

Sicherheit in Technik und Chemie



# KREISLAUFWIRTSCHAFT Sicherheit im Fokus

*CIRCULAR ECONOMY  
Focus on safety*



# VORWORT

## PREFACE

Das gegenwärtige globale Wirtschaftsmodell basiert auf dem Prinzip linearen Wachstums. Aufgrund der Endlichkeit natürlicher Ressourcen wird dieser Wachstumsgedanke in Zukunft jedoch an Grenzen stoßen. Schon in den 1960er Jahren haben Ökonomen das Modell einer Kreislaufwirtschaft, einer Circular Economy, entwickelt. Es zielt darauf ab, den Gebrauchswert von Ressourcen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu optimieren und Materialkreisläufe zu schließen.

2019 hat die Europäische Kommission ihren Aktionsplan zur Circular Economy aus dem Jahr 2015 bekräftigt und aktualisiert. Auch die deutsche Bundesregierung unterstützt diese internationalen Bemühungen seit langem mit ihrer Nachhaltigkeitsstrategie und ihrem Ressourceneffizienzprogramm.

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist in vielfältiger Weise in diese Aktivitäten involviert. Unter dem Motto „Sicherheit in Technik und Chemie“ arbeiten wir gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung im Bereich der Prozess- und Produktsicherheit sowie der Umweltsicherheit. Dabei legen wir besonderes Augenmerk auf Ressourceneffizienz, indem wir neue Verfahren zur Extraktion wertvoller Ressourcen aus Abfällen und zur Wiederverwertung von Massenreststoffen entwickeln. Wir analysieren die Beständigkeit und das Alterungsverhalten von Kunststoffen und untersuchen die Umweltverträglichkeit und Dauerhaftigkeit innovativer Bauprodukte aus Abfällen.

Zudem ist die BAM in nationalen und internationalen Gremien bei der Normung und Regelsetzung im Bereich Kreislaufwirtschaft tätig und fördert den Wissensaustausch zwischen Forschung und Industrie. So leisten wir einen wichtigen Beitrag zur Transformation der deutschen und europäischen Wirtschaft hin zu einer Circular Economy.

Prof. Dr. Ulrich Panne  
Präsident/President  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

*The current global economic model is based on the principle of linear growth. Due to the finite nature of natural resources, this concept of growth will reach its limits soon. Already in the 1960s, economists developed the model of a circular economy. It aims to optimize the utility value of resources along the entire value chain and to close material cycles.*

*In 2019, the European Commission confirmed and updated its 2015 Circular Economy Action Plan. The German government supports these international efforts with its sustainability strategy and the resource efficiency program.*

*The Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) is involved in these activities in many ways. According to the motto 'safety in technology and chemistry', we work in cooperation with partner institutions from industry and research in the field of process and product safety as well as environmental safety. In particular, we focus on resource efficiency by developing new processes for the extraction of valuable resources from waste and for the recycling of mass residuals. We analyze the durability and the aging behavior of plastics and investigate the environmental compatibility and durability of innovative building products made from waste.*

*In addition, BAM is active in national and international committees for standardization and regulation in the field of recycling management and promotes the exchange of knowledge between research and industry. In this way we make an important contribution to the transformation of the German and European economy towards a circular economy.*

# INHALT

## CONTENT

Sicherheit macht Märkte <i>Safety creates markets</i>	6
Circular Economy – für ein nachhaltiges Wirtschaften <i>Circular economy – towards a sustainable economy</i>	8
Seltene Metalle - neue Verfahren zur Rückgewinnung <i>Rare metals - new methods for recovery</i>	10
Scandium – vom Industriereststoff zum sekundären Rohstoff <i>Scandium – from industrial residue to secondary raw material</i>	12
Dünger aus Klärschlammasche – Rückführung von Phosphor in den Stoffkreislauf <i>Fertiliser from sewage sludge ash – return of phosphorus to the material cycle</i>	14
Zink, Eisen und Kohlenstoff – Rückgewinnung aus Stahlwerksstäuben <i>Zinc, iron and carbon – recovery from steel mill dusts</i>	16
Schlacke zu Zement – Reststoffnutzung in Zeiten des Klimawandels <i>Slag to cement – residue use in times of climate change</i>	18
Metallhüttenschlacken – Umwandlung zu sicheren Bindemitteln <i>Metallurgical slags – conversion into safe binders</i>	20
CFK-Materialien – Grundlagenforschung für das Recycling <i>CFRP materials – basic research for recycling</i>	22
Wiederverwerteter Gips – ein Baustoff mit Zukunft? <i>Recycled gypsum – a building material with a future?</i>	25

Neue Aufbereitungsmethoden – aus Abfällen wertvolle Rohstoffe gewinnen <i>New processing methods – extracting vulnerable raw materials from waste</i>	28
Ersatzbaustoffe – umweltverträgliche Gewinnung aus Abfällen <i>Substitute building materials – environmentally compatible extraction from waste</i>	30
Nachhaltige Baustoffe – Nutzung von Bauabfällen <i>Sustainable building materials – use of construction waste</i>	32
Bodenmaterialien – sicher verwertet <i>Soil-like materials – safely recycled</i>	36
Flammgeschützte Polymerwerkstoffe – Wege zur Nachhaltigkeit <i>Flame retardant polymer materials – ways to sustainability</i>	38
Faserverbundwerkstoffe – Reparaturmechanismen für Windkraftanlagen <i>Fibre composites – repair mechanisms for wind turbines</i>	40
Polymerwerkstoffe – Untersuchung des Alterungsverhaltens <i>Polymer materials – Investigation of ageing behaviour</i>	43
3D-Druck – nachhaltiges Ausgangsmaterial aus der Natur <i>3D printing – sustainable feedstock from nature</i>	45
Alternative Brennstoffe – sichere Handhabung und Lagerung <i>Alternative fuels – safe handling and storage</i>	48



# SICHERHEIT MACHT MÄRKTE

## SAFETY CREATES MARKETS

Verantwortungsvoller technologischer Wandel ist ein Garant für den Wohlstand unserer Gesellschaft. Neue Technologien sind die Basis für die erfolgreiche Weiterentwicklung des Wirtschaftsstandortes Deutschland und für eine Wertschöpfung in globalen Märkten. Die nachhaltige Sicherheit neuer Technologien schafft das Vertrauen von Bürger\*innen in den Wandel und sichert unsere Zukunft.

In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) einen entscheidenden Beitrag zur technischen Sicherheit von Produkten, Prozessen und der Lebens- und Arbeitswelt der Menschen. Dazu forschen, prüfen und beraten wir mit unserer fachlichen Kompetenz und langjährigen Erfahrung an den Schnittstellen von Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik.

Als Kompetenzzentrum „Sicherheit in Technik und Chemie“ leisten wir einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung der deutschen Wirtschaft. Sicherheit macht Märkte.

*Responsible technological change helps guarantee our society's prosperity. And new technologies are key to Germany's status as a top business location. But the long-term safety of new technologies is also essential to build public trust in change and safeguard our future.*

*By working at the cutting edges of materials science, materials engineering and chemistry, the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) makes a crucial contribution to the technical safety of products, processes and to people's life and work. For this purpose, we carry out research, perform tests and provide advice based on our technical expertise and many years of experience at the interfaces of science, technology, industry and politics.*

*As a centre of excellence for safety in technology and chemistry, we make a significant contribution to the development of German industry. Safety creates markets.*

# CIRCULAR ECONOMY – FÜR EIN NACHHALTIGES WIRTSCHAFTEN

## CIRCULAR ECONOMY – TOWARDS A SUSTAINABLE ECONOMY

Derzeit steht das globale Wirtschaftssystem erst am Beginn der Transformation hin zu einer Circular Economy. So wurden 2017 in den Staaten der Europäischen Union knapp 5,4 Milliarden Tonnen an Rohstoffen gewonnen und zusätzlich 1,7 Milliarden Tonnen an Materialien und Produkten importiert. Im Vergleich dazu wurden jedoch nur etwa 900 Millionen Tonnen über Recycling und Wiederverwertung erneut in den Wirtschaftskreislauf eingebracht.

Auf dem Weg zu einer Circular Economy sollte das wirtschaftliche Wachstum schrittweise vom Verbrauch endlicher Ressourcen entkoppelt werden. Dabei ist sie nicht auf klassisches Recycling – im Sinne der Verwertung von Abfällen – beschränkt, sondern beginnt bereits bei einem Produktdesign, das Instandhaltung, Wiederverwendung und Wiederaufbereitung des Produkts beziehungsweise der enthaltenen Rohstoffe von Anfang an mitdenkt.

Aufgrund ihrer großen Massen sind dabei mineralische Primär- und Sekundärrohstoffe von besonderer

Bedeutung. So können z. B. Gesteinskörnungen für die Betonherstellung aus Bauschutt und Metalle aus den Abfällen industrieller Massenproduktionen gewonnen werden.

Mit Kenntnissen über das Alterungsverhalten und die Beständigkeit von Materialien lassen sich zudem mittels Instandhaltung und Wiederaufbereitung die Lebensdauerzyklen von Produkten verlängern. Zugleich kann dadurch der Verbrauch neuer Ressourcen und die Menge an Abfällen reduziert werden.

---

*Currently, the global economic system is only at the beginning of transition to a circular economy. In 2017, countries of the European Union produced nearly 5.4 billion tons of raw materials and imported additionally 1.7 billion tons of materials and products. In comparison, only about 900 million tons were reintroduced into the economic cycle via recycling and reuse.*



On the way to a circular economy, economic growth should be gradually decoupled from the consumption of finite resources. The idea is not limited to classic recycling in the sense of waste recovery but from the very beginning focuses on product design that considers maintenance, reuse and reprocessing of the product or the raw materials it contains.

Due to their large masses, primary and secondary mineral raw materials are of particular importance. For example, aggregates for concrete production can be

extracted from building rubble and metals can be obtained from the waste of industrial mass production.

Knowledge of the aging behavior and durability of materials allows to extend the life cycles of products through maintenance and reprocessing and thus to reduce the consumption of new resources and the amount of waste.



In einer Circular Economy sind Materialkreisläufe weitgehend geschlossen.

In a circular economy material cycles are largely closed.

# SELTENE METALLE – NEUE VERFAHREN ZUR RÜCKGEWINNUNG

## RARE METALS – NEW METHODS FOR RECOVERY

In vielen industriellen Reststoffen wie Stäuben, Schlacken, Aschen oder Schlämmen sind noch wertvolle Elemente enthalten, deren Vorkommen und Verfügbarkeit gering ist und die deshalb als „kritisch“ eingestuft werden. Dazu gehören z. B. Tantal, Niob, Indium, Wolfram, seltene Erden und viele andere wirtschaftlich bedeutende Metalle. Durch die oft noch notwendige Deponierung dieser Reststoffe oder deren direkte Verwertung, etwa im Straßenbau, werden diese Wertstoffe dem Stoffkreislauf entzogen. In der Regel sind sie fest in der sie umgebenden Matrix eingebunden und müssen für ihre Rückgewinnung zuerst aus ihren Verbindungen gelöst und anschließend separiert werden. Mechanische Verfahren, die oft zur Aufbereitung von Reststoffen eingesetzt werden, sind dazu in der Regel nicht in der Lage.

Rückgewinnung und Separation können jedoch in pyrometallurgischen Verfahren erfolgen. Hier liegen die Verbindungen flüssig in einer Schmelze vor und lassen sich mit einem geeigneten Hilfsmittel, z. B. Koks, in ihre metallische Form überführen, die sich dann aufgrund ihrer hohen Dichte am Boden des Schmelzbades anreichert. Gleichzeitig bieten derartige Verfahren prinzipiell auch die Möglichkeit, die verbleibende Restschmelze hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Eigenschaften so zu verbessern, dass eine Deponierung vermieden werden kann und sogar hochwertigere Verwertungswege möglich sind.

Für derartige Untersuchungen steht an der BAM ein kleintechnischer elektrischer Lichtbogenofen zur Verfügung, in dem im 100-kg-Maßstab technische Prozesse nachgestellt, optimiert oder entwickelt werden können. Dabei können Temperaturen von über 2000°C realisiert werden. Hier wurden bereits industriell genutzte Verfahren zur Rückgewinnung von Tantal und Niob aus verschiedenen Schlacken untersucht und Möglichkeiten zur Optimierung aufgezeigt, um eine effizientere Rückführung in den Stoffkreislauf zu ermöglichen.

Pyrometallurgische Verfahren sind energetisch aufwendig, so dass ihre Verwendung zur Wertstoffrückgewinnung aus Reststoffen auf den ersten Blick sehr kostenintensiv erscheint. Die geringe Verfügbarkeit der als kritisch eingestuften Metalle bei gleichzeitig hohem Bedarf bedingt jedoch auch sehr hohe Aufwendungen bei der Primärgewinnung, die zudem noch mit erheblichen, nicht ausgleichbaren Eingriffen in die Umwelt verbunden sind. Aus diesem Grunde hat die Entwicklung neuer oder die Optimierung bestehender Verfahren nicht nur unter ökologischen, sondern auch unter ökonomischen Gesichtspunkten eine hohe Relevanz.

Various industrial residues such as dusts, slags, ashes or sludges contain valuable elements whose deposits and availability are scarce. These elements are therefore classified as “critical” and include tantalum, niobium, indium, tungsten, rare earths and many other economically significant metals. Through often still necessary dumping of these residues or their direct recycling, for example in road construction, these valuable materials are removed from the material cycle. Generally, they are firmly embedded in the surrounding matrix and must first be dissolved from their compounds and then be separated for the recovery. Mechanical processes often used to process residual materials do not allow for this, usually.

Recovery and separation can be realised in pyrometallurgical processes: liquid compounds in a melt can be converted into their metallic form by adding a suitable auxiliary material, coke for instance, which then accumulates at the bottom of the melt due to its high density. In addition, such processes generally allow to improve the material composition and physical properties of the remaining mineral phase and thus



*Tantalrecycling - Abguss einer Schlacke nach einer reduzierenden Behandlung im kleintechnischen Lichtbogenofen. Tantal wird in der am Boden des Lichtbogenofens separierten Metallphase angereichert.*

*Tantalum recycling - casting of a slag after a reducing treatment in a small-scale electric arc furnace. Tantalum is enriched in the metal phase separated at the bottom of the arc furnace.*

avoid landfilling and enable higher-quality recycling routes.

