarchiv/pm-162-2020-abfall-mengenbilanz-haushaltsabfaellenahmen-2019-zu (abgerufen am 10.02.2022).
- 24 Statistisches Bundesamt 2022a. Abfallwirtschaft. Link: www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html (abgerufen am 10.02.2022).
- 25 Statistik. Hessen 2020a. Hessische Wirtschaft wächst 2019 um 1,1 Prozent – Revidierte Ergebnisse 1991 bis 2018. Link: www.statistik.hessen.de/press/pressarchiv/pm_2320.html; Statistik Hessen 2019. Hessische Wirtschaft wächst 2018 um 2,2 Prozent. Link: www.statistik.hessen.de/press/pressarchiv/pm_2080.html (abgerufen am 29.03.2022).
- 26 Hessisches Statistisches Landesamt 2021. Abfallentsorgung in Hessen 2019. Wiesbaden, S. 13.
- 27 Berechnungsformel: $(\text{Erzeugte Abfallmenge Hessen} / \text{Erzeugte Abfallmenge Deutschland} \times 8,6 \%) \times 100 = z \%$.
- 28 Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2021. Abfallwirtschaftsplan Hessen. Siedlungsabfälle und Industrielle Abfälle, Wiesbaden, S. 54 ff.
- 29 PIUS steht für „Produktionsintegrierter Umweltschutz“ und zielt auf einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und Energie in einem Produktionsbetrieb sowie die Vermeidung von Abfall, Abwasser und Emissionen ab. Siehe: www.pius-info.de/pius-portal/definition-pius. (abgerufen am 15.03.2022). Das Portal wird von Partnern aus den Bundesländern NRW (Effizienz-Agentur NRW), Hessen (Hessen Trade & Invest GmbH), Rheinland-Pfalz (Sonderabfall-Management-Gesellschaft), Baden-Württemberg (Umwelttechnik BW) und Thüringen (Energie- und Greentech Agentur ThEGA) und dem Bund (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH) betrieben.
- 30 Siehe www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Modul4_Energiebezogene_Optimierung/modul4_energiebezogene_optimierung_node.html (abgerufen am 15.03.2022).
- 31 Das Kompetenzzentrum ist ein Projekt des Bundesumweltministeriums und bei der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH angesiedelt. Es zielt darauf ab, verfügbares technisches Wissen über den effizienteren Umgang mit Material und Energie zu bündeln und als branchenspezifisches Know-how aufbereitet KMU zur Verfügung zu stellen. Siehe: www.ressource-deutschland.de/service/ueber-uns (abgerufen am 15.03.2022).

- 32 AGN (ohne Datum). Rathaus Korbach. Link: www.agn.de/projekt/ansicht/rathaus-korbach (abgerufen am 15.03.2022).
- 33 Das Umweltbundesamt definiert Urban Mining als „die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen“. Link: www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#was-ist-urban-mining- (abgerufen am 15.03.2022).
- 34 Mostert, Clemens et al. 2021. Neubau aus Rückbau. Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat). BBSR-Online-Publikation 15/2021, Bonn.
- 35 www.urban-mining-design.de (abgerufen am 16.02.2022).
- 36 www.urban-mining-design.de (abgerufen am 16.02.2022).
- 37 www.kai-laumann.de/buerogebaeude-norsk (abgerufen am 18.01.2022).
- 38 www.kai-laumann.de/projekte (abgerufen am 18.01.2022).
- 39 www.kai-laumann.de/studentenwerk-frankfurt-riedberg (abgerufen am 18.01.2022).
- 40 Forschungsprojekt VERENA (Vergasungsprozesse mit integrierter Überschussstromeinbindung zur flexiblen Stromerzeugung und Herstellung synthetischer Energieträger aus Reststoffen). TU Darmstadt 2020. Chemikalien und Strom aus Müll gewinnen. Link: www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2020/2020quartal4/news_archiv_de_287552.de.jsp (abgerufen am 14.12.2021).
- 41 Duesenfeld (ohne Jahr). Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Link: www.duesenfeld.com/recycling.html (abgerufen am 22.12.2021).
- 42 Europäische Kommission 2020. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. Link: www.eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/uri=CELEX%3A52020DC0474&qid=1657175394451 (abgerufen am 14.12.2021).
- 43 Steger, Sören et al. 2021. Bei welchen Bauteilen ist die Gewinnung hochwertiger Metalle aus Altfahrzeugen wirtschaftlich? In: Müll und Abfall, 53 (2021), 4, S. 201-207.
- 44 Groke, Matthias et al. 2017. Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). UBA Texte 02/2017.
- 45 Henning, Matthias; Grunwald, Jens; Lüsebrink, Helge 2020: Aus Verpackungen werden Automobilteile. In: Kunststoffe, 01/2020, S. 64-67. Link: www.kunststoffe.de/a/fachartikel/aus-verpackungen-werden-automobilbauteil-152638 (abgerufen am 03.12.2021).
- 46 www.pius-invest.de (abgerufen am 06.04.2022).
- 47 Statista 2022b. Prognose zur Anzahl der installierten Arbeitsplatzcomputer in Deutschland von 2010 bis 2020. Link: www.de.statista.com/statistik/daten/studie/199774/umfrage/prognose-zur-anzahl-der-arbeitsplatzcomputer-in-deutschland (abgerufen am 16.12.2021).
- 48 TCO Certified 2020. It's time for IT to transition to a circular economy. Link: www.tcocertified.com/its-time-for-it-to-transition-to-a-circular-economy (abgerufen am 16.12.2021).
- 49 NABU 2018. Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen. Abfallaufkommen in Deutschland 1994 bis 2017. Berlin.
- 50 https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/2018_nabu_broschuere_einweggeschirr_to-go.pdf (abgerufen am 29.11.2021).

