

1 ▶
Mobile phones
after they have been
fragmented with the
shock wave technology
from ImpulsTec

Handys, nachdem
sie mit der Schock-
wellentechnologie von
ImpulsTec zerlegt wurden

Photo: ImpulsTec GmbH



Innovative recycling with shock wave technology

- ▶ High-grade waste electronics or solar modules contain recyclables (Au, Ag, Pd, Cd, Te) in small concentrations. Classical recycling procedures are increasingly reaching their limits when it comes to profit-maximizing recycling. The process developed by ImpulsTec GmbH, on the other hand, takes a new approach in order to optimize existing business models: with innovative shock wave fragmentation, recyclables in complex industrial materials can be mechanically exposed and concentrated for more efficient recycling – this is a future technology with huge application potential.

Innovativer Recyclingansatz mittels Schockwellenzerkleinerungstechnologie

- ▶ In hochwertigem Elektronikschrott oder Solarmodulen liegen Wertstoffe (Au, Ag, Pd, Cd, Te) in geringer Ausgangskonzentration vor. Klassische Recyclingverfahren stoßen dabei für eine gewinnmaximierende Verwertung zunehmend an ihre Grenzen. Das Verfahren der ImpulsTec GmbH hingegen verfolgt einen neuen Ansatz zur Optimierung bestehender Geschäftsmodelle: Durch die innovative Schockwellenzerkleinerung können Wertstoffe komplexer Industriematerialien für effizientere Verwertungsprozesse maschinell freigelegt und angereichert werden – eine Zukunftstechnologie mit hohem Anwendungspotenzial.

Authors/Autoren

Dipl.-Ing. Stefan Eisert, Geschäftsführer der ImpulsTec GmbH
M.Sc. Janina Bartkowski, Assistenz Marketing, ImpulsTec GmbH
www.impulstec.com

With the help of light pulses generated by means of high-voltage discharges, ImpulsTec GmbH, the young German technology company, can fragment a large number of complex industrial materials into their individual components in just seconds. For this purpose, the material to be fragmented is placed in a container filled with water. During the treatment process in this fragmentation vessel, so-called shock waves are generated. As they propagate, these intensive shock waves impact the material to be fragmented, leading to its fragmentation. With reference to the example of mobile phones, the achievable effect can be illustrated particularly impressively (**Fig. 1**). After just a few seconds, the phone fractures at the joints of the casing and is fragmented into its main components (shell of the casing, circuit board, display, keypad, etc.). With continuing shock wave treatment, electrical components can be gently detached from the circuit board. What was previously only possible by hand can now be realized by machine for the first time. Accordingly, for selective material separation, the shock wave process offers a promising alternative to conventional fragmentation processes.

Mit Hilfe von Lichtblitzen, welche mittels Hochspannungsentladungen generiert werden, kann das junge deutsche Technologieunternehmen ImpulsTec GmbH eine Vielzahl komplexer Industriematerialien innerhalb weniger Sekunden in seine Einzelteile zerlegen. Dazu wird das zu zerkleinernde Material in einen mit Wasser gefüllten Behälter gegeben. In diesem Zerkleinerungsreaktor werden dann während des Behandlungsprozesses sogenannte Schockwellen erzeugt. Diese intensiven Druckwellen treffen bei ihrer Ausbreitung auf das zu zerkleinernde Material und führen zu dessen Zerkleinerung.

Am Beispiel von Mobiltelefonen lässt sich der erzielbare Effekt besonders eindrucksvoll verdeutlichen (**Bild 1**). Bereits nach wenigen Sekunden bricht das Handy an den Fügstellen des Gehäuses auf und wird in seine Hauptkomponenten (Gehäuseschalen, Leiterplatte, Display, Tastatur, etc.) zerlegt. Durch eine fortschreitende Schockwellenbehandlung können auch elektrische Bauteile schonend von der Leiterplatte abgelöst werden: Was bisher nur händisch möglich war, kann nun erstmals maschinell



◀ 2
EHF 400 shock wave fragmentation system of the Fraunhofer IWKS Project Group in Alzenau

Schockwellenzerkleinerungsanlage EHF 400 der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS in Alzenau
Photo: ImpulsTec GmbH

A current user of the ImpulsTec technology is the German recycling company Lars Walch GmbH & Co. KG based in Baudenbach. At the certified waste management company, the innovative shock wave fragmentation system is used mostly where classical shredders and crushers fall short. "In our view, the shock wave fragmentation of ImpulsTec GmbH is suitable especially for the fragmentation of metal-ceramic composites as well as electronic scrap. The main advantage here is the clean separation of components with low and high recyclables content so that these can be recycled more efficiently downstream," reports Matthias Walch, head of electronic waste recycling at Lars Walch GmbH & Co. KG. With the Fraunhofer IWKS Project Group for Material Recycling and Resources Strategy, ImpulsTec GmbH has developed new recycling processes on the basis of this technology in order to open up other applications, e.g. the recycling of solar modules. Together the R&D partners plan to upscale this technology for industrial application. "We believe that shock wave technology has great application potential for solar cell recycling as it enables efficient separation of material composites. With shock waves, not only have we achieved complete exposure of the semiconductor films but also chemical-free detachment of the semiconductor films from the glass and the polymer film. The valuable semi-conductor materials can thus be separated in simple, physical separation processes and then recy-

ausgeführt werden. Damit bietet das Schockwellenverfahren für die selektive Materialtrennung eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Zerkleinerungsverfahren.

Ein aktueller Anwender der ImpulsTec-Technologie ist das fränkische Recyclingunternehmen Lars Walch GmbH & Co. KG aus Baudenbach. Beim zertifizierten Entsorgungsbetrieb findet die innovative Schockwellenzerkleinerungsanlage meist dort Anwendung, wo klassische Shredder bzw. Brecher versagen. „Die Schockwellenzerkleinerungstechnologie der ImpulsTec GmbH eignet sich aus unserer Sicht besonders für die Zerlegung von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen sowie für Elektronikschrott. Der Hauptvorteil dabei ist die saubere Trennung von wertstoffarmen und wertstoffreichen Bestandteilen, so dass diese dann im Anschluss effizienter verwertet werden können“, berichtet Matthias Walch, Leiter Elektroschrottreycling der Lars Walch GmbH & Co. KG.