For such investigations, BAM uses a small-scale electric arc furnace where technical processes can be simulated, optimised or developed. The capacity of the furnace is 100 kg and it allows for temperatures over 2000°C. The investigations of industrial processes for the recovery of tantalum and niobium from various slags have shown possibilities for optimisation to enable a more efficient return to the material cycle.

Pyrometallurgical processes are highly energy-consuming, and at the first glance their use for recovering recyclable materials from residues appears very cost intensive. However, low availability of the metals classified as critical combined with high demand means that their primary extraction alone requires large efforts and is also associated with considerable and irreversible environmental impact. For this reason, development of the new or optimisation of the existing processes are highly relevant not only from the ecological but also from the economic point of view.

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Burkart Adamczyk  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Burkart.Adamczyk@bam.de



# SCANDIUM – VOM INDUSTRIERESTSTOFF ZUM SEKUNDÄREN ROHSTOFF

## SCANDIUM – FROM INDUSTRIAL RESIDUE TO SECONDARY RAW MATERIAL



*Scandiumhaltiger-  
Rotschlamm*

*Scandium-containing  
red mud*

Erst durch den Einsatz von Technologiemetallen wurden viele technische Fortschritte in High-Tech-Anwendungen möglich. Hierzu zählen z.B. Indium, Gallium, Gold oder Platin und die Elemente der seltenen Erden. Die seltene Erde Scandium (Sc) ist ein Übergangsmetall, dessen Einsatz sich in verschiedenen Anwendungen als förderlich herausgestellt hat. So kann es z.B. in speziellen Aluminium-Scandium-Legierungen verwendet werden, wo es maßgeblich zur Verbesserung der Eigenschaften dieses Leichtbauwerkstoffes beiträgt. Es ist daher besonders für die Luft- und Raumfahrtindustrie von Interesse. Scandium ist zudem eine Schlüsselkomponente bei der Herstellung bestimmter Festoxidbrennstoffzellen, wo es derzeit am häufigsten eingesetzt wird. Da solche Materialien und Anwendungen in neuen und umweltfreundlichen Techniken immer wichtiger werden, wächst auch das Interesse an Scandium und an der Sicherstellung seiner Verfügbarkeit.

Im Gegensatz zu anderen Elementen ist Scandium aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften nur selten

in natürlichen Vorkommen, wie z.B. Erzlagerstätten, angereichert. Entsprechend ist die jährliche Produktion und Bereitstellung auf dem Weltmarkt mit weniger als 35 t pro Jahr sehr gering. Es gibt weltweit nur wenige Hersteller und keine Produktionsstätte in Europa. Scandium zählt für die Europäische Union zu den kritischen Rohstoffen und ist derzeit eines der teuersten Elemente auf dem Weltmarkt.

Um die Verfügbarkeit von Scandium zu erhöhen und auch in Europa sichere Versorgungswege aufbauen zu können, untersucht die BAM zusammen mit 18 Partnern aus 10 europäischen Ländern in einem von der EU geförderten Projekt die Möglichkeiten zur Gewinnung von Scandium aus industriellen Reststoffen wie Rotschlamm, einem Rückstand aus der Aluminiumoxidherstellung. Im Mittelpunkt stehen dabei innovative Technologien und ihre Anwendung und Wirtschaftlichkeit auf industrieller Ebene. Ziel ist die Etablierung einer geschlossenen und sicheren Wertschöpfungskette für Scandium in Europa. Die damit verbundene Nutzung des Rotschlammes und weiterer industrieller Reststoffe, die bisher größtenteils deponiert werden, ist dabei ein wesentlicher Faktor und trägt zum Circular-Economy-Ansatz der Europäischen Union bei.

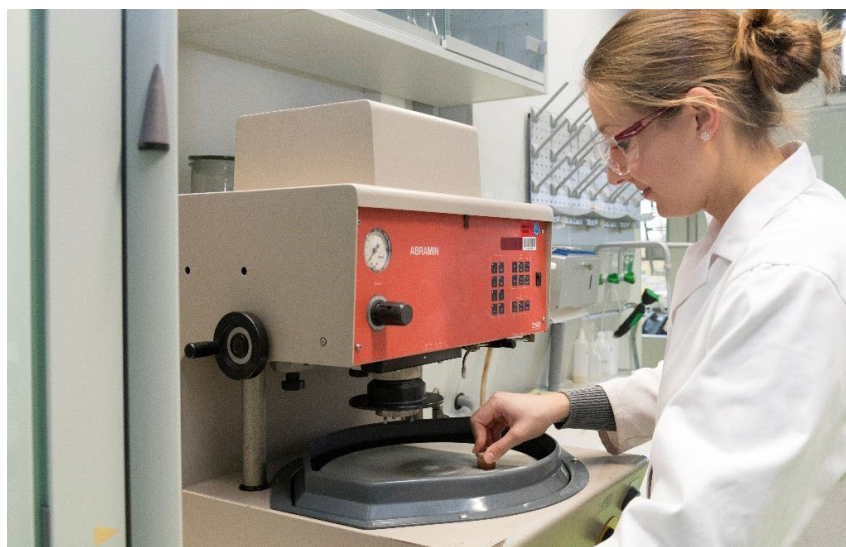
Innerhalb dieses EU-Projektes wird an der BAM an der mineralogischen und chemischen Charakterisierung von scandiumhaltigen Reststoffen (vorwiegend Rotschlamm sowie Abfälle aus der Titandioxid-Produktion) geforscht. Dies ist wichtig für die Prozessführung zur Extraktion von Scandium aus dem Reststoff als Grundlage für eine industrielle Nutzung. Zusätzlich werden weitere Reststoffe in Hinblick auf eine mögliche Nutzung als Scandiumquelle eruiert und charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Projekt von unseren europäischen Partnern genutzt und zudem in eine europäische Rohstoffdatenbank aufgenommen.

---

It was only through the use of technology metals that many technical advances in high-tech applications became possible. These metals include, for example, indium, gallium, gold or platinum, and also elements of the rare earths. The use of the rare earth scandium (Sc), which is a transition metal, has proved to be beneficial in various applications, for example in special aluminium scandium alloys where it contributes to a significant improvement of the properties of this lightweight material. It is therefore of particular interest to the aerospace industry. Moreover, scandium is currently widely used as a key component in manufacturing of certain solid oxide fuel cells. As such materials and applications become more and more important in new and environmentally friendly technologies, interest in scandium and in securing its availability is also growing.

Unlike other elements and due to its specific properties, scandium is rarely enriched in natural deposits such as ore deposits. Accordingly, the annual production and supply on the world market is very low, with less than 35 tons per year. There are only a few producers worldwide and no production site exists in Europe. Scandium is a critical raw material for the European Union and is currently one of the most expensive elements on the world market.

In order to increase the availability of scandium and to ensure secure supply routes in Europe, BAM in cooperation with 18 partners from 10 European countries within the framework of an EU-funded project is investigating the possibilities of extracting scandium from industrial residues such as red mud, a residue from alumina production. Focus is on innovative technologies and their application and economic efficiency on an industrial level. The aim is to establish



*Präparation einer Rotschlamm-  
Probe für mineralogische Unter-  
suchungen*

*Preparation of a red mud sample  
for mineralogical analysis*

a closed and secure value chain for scandium in Europe. The associated use of red mud and other industrial residues, most of which are currently landfilled, is an essential factor in this process and contributes to the circular economy approach in the European Union.

Within this EU project, BAM is carrying out research on mineralogical and chemical characterisation of scandium-containing residues (mainly red mud and waste from titanium dioxide production) which is important for the process control for the extraction of scandium from the residue as a basis for industrial use. In addition, further residues are investigated and characterized with regard to their possible use as a source of scandium. The results of this research will be used in the project run by our European partners and will also be included in European raw material database.

#### **IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Christian Adam  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Christian.Adam@bam.de



# DÜNGER AUS KLÄRSCHLAMMASCHE – RÜCKFÜHRUNG VON PHOSPHOR IN DEN STOFFKREISLAUF

## *FERTILISER FROM SEWAGE SLUDGE ASH – RETURN OF PHOSPHORUS TO THE MATERIAL CYCLE*

Phosphor ist ein wertvoller Nährstoff, den jeder Organismus benötigt und der nicht substituiert werden kann. Aufgrund der Endlichkeit der Phosphorlagerstätten und der zu erwartenden Preissteigerungen auf dem Weltmarkt werden Rückgewinnung, Kreislaufführung und sparsamer Umgang mit dem essenziellen Makronährstoff Phosphor zunehmend interessant und wichtig. Rohphosphate, die für die Düngemittelherstellung benötigt werden, sind (ebenso wie elementarer Phosphor) von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft und damit im Fokus des Circular Economy Action Plans der Europäischen Union. In diesem Zusammenhang wird von der EU das Recycling von nährstoffhaltigen Reststoffen für eine Circular Economy explizit begrüßt.

Bei der landwirtschaftlichen Produktion von Nahrungsmitteln nehmen Pflanzen Phosphor aus dem Boden auf. Dieser muss dem Boden in gleichem Maße wieder zugeführt werden, um weiteres Pflanzenwachstum zu ermöglichen. Nach Konsum der Nahrungsmittel landet ein großer Teil des Phosphors über die Ausscheidungen der Menschen im Abwasser und wird im sogenannten Klärschlamm angereichert. Die Rückführung des Klärschlammes auf die Felder im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, ist aufgrund der enthaltenen Schadstoffe, u.a. Medikamentenrückstände und Schwermetalle, problematisch. Heute wird der Klärschlamm in Deutschland aus diesem Grund überwiegend verbrannt. Dabei entsteht eine phosphorreiche Klärschlammasche, die im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu Düngemitteln verarbeitet werden sollte. Die Klärschlammasche enthält allerdings noch Schwermetalle und die enthaltenen Phosphate sind schlecht für Pflanzen verfügbar.

Aus diesem Grund wird in der BAM an thermochemischen Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus

Klärschlammaschen gearbeitet, welche die Phosphate pflanzenverfügbar machen und Schwermetalle wie Cadmium und Blei abtrennen. Durch die Entfernung dieser Schadstoffe kann die Umweltverträglichkeit und Produktsicherheit der Recyclingdünger erhöht werden.

In verschiedenen nationalen und internationalen Vorhaben wurden bereits, unter Beteiligung der BAM, wichtige Fragestellungen dieser Thematik untersucht. Neben Klärschlammaschen wurden auch andere potenzielle Phosphorquellen wie Tiermehle oder Pflanzaschen auf ihre Eignung hin überprüft. Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung geeigneter Extraktions- und Analyseverfahren für eine verbesserte Bewertung von Düngewirkung und Pflanzenverfügbarkeit.

In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt mit internationalen Partnern wird zudem an der Entwicklung von sogenannten Düngern der nächsten Generation geforscht („Next Generation Fertilizers“), also Klärschlammaschedüngern, die den Phosphor möglichst synchron zum Pflanzenwachstum abgeben.

---

Phosphorus as a valuable nutrient is needed by every organism and cannot be substituted. Due to the finite nature of phosphorus deposits and the expected price increase on the world market, recovery, recycling and economical use of the essential macronutrient phosphorus are becoming increasingly interesting and important. Phosphate rock required to produce fertilizers is classified by the EU along with elementary phosphorus as a critical raw material and is thus focus of the

European Union's Circular Economy Action Plan. In this regard, the EU explicitly supports the recycling of nutrient-containing residues within the framework of circular economy.

Agricultural crops take up phosphorus from soil, and the same amount of phosphorus must be returned to the fields to ensure further plant growth. In the process of food consumption, a large part of phosphorus ends up with human excreta in the wastewater and is enriched in the so-called sewage sludge. The return of sewage sludge to the fields in the sense of a circular economy is problematic due to pollutants it contains like drug residues and heavy metals. For this reason, in Germany nowadays sewage sludge is predominantly incinerated. This results in phosphorus-rich sewage sludge ash, which should be processed into fertilizers in the spirit of a circular economy. However, sewage sludge ash still contains heavy metals, and the phosphates it contains are not readily available to plants.

Therefore BAM is working on thermochemical processes for the recovery of phosphorus from sewage sludge ashes which allow to make phosphates available to plants and separate heavy metals such as cadmium and lead. The removal of these pollutants allows to increase the environmental compatibility and product safety of the recycled fertilizers.

Various national and international projects where BAM is involved are conducting research on important issues related to this subject. In addition to sewage sludge ash, other potential sources of phosphorus such as meat and bone meal or plant ash have been examined for suitability. Further focus was the development of suitable extraction and analysis methods for an improved evaluation of fertilising effect and plant availability.

In a project funded by the German Federal Ministry of Education and Research and in cooperation with international partners, BAM is conducting research on the development of the so-called "next generation fertilizers", i.e. sewage sludge ash-based fertilizers that release phosphorus as synchronously with the plant growth as possible.



*Düngergranulat aus Klärschlammasche*

*Fertilizer granules produced from sewage sludge ash*

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Christian Adam  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Christian.Adam@bam.de



# ZINK, EISEN UND KOHLENSTOFF – RÜCKGEWINNUNG AUS STAHLWERKSSTÄUBEN

## ZINC, IRON AND CARBON – RECOVERY FROM STEEL MILL DUSTS



*Elektroofenstaub (links) und Gichtgasschlamm (rechts)*

*Electric arc furnace dust (left) and blast furnace sludge (right)*

Neben den Stahlwerksschlacken fallen bei der Eisen- und Stahlproduktion auch Filterstäube und Gichtgasschlämme aus der Abluftreinigung an. Pro Tonne Elektrostahl wird beispielsweise etwa 20 kg Filterstaub abgeschieden, welcher mit 20 bis 30 Massenprozent sehr hohe Gehalte an Zink enthält. Bei der Produktion einer Tonne Roheisen im Hochofen fallen ca. 6 kg Gichtgasschlamm an, in dem ebenfalls Zink angereichert ist. Die hohen Zinkgehalte führen dazu, dass diese Stoffströme mit den Hauptbestandteilen Eisen und Kohlenstoff nicht wieder in den

Produktionsprozess zurückgeführt werden können und somit als Abfallströme anfallen. Bei einer weltweiten Produktion von mehr als einer Milliarde Tonnen Roheisen entstehen jährlich 7,1 Millionen Tonnen Gichtgasschlämme, die zum Großteil deponiert werden. Auf diese Weise wird jeden zweiten Tag in etwa die Menge an Eisen entsorgt, die der Masse des Eiffelturms entspricht.