Bildnachweise

Titelseite: Adobe Stock, **S. 18/19:** Lekkerwerken GmbH, **S. 20:** Adobe Stock, **S. 22:** BAUREKA Baustoff-Recycling GmbH, **S. 25:** BAUREKA Baustoff-Recycling GmbH, **S. 27:** Bimolab gGmbH, ARGE agn und heimspiel architekten / Studio Caspar Sessler, **S. 29:** Kai Laumann Zimmerei- und Bedachungs GmbH, **S. 31:** EST/TU Darmstadt, **S. 32:** Messer SE & Co. KGaA, **S. 35:** Duesenfeld GmbH, **S. 36:** Electrocycling GmbH, **S. 37:** Getty Images, **S. 39:** Umicore AG & Co. KG, **S. 40:** General-Industries Deutschland GmbH, **S. 43:** Polysecure GmbH, **S. 45:** GSD Remarketing GmbH, **S. 46:** Grover Tech, Inc., **S. 49:** rezzeat GmbH, **S. 51:** Knärzje GmbH

Vervielfältigung und Nachdruck – auch auszugsweise – nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Hessen Trade & Invest GmbH herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfenden während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlkampfveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Die genannten Beschränkungen gelten unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl die Druckschrift den Adressaten zugegangen ist. Den Parteien ist es jedoch gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Herausgeberin übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung der Herausgeberin übereinstimmen.

Weitere Publikationen im Technologieland Hessen

Mit unseren Publikationen informieren wir über ausgewählte Themen unserer Innovationsfelder Digitalisierung, Life Sciences & Bioökonomie, Materialtechnologien, Mobilität & Logistik, Produktion sowie Ressourceneffizienz & Umwelttechnologie.

Neben Standortstudien zu den hessischen Kernbranchen finden Sie insbesondere zahlreiche Veröffentlichungen zu spezifischen Themen und Technologien aus den Kompetenzfeldern.



Materials for the European Green Deal (Abschlussbericht)

[Materialtechnologien](#)

Erscheinungsdatum 26.04.2022



CO₂-Helden denken weiter

[Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien](#)

Erscheinungsdatum 19.04.2022



Technologieland-Magazin

7. Ausgabe

[Innovationsunterstützung](#)

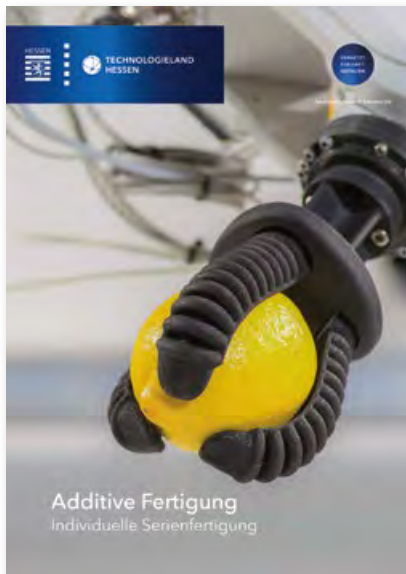
Erscheinungsdatum 17.01.2022



Digitalisierung? Klar! Aber richtig!

[Digitalisierung, Smart Production, Innovationsunterstützung](#)

Erscheinungsdatum 15.12.2021



Additive Fertigung - Individuelle Serienfertigung

Materialtechnologien

Erscheinungsdatum 14.12.2021



Kunststoff - Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft

Materialtechnologien, Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien

Erscheinungsdatum 08.12.2021



Wirtschaft 4.0 - Für Hessens produzierendes Gewerbe

Smart Production

Erscheinungsdatum 15.09.2021



Von Avantgardist bis Zahnimplantat - Einblicke in die Innovationsvielfalt der Hessischen Gesundheitsindustrie

Life Sciences & Bioökonomie

Erscheinungsdatum 06.09.2021



Fit für die Zukunft - Ressourceneffizienz in Produktionsprozessen

Smart Production, Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien

Erscheinungsdatum 30.04.2021



Mit Ecodesign zu einer ressourcenschonenden Wirtschaft (2. Auflage)

Ressourceneffizienz & Umwelttechnologien

Erscheinungsdatum 24.02.2021

HESSEN



Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Wohnen

Projektträger:



HESSEN
TRADE & INVEST

Wirtschaftsförderer für Hessen