Mit der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS entwickelte ImpulsTec GmbH neue Recyclingverfahren auf Basis dieser Technologie, um weitere Anwendungsbereiche wie beispielsweise das Recycling von Solarmodulen zu erschließen. Zusammen planen die FuE-Partner, diese Technologie auf großindustrielle Maßstäbe zu übertragen. „Die Schockwellentechnologie besitzt aus unserer Sicht ein hohes Anwendungspotenzial für das Solarzellenrecycling, da sie eine effiziente Auftrennung von Werkstoffverbunden ermöglicht. Mittels Schockwellen ist uns nicht nur eine vollständige Freilegung der Halbleiterschichten gelungen, sondern zusätzlich auch eine chemikalienfreie Ablö-

Clean separation of components with low and high recyclables content

ung der Halbleiterschichten vom Glas und von der Polymerfolie. Die wertvollen Halbleitermaterialien können so über einfache, physikalische Trennverfahren separiert und anschließend effizient aufbereitet werden. Zusammen mit der ImpulsTec GmbH soll nun die Aufskalierung des gesamten Recyclingverfahrens zu einem großindustriellen Prozess umgesetzt werden“, so Andreas Bittner, Geschäftsfeldleiter der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS.

1 The process

The innovative fragmentation process of ImpulsTec GmbH uses a mechanical shock wave generated in a liquid medium to effect a fragmentation of the material. The shock waves are generated with the help of the electrohydraulic effect, a short-time arc being ignited in a liquid between two electrodes. For this purpose, capacitors are charged to the necessary working voltage up to 50 kV and then, by means of a spark gap, this is relayed to the electrode system of the fragmentation vessel. The so-called "impulse discharge" generates a rapidly expanding plasma channel that causes a radially propagating shock wave in the liquid. At the point of origin of the shock wave, pressures of several thousand atmospheres are generated, which decrease with the expansion of the shock front over the further course of time. Via the shock wave propagating in the fragmentation medium, the electrohydraulic fragmentation process impacts the material to be fragmented. In this way, there is no

ung der Halbleiterschichten vom Glas und von der Polymerfolie. Die wertvollen Halbleitermaterialien können so über einfache, physikalische Trennverfahren separiert und anschließend effizient aufbereitet werden. Zusammen mit der ImpulsTec GmbH soll nun die Aufskalierung des gesamten Recyclingverfahrens zu einem großindustriellen Prozess umgesetzt werden“, so Andreas Bittner, Geschäftsfeldleiter der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS.

1 Das Verfahren

Das innovative Zerkleinerungsverfahren der ImpulsTec GmbH bedient sich mechanischer Schockwellen, welche in einem flüssigen Medium generiert werden, um eine Zerkleinerung des Materials zu bewirken. Die Schockwellen werden mit Hilfe des elektrohydraulischen Effekts erzeugt, indem in einer Flüssigkeit zwischen zwei Elektroden ein kurzzeitiger Lichtbogen gezündet wird. Dazu werden Kondensatoren auf die benötigte Arbeitsspannung von bis zu 50 kV aufgeladen und im Anschluss mittels einer Funkenstrecke auf das Elektrodensystem des Zerkleinerungsreaktors geschaltet. Die sich daraufhin ausbildende sogenannte „Stoßentladung“ erzeugt einen rapide expandierenden Plasmakanal, der in

direct contact, so the procedure can be described as a non-contact separation process.

Unlike the classical grinding processes with solid grinding media, the energy input is not concentrated at the impact point of the tool, but evenly distributed over the entire surface of the component. This is described as homogeneous energy input. It results in fractures primarily at the mechanically weakest points of the composite component.

Further, the energy input is selective in respect of acoustic material properties. The shock wave input into the material to be fragmented propagates through the solid body similar to a sound wave. At boundary surfaces to materials with different acoustic impedances, pressure is increased as a result of transmission and reflection, which additionally reinforce the fracturing effect. As a function of the sign of the impedance difference, there results a phase inversion of the reflected wave. This causes tensile stress at the boundary surface and effects fractures precisely at these material boundary surfaces.

The third selectivity of shock wave generation takes effect at the electrically conductive parts in the material to be fragmented. If electrically conductive materials are present in the composite, the arc generated in the process medium is diverted through the conductive components. This effects additional selective input of the energy in electrically conductive areas of the material to be fragmented. Thanks to its high material selectivity, the shock wave process is predestined for application to complex material composites.

ImpulsTec GmbH has successfully commercialized high-voltage impulse technology in recent years and offers its customers shock wave fragmentation systems that can be used industrially as well as

der Flüssigkeit sich radial ausbreitende Schockwellen hervorruft. Am Entstehungsort treten dabei Drücke von einigen tausend Atmosphären auf, welche mit der Expansion der Schockfront im weiteren zeitlichen Verlauf abnehmen. Das elektrohydraulische Zerkleinerungsverfahren koppelt über die im Zerkleinerungsmedium propagierende Schockwelle an das Zerkleinerungsgut an. Dadurch ergibt sich kein direkter Kontakt, so dass von einem berührungsfreien Trennverfahren gesprochen werden kann.

Im Gegensatz zu klassischen Mahlverfahren mit festen Mahlkörpern erfolgt der Energieeintrag nicht

Fractures occur at the mechanically weakest points of the composite component

konzentriert am Auftreffpunkt des Werkzeugs, sondern gleichverteilt über die gesamte Oberfläche des Bauteils. Man spricht von einem homogenen Energieeintrag. Dadurch treten Brüche vorzugsweise an der mechanisch schwächsten Stelle des Verbundbauteils auf.

Weiterhin existiert eine Selektivität des Energieeintrages hinsichtlich akustischer Materialeigenschaften. Die in das Zerkleinerungsgut eingekoppelte Schockwelle propagiert durch den Festkörper ähnlich einer Schallwelle. An Grenzflächen zu Materialien mit differierenden akustischen Impedanzen treten Druckerhöhungen durch Transmission und Reflexion auf, die die Bruchbildung zusätzlich verstärken. In Abhängigkeit vom Vorzeichen des Impedanzunterschiedes kommt es dabei zu einer Phaseninversion der reflektierten Welle. Dies bedingt eine Zugspannung an der Grenzfläche und bewirkt bevorzugte Brüche an ebendiesen Materialgrenzflächen.