Deshalb entwickelt die BAM gemeinsam mit Industriepartnern ein Verfahren, welches das in Filterstäuben



und Gichtgasschlämmen enthaltene Zink separiert. Der vom Zink befreite mineralische Rückstand kann anschließend wieder im Stahlprozess verwertet werden, wodurch Eisen und Kohlenstoff als Primärrohstoffe eingespart werden. Gleichzeitig wird ein Zinkkonzentrat erzeugt, welches wirtschaftlich verwertet wird und damit primär erzeugtes Zink substituieren kann. Das Verfahren arbeitet ausschließlich mit den Abfallstoffen der Stahlproduktion. Die zinkhaltigen Abfälle werden mit einer Eisenchlorid-Lösung gemischt, die als Abfall bei der Stahlbeize anfällt. Dadurch wird das enthaltene Zink in selektiv verdampfbares Zinkchlorid überführt und bei bis zu 1000 °C in einem Drehrohrofen entfernt. Das Zinkchlorid wird in einem Gaswäscher abgeschieden und aufgereinigt. Eisen und Kohlenstoff verbleiben im Feststoff und können wieder als Sekundärrohstoff im Stahlwerk eingesetzt werden. Aus den verschiedenen Abfallströmen des Stahlwerks können somit Produkte gewonnen und die natürlichen Ressourcen geschont werden. Darüber hinaus kann die Deponierung der Abfälle vermieden werden, welche mit Flächenbedarf und einer potenziellen Umweltbelastung verbunden ist.

---

In addition to steel mill slags, filter dusts and blast furnace sludges from exhaust air treatment are also produced in iron and steel production. For example, about 20 kg filter dust is separated during production of one ton of electric steel contains very high levels of zinc (20-30 mass percent). During the production of one ton of pig iron in a blast furnace, approximately 6 kg of blast furnace sludge is produced, in which zinc is also enriched. The high share of zinc means that the material flows whose main components are iron and carbon cannot be returned to the production process

and therefore accumulate as waste flows. With a world-wide production of more than one billion tons of pig iron, 7.1 million tons of blast furnace sludge are produced annually, most of which is landfilled. As a result, the amount of iron of about mass of the Eiffel Tower is dumped every second day.

Therefore, together with its industrial partners, BAM is developing a process which separates zinc contained in filter dusts and blast furnace sludges. The mineral residue freed from zinc can then be reused in the steel process, saving iron and carbon as primary raw materials. At the same time, zinc concentrate is produced which can be used economically and thus substitute primary zinc. This process works exclusively with waste materials from steel production: zinc-containing waste is mixed with an iron chloride solution, which is a waste product of the steel pickling process whereby zinc is converted into selectively evaporable zinc chloride and is then removed at up to 1000 °C in a rotary kiln. Zinc chloride is separated in a gas scrubber and purified afterwards. Iron and carbon remain in the solid material and can be used again as secondary raw material in steelworks. Thus, products can be extracted from various waste streams of steelworks, which allow to save natural resources and in addition avoid landfilling of waste, which requires space and is a source of potential environmental pollution.

#### IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:

Christian Adam  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Christian.Adam@bam.de



# SCHLACKE ZU ZEMENT – RESTSTOFFNUTZUNG IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS

*SLAG TO CEMENT – RESIDUE USE IN TIMES  
OF CLIMATE CHANGE*



*Stahlwerksschlacken können im schmelzflüssigen Zustand so modifiziert werden, dass sie Eigenschaften wie ein klassischer Zementklinker aufweisen und diesen substituieren können. Die erforderlichen hohen Behandlungstemperaturen werden im kleintechnischen Lichtbogenofen realisiert.*

*Steelworks slags can be modified in the molten state so that they have properties similar to those of a classic cement clinker and can substitute it. The required high treatment temperatures are reached in a small-scale arc furnace.*

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Herausforderungen betreffen insbesondere auch die Bauindustrie. Einerseits sorgt sie für die weltweit größten Abfallströme und trägt andererseits mit der Zementherstellung zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

Die BAM untersucht vor diesem Hintergrund die Herstellung von Zement aus Stahlwerksschlacken, die als Reststoffe bei der Roheisenverarbeitung nach dem Linz-Donawitz-Verfahren anfallen. Diese sogenannten LD-Schlacken ähneln, abgesehen von großen Anteilen an Eisenoxiden, in ihrer chemischen Zusammensetzung dem Portlandzementklinker, dem wichtigsten Bestandteil vieler Zementsorten, der die Erhärtung und Festigkeit dieser Baustoffe maßgeblich bestimmt. In Voruntersuchungen zusammen mit Kooperationspartnern aus Forschung und Industrie konnten im kleintechnischen Lichtbogenofen der BAM in einem Schmelzprozess bei Temperaturen um 1.800 °C aus den Eisenoxiden, die in der Stahlwerksschlacke enthalten sind, Roheisen gewonnen und der Rest der Schlacke in ein zementklinkerähnliches Material mit hoher Reaktivität umgewandelt werden.

Gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und der Technischen Universität Berlin werden die grundlegenden Abläufe bei der Hochtemperaturbehandlung der LD-Schlacken, insbesondere bei der Bildung der reaktiven Zementklinker untersucht. Aus den Ergebnissen werden Möglichkeiten zur Beeinflussung dieses Prozesses abgeleitet, die eine Anpassung an die bei der industriellen Roheisenproduktion herrschenden Betriebsparameter erlaubt. Durch die Umwandlung der Schlacke in ein portlandzementähnliches Bindemittel könnte der Verbrauch an Primärrohstoffen für die Zementproduktion, bei der erhebliche CO<sub>2</sub>-Mengen freigesetzt werden, deutlich verringert werden. Dies soll in einem Folgeprojekt zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung untersucht werden.

---

Challenges posed by climate change particularly affect the construction industry, which generates the world's largest waste streams and contributes to considerable CO<sub>2</sub> emissions through cement production.

Against this background, BAM is investigating the production of cement from steelworks slags, which are residues from pig iron processing using the Linz-Donawitz process. Apart from the large amounts of iron oxides, chemical composition of these so-called LD slags is similar to that of Portland cement clinker, which is the most important component of many types of cement and which significantly determines the hardening and strength of these building materials. In preliminary investigations in cooperation with partners from research and industry, pig iron was extracted from the iron oxides contained in the steelworks slag in a smelting process at temperatures around 1,800 °C in BAM's small-scale electric arc furnace. The rest of the slag was converted into a cement clinker-like material with high reactivity.

Basic processes involved in the high-temperature treatment of LD slags, in particular in the formation of the reactive cement clinkers, are being investigated at BAM in cooperation with the German Aerospace Centre (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) and the TU (Technische Universität) Berlin. The obtained results will allow to consider possibilities to influence this process and to align it with the operating parameters prevalent in industrial pig iron production. Converting slag into a Portland cement-like binder might significantly reduce the consumption of primary raw materials for cement production, which releases considerable amounts of CO<sub>2</sub>. This will be investigated in a follow-up project in cooperation with partners from industry and research.

#### IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:

Burkart Adamczyk  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Burkart.Adamczyk@bam.de



# METALLHÜTTENSCHLACKEN – UMWANDLUNG ZU SICHEREN BINDEMITTELN

## METALLURGICAL SLAGS – CONVERSION INTO SAFE BINDERS



*Ungemahlene Kupferhüttenschlacke*

*Unground copper smelter slag*

Die Steigerung der Rohstoffproduktivität ist vor dem Hintergrund der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und des deutschen Ressourceneffizienzprogramms erklärtes Ziel der Bundesregierung. Die Gewinnung von Rohstoffen aus Reststoffen fokussiert sich jedoch in vielen Fällen auf Technologiemetalle, da hierbei die Wertschöpfung zurzeit am höchsten ist. Ohne eine möglichst vollständige Verwertung des meist mineralischen Hauptmassstroms bei diesen Prozessen ist das gesteckte Ziel aber nur eingeschränkt erreichbar. Ein Beispiel hierfür sind Metallhüttenschlacken, d.h. Schlacken, die bei der Verhüttung von Nichteisenmetallen (Kupfer, Zink, Blei etc.) entstehen. Diese werden gegenwärtig vor allem als Schotter oder Gesteinskörnung im Straßenbau oder für Verfüllungen, also mit nur geringer Wertschöpfung, eingesetzt oder deponiert.

Es ist jedoch bekannt, dass sich aus solchen Metallhüttenschlacken mittels Alkaliaktivierung Bindemittel für Mörtel mit hohen Festigkeiten, poröse Keramiken und Brandschutzbeschichtungen mit hervorragenden technischen Eigenschaften herstellen lassen, so dass potenziell eine sehr viel höherwertige Nutzung möglich ist. Allerdings war die Struktur der erhärteten Bindemittel bisher nicht aufgeklärt. Dies ist auf ihre amorphe Struktur und ihren hohen Eisengehalt zurückzuführen, der eine Untersuchung mittels Kernspinresonanzspektroskopie ausschließt. Um eine sichere Nutzung der genannten Materialien zu gewährleisten, ist es jedoch notwendig, die Struktur dieser Materialien aufzuklären.

In einer Kooperation mit der Katholischen Universität Löwen (Belgien) hat die BAM daher verschiedene

synthetische Metallhüttenschlacken mit unterschiedlichen Zusammensetzung im System CaO-FeOx-SiO<sub>2</sub> hergestellt und die chemische Umgebung des Eisens in den Schlacken sowie in den aus ihnen hergestellten, alkaliaktivierten Bindemittel erstmalig mittels Röntgen-Nahkanten-Absorptionsspektroskopie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass das Eisen in den Schlacken überwiegend in reduzierter Form vorliegt und durchschnittlich von etwa fünf Sauerstoffatomen umgeben ist. In den ausgehärteten Bindemitteln bleibt die durchschnittliche Fünffachkoordination erhalten; die alkaliaktivierten Bindemittel unterscheiden sich dadurch in ihrer atomaren Struktur von den gegenwärtig intensiv beforschten, Eisen-ärmeren alkaliaktivierten Zementen, z.B. auf Basis von Flugaschen oder Metakaolin. Im Verlauf des Erhärtungsvorgangs wird das Eisen zu Eisen(III)-oxid oxidiert. Auf Basis dieses Verhaltens konnten die Reaktionsgrade der Schlacken bestimmt und Zusammenhänge des Reaktionsgrads mit den Calciumoxid- und Eisen(II)-oxid-Gehalten der Schlacken ermittelt werden. Hieraus ergeben sich Empfehlungen für die chemische Zusammensetzung von Schlacken zur Erzielung einer optimalen Reaktivität und damit für die Verwendung von Schlackebildner bei der Metallverhüttung.

---

In the context of the national sustainability strategy and the German Resources Efficiency Program, German government has set a goal to increase the productivity of raw materials. Yet, in many cases the valorisation of by-products is limited to the recovery of the so-called ‘technology metals’ (i.e. rare metals etc.) since at present this creates the highest added value. However, without valorisation of the main material throughout of this process the declared goal cannot be fully reached. Non-ferrous slags i.e. slags that are formed during the smelting of non-ferrous

metals (copper, zinc, lead etc.), can serve as an example. Currently, these slags are mainly used in low-grade applications such as aggregates for road construction or for backfilling, or they are landfilled.

It is known, however, that via alkali activation non-ferrous slags can be used to produce binders for mortars with high strength, porous ceramics as well as fire-proofing coatings with excellent engineering properties, which would mean significantly higher added value. Yet, the structure of the hardened binders remained unclear due to the amorphous nature of the binders and a high iron content, which precludes the use of nuclear magnetic resonance spectroscopy for structural analysis. However, to ensure safe use of these materials, their structure must be determined.

In cooperation between BAM and the Catholic University of Leuven (Belgium), various synthetic non-ferrous slags with different compositions in the system CaO-FeOx-SiO<sub>2</sub> were produced. The chemical environment of iron in these slags and the alkali-activated binders produced from them were investigated for the first time by X-ray near-edge absorption spectroscopy. The results show that iron is present in the slags mostly in reduced form and is surrounded by approximately five oxygen atoms, on average. The average fivefold coordination is retained in the hardened binders; the alkali-activated binders therefore differ in their atomic structure from low-iron alkali-activated materials, such as those based on fly ash or metakaolin, which are currently the subject of intensive research. In the hardened binders, the iron was oxidized to iron(III). Based on this behaviour, the degree of reaction of the slags could be determined, and its relationship to the calcium and iron contents of the slags could be elucidated. The results allowed to formulate recommendations regarding the chemical composition of slags in order to achieve optimum reactivity and thus regarding the use of slag formers in metal smelting.