Die dritte Selektivität der Schockwellengenerierung kommt bei elektrisch leitfähigen Bestandteilen im



3
Universal applicability to a wide range of models (smart phones)

Universelle Anwendbarkeit auf verschiedenste Bauformen (Smartphones)

Photo: ImpulsTec GmbH

application-specific adaption and scaling of the application (Fig. 2). With the EHF 400 universal shock wave fragmentation system developed by ImpulsTec GmbH, depending on the materials to be treated, throughput rates between 50–175 kg/h and running costs in the range of 0.15–0.75 €/kg can be achieved.

2 Case study – high-grade waste electronic equipment

Ever shorter product lifecycles with at the same time wide variety of product types as well as the falling precious metal revenue on account of low raw material prices present recyclers with ever new challenges for the recycling of complex electronic equipment. The raw material potential can be illustrated with reference to the example of mobile phones. One tonne of scrap mobile phones contains around 200–250 g gold, that is approx. 40 times the concentration of precious metals of a tonne of gold ore. The mobile phone with its high content of gold, silver, palladium and copper is a prime example of high-grade electronic equipment. However, notebooks and digital cameras also boast a particularly high content of recyclables. In mobile phones, the value metals are found especially in the circuit board and other components, such as the speakers, microphone or gold-plated contacts. According to studies, a mobile phone has, depending on its age and type, recycling revenue

**One tonne of scrap mobile phones
contains around 200–250 g gold**

of 9–14 €/kg. In comparison with that, the revenue for laptops is just 3 €/kg. Depending on the model, mobile phones consist of up to 56 % plastics, 25 % metals and 16 % glass or ceramic. The precious metal content only makes up part of this, that is well under one mass percent (mass%).

2.1 Conventional recycling

In conventional recycling processes, mobile phones are either melted directly or, for the purpose of homogenization, mechanically comminuted in an upstream process step and then thermally processed. With conventional, mechanical fragmentation selective removal of individual, precious-metal-containing components, e.g. gold-plated contacts from the casing components, is only possible to a certain extent, preventing the removal of a clean plastic or metal fraction. Moreover, a loss of the precious metal content caused by the mechanical stresses results in a decrease in value. According to the analyses, the loss in gold with mechanical comminution of small electrical and electronic devices amounts to up to 30 mass%. Mobile phones are therefore usually fed direct to the melting process for recovery of the valuable metals gold, silver, palladium and copper. Low-concentration recyclables (e.g. tantalum) are not recovered in the heat treatment but lost in the

Zerkleinerungsgut zum Tragen. Im Falle von teilweise elektrisch leitfähigen Materialien kommt es zu einer Umleitung des im Prozessmedium erzeugten Lichtbogens durch die leitfähigen Komponenten. Dies bewirkt eine zusätzliche Selektivität der Energieinkopplung auf elektrisch leitfähige Bereiche des Zerkleinerungsguts. Durch seine hohe Materialelektivität ist das Schockwellenverfahren somit prädestiniert für die Anwendung auf komplexe Materialverbände.

Die ImpulsTec GmbH hat diese Hochspannungsimpulstechnologie in den letzten Jahren erfolgreich kommerzialisiert und bietet ihren Kunden industriell einsetzbare Schockwellenzerkleinerungsanlagen sowie eine anwendungsspezifische Adaptierung und Skalierung der Applikation (Bild 2). Mit der universellen Schockwellenzerkleinerungsanlage EHF 400 der ImpulsTec GmbH lassen sich in Abhängigkeit der zu behandelnden Materialien Durchsätze zwischen 50–175 kg/h und Betriebskosten im Bereich von 0,15–0,75 €/kg erreichen.

2 Anwendungsbeispiel: Hochwertige Elektronikgeräte

Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen bei gleichzeitig hoher Produkttypenvielfalt sowie die sinkenden Edelmetallerlöse aufgrund von niedrigen Rohstoffpreisen stellen Recycler vor immer neue Herausforderung bei der Aufarbeitung von komplexen Elektronikgeräten.

Das Rohstoffpotenzial lässt sich am Beispiel von Mobiltelefonen verdeutlichen. So enthält eine Tonne Handschrott mit ca. 200–250 g Gold in etwa das 40fache der Edelmetallkonzentration einer Tonne Golderz. Das Mobiltelefon mit seinen hohen Anteilen an Gold, Silber, Palladium und Kupfer ist dabei ein Paradebeispiel für hochwertige Elektronikgeräte. Daneben weisen allerdings auch Notebooks und Digitalkameras einen besonders hohen Wertstoffgehalt auf. Beim Handy liegen die Wertmetalle vor allem in der Leiterplatte bzw. in weiteren Komponenten wie Lautsprecher, Mikrofon oder vergoldeten Kontakten. Studien zufolge weist ein Handy in Abhängigkeit von Alter und Typ einen Wertstofflerlös von 9–14 €/kg auf. Im Vergleich dazu liegen die Erlöse bei Laptops bei lediglich 3 €/kg. Mobiltelefone bestehen je nach Bauform aus bis zu 56 % Kunststoff, 25 % Metallen und 16 % Glas bzw. Keramik. Die Edelmetallgehalte machen davon nur einen Anteil von deutlich unter einem Masseprozent (Ma%) aus.

2.1 Konventionelles Recycling

Bei konventionellen Recyclingprozessen werden die Mobiltelefone entweder direkt eingeschmolzen oder aber zur Homogenisierung in einem vorgelagerten Prozessschritt mechanisch zerkleinert und anschließend thermisch verwertet. Durch die konventionelle mechanische Zerkleinerung ist das selektive Herauslösen von einzelnen, edelmetallhaltigen Bestandteilen wie z.B. vergoldeten Kontakten aus den Gehäusekomponenten nur bedingt möglich, was die Abtrennung einer sauberen Kunststoff- bzw. Metallfraktion

slag. The plastics fraction, which makes up the largest mass percentage of the mobile phones, is recycled to energy in the melting process.

2.2 Optimized recycling with concentration of recyclables

The innovative shock wave process from ImpulsTec GmbH pursues a completely new solution approach for increasing efficiency in (mobile phone) recycling: as a result of high-grade fragmentation of the phone, precious-metal-free (e.g. plastic case or metal parts) and precious-metal-rich components (e.g. circuit board) are reliably separated from each other so that a concentrated recyclable fraction is formed for the melting process. This is possible thanks to the homogeneous energy input of the spatially distributed shock wave, resulting in increased fracture probability at mechanical weak points.

For the example of the mobile phone, this leads to the casing starting to break up at the joints after few discharges. The required degree of separation can be easily influenced by the number of generated discharges. Besides the actual fragmentation of the mobile phones, the high selectivity of the shock wave process enables the detachment of value recyclables from the plastic casing as well as loosening of components from the circuit board or impurities such as shield plates (Fig. 3). With the non-contact fragmentation in aqueous medium in the shock wave process, there are no significant precious metal losses compared to classical mechanical processing.

The material mix produced can after fragmentation be further processed in all common separation processes. So clean plastic parts, which come primarily from the phone casing, and other inferior quality components can be separated from the recyclables-containing components (circuit board, microphone, speaker, camera, etc.). The separation of recyclable-

verhindert. Des Weiteren wirkt sich der durch die mechanische Beanspruchung auftretende edelmetallhaltige Verlust wertmindernd aus. Untersuchungen zufolge liegt der Goldverlust bei der mechanischen Zerkleinerung von Elektrokleingeräten bei bis zu 30 Ma%. Die Mobiltelefone werden deshalb meist auf direktem Weg dem Schmelzprozess zur Rückgewin-

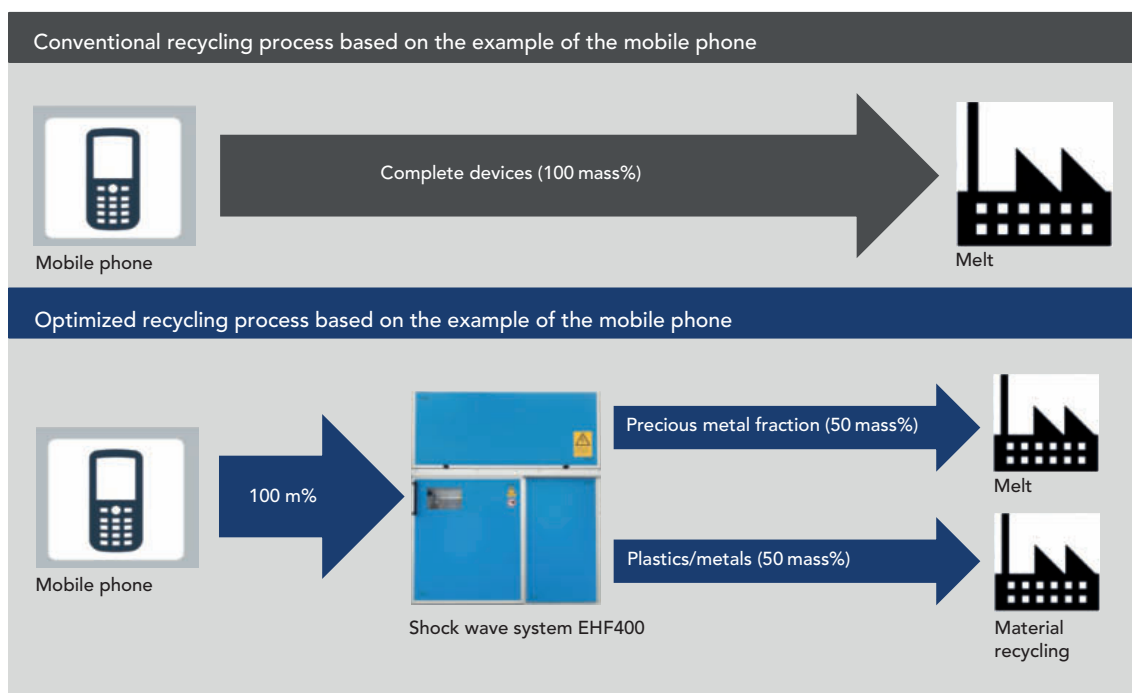
A concentrated recyclable fraction is formed for the melting process

nung der Wertmetalle Gold, Silber, Palladium und Kupfer zugeführt. Niedrig konzentrierte Wertstoffe (z.B. Tantal) werden dabei nicht vergütet und gehen in der Schlacke verloren. Die Kunststofffraktion, welche den größten Masseanteil der Handys ausmacht, wird im Schmelzprozess energetisch verwertet.

2.2 Optimiertes Recycling durch die Anreicherung von Wertstoffen

Das innovative Schockwellenverfahren der ImpulsTec GmbH verfolgt dagegen einen völlig neuen Lösungsansatz zur Effizienzsteigerung beim (Mobiltelefon-) Recycling: Durch eine hochwertige Zerlegung des Handys werden edelmetallfreie (z.B. Kunststoffgehäuse oder Metallteile) und edelmetallreiche Komponenten (z.B. Leiterplatte) zuverlässig voneinander getrennt, sodass eine für den Schmelzprozess angereicherte Wertstofffraktion entsteht. Möglich wird dies durch die homogene Energieeinkopplung der räumlich verteilten Schockwelle. Damit kommt es zu einer erhöhten Bruchwahrscheinlichkeit an mechanischen Schwachstellen.

Am Beispiel des Mobiltelefons führt dies dazu, dass das Gehäuse bereits nach wenigen Entladungen an



4 Process chain of optimized processing based on a shock wave system compared to conventional recycling

Prozesskette der optimierten Aufbereitung mittels Schockwellenanlage im Vergleich zum konventionellen Recycling

Photo: ImpulsTec GmbH

free components enables for the first time concentration of the precious metal starting content prior to the downstream melting process. In this way, more than 50 mass% of the mobile phone can be removed and recycled separately even before refining process (Fig. 4). This mass removal also has financial benefits for the recycler as he only pays the processing fees for the final refining process for the material fraction that actually does contain the precious metal components.