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

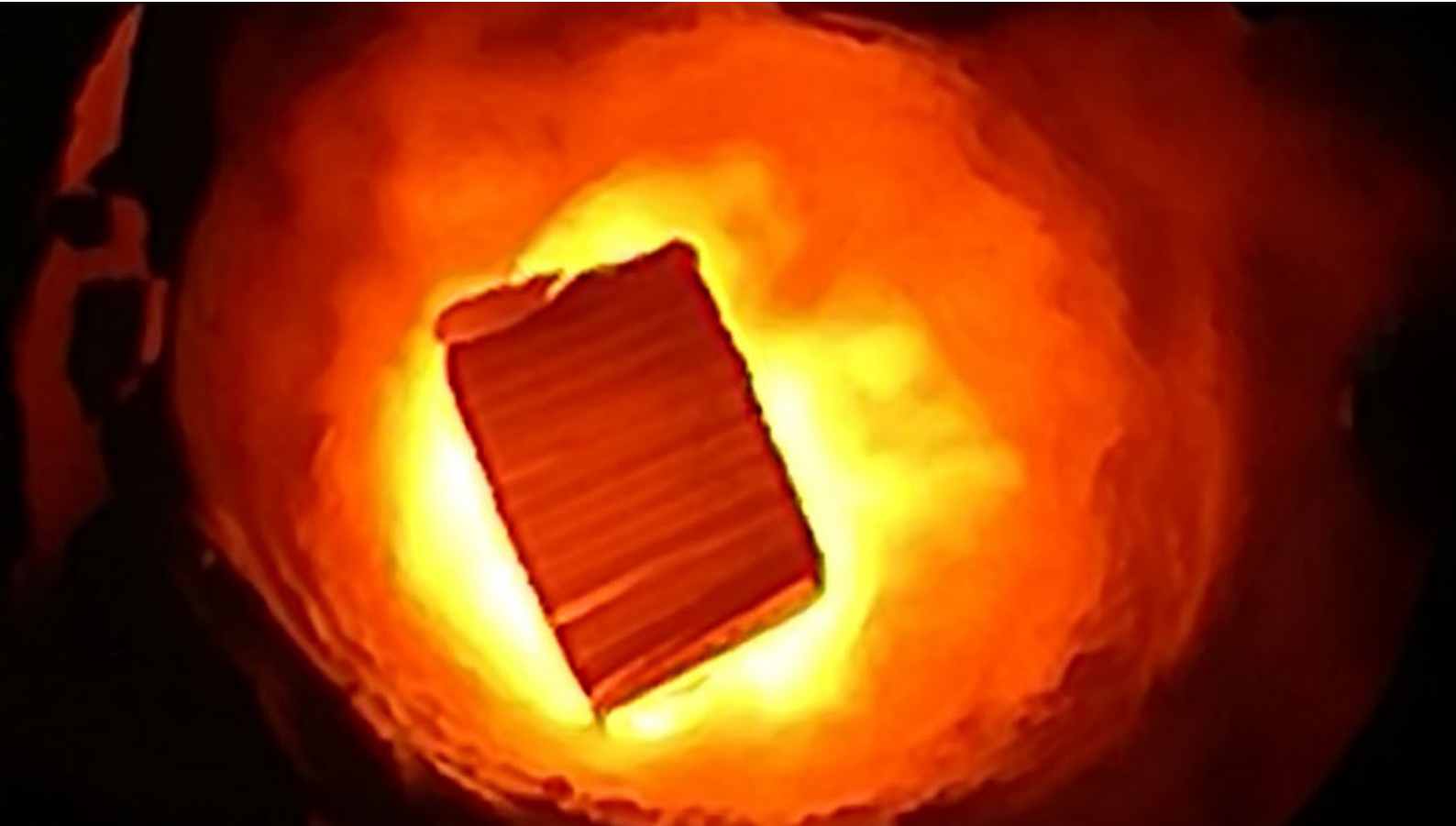
Gregor Gluth  
Baustofftechnologie  
Technology of Construction Materials

Gregor.Gluth@bam.de



# CFK-MATERIALIEN – GRUNDLAGEN- FORSCHUNG FÜR DAS RECYCLING

## CFRP MATERIALS – BASIC RESEARCH FOR RECYCLING



Gerade im Hinblick auf umweltschonende Wirtschafts- und Stoffkreisläufe bieten Leichtbaumaterialien viele Vorteile. Neben der Möglichkeit zu platz- und flächensparenden Bauweisen wirkt sich der Einsatz von Leichtbaumaterialien oftmals auch durch niedrigeren Ressourcenbedarf und durch ein geringeres und leichteres Transportvolumen in der Bauphase positiv aus.

Unter den Leichtbaumaterialien spielen carbonfaserverstärkte Verbundstoffe weltweit eine immer wichtigere Rolle. Hierbei handelt es sich um Verbundwerkstoffe, bei denen Carbonfasern in eine umhüllende Matrix (Kunststoff, Keramik, Metall etc.) eingebettet werden,

*Probekörper bei der Behandlung im Lichtbogenofen zusammen mit einer metallurgischen Schlacke, auf der er aufschwimmt. Die Kunststoffmatrix ist bereits thermisch zersetzt worden und die lamellenartige Anordnung der Faserebenen ist zu erkennen.*

*Test specimen floating on a metallurgical slag during treatment in an electric arc furnace. The plastic matrix has already thermally decomposed and the lamellar arrangement of the fibre planes can be seen.*

um einen sehr widerstandsfähigen aber zugleich leichten Werkstoff zu erhalten. Leichtbaumaterialien werden überwiegend in den Bereichen Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt sowie in Windkraftanlagen, im Sport- und Freizeitbereich und in geringerem Umfang auch in anderen Industrien eingesetzt. Den größten Teil dieser Materialien stellen carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK).

Mit dem Anstieg der Nutzung von CFK in den verschiedenen Einsatzbereichen nimmt auch die Menge carbonfaserhaltiger Abfälle stetig zu. Während sich Produktion und Nutzungsphase dieser Werkstoffe im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen oft durch positive Umweltwirkungen auszeichnen, kann dies für die End-of-Life-Phase noch nicht festgestellt werden. Bisher können nur sortenrein anfallende CFK-Produktionsabfälle recycelt und damit stofflich verwertet werden, wobei sich durch die Prozessbedingungen die Qualität der Carbonfasern gegenüber dem Ausgangsmaterial verschlechtert.

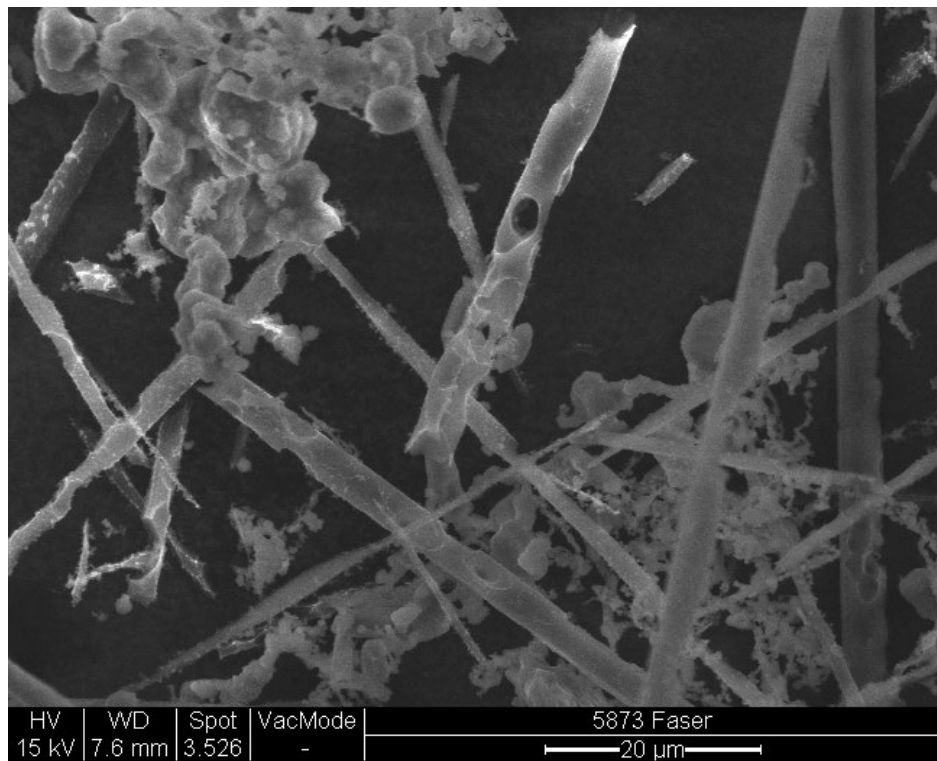
Es wurde bereits versucht, den Energiegehalt von CFK-haltigen Abfällen in thermischen Behandlungen zu nutzen. Aktuelle Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Bedingungen bestehender Verwertungspfade, wie Siedlungs- und Sonderabfallverbrennungsanlagen,

für eine Nutzung dieser Abfälle nicht ausreichen, da die Prozessbedingungen keine vollständige Umsetzung der Fasern ermöglichen. Dadurch können technische Probleme in den Verbrennungsanlagen entstehen und auch mögliche Umwelt- oder Gesundheitsbelastungen nicht ausgeschlossen werden.

Erste Versuche zur Verwertung CFK-haltiger Abfälle in pyrometallurgischen Verfahren (u.a. im kleintechnischen elektrischen Lichtbogenofen der BAM), die meist bei deutlich höheren Temperaturen als in den oben genannten Verbrennungsprozesse ablaufen, haben gezeigt, dass CFK hier unter bestimmten Bedingungen energetisch oder stofflich umgesetzt werden können und damit eine Verwertung grundsätzlich möglich ist. In einem in 2020 gestarteten Vorhaben wird in Zusammenarbeit mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen eine umfassende Technologiebewertung der Verwertung von CFK-haltigen Abfällen in pyrometallurgischen Prozessen vorgenommen. Besonderes Augenmerk wird auf die Sicherheit in der Prozessführung in Hinblick auf den Ausschluss einer möglichen Gefährdung von Mensch und Umwelt, z.B. durch die Bildung lungengängiger Fasern, gelegt. Mit der Untersuchung der End-of-Life-Phase von CFK

*Faserbruchstücke und angegriffene Carbonfasern nach nicht ausreichend langer Behandlungsdauer im Lichtbogenofen*

*Fibre fragments and damaged carbon fibres after insufficient treatment time in an electric arc furnace*



kann der gesamte Lebensweg dieser Materialien im Kontext einer Circular Economy bewertet werden.

---

Lightweight construction materials offer many advantages, especially regarding environmentally friendly economic and material cycles. In addition to the possibility of space-saving construction designs, the use of lightweight construction materials often has a positive effect through lower resource requirements and lower and lighter transport volume during the construction phase.

Along with the other lightweight construction materials, carbon fiber reinforced composites are playing an increasingly important role worldwide. In these composite materials carbon fibres are embedded in a matrix (plastic, ceramic, metal, etc.) to obtain a very resistant but also light material. Lightweight materials are mainly used in automotive construction, aerospace technology and wind turbines, in sports and leisure sector and, to a lesser extent, in other industries. Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) make up the largest part of these materials.

With the increase in the use of CFRP in various application fields, the amount of waste containing carbon fibres is steadily rising. The production and utilization phase of these materials often have positive environmental effects compared to conventional building materials; however, these positive effects have not been proven for the end-of-life phase yet. Up to now, only unmixed CFRP production waste can be recycled and thus reused, whereby the processing conditions deteriorate the quality of carbon fibers compared to the original material.

Attempts have already been made to use the energy content of waste containing CFRP in thermal treatments. However, current investigations have shown that the conditions of the existing recycling paths, for example in municipal and hazardous waste incineration plants, are insufficient for this purpose, since the process conditions do not allow to convert the fibres fully. This might lead to technical problems in the incineration plants and environmental pollution; health impacts may not be excluded.

Pyrometallurgical processes usually take place at significantly higher temperatures than the above-mentioned combustion processes. First attempts to recycle waste containing CFRP pyrometallurgical (e.g. in BAM's small-scale electric arc furnace) have shown that CFRP can be converted energetically or materially under certain conditions and recycling is thus basically possible. In a project started in 2020, a comprehensive technology evaluation of the recovery of CFRP-containing waste in pyrometallurgical processes is being carried out in cooperation with the RWTH Aachen University. Special attention will be paid to operational safety regarding the exclusion of possible hazards to humans and the environment, e.g. through the formation of respirable fibres. By investigating the end-of-life phase of CFRP, the entire life cycle of these materials can be evaluated in the context of circular economy.



**IHRE ANSPRECHPARTNERIN/CONTACT:**

Karin Weimann  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Karin.Weimann@bam.de



# WIEDERVERWERTETER GIPS – EIN BAUSTOFF MIT ZUKUNFT?

*RECYCLED GYPSUM – A BUILDING  
MATERIAL WITH A FUTURE?*



*Bauschutt mit Gipsabfällen aus dem Rückbau von Innen-  
ausbaumaterialien*

*Building rubble with gypsum waste after the deconstruction  
of interior fitting materials*

Gips kann aufgrund seiner hervorragenden Materialeigenschaften als Baustoff für viele Anwendungen genutzt werden. Da im Bausektor der Verbrauch von Gips, speziell für Innenausbaumaterialien, wie z.B. Gipskartonplatten, in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen ist, nimmt in Abhängigkeit von der jeweiligen Lebensdauer auch der Anteil an Gipsprodukten in Baurestmassen zu.

Viele Gründe sprechen dafür, die als Abfall anfallenden Gipsreste zu separieren und in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. Zunächst wird Gips in Baurestmassen oft als Störfaktor angesehen, denn beim Kontakt von Gips mit Wasser kann es zur Elution von Sulfaten aus Gipsprodukten kommen. Dies ist aus bautechnischen Gründen (Bildung von treibenden Mineralphasen) sehr ungünstig und daher gehören Sulfate im Sekundärbau- stoff zu den begrenzenden Faktoren beim Recycling bzw. bei der Verwertung von Bauschutt und anderen mineralischen Abfällen. Vor diesem Hintergrund ist die getrennte Erfassung von Gipsabfällen nicht nur für ein sortenrei- nes Gipsrecycling, sondern auch für die



*Seine Materialeigenschaften machen Gips zu einem hervor- ragenden Baustoff.*

*Its material properties make gypsum an excellent building material.*

Wiederverwertung von Bauschutt von Bedeutung und damit doppelt sinnvoll.

Weiterhin ist Naturgips nicht unbegrenzt verfügbar und sein Abbau ist mit Umweltbelastungen verbunden. Wäh- rend REA-Gips (aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken) zurzeit noch rund 60 % des Gips- bedarfs in Deutschland abdeckt, ist infolge der Energie- wende mit einem starken Rückgang des REA-Gips-Auf- kommens zu rechnen. Um die Versorgungssicherheit für die zukünftige Gipsproduktion zu gewährleisten, ist der Einsatz von geeignetem rezykliertem Gips (RC-Gips) ein wichtiger Baustein. Durch geschlossene Kreisläufe kann auch hier ein wichtiger Beitrag zu Ressourceneffi- zienz im Sinne der Circular Economy geleistet werden.

Zu den wichtigsten Gesichtspunkten bei der Kreislauf- führung von Stoffen oder Materialien gehören neben der Umweltverträglichkeit der gewählten Verfahrensweisen auch die Verfügbarkeit von Materialien und Recycling- anlagen. Neben einer ökobilanziellen Bewertung der Recyclingverfahren für Gips selbst, sollten auch weitere Aspekte betrachtet werden, wie z.B. die selektive Rückbaubarkeit/Demontage von eingebauten Gipspro- dukten oder der Aufwand für Transporte zu Aufbereitungsanlagen.

In zwei vom Umweltbundesamt geförderten Projekten wurde an der BAM zusammen mit Partnern aus For- schung und Industrie zunächst die Verfügbarkeit und selektive Rückbaubarkeit von unterschiedlichen Gips- produkten im Baubestand ermittelt. Für verschiedene Szenarien wurden dabei die Umweltwirkungen ökobilan- ziell bewertet. Im zweiten Projekt wurde das Recycling von Gipskartonplatten (einschließlich der notwendigen Transportstrecken z.B. zu Herstellern von Gipsproduk- ten) ökobilanziell betrachtet und mit den entsprechenden Werten für Natur- und REA-Gipsen verglichen. Beide Studien haben gezeigt, dass ein Closed-Loop-Recycling von Gips möglich und ökologisch vorteilhaft sein kann, wenn die RC-Gipse selektiv gewonnen werden können. Insbesondere der Landverbrauch wird verringert. Die Auswirkungen auf den Klimawandel werden weniger durch Rückbau und Aufbereitung, als vielmehr von den zugehörigen Transportentfernungen dominiert.

In Vorbereitung auf den zu erwartenden Rückgang von REA-Gips aus der Kohleverstromung sollen in einem

nächsten Projekt weitere Quellen für RC-Gipse und mögliche Aufbereitungsverfahren eruiert und ökobilanziell bewertet werden.

---

Due to its excellent material properties, gypsum can be used as a building material for many applications. Since the consumption of gypsum in the construction sector, especially for interior fittings such as gypsum plasterboards, has risen sharply in recent decades, the share of gypsum products in building rubble, depending on the respective service life, has increased too.

There are many reasons why gypsum residues that accumulate as waste should be separated and returned to the material cycle. First, gypsum is often regarded as a disturbing factor in construction waste because of the possible elution of sulphates in contact with water. This is very unfavourable for constructional reasons (formation of voluminous mineral phases); therefore the occurrence of sulphates in secondary building materials is one of the limiting factors in the recycling or recovery of building rubble and other mineral waste. Accordingly, separate collection of gypsum waste is not only important for the recycling of gypsum itself but also for the reuse of building rubble.

Furthermore, the amount of natural gypsum available is limited, and its mining causes environmental impacts. While FGD gypsum (from the flue gas desulphurisation of coal-fired power plants) currently still covers around 60 % of the demand for gypsum in Germany, a sharp decline in the volume of FGD gypsum can be expected as a result of the energy transition. In order to ensure the security of supply for future gypsum production, it is important to provide for the use of suitable recycled gypsum (RC gypsum).

Closed building material cycles are also important for resource efficiency in the spirit of a circular economy.

The key aspects in the recycling of substances or materials include not only the environmental compatibility of the selected processes but also the availability of materials and recycling facilities. In addition to a life cycle assessment of the recycling processes for gypsum itself, other aspects should also be considered such as the selective disassembly of the incorporated gypsum products or the efforts and costs of transportation to the recycling plants.

In two projects funded by the German Federal Environment Agency and carried out in cooperation with partners from research and industry, BAM investigated the environmental impacts of RC gypsum. In the first project, availability and selective decomposition of different gypsum products in the existing buildings were determined. Environmental impact categories for various scenarios were evaluated. In the second project, the recycling of gypsum plasterboards including necessary transport routes (e.g. to manufacturers of gypsum products) were evaluated from a life-cycle assessment perspective, and the obtained results were compared with the respective values for natural and FGD gypsum. Both studies have shown that closed-loop recycling of gypsum can be possible and ecologically advantageous if gypsum waste can be obtained selectively. In particular, land consumption is reduced. The impact category climate change was rather affected by transportation distances than by dismantling and gypsum processing steps.

Preparing for the expected decline of FGD gypsum from coal-based power stations, a next project will investigate alternative sources of RC gypsum and possible methods to process it. Moreover, the objective will be to evaluate those sources in terms of their ecological balance.

#### **IHRE ANSPRECHPARTNERIN/CONTACT:**

Karin Weimann  
Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Thermochemical Residues Treatment and Resource Recovery

Karin.Weimann@bam.de



# NEUE AUFBEREITUNGSMETHODEN – AUS ABFÄLLEN WERTVOLLE ROHSTOFFE GEWINNEN

*NEW PROCESSING METHODS – EXTRACTING  
VULNERABLE RAW MATERIALS FROM WASTE*



*Das bleibt nach der Verbrennung von Hausmüll übrig. Aus der Asche werden mit Magneten Eisen und mit der Wirbelstromtechnik Aluminium und Kupfer abgetrennt. Zusammen sind das rund 10 %. Auch der mineralische Anteil kann nach weiterer Aufbereitung verwertet werden.*

*This is what remains after the incineration of household waste. Iron is separated from the ashes with magnets and aluminium and copper with eddy current technology. The mineral content can be recycled after further processing.*

In Deutschland fallen jährlich fünf Millionen Tonnen Hausmüll-Verbrennungsrückstände an, in denen wertvolle Metalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium enthalten sind. Die BAM forscht an neuen Aufbereitungsmethoden, die die Ausbeute an diesen Metallen erhöhen, denn die ihre Herstellung aus Erzen ist mit einem sehr hohen Energieaufwand verbunden. Bei Aluminium beispielsweise spart man 90 % Energie ein, wenn man es aus Abfallströmen zurückgewinnt. Anders als bei Kunststoffen ändern sich die Eigenschaften der Metalle durch das Recycling nicht. D.h., dass Metalle relativ lange in gleicher Qualität in einem Kreislauf gehalten werden können.

Allerdings haften Metalle Mineralien an, die beim Verbrennungs- und Austragungsprozess entstehen. Beim Umschmelzen der Metalle in der Metallurgie stören diese Anhaftungen und erhöhen den Energieverbrauch. Die BAM hat dazu einen weiteren Verfahrensschritt untersucht, der die mineralischen Anhaftungen minimiert.

90 % der Verbrennungsrückstände sind mineralisches Material und sollen zu Ersatzbaustoffen verarbeitet werden. Deren Umweltverträglichkeit ist von besonderer Wichtigkeit. Die BAM hat realitätsnahe Waschverfahren und thermische Verfahren erprobt und weiterentwickelt, um die Schadstoffe zu reduzieren. Das Ziel war, aus den Rückständen einen kostengünstigen Baustoff zu erzeugen, der gleichzeitig eine hohe Umweltverträglichkeit aufweist. Die BAM testete dazu auch teilautomatisierte Analyseverfahren, die ohne Überwachung rund um die Uhr durchgeführt werden können.

---

Each year Germany generates five million tons of municipal solid waste incineration ashes which contain valuable metals such as iron, copper and aluminium. BAM is investigating new processing methods to increase the yield of these metals since their production from ores is highly energy consuming. For example, in case of aluminium, 90 % of energy can be saved by recovering it from waste streams. Unlike plastic, properties of metals do not change in the course of recycling, which means that in a cycle the quality of metal remains stable for a relatively long time.

However, minerals that are produced during the incineration and discharge process adhere to metals. When in metallurgy metals are re-melted, these attachments interfere and increase energy consumption. BAM has investigated a further process step which minimises such mineral adhesions.

Mineral material makes up 90 % of the incineration ashes and it has to be processed into substitute building materials whose environmental compatibility is of particular importance. BAM has tested and further developed feasible washing and thermal processes to reduce the pollutants. The aim was to produce secondary building materials from the ashes which would be cost-effective and at the same time environmentally friendly. To this end, BAM has also tested partially automated analysis procedures which can be carried out around the clock without supervision.

#### IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:

Franz-Georg Simon  
Schadstofftransfer und Umwelttechnologien  
Contaminant Transfer and Environmental Technologies

[Franz-Georg.Simon@bam.de](mailto:Franz-Georg.Simon@bam.de)



# ERSATZBAUSTOFFE – UMWELTVERTRÄGLICHE GEWINNUNG AUS ABFÄLLEN

*SUBSTITUTE BUILDING MATERIALS –  
ENVIRONMENTALLY COMPATIBLE EXTRACTION  
FROM WASTE*



*Der Einsatz von Ersatzbaustoffen im Straßenbau, für Lärm-schutzwälle oder als Deponieersatzbaustoff schont natürliche Sand- und Kiesvorkommen. Die mineralischen Abfälle müssen aber zuvor aufbereitet werden, um Schadstoffe auszuschleusen.*

*The use of substitute building materials in road construction, for noise protection walls or as landfill substitute building material helps preserve natural sand and gravel deposits. However, at first, the mineral waste must be processed to remove pollutants.*

Der Ressourcenverbrauch wächst weltweit unaufhaltsam. Maßnahmen zur Schonung der Ressourcen sind der Einsatz von Sekundärrohstoffen, Materialsubstitution oder Recycling. Recycling steht in erster Linie für die Rückführung von Glas, Papier, Leichtverpackungen oder verschiedener Metalle in den Rohstoffkreislauf. Doch auch mineralische Baustoffe werden aus Baurestmassen, industriellen Rückständen und Verbrennungsrückständen zurückgewonnen. In Deutschland fallen jährlich 50 bis 100 Millionen Tonnen Baurestmassen an. Sie enthalten wertvolle Metalle und Rohstoffe für die Asphalt-, Beton- und Zementherstellung.

Bei der Aufbereitung von mineralischen Abfällen zu Sekundärbaustoffen werden kaum mehr als 2-3 Euro Behandlungskosten pro Tonne akzeptiert, denn so viel kostet die Herstellung der Baustoffe aus natürlichen Quellen. Mit Nassaufbereitungsverfahren, die im Technikum der BAM erprobt werden, gelingt die Entfrachtung von Sulfatbestandteilen. Damit können umweltverträgliche Gesteinskörnungen mit sehr guten Materialeigenschaften gewonnen werden, ohne dass die Kosten eine Vermarktung erschweren. Die Bundesregierung will mit der geplanten Ersatzbaustoffverordnung eine bundeseinheitliche Regelung zur Verwertung solcher Materialien schaffen. Wir unterstützen diesen Prozess mit unseren Ergebnissen und beteiligen uns an der Entwicklung zuverlässiger Charakterisierungsmethoden und der Festlegung sinnvoller Grenzwerte.

---

Worldwide the consumption of resources is growing steadily. Measures to conserve natural resources include the use of secondary raw materials, material substitution or recycling. Recycling means primarily returning glass, paper, light packaging or various metals to the

raw materials cycle. However, mineral building materials are also recovered from building rubble, industrial residues and combustion residues. In Germany, 50 to 100 million tons of construction waste accumulate annually. This waste contains valuable metals and raw materials which are essential for the production of asphalt, concrete and cement.

When mineral waste is processed into secondary building materials, treatment costs may hardly exceed 2-3 Euros per ton to keep the production of building materials feasible. Wet processing methods tested at the BAM pilot plant allow to remove sulphate components and thus to obtain environmentally safe aggregates with very good material properties while keeping the costs for further marketing at bay. By planning to introduce a Secondary Building Materials Regulation, the German Federal Government aims to create a uniform nationwide system for recycling such materials. To support this process, we provide the results of our research and contribute to the development of reliable characterization methods and definition of reasonable limit values.

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Franz-Georg Simon  
Schadstofftransfer und Umwelttechnologien  
Contaminant Transfer and Environmental Technologies

Franz-Georg.Simon@bam.de



# NACHHALTIGE BAUSTOFFE – NUTZUNG VON BAUABFÄLLEN

*SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS –  
USE OF CONSTRUCTION WASTE*



*Thermisch aus Mauerwerkbruch hergestellte leichte  
Gesteinskörnungen der Größe 4-8 mm.*

*Lightweight aggregates of 4-8 mm grain size thermally  
produced from masonry rubble.*



Mineralische Bau- und Abbruchabfälle stellen 50 % des gesamten Abfallaufkommens in Deutschland dar. Darunter sind jährlich 50 Millionen Tonnen Beton- und Mauerwerkbruch. Ihr Einsatz zur Herstellung von neuen hochwertigen Baustoffen ist für die in Zukunft angestrebten geschlossenen Stoffkreisläufe hinsichtlich einer Schonung von natürlichen Ressourcen, einer Reduzierung von Abfall- und Deponiemengen und einer möglichst hochwertigen Nutzung dieser Stoffe unabdingbar und gleichzeitig ein Beitrag zum nachhaltigen Bauen. Dabei muss das neue Bauprodukt auch technische Qualitätsanforderungen an Festigkeit, Beständigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllen. Die bei Verarbeitung und Applikation möglicherweise freigesetzten Schadstoffe dürfen zu keiner Gefährdung von Gesundheit und Umwelt führen, d.h., die Einhaltung gesetzlich festgelegter Grenzwerte muss gesichert sein.

Im Mittelpunkt aktueller Forschungsarbeiten steht der Mauerwerkbruch, ein Gemisch verschiedener Wandbaustoffe, wie Ziegel, Betonstein, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton sowie Mörtel und Putz. Er weist aufgrund seiner heterogenen

Zusammensetzung und eines hohen Feinkornanteils ein besonders hohes Verwertungsdefizit auf. Über ein rohstoffliches Recycling, d.h. unter Ausnutzung der chemisch-mineralogischen Eigenschaften, ist es möglich, den Mauerwerkbruch in poröse leichte Gesteinskörnungen umzuwandeln. In einem mehrstufigen Herstellungsprozess (Zerkleinern, Homogenisieren, Formgebung, thermische Stabilisierung und Porosierung im Drehrohrofen) werden aus Mauerwerkbruch Blähgranulate mit definierter Korngröße und Rohdichte hergestellt. Die Blähgranulate sind leichte Gesteinskörnungen, die handelsüblichen Blähton ersetzen können. Das gesamte hergestellte Material kann verwendet werden, die feinen Körnungen kleiner als 2 mm für leichte Steinerfüllungsmörtel in der Denkmalpflege und die groben Körnungen 2-8 mm für Leichtbeton oder Schüttungen.

In gemeinsamen Forschungsprojekten zwischen verschiedenen Industriepartnern, der Bauhaus-Universität Weimar, dem IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH und der BAM wurden der gesamte Herstellungsprozess der Blähgranulate im Labormaßstab entwickelt und die neuen leichten



*Mauerwerkbruch wird bislang kaum weiterverwertet.*

*Masonry rubble has hardly been recycled so far.*



*Einbau eines Sitzsteines aus Leichtbeton im Innenhof der BAM.*

*Installation of a seat block made of lightweight concrete in the inner courtyard of the BAM.*

Gesteinskörnungen umfassend in Anwendungstests charakterisiert. Als nächstes sollen grundlegende Reaktionsmechanismen des thermischen Prozesses aufgeklärt werden. Gleichzeitig wird ein Scale-up der Herstellung und eine Erweiterung der Rohstoffbasis auf weitere Reststoffe erfolgen. Damit steht dann auch ausreichend Material für die Bewertung der Leistungsbeständigkeit und umfassende Applikationsuntersuchungen zur Verfügung. Mit Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit und Dauerhaftigkeit der neuen Bauprodukte leistet die BAM dabei einen wichtigen Beitrag zur Umwelt- und Produktsicherheit.