With the help of shock wave fragmentation technology, efficient processing of mobile phones is possible, irrespective of whether smart phones or older models are processed. In the current stage of development, only devices without a battery are

den Fügstellen aufricht. Der gewünschte Auftrennungsgrad kann dabei einfach durch die Anzahl an generierten Entladungen beeinflusst werden. Die hohe Selektivität des Schockwellenverfahrens ermöglicht neben der reinen Zerlegung der Mobiltelefone auch das Herauslösen von Wertstoffen aus dem Kunststoffgehäuse sowie das Ablösen von Komponenten der Leiterplatte oder Störfractionen wie Schirmbleche (Bild 3). Durch die berührungslose Zerkleinerung im wässrigen Medium treten beim Schockwellenverfahren im Vergleich zu klassischen mechanischen Aufbereitungsverfahren keine signifikanten Edelmetallverluste auf.

Das entstandene Materialgemisch kann im Anschluss an die Zerkleinerung mit gängigen Separationsverfahren aufbereitet werden. So können saubere Kunststoffteile, welche hauptsächlich aus dem Handygehäuse stammen, und weitere minderwertige Bestandteile von den wertstoffhaltigen Komponenten (Leiterplatte, Mikrofon, Lautsprecher, Kamera, etc.) getrennt werden. Die Abtrennung von wertstofffreien Komponenten ermöglicht erstmals eine Anreicherung der Edelmetallausgangsgelalte vor dem nachfolgenden Schmelzprozess. Auf diese Weise können mehr als 50 Ma% der Mobiltelefonbestandteile bereits vor dem Raffinationsprozess entfernen und getrennt verwertet werden (Bild 4). Diese Massenentfrachtung wirkt sich für den Recycler auch finanziell vorteilhaft aus, da er lediglich für die Materialfraktion die Aufarbeitungsgebühren für den finalen Raffinationsprozess bezahlt, die auch wirklich edelmetallhaltige Bestandteile beinhalten.

Mit Hilfe der Schockwellenzerkleinerungstechnologie ist eine effiziente Aufarbeitung von unterschiedlichen Mobiltelefonen möglich, ganz gleich ob Smartphone oder ältere Bauform. Im aktuellen Stadium der Entwicklung werden lediglich Geräte ohne Akku behandelt. Das Schockwellenzerkleinerungsverfahren der ImpulsTec GmbH bietet allerdings auch die Möglichkeit der Behandlung von Smartphones mit fest integriertem Akku. Dabei wirkt sich die Arbeitsweise in einem flüssigen Prozessmedium besonders vorteilhaft aus, da durch die Wahl eines geeigneten Zerkleinerungsmediums die Passivierung der in der Lithium-Ionen Batterie enthaltenen Gefahrstoffen sichergestellt werden kann. Neben Mobiltelefonen, welche einen besonders hohen Edelmetallanteil aufweisen, eignet sich das Schockwellenzerkleinerungsverfahren auch für zahlreiche andere hochwertige Elektronikkomponenten wie Laptops oder Digitalkameras. Der Recyclingansatz ist dabei derselbe. Die komplexen Baugruppen werden selektiv zerlegt in ihre wertstoffhaltigen Einzelkomponenten und minderwertige (Gehäuse-)Materialien, welche anschließend getrennt verwertet werden.

The mass removal has financial benefits for the recycler

treated. However, the shock wave fragmentation process from ImpulsTec GmbH also offers the possibility of treating smart phones with built-in battery. Here the operation in a liquid process medium is particularly advantageous as with the selection of an appropriate fragmentation medium, passivation of the hazardous substances contained in the lithium-ion battery can be ensured. Besides mobile phones, which have a particularly high content of precious metals, the shock wave fragmentation process is also suitable for numerous other high-grade electronic components such as laptops or digital cameras. The recycling approach is the same. The complex component assemblies are fragmented selectively into their individual components containing recyclables and inferior (casing) materials, which are then separately recycled.

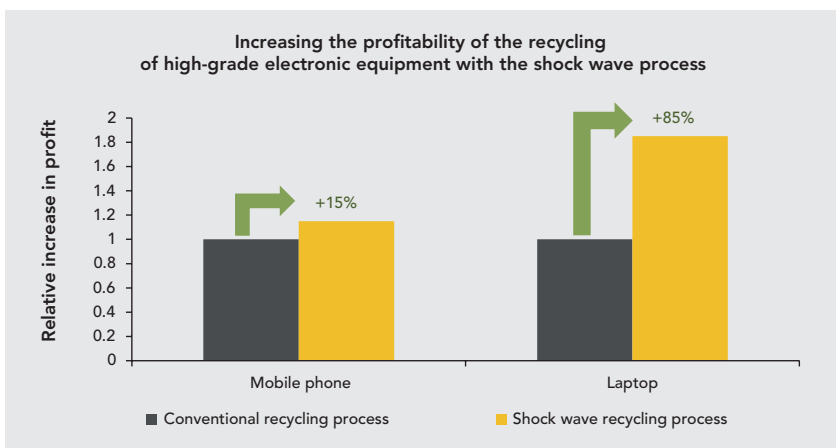
2.3 Feasibility study

In the feasibility study, the revenues of the optimized shock wave recycling process and the conventional recycling process are compared. In the traditional process, the mobile phones are processed as a complete device, which is why the calculations are based

Profit maximization in the processing of high-grade electronic equipment by means of the shock wave recycling process

Gewinnoptimierung bei der Aufarbeitung hochwertiger Elektronikgeräte durch den Schockwellenrecyclingprozess

Photo: ImpulsTec GmbH



2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung wurden die Erlöse des optimierten Schockwellenrecyclingprozesses und des konventionellen Verwertungsverfahrens gegenübergestellt. Im klassischen Prozess werden

on market-typical sales revenues for mobile phones. In the costing of the optimized mobile phone recycling with the application of shock wave fragmentation, the revenues from the heat-treated recyclables from the melting process (Au, Ag, Pd, Cu) minus the processing fees incurred, the running costs of the fragmentation system as well as upstream and downstream process steps are taken into account. Starting from the current raw material prices, there results a profit increase thanks to the optimized recycling pro-

die Mobiltelefone als komplettes Gerät verwertet, weshalb als Referenz mit marktüblichen Verkaufserlösen für Handys kalkuliert wurde. In der Kostenrechnung des optimierten Mobiltelefonrecyclings unter Nutzung der Schockwellenzerkleinerung spiegeln sich die Erlöse aus den vergüteten Wertstoffen des Schmelzprozesses (Au, Ag, Pd, Cu) abzüglich der dafür fälligen Aufarbeitungsgebühren, der Betriebskosten der Zerkleinerungsanlage sowie vor- und nachgelagerter Prozessschritte wider. Ausgehend von

den aktuellen Rohstoffpreisen ergibt sich damit eine Gewinnerhöhung durch den optimierten Recyclingprozess von 15%, was einem Profit im Vergleich zur konven-