Mineral construction and demolition waste make up 50% of the total waste volume in Germany and includes 50 million tons of concrete and masonry rubble annually. The reuse of waste in the production of new high-quality building materials is indispensable for the closed material cycles aimed for in the future; moreover, it is vital for the conservation of natural resources, for the reduction of waste volumes and landfill capacities as well as for the use of recycled materials at highest level possible. The reuse of waste thus contributes to better sustainability in construction. At the same time, a new building material must meet technical quality requirements for strength, resistance and durability. Pollutants released during processing and application may not endanger human health and environment, i.e. may not exceed the legally defined limits.

Current research focuses on masonry rubble, which is a mixture of different building materials such as brick, concrete block, calcium-silicate brick, lightweight concrete and aerated autoclaved concrete as well as mortar and renderings. Due to its heterogeneous composition and high volume of fines, masonry rubble has a particularly high recycling deficit. By means of feedstock recycling, i.e. by exploiting chemical and mineralogical properties of waste, it is possible to convert masonry rubble into porous lightweight aggregates. The expanded granules with a defined grain size and bulk density are produced from masonry rubble in a multi-stage manufacturing process (crushing and milling, homogenisation, shaping, thermal stabilisation and porosification in a rotary kiln). The expanded granules are lightweight aggregates, which can replace commercially available expanded clay. All produced materials can be used: fine aggregates with grains smaller than 2 mm can be used in lightweight repair mortars in preservation of historical monuments and coarse aggregates of 2-8 mm grain size can be used in lightweight concretes or fillings.

In joint research projects with participation of various industrial partners, the Bauhaus Universität Weimar, Weimar Institute for Applied Construction Research (IAB) the entire manufacturing process of the expanded

granules was developed on a laboratory scale, and the new lightweight aggregates were comprehensively characterised in application tests. As a next step, fundamental reaction mechanisms of the thermal process have to be studied. At the same time, the manufacturing process will be scaled up and the raw material basis will be extended to further residual materials, which

will provide sufficient amount of lightweight aggregates to assess their material performance and to carry out comprehensive application tests. By conducting studies on environmental compatibility and durability of the new building material, BAM makes an important contribution to environmental and product safety.



*Die Sitzsteine aus pigmentiertem Leichtbeton in einem Innenhof der BAM. Der Beton enthält leichte Gesteinskörnungen, die thermisch aus Mauerwerkbruch hergestellt wurden.*

*The seatblocks made of pigmented lightweight concrete in an inner courtyard of BAM. The concrete contains lightweight aggregates thermally produced from masonry rubble.*

**IHRE ANSPRECHPARTNERIN/CONTACT:**

Katrin Rübner  
Baustofftechnologie  
Technology of Construction Materials

[Katrin.Ruebner@bam.de](mailto:Katrin.Ruebner@bam.de)



# BODENMATERIALIEN – SICHER VERWERTET

## SOIL-LIKE MATERIALS – SAFELY RECYCLED



*Die Untersuchung von Bodenmaterial ist aufwändig. Nach der Probenahme sind weitere Vorbereitungs-schritte im Labor nötig.*

*The examination of soil is complex. After sampling, further preparatory steps are necessary in the laboratory.*

Boden und Steine sind mit jährlich etwa 140 Millionen Tonnen der mengenmäßig größte Abfallstrom in Deutschland. Bodenmaterial fällt vor allem bei Baumaßnahmen in Form von Bodenaushub an und soll möglichst hochwertig verwertet werden, um natürliche Ressourcen zu schonen und den Anteil der Deponierung zu reduzieren.

Bodenmaterial kann jedoch in Abhängigkeit seiner vorherigen Nutzung oder Herkunft mit Schadstoffen belastet sein. Die weiteren Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterialien hängen nicht nur vom Gehalt an Schadstoffen im Feststoff, sondern auch von deren Mobilisierbarkeit – dem Elutionsverhalten – ab.

Die geplante Novelle der Bundesbodenschutz- und Altlasten-Verordnung (BBodSchV) sieht neue Vorgaben hinsichtlich des Auf- und Einbringens von Bodenmaterial unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht vor. Es soll die Möglichkeit eingeräumt werden, Bodenmaterialien mit Feststoffgehalten von regulierten Stoffen bei Überschreitung des Vorsorgewertes einer weiteren Verwertung zuzuführen unter der Voraussetzung, dass die festgelegten Grenzwerte im Eluat, das in Auslaugungsversuchen mit Wasser gewonnen wird, eingehalten werden. Für die Auswirkung dieser neuen Regelungen auf die Verwertung von Bodenmaterialien bestehen bisher noch Unsicherheiten, besonders für organische Stoffe. Ziel eines in der BAM bearbeiteten Vorhabens war es daher, Datendefizite für Bodenmaterialien, die unter die neuen Kriterien fallen, zu schließen und neues Verwertungspotenzial aufzuzeigen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Schadstoffgruppe der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Es wurden unterschiedliche Bodenmaterialarten wie Baggergut, Bankettschälgut, Stadt- und Auenböden sowie Bergematerial untersucht. Mit den vorliegenden Daten kann speziell hinsichtlich der Stoffgruppe der PAK gezeigt werden, dass sich mit Verabschiedung

der neuen Regelungen zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterialien eröffnen, ohne den Vorsorgegrundsatz für das Schutzgut Boden zu verletzen. Damit kann ein sicherer Umgang mit Bodenmaterialien zur Verwertung gewährleistet werden.

---

Soil and stones are the largest waste stream in Germany in terms of volume: around 140 million tons per year. Soil-like material is mainly generated by excavating soil during construction work and should be utilised in high grade applications in order to conserve natural resources and reduce the amount of waste disposed in landfills.

Depending on its previous use or origin, however, soil-like material can be contaminated with pollutants. Further recycling possibilities of soil-like materials depend not only on the content of pollutants in the solid matter but also on the degree of their mobilisation, i.e. on their leaching behaviour.

The planned amendment to the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) stipulates new requirements regarding the application and placement of soil-like material below or outside of a rootable soil layer. The objective is to enable the use of soil-like materials even if the precautionary values of regulated substances in solid matter are slightly exceeded, provided that the newly specified limit values for eluates are met. The eluate analysis is performed by laboratory tests using water as leachant. Uncertainties still exist regarding the impact of these new regulations on the utilisation of soil-like materials, especially with respect to organic substances. The aim of one of the projects carried out at BAM was therefore to provide sufficient data on soil-like materials covered by the new

regulations and to show new potential for utilisation. The investigations were focused on the pollutant group of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Different types of soil-like material such as dredged material, banquet peelings, urban and alluvial soils and tailings were investigated. The available data allowed to demonstrate, in particular regarding the PAH substance group, that the adoption of the new regulations will open up additional recycling possibilities for soil-like materials without violating the precautionary principle for soil as a protected resource. This will ensure safe handling of soil-like materials as a secondary resource.



*Säulenversuche liefern realitätsnahe Ergebnisse zum Auslaugverhalten von Böden und Abfällen. Nach dem Befüllen der Säulen läuft die Untersuchung automatisch ab. Die einzelnen Eluate werden anschließend im Labor auf die Gehalte an Schadstoffen untersucht.*

*Column experiments provide realistic results on the leaching behaviour of soils and wastes. After filling the columns, the leaching tests run automatically. Several eluate fractions are then examined in the laboratory for pollutants.*

**IHRE ANSPRECHPARTNERIN/CONTACT:**

Ute Kalbe  
Schadstofftransfer und Umwelttechnologien  
Contaminant Transfer and Environmental Technologies

Ute.Kalbe@bam.de



# FLAMMGESCHÜTZTE POLYMERWERKSTOFFE – WEGE ZUR NACHHALTIGKEIT

## FLAME RETARDANT POLYMER MATERIALS – WAYS TO SUSTAINABILITY



*Test von flammgeschützten  
Polymerwerkstoffen*

*Test of flame retardant  
polymer materials*

Flammgeschützte Polymerwerkstoffe bestehen überwiegend aus fossil-basierten Standardpolymeren oder technischen Polymeren. Der Flammenschutz wird in modernen Polymerwerkstoffen durch maßgeschneiderte, oft synergistische Mehrkomponentensystemen erreicht. Dabei ist nicht nur der Flammenschutz auf das Polymer und dessen Anwendung spezifisch ausgelegt. Weitere Additive und Füllstoffe stellen das Eigenschaftsprofil des Polymerwerkstoffes im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Mechanik, Verarbeitbarkeit, Farbe, usw. sicher. Recycling von sortenreinen Polymerwerkstoffabfällen, z. B. während der Herstellung von Produkten im Spritzgussverfahren, ist trotz oder gerade wegen dieses spezifischen und komplexen Mix aus vielen Komponenten ökologisch und ökonomisch sinnvoll

und erfolgreich durchführbar. Weit schwieriger ist die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft für Altpolymere, wenn sie als nicht definierter Müllmix teils gealtert und verunreinigt vorliegen. Auch wenn in einer Vielzahl von Forschungs- und Pilotprojekten die Machbarkeit von Up-Cycling über das werkstoffliche bis hin zum rohstofflichen Recycling demonstriert wurde, ist die Umsetzung bisher weit hinter den angestrebten Zielen zurückgeblieben. Allein die thermische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen statt der Verbringung in Mülldeponien hat sich in vielen Ländern durchgesetzt.

Das Hinzufügen der Eigenschaft Recyclingfähigkeit, z. B. durch die Verbesserung der Sortier- und Verwertbarkeit am Ende des Lebenszyklus, der Ersatz von fossil-basierten Polymeren, Flammenschutzmitteln und Additiven durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen als Ausgangsmaterialien oder Biopolymeren und Biokompositen statt synthetischer Polymere, und die Realisierung von bioabbaubaren flammgeschützten Werkstoffen sind aktuelle Forschungsthemen. Diese Entwicklungen zählen teilweise oder ganz auf die Realisierung der zirkulären Ökonomie ein. Die BAM begleitet solche Entwicklungen vor allen in Forschungs-kooperationen in drittmittelgeförderten Projekten.

Zirkuläre flammgeschützte Kunststoffe sind dabei nicht notwendigerweise erneuerbar, also biobasiert, und nachwachsende Rohstoffe, wenn sie zusätzliche Anbaufläche erfordern, nicht unbedingt nachhaltig. Der Schwerpunkt unserer Arbeiten in den skizzierten Themen liegt daher zum einen in der Steigerung der Materialeffizienz, die oft intrinsisch und wesentlich zur Lösung beiträgt, und zum anderen in der Steigerung der Nachhaltigkeit. So hat die BAM beispielsweise in einem Deutsch-Mexikanischen Projekt synergistisch flammgeschützte Biokomposite entwickelt, in denen wir Naturfasern aus in Mexiko entstandenen

Industrieabfällen verwendet, vor Ort in bioabbaubaren Biokompositen verarbeitet und deren Flammseigenschaften optimiert haben. Die BAM trägt somit durch ihre Forschung, aber auch durch wissenschaftliche Dienstleistungen zu Lösungen auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft von Polymerwerkstoffen bei.

---

Flame-retardant polymer materials mainly consist of fossil-based standard polymers or technical polymers. In modern polymer materials, flame retardancy is achieved by tailor-made, often synergistic multi-component systems. Not only is the flame retardant specifically designed for the polymer and its application; other additives and fillers ensure the characteristic profile of the polymer material in terms of durability, mechanics, processability, colour, etc. In spite of - or maybe precisely because of - this specific and complex mix of many components, recycling of pure polymer material waste appears to be ecologically and economically expedient and feasible, for example during the manufacture of products by injection moulding. It is far more difficult to implement a closed-loop economy in case of waste polymers if they are found in an undefined waste mix, are partly aged or contaminated. Various research and pilot projects have demonstrated feasibility of up-cycling, material recycling and raw material recycling; however, the implementation has fallen far short of the intended targets so far. Thermal recycling in waste incineration plants alone has prevailed in many countries and has replaced dumping in landfills.

Current research covers following topics: the addition of recyclability as a material property by improving the

ability to be sorted and recycled at the end of the life cycle, for instance; the replacement of fossil-based polymers, flame retardants and additives by using renewable raw materials as starting materials or biopolymers and biocomposites instead of synthetic polymers, and the realisation of biodegradable flame-retardant materials. These developments contribute in part or in full to expansion circular economy. BAM takes part in this work, particularly in third-party funded research cooperation projects.

Circular flame-retardant plastics are not necessarily renewable, i.e. bio-based, and renewable raw materials are not necessarily sustainable if they require additional land for cultivation. The focus of our work on the outlined topics is therefore on both the increase of material efficiency, which is often an intrinsic and significant contribution to the solution, and on the enhancement of sustainability. In a German-Mexican project, for example, BAM has synergistically developed flame-retardant biocomposites: we used natural fibres from industrial waste generated in Mexico, processed them on site in biodegradable biocomposites and optimised their flame-retardant properties. Thus, by conducting research and offering its scientific services BAM contributes to finding solutions to the closed cycle management of polymer materials.

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Bernhard Schartel  
Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen  
Technical Properties of Polymeric Materials

Bernhard.Schartel@bam.de



# FASERVERBUNDWERKSTOFFE – REPARATURMECHANISMEN FÜR WINDKRAFTANLAGEN

## FIBRE COMPOSITES – REPAIR MECHANISMS FOR WIND TURBINES

Die aus bewegter Luft gewonnene Energiemenge steigt stetig in Deutschland, und zudem auch die Größe von Windkraftanlagen. Neue Anlagen werden von bis zu 85 Meter langen Rotorblättern angetrieben. Sie sind damit so lang wie die Spannweite des Großraum-Passagerflugzeugs Airbus A 380 beträgt. Und noch längere Rotorblätter sind in der Entwicklung. Doch daraus erwachsen besondere Belastungen für die Bauteile.

Bereits bei den heute im Einsatz befindlichen Rotorblättern entdecken die Inspektoren immer häufiger Risse in der Blattschale. Viel zu früh, lag die

prognostizierte Lebensdauer doch bei rund 20 Jahren. Nach Meinung vieler Experten sind 70 - 80 % der Schäden auf ungewollte Fertigungs- und auf konstruktiv bedingte Abweichungen – sogenannte Imperfektionen – zurückzuführen. Kein ungefährlicher Arbeitsplatz: Wenn die Schäden direkt am Blatt repariert werden sollen, müssen die Fachkräfte sich dazu in luftiger Höhe abseilen. Im Extremfall muss das gesamte Rotorblatt ausgetauscht werden. Das ist kostenintensiv und der zusätzliche Stillstand der Anlage führt zu weiteren erheblichen finanziellen Einbußen.

An der BAM wird die Betriebsfestigkeit der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) seit vielen Jahren erforscht. Neben dem Einsatz dieser Werkstoffklasse in den Rotorblättern sind FKV vor allem im Flugzeugbau und auch im Automotive-Bereich Stand der Technik. Neben der Aufgabe, bei Inspektionen Schäden in FKV-Strukturen mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren aufzuspüren, stellt sich zugleich die Frage, wie das Bauteil nachhaltig für den weiteren Betrieb repariert werden kann.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der BAM untersuchen hierzu verschiedene Faserverbund-Schalen-segmente unterschiedlicher Dicken, Größen und Krümmungen auf ihre Betriebsfestigkeit. Dazu haben sie einen Prüfstand konstruiert und aufgebaut, der in



*Reparatur von Faser-Kunststoff-Verbund  
im Labor*

*Repair of fibre reinforced-plastic composites  
in the laboratory*





eine servohydraulische Prüfmaschine mit maximal 500 Kilonewton (kN) Last integriert wurde. In-situ werden während einer simulierten Betriebsbeanspruchung mit zerstörungsfreien Prüfverfahren der Schadensort, der Schadensfortschritt und Schadensursache untersucht, um mittels numerischer Modelle eine Lebensdauerprognose angeben zu können. Diese Methodik wird in einem laufenden Forschungsvorhaben auf Schalenprüfkörper mit Test-Reparaturstellen übertragen. Ziel ist es, aus der Vielzahl von möglichen und praktizierten Reparaturverfahren das nachhaltigste auszuwählen, welches zugleich auch in luftiger Höhe am Rotorblatt noch technisch machbar ist.

---

The amount of energy generated from wind is constantly increasing in Germany, as is the size of wind

*Reparatur eines Rotorblatts an einer Windkraftanlage „im Seil“*

*Repair of a wind turbine rotor blade "on the ropes"*

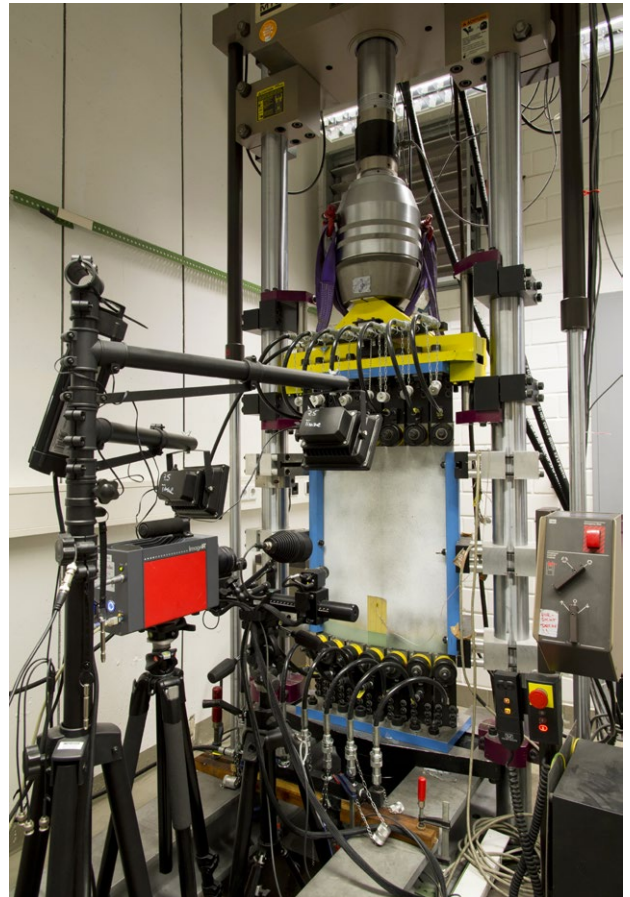
turbines. New turbines are driven by up to 85-meter-long rotor blades, which is the equivalent of a full wingspan of an Airbus A380 wide-body passenger aircraft, and even longer rotor blades are currently under development. As a result of this development, structural components are exposed to additional loads.

With the rotor blades in use today, inspectors discover cracks in the blade shells more and more frequently. These occur significantly before the predicted turbine lifetime of around 20 years. According to many experts, 70 to 80 % of these damages are due to the unintentional production and manufacturing-related deviations,

the so-called imperfections. This leads to a risky work environment for the technicians: if damage has to be repaired directly on the blade, they have to abseil at lofty heights. In extreme cases, the entire rotor blade may have to be replaced. This is quite cost-intensive, and the shutdown of a wind turbine leads to further financial losses.

BAM has been researching the fatigue strength of fibre-reinforced plastic composites (FRP) for many years. Apart from the use of this material class in rotor blades, FRPs are state of the art especially in aircraft construction as well as in the automotive industry. The primary task is to detect damage in FRP structures during inspections using non-destructive testing methods; on top of that, the challenge is to repair a component sustainably and efficiently for further operation.

With this objective in mind, researchers at BAM are investigating various fibre composite shell segments of different thicknesses, sizes and curvatures for their operational strength. To do so, they have designed and built a test rig which was integrated into a servo-hydraulic testing machine with a maximum load of 500 kilonewtons (kN). During a simulated operational load, damage location, progress and cause are examined in-situ using non-destructive testing methods in order to make a life expectancy prognosis using numerical models. In an ongoing research project, this methodology is being transferred to shell test specimens with test repair patches. The aim is to select the most sustainable repair technique from a large number of possible and used in practice repair procedures, which at the same time would be technically feasible to execute on the rotor blade even at high altitudes.



*Prüfstand für FKV-Schalenstrukturen integriert in eine 500 kN-Prüfmaschine*

*Test rig for FRP shell structures integrated into a 500 kN testing machine*



**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Volker Trappe  
Mechanik der Polymerwerkstoffe  
Mechanics of Polymers

Volker.Trappe@bam.de

# POLYMERWERKSTOFFE – UNTERSUCHUNG DES ALTERUNGSVERHALTENS

## POLYMER MATERIALS – INVESTIGATION OF AGEING BEHAVIOUR

Ein Polymerwerkstoff setzt sich aus der polymeren Matrix, Additiven, Füll- und Hilfsstoffen zusammen. Während man bei der Beeinflussung von Eigenschaften mit der Auswahl der polymeren Matrix schnell an Grenzen stößt, lässt sich über aktive Additive eine Variation dieser Eigenschaften oft um mehrere Größenordnungen erreichen.

Beim Design der Beständigkeit von Polymerwerkstoffen verfolgt man je nach Verwendung unterschiedliche Ansätze. Während für viele einfache Verpackungs- und Billigprodukte die lange Lebensdauer des entsprechenden Abfalls ein Problem darstellt und man z.B. Bioabbaubarkeit anstrebt, steht bei höherwertigen und sicherheitsrelevanten Produkten ein möglichst langer Erhalt der Funktionalität, am besten über mehrere Kreisläufe hinweg, im Vordergrund. Die Additivierung soll für eine lange Lebensdauer der Funktionalität stabilisierend wirken.

In beiden Fällen ist für die Circular Economy die Kenntnis des resultierenden Alterungsverhaltens der Funktionalitäten des betreffenden Polymerwerkstoffes unter der herrschenden Anwendungssituation von fundamentaler Bedeutung für die Produktentwicklung und das Einsatzspektrum.

Das Alterungsverhalten spiegelt sich beim selben Polymer in verschiedenen Eigenschaften (wie dem äußeren Erscheinungsbild, mechanischer Festigkeit, etc.) und Funktionalitäten (wie Flammschutz und Brandverhalten etc.) in unterschiedlicher Weise wider. Für die Alterungseigenschaften des Polymerwerkstoffes spielt nicht nur die chemische Struktur des Polymers selbst, sondern auch die aller Additive, Füllstoffe und Hilfsstoffe eine Rolle. Die Alterung ergibt sich als molekulare Antwort des Polymerwerkstoffes auf eine bestimmte Beanspruchungssituation aus einem komplexen Zusammenspiel vieler, teils konkurrierender chemischer

Reaktionen (Oxidation, Hydrolyse, Depolymerisierung etc.) und damit in Beziehung stehender physikalischer Prozesse (Photoprozesse, Diffusion etc.), so dass sich letztlich als Summe dieser Einzelprozesse abrupte, nicht-monotone zeitliche Verläufe ergeben können, die noch dazu bei verschiedenen Polymer-Matrices in der Regel nicht parallel zueinander verlaufen.



*Künstliche Bewitterung von Kunstrasen zur Untersuchung witterungsbedingter Auswaschung von Komponenten in das Grundwasser.*

*Artificial weathering of artificial turf to investigate weather-related washing out of the components into the groundwater.*

Die Alterung eines bestimmten Polymers bezüglich einer bestimmten Eigenschaft über eine bestimmte Exposition wird man auch in Zukunft nicht in einer Tabelle ablesen können. Da das physikalisch-chemische Modell der Alterung fehlt, können auch Simulationen letztlich zwar bei der Interpolation

zwischen gemessenen Alterungswerten von Eigenschaften, nicht aber bei der Extrapolation helfen.

In dieser Situation kommt der experimentellen Untersuchung des Alterungsverhaltens im Kontext der Circular Economy eine besondere Rolle zu. Durch künstliche Bewitterung kann dabei die Alterung eines Polymerwerkstoffes als Antwort auf systematisch variierte Expositionsbedingungen von UV-Bestrahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Regenphasen und ggf. Chemikalien wiederholbar und reproduzierbar untersucht werden. Die Alterung beim Einsatz unter Außenbewitterungsverhältnissen wird so bezüglich der Lebensdauer und individuellen Empfindlichkeiten in einer Materialgruppe verglichen und bestimmt.

---

A polymer material is composed of the polymer matrix, additives, fillers and auxiliary materials. Attempts to influence the polymer properties by altering the polymer matrix quickly reaches its limits, whereas use of different active additives often results in a variation of these properties by several orders of magnitude.

To engineer the durability of polymer materials, one may pursue different approaches depending on the application. In case of many simple packaging and cheap products, a long service life of the corresponding waste is a problem, and biodegradability is a plus, while in case of higher-value and safety-relevant products focus is on the maintenance of functionality for as long as possible, preferably over several cycles. For a long service life addition should have a stabilising effect on the functionality.

In both cases, knowledge of the ageing behaviour of the functionalities of a polymer material in a

prevalent application situation and in the context of circular economy is of fundamental importance for the product development and its application range.

The ageing behaviour of the same polymer is reflected in different ways in different properties (such as external appearance, mechanical strength, etc.) and functionalities (such as flame retardancy and fire behaviour, etc.). Not only the chemical structure of the polymer itself but also that of all additives, fillers and auxiliary materials affect the ageing properties of the polymer. Ageing is a molecular response of the polymer material to a specific stress situation and results from a complex interplay of many partly competing chemical reactions (oxidation, hydrolysis, depolymerization etc.) and the related physical processes (photo processes, diffusion etc.). Ultimately, as the sum of these individual processes, abrupt non-monotonous temporal courses may occur, which do not usually run parallel in different polymer matrices.

It will hardly be ever possible to compile a table containing data on ageing of a specific polymer regarding a specific property in relation to a specific exposure. Since the physical-chemical model of ageing is missing, simulations can ultimately help not in the extrapolation but rather in the interpolation between the measured ageing values of the properties.

Against this backdrop, the experimental investigation of ageing behaviour in the context of circular economy plays a special role. Artificial weathering can be used to investigate the ageing of a polymer material in response to systematically varied exposure conditions of UV irradiation, temperature, humidity, rain phases and, if necessary, chemicals in a repeatable and reproducible way. Ageing under outdoor weathering conditions is thus compared and determined with regard to the service life and individual sensitivities in a material group.



**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Bernhard Schartel  
Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen  
Technical Properties of Polymeric Materials

Bernhard.Schartel@bam.de

# 3D-DRUCK – NACHHALTIGES AUSGANGSMATERIAL AUS DER NATUR

## 3D PRINTING – SUSTAINABLE FEEDSTOCK FROM NATURE

Ausscheidungen des europäischen Hausbockkäfers *Hylotrupes bajulus* und der Trockenholztermiten *Incisitermes marginipennis* bestehen aus kleinen Partikeln und besitzen eine gute Rieselfähigkeit, so dass sie ein gutes Ausgangsmaterial für den pulverbasierten 3D-Druck darstellen. In diesem additiven Fertigungsverfahren wird ein als Pulver vorliegendes Ausgangsmaterial in dünnen Schichten gestapelt, wobei jede Schicht lokal, durch Einspritzen eines Binders, konsolidiert werden kann. Hierdurch können Bauteile Schicht für Schicht aufgebaut werden, wenn das Bauteil als schichtweise aufgebautes Datenmodell vorliegt.

Die Verwendung von natürlichen Rohstoffen ist ein Trend, den auch die additive Fertigung aufgreift. Einen Schritt weiter geht die Verwendung von in der Natur als Pulver vorprozessierten Materialien z. B. Ausscheidungen, da dieser Rohstoff bereits durch Insekten als für den 3D-Druck geeignetes Ausgangsmaterial bearbeitet wurde. Bei klassischem Ausgangsmaterial

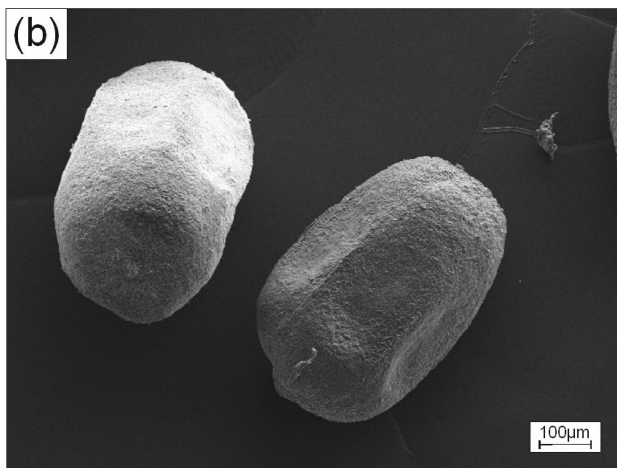
wird ein Material, Kunststoff, Metall oder Keramik, über aufwendige Verfahren zu einem Pulver aufbereitet. Nicht nur, dass die Herstellung der Materialien selbst Ressourcen verbraucht, auch ihre Aufbereitung ist energieintensiv und als Pulver bergen sie zusätzlich ein besonderes, nicht immer voll verstandenes Gefährdungspotential, wie am Beispiel Mikroplastik klar wird. Im Gegensatz dazu erfolgt die natürliche Rohstoffaufbereitung durch Insekten ressourceneffizient und nachhaltig ohne Abfallprodukte, wie z. B. zu feine Partikel.