The innovative shock wave treatment increases profit by up to 85%

cess of 15%, which corresponds to a profit of around 1.00 €/kg mobile phone compared to conventional recycling. In the treatment of laptops, the relative profit increase is around 85%, i.e. 0.25 €/kg (Fig. 5). The biggest challenge in the recycling of mobile phones are the low collection and waste volumes. In the last few years around 1.8 billion mobile phones have been sold worldwide (in Germany around 25 million devices). But only a fraction, namely less than 5% of scrapped mobile phones, find their way into recycling processes. The large part disappears into drawers or is exported as reuse phones into developing countries. With the help of the plant engineering from ImpulsTec GmbH, the optimized recycling process for mobile phones can be made cost-efficient even for smaller volumes. With the current generation of systems, around 50–75 kg mobile telephones per hour are processed. However, a larger market for the application of shock wave technology is given by laptops or tablets with around 375 million devices sold worldwide in 2014 (in Germany a good 5 million devices were sold in 2014). According to calculations, investment in a shock wave system from ImpulsTec GmbH pays off, based on 80% system utilization and single-shift operation, already after 2.5 years for the processing of mobile phones and after around 3 years in the case of notebooks. The concentration of recyclables by means of efficient primary fragmentation prior to the final metallurgical melting process presents also with regard to economic aspects a promising alternative for more efficient recycling of high-grade electronic devices.

3 Case study: solar modules

Another application of shock wave technology is the recycling of photovoltaic modules. Solar modules are complex industrial products composed of mainly glass (74–95%), semi-conductor film (approx. 1–200 µm in thickness) and polymer film (3.5–10%). A differentiation is made between crystalline silicon modules and thin-film modules in which the semi-conductor films usually consist of cadmium telluride (CdTe), copper-indium-diselenide (CIS) or copper-indium-gallium-diselenide (CIGS).

tionellen Verwertung von etwa 1,00 €/kg Mobiltelefon entspricht. Bei der Behandlung von Laptops beträgt die relative Gewinnsteigerung etwa 85%, d.h. 0,25 €/kg (Bild 5).

Die größte Herausforderung beim Recycling von Mobiltelefonen sind die geringen Sammel- und Abfallmengen. Weltweit wurden in den letzten Jahren jeweils etwa 1,8 Mrd. Mobiltelefone verkauft (in Deutschland ca. 25 Mio. Geräte). Doch nur ein Bruchteil, nämlich weniger als 5% der ausrangierten Mobiltelefone, finden den Weg zurück ins Recycling. Der Großteil verschwindet in Schubladen oder wird als Reuse-Handys in Entwicklungsländer exportiert. Mit Hilfe der Anlagentechnik der ImpulsTec GmbH kann das optimierte Recyclingverfahren für Mobiltelefone bereits für kleinere Menge kosteneffizient gestaltet werden. Mit der aktuellen Anlagengeneration können demnach etwa 50–75 kg Mobiltelefone pro Stunde aufgearbeitet werden. Einen größeren Markt für die Anwendung der Schockwellentechnologie stellen dagegen Laptops oder Tablets mit weltweit etwa 375 Mio. und in Deutschland gut 5 Mio. verkaufter Geräte im Jahr 2014 dar. Eine Investition in eine Schockwellenanlage der ImpulsTec GmbH amortisiert sich Berechnungen zufolge bei 80%iger Anlagenauslastung und einschichtigem Betrieb für die Aufarbeitung von Mobiltelefonen bereits nach 2,5 Jahren und für Notebooks nach etwa 3 Jahren. Die Anreicherung von Wertstoffen durch eine effiziente Vorzerkleinerung vor dem finalen schmelzmetallurgischen Verwertungsprozess stellt damit auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einen potenzialreiche Variante für ein effizienteres Recycling von hochwertigen Elektronikgeräten dar.

3 Anwendungsbeispiel: Solarmodule

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Schockwellentechnologie ist das Recycling von Photovoltaikmodulen. Solarmodule sind komplexe Industrieprodukte und bestehen hauptsächlich aus Glas (74–95%), Halbleiterschicht (ca. 1–200 µm dick) und Polymerfolie (3,5–10%). Dabei unterscheidet man zwischen kristallinen Siliziummodulen und Dünnschichtmodulen, bei denen die Halbleiterschichten meist aus Cadmiumtellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Disele-

6 ▶
Separation of the solar module at the boundary surface between front glass, semi-conductor film and polymer film

Auftrennung des Solarmoduls an der Grenzfläche zwischen Frontglas, Halbleiterschicht und Polymerfolie

Photo: ImpulsTec GmbH



Despite the solar boom in recent years, comparatively small volumes of waste have been produced so far. The steadily increasing solar module waste currently comes from rejects from module production. On the basis of the forecast technical lifetime of the modules of 20–30 years, however, increased volumes of waste of well over than one million tonnes of end-of-life modules per year can be expected over the next 10–15 years.

3.1 Conventional recycling

Known recycling processes for photovoltaic modules use mostly a combination of mechanical, thermal and chemical process steps for recovery of the semi-conductor films (Si, CdTe, etc.) and the glass fraction. On account of the low recyclables content of a solar module, the corresponding recycling costs cannot usually be financed solely from the revenue of the recovered materials. For CdTe-thin-film modules, already on sale of the modules, a commensurate percentage for the financing of the later recycling is taken into account. Considerable potential for optimization is provided by a more efficient separation of the solar modules with the aim of liberating the semi-conductor films because this simplifies the downstream recovery steps. As the semi-conductor film is sometimes only a few micrometres thick, the break-up of the composite precisely at this interface is a particular challenge.

nid (CIS) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) bestehen.

Trotz des Solarbooms der letzten Jahre fielen bei den Solarmodulen bislang vergleichsweise geringe Abfallmengen an. Der stetig wachsende Solarmodulabfall stammt aktuell hauptsächlich vom Ausschuss aus der Modulproduktion. Auf Basis der prognostizierten technischen Lebensdauer der Module von 20–30 Jahren ist in den kommenden 10–15 Jahren allerdings mit erhöhten Abfallmengen von deutlich mehr als einer Million Tonnen Altmodule pro Jahr zu rechnen.

3.1 Konventionelles Recycling

Bekannte Recyclingverfahren für Photovoltaikmodule nutzen meist eine Kombination aus mechanischen, thermischen und chemischen Prozessschritten zur Rückgewinnung der Halbleiterschichten (Si, CdTe, etc.) und der Glasfraktion. Aufgrund der geringen Wertstoffgehalte eines Solarmoduls lassen sich die entsprechenden Recyclingkosten meist jedoch nicht allein über die Erlöse der rückgewonnenen Rohstoffe finanzieren. Bei CdTe-Dünnschichtmodulen wird deshalb bereits beim Verkauf der Module eine entsprechende Umlage für die Finanzierung des späteren Recyclings berücksichtigt.

Ein erhebliches Optimierungspotenzial bietet eine effizientere Auftrennung der Solarmodule mit dem Ziel der Freilegung der Halbleiterschichten, weil dies

ImpulsTec GmbH

ImpulsTec GmbH was spun off from the research department of a photovoltaic group in 2014 to market the high-potential and widely applicable shock wave technology. Focus is on the development and realization of shock wave fragmentation systems for different areas of application.

The innovativeness and technological expertise of this young high-tech company based in Dresden is reflected in patents, which at the same time assure the company's market leadership in the field of shock wave fragmentation.

ImpulsTec GmbH

Die ImpulsTec GmbH wurde 2014 aus der Forschungsabteilung eines Photovoltaikkonzerns ausgegliedert, um die potentialreiche und breit anwendbare Schockwellentechnologie zu vermarkten. Hauptfokus liegt dabei auf der Entwicklung und Realisierung von Schockwellenzerkleinerungsanlagen für unterschiedliche Anwendungsgebiete.

Die Innovationskraft und technologische Kompetenz des jungen HighTech-Unternehmens aus Dresden spiegelt sich in den Patenten wieder, welche gleichzeitig die Marktführerschaft auf dem Gebiet der Schockwellenzerkleinerung sichern.

3.2 Optimized recycling by exposure of the recoverable films

First tests at ImpulsTec GmbH shows that the shock wave technology exhibits high separation selectivity for photovoltaic modules too. Together with the Fraunhofer Project Group for Materials Recycling and Resource Strategies (IWKS), an optimized recycling process was developed for solar modules on the basis of the innovative shock wave process. This enables the selective separation at the boundary surface between the front glass-semiconductor-polymer film and therefore the exposure of the high-recyclables semi-conductor film in a purely mechanical process (Fig. 6). The better accessibility of the material film has a positive influence especially for downstream chemical recovery steps.

Moreover, the Fraunhofer IWKS Project Group obtained with its first industrially applicable pilot plant from ImpulsTec GmbH and longer treatment duration almost complete separation of the semiconductor film from the front glass. With the help of the shock wave process is therefore not only possible to efficiently liberate the semiconductor materials, but separate these almost completely as a consequence (Fig. 7).

Universal applicability for different thin film and silicon module types

With the use of simple separation process downstream of the fragmentation, it proved possible to remove clean glass and the polymer film from the material mix. The semiconductor material could be concentrated in the fine fraction and recovered either by means of downstream chemical processes or conventional physical separation processes. A key advantage of the developed process is its universal applicability for different thin film and silicon module types. The liberation and concentration of the semiconductor materials forms the basis for new recycling models for photovoltaic modules.

3.3 Economic efficiency

According to forecasts, with the application of shock wave fragmentation a cost reduction of around 12% for thin film modules and 6% for crystalline silicon modules can be achieved compared with conventional recycling processes (Fig. 8). The main reason for this is the improved accessibility of the semi-conductor films thanks to their efficient liberation and the associated simplification of the downstream chemical treatment. With the concentration of the semi-conductor material as a result of the previous separation of the clean glass fraction, the starting concentration of the recyclables is increased for the final chemical processing, therefore contributing to an increase in efficiency.

This novel processing approach of the Fraunhofer IWKS Project Group and ImpulsTec GmbH therefore offers potential for improvement as an extension

die nachfolgenden Rückgewinnungsschritte vereinfacht. Da die Halbleiterschicht teilweise nur wenige Mikrometer dick ist, stellt das Aufbrechen des Verbundes an ebendieser Grenzschicht eine besondere Herausforderung dar.

3.2 Optimiertes Recycling durch Freilegung der Wertstoffschichten

Erste Versuche bei der ImpulsTec GmbH zeigten, dass die Schockwellentechnologie auch für Photovoltaikmodule eine hohe Trennselektivität besitzt. Zusammen mit der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS wurde daraufhin ein optimierter Recyclingprozess für Solarmodule auf Basis des innovativen Schockwellenverfahrens entwickelt. Hierbei wird die gezielte Auftrennung an der Grenzfläche zwischen Frontglas-Halbleiter-Polymerfolie ermöglicht und damit das Freilegen der wertstoffreichen Halbleiterschicht auf rein mechanischem Weg (Bild 6). Die bessere Zugänglichkeit der Wertstoffschicht wirkt sich dabei vor allem für anschließende chemische Rückgewinnungsschritte positiv aus.

Des Weiteren erzielte die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS mit ihrer ersten industriell ausgerichteten Pilotanlage der ImpulsTec GmbH bei längerer Behandlungsdauer auch eine nahezu vollständige Abtrennung der Halbleiterschicht vom Frontglas. Mit Hilfe des Schockwellenverfahrens ist es somit nicht nur gelungen die Halbleitermaterialien effizient freizulegen, sondern diese in der Folge nahezu vollständig abzutrennen (Bild 7).