Hervorzuheben ist außerdem, dass die Partikel eine besonders hohe Dichte im Vergleich zu Holz haben und ihre Form besonders hohe Packungsdichten ermöglicht, was anscheinend vorteilhaft für die Termiten, aber auch für den 3D-Druck ist.

Insbesondere Ausscheidungen von Trockenholztermiten liegen als Pulver mit fast monomodaler Partikelgrößenverteilung vor, wie in Abbildung (a) und



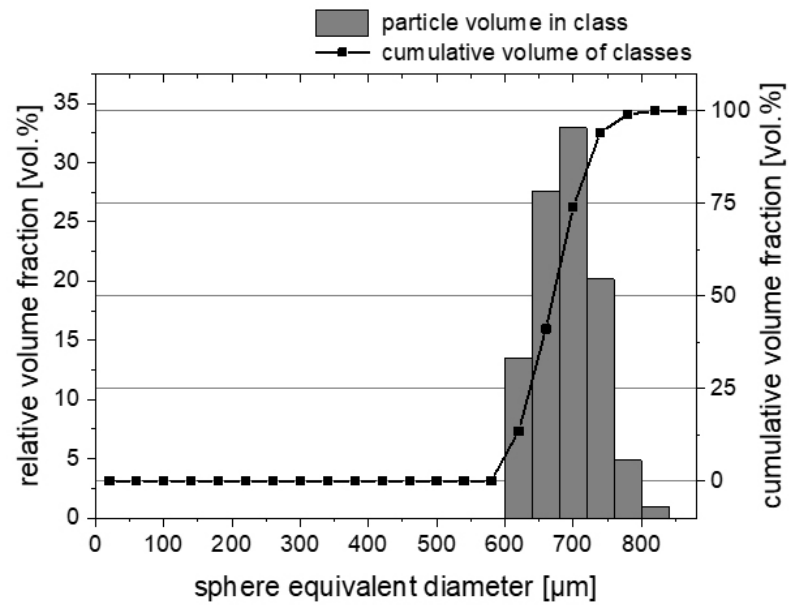
(a) Trockenholztermiten "*Incisitermes marginipennis*" mit Ausscheidungen, (b) zwei ausgeschiedene Pellets mittels Elektronenmikroskop abgebildet



(a) dry wood termites "*Incisitermes marginipennis*" with frass, (b) two frass pellets imaged by electron microscope



## Kugeläquivalentdurchmesser



*μCT Bild von Termiten ausgeschiedenen Pellets mit Partikelgrößenverteilung (kurze Achse der Pellets)*

*μCT image of termite frass pellets with particle size distribution (short axis of the pellets)*

Abbildung (b) dargestellt ist. Die Größe der einzelnen Partikel liegt je nach Termitenart zwischen 0,6-1 mm (lange Achse der Pellets). Abbildung (c) zeigt ein aus Ausscheidungen von Termiten gedrucktes Bauteil.

Untersuchungen die Eigenschaften der Ausscheidungen von Termiten genauer charakterisiert. Die Forschungen dazu bewegen sich an der Schnittstelle zwischen Biologie, Materialwissenschaften und Prozesstechnologie.

Deutlich ist die granulare Struktur durch die einzelnen Partikel zu erkennen, die für einen 3D-Druckprozess ein bis zwei Größenordnungen größer sind als typischerweise verwendete Pulver aus keramischen, metallischen oder polymeren Werkstoffen. Dies ist allerdings nicht unbedingt nachteilig, da z.B. durch größere Pulver hohe Schichtdicken und somit höhere Aufbauraten erreicht werden können. Um eine ausreichende Festigkeit des Bauteils zu erreichen, die letztlich auch für eine Anwendung z.B. als Möbel gefordert ist, kann das gedruckte Bauteil mit einem Binder zusätzlich infiltriert werden. Derzeit laufen Versuche an der BAM, diese Strukturen mit Baumharzen zu infiltrieren. Ziel dieser Forschungsaktivität ist es, den natürlich aufbereiteten Rohstoff der Termiten weiter als Ausgangsmaterial für den 3D-Druck zu qualifizieren. Zusätzlich werden in laufenden

Droppings of European house borer *Hylotrupes bajulus* and dry wood termites *Incisitermes marginipennis* are known as frass and consist of small pellets with good flowability, which makes them good feedstock for powder-based 3D printing. In this additive manufacturing process, feedstock in powder form is stacked in thin layers, with each layer consolidated locally by injecting a binder. This allows to build up the component layer by layer provided the component is available as a layered data model.

Additive manufacturing is following the trend to use natural raw materials. A further step is the use of

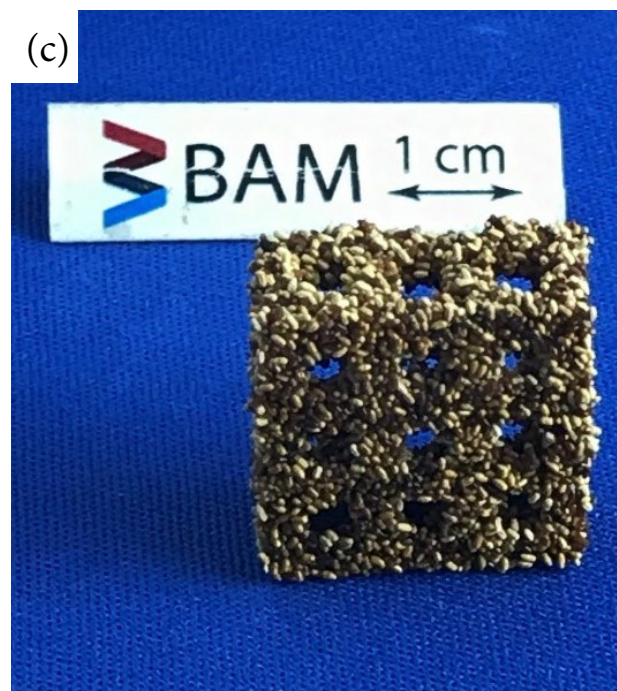
raw materials already pre-processed in the nature, for example droppings processed by insects into pellets suitable for 3D printing. To produce classic feedstocks, elaborate procedures are employed to process material - plastic, metal or ceramic - into powder. Not only does the production of the materials themselves require resources, the preparation of those is energy-consuming, too. In form of powder these materials pose potential risk which is not yet fully understood, as the example of microplastics makes evident. In contrast, processing of natural raw material by insects is resource-efficient and sustainable with no waste products such as too fine particles.

It is also worth noting that compared to wood, frass pellets produced by termites have a particularly high density and their shape allows particularly high packing densities. This seems to be beneficial not only for the termites but also for the 3D printing.

Particularly the frass of dry wood termites is characterised by almost monomodal particle size distribution, as shown in Figure (a) and Figure (b). Depending on the type of termite, the size of individual particles is between 0.6 and 1 mm (long axis of the pellets). Figure (c) shows a component printed from termite frass.

Through individual particles one can clearly recognize the granular structure, which is one to two orders of magnitude larger than the conventional ceramic, metallic or polymeric powders used in 3D printing. However, this is not necessarily a disadvantage as coarser powders can achieve high layer thicknesses and thus higher build-up rates. To achieve sufficient stability of the component, which is ultimately required for applications like furniture, the printed component can be additionally infiltrated with a binder. At present,

experiments are being conducted at BAM to infiltrate these structures with tree resins. The aim of this research is to further qualify the natural raw material processed by termites as feedstock for 3D printing. In addition, the ongoing investigations aim at more accurate characterisation of termite frass properties. Research in this area is carried out at the interface between biology, material sciences and process technology.



*Aus Ausscheidungen von Termiten mittels 3D Druck (Binder Jetting) hergestelltes Bauteil*

*Component produced from termite frass by 3D printing (binder jetting)*

**IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:**

Jens Günster  
Keramische Prozesstechnik und Biowerkstoffe  
Ceramic Processing

Jens.Guenster@bam.de



# SICHERHEIT BEI DER HANDHABUNG UND LAGERUNG ALTERNATIVER UND REGENERATIVER BRENNSTOFFE

## SAFETY IN HANDLING AND STORAGE OF ALTERNATIVE AND RENEWABLE FUELS



*Für mikrokolorimetrische Untersuchungen vorbereitete Proben (gebrauchte Leichtverpackungen)*

*Samples prepared for microcalorimetric analysis (used light packaging)*

Die Nutzung alternativer Brennstoffe zur Energiegewinnung stellt einen Beitrag zum Gelingen der Energiewende dar. Einen wesentlichen Teil alternativer Brennstoffe nehmen sogenannte biogene Festbrennstoffe ein; deren Gewinnung erfolgt in der Regel aus pflanzlichen Rohstoffen, wie z.B. Holz oder weiteren Energiepflanzen. Weiterhin kommt eine Vielzahl von Produkten, die nach ihrer bestimmungsgemäßen Verwendung aufgrund ihrer Beschaffenheit nur mit großem Aufwand in einen Materialkreislauf zurückzuführen wären, für eine energetische Nutzung in Frage. Hierbei handelt es sich um sogenannte Recyclingbrennstoffe.

Die Verarbeitung, Handhabung und Lagerung solcher alternativen Brennstoffe bergen, wie bei allen anderen Materialien auch, Gefahren für Gesundheit und Umwelt. Hier ist insbesondere das Risiko von Bränden und Staubexplosionen sowie die Entstehung toxischer Gase zu nennen.

Die BAM untersucht diese Gefahren mit dem Fokus auf die Vermeidung der sogenannten Selbstentzündung. Diese besteht immer bei der Lagerung großer Mengen brennbarer Stoffe. Eine Besonderheit alternativer Brennstoffe, wie Holzpellets oder Pellets aus



gebrauchten Leichtverpackungen, besteht darin, dass unterschiedlichste Reaktionen als Auslöser für Selbstentzündung dienen können. Dies können u. a. mikrobielle Zersetzung, „Kompostierung“ als auch die Oxidation weiterer Komponenten sein, wie z. B. in den Materialien enthaltene Öle und Harze. Diese vielfältigen und komplexen Reaktionen erschweren sowohl die Beurteilung der auftretenden Gefahren als auch die Festlegung von Schutzmaßnahmen und sicheren Lagerbedingungen. Auf Grund bereits durchgeführter Forschungsprojekte zur sicheren Lagerung von Holzhackschnitzeln und -pellets, Miscanthus (schnellwüchsiges Süßgras, geeignet zur Energiegewinnung) sowie Recyclingstoffen erfolgte der Aufbau eines weltweit einzigartigen Versuchsstandes zur systematischen Untersuchung des Selbstentzündungsverhaltens von halbtechnischen Proben bis zu einer Größe von einem Kubikmeter. In Kombination mit numerischen Methoden wird so eine wesentlich genauere Beurteilung der von zum Teil mehrere tausend Tonnen umfassenden Halden ausgehenden Gefahren ermöglicht.

Neben der Bearbeitung aktueller Fragestellungen wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse auch die Erarbeitung entsprechender internationaler Normen und Regelwerke ermöglicht. Die BAM ist an der Erstellung dieser Normen und diesbezüglicher, für alternative Brennstoffe neu zu entwickelnder Untersuchungsmethoden beteiligt.

---

The use of alternative fuels for energy production contributes to the success of energy system transformation. The so-called solid biofuels make up a substantial part of the alternative fuels; they are usually obtained from plant-based raw materials such as wood or other energy crops. In addition, a large number of products, whose return to the material cycle after use would

require extensive efforts due to their nature, can be used for energy generation. These are so-called solid recovered fuels.

Processing, handling and storage of such alternative fuels, as that of all other materials, pose risks for health and for the environment. In particular, the risk of fires and dust explosions as well as the generation of toxic gases need to be considered.

BAM examines these hazards focussing on the prevention of the so-called spontaneous combustion. This hazard always exists when large quantities of flammable substances are stored. Inherent to alternative fuels such as wood pellets or pellets from the used light packaging is that a wide variety of reactions may trigger spontaneous combustion. These can include microbial decomposition, “composting” and oxidation of other components such as oils and resins contained in the materials. These diverse and complex reactions make it difficult both to assess the existing hazards and to determine the protective measures and safe storage conditions. On the basis of research projects already carried out on the safe storage of wood chips and pellets, miscanthus (fast-growing sweet grass suitable for energy generation) and recycled materials, a unique test facility was set up for the systematic investigation of the spontaneous combustion behaviour of semi-industrial samples of a size up to one cubic metre. In combination with numerical methods, this enables a much more accurate assessment of the hazards posed by stockpiles, some of those weighing several thousand tons.

Beside work on current issues, the acquired knowledge allows to develop the respective international standards and regulations. BAM contributes to working out standards and the related newly developed methods to investigate alternative fuels.

#### IHR ANSPRECHPARTNER/CONTACT:

Martin Schmidt  
Explosionsschutz Gase, Stäube  
Explosion Protection Gases and Dusts

Martin.Schmidt@bam.de



## Impressum

Herausgeber/*Publisher*:  
Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin

Postanschrift/*Address*: 12200 Berlin

Telefon/*Fon*: +49 30 8104-0  
E-Mail: [info@bam.de](mailto:info@bam.de)  
Internet: [www.bam.de](http://www.bam.de)

Redaktion/*Editor*:  
Michelle Unger  
03/2021

Bildnachweis/*Images*:  
S.11 unten rechts, S.13 unten rechts, S.15 unten rechts, S.17, S.19, S.29, S.31, S.39,  
S.42, S.44, S.47 unten rechts: Michael Danner; alle anderen Fotos: BAM





---

Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin, Germany

✉ [Info@bam.de](mailto:Info@bam.de)  
🌐 [www.bam.de](http://www.bam.de)