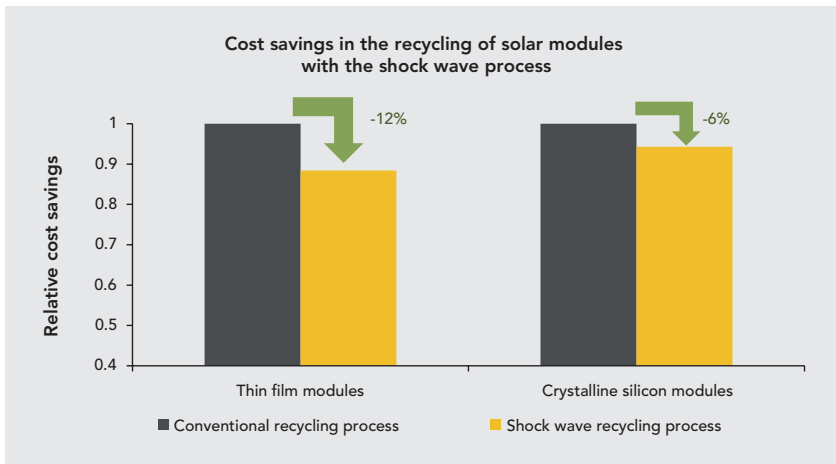
Durch den Einsatz einfacher Separationsverfahren nach der Zerkleinerung gelang es anschließend sauberes Glas sowie die Polymerfolie aus dem Materialgemisch abzutrennen. Das Halbleitermaterial konnte in der Feinfraktion angereichert werden und kann entweder mittels nachgelagerter chemischer Prozesse oder konventioneller physikalischer Trennverfahren zurückgewonnen werden. Ein wesentlicher Vorteil des entwickelten Verfahrens ist die universelle Einsetzbarkeit für unterschiedliche Dünnschicht- und Siliziummodultypen. Die Freilegung und Anreicherung der Halbleitermaterialien stellt dabei die



7 Separation of the semiconductor film from the front glass and concentration in the fines fraction

Abtrennung der Halbleiterschicht vom Frontglas und Anreicherung in der Feinfraktion

Photo: ImpulsTec GmbH



8 ▲ of existing recycling processes of solar modules to expose recyclable layers upstream of the final chemical recovery step. In the design of new recycling process chains, shock wave technology of ImpulsTec GmbH can also be used for the complete processing of solar modules by exclusively mechanical means.

Recycling costs of crystalline silicon and thin film modules for shock wave processes and conventional processes
Recyclingkosten von kristallinen Silizium- und Dünnschichtmodulen für Schockwellenverfahren und konventionelle Prozesse
Photo: ImpulsTec GmbH

4 Conclusion

Thanks to its high separation selectivity, the innovative fragmentation technology from ImpulsTec GmbH offers a wide array of potential commercial applications for waste electronic equipment and solar cells. The separation and liberation of components containing valuable recyclables in complex composite materials will enable completely new, more efficient recycling models in future. Consequently, so far unex-

So far unexploited sources of raw materials can be tapped into

ploited sources of raw materials can be tapped into and developed while profits of existing business models maximized. For the concentration of low-concentrated recyclables in widely varying waste streams, like high-grade electronic equipment, the high-tech process already offers high recycling potential.

Advantages of the shock wave process

- ▶ Homogeneous input of the shock waves into the material to be fragmented
- ▶ Increased fracture behaviour at boundary surfaces of materials
- ▶ High degree of selectivity in the separation of complex materials
- ▶ Low-contamination fragmentation process
- ▶ High degree of automation enables operation without the need for specialist additional qualifications
- ▶ Rugged, scalable technology for use in industrial environments with working voltages to 50 kV

Vorteile des Schockwellenverfahrens

- ▶ Homogene Einkopplung der Schockwellen in das Mahlgut
- ▶ Verstärktes Bruchverhalten an Grenzflächen von Materialien
- ▶ Hohe Selektivitätsgrade bei der Trennung komplexer Materialien
- ▶ Verunreinigungsarmes Zerkleinerungsverfahren
- ▶ Hoher Automatisierungsgrad ermöglicht Betrieb ohne spezielle Zusatzqualifikationen
- ▶ Robuste, skalierbare Technologie für Einsatz im industriellen Umfeld durch Arbeitsspannungen bis 50 kV

Grundlage neuer Aufbereitungsansätze für Photovoltaikmodule dar.

3.3 Wirtschaftlichkeit

Prognosen zufolge lässt sich durch den Einsatz der Schockwellenzerkleinerung im Vergleich zu konventionellen Recyclingprozessen eine Kostenreduktion von etwa 12% bei Dünnschichtmodulen und 6% bei kristallinen Siliziummodulen erzielen (Bild 8). Hauptgrund dafür ist die verbesserte Zugänglichkeit der Halbleiterschichten durch deren effiziente Freilegung und die damit verbundene Vereinfachung der nachfolgenden chemischen Behandlung. Durch die Anreicherung des Halbleitermaterials infolge des vorherigen Abtrennens der sauberen Glasfraktion erhöht sich die Ausgangskonzentration der Wertstoffe für den finalen chemischen Aufbereitungsprozess und trägt damit ebenfalls zu einer Effizienzsteigerung bei. Dieser neuartige Aufbereitungsansatz der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS und der ImpulsTec GmbH bietet somit ein Verbesserungspotenzial als Erweiterung für bestehende Recyclingprozesse von Solarmodulen um die Wertstoffschichten vor dem finalen chemischen Rückgewinnungsschritt freizulegen. Bei der Konzipierung neuer Recyclingprozessketten kann die Schockwellentechnologie der ImpulsTec GmbH zusätzlich auch für die komplette Aufbereitung von Solarmodulen auf rein mechanischem Weg genutzt werden.

4 Fazit

Aufgrund der hohen Trennselektivität bietet die innovative Zerkleinerungstechnologie der ImpulsTec GmbH für Elektronikgeräte und Solarzellen vielfältige kommerzielle Anwendungsmöglichkeiten. Das Auftrennen und Freilegen von werthaltigen Bestandteilen in komplexen Verbundwerkstoffen ermöglicht in Zukunft ganz neue, effizientere Recyclingansätze. Dadurch können sowohl bisher ungenutzte Rohstoffquellen erschlossen als auch Gewinne bestehender Geschäftsmodelle maximiert werden. Für die Anreicherung von niedrigkonzentrierten Wertstoffen in verschiedensten Abfallströmen, wie hochwertigen Elektronikgeräten, bietet das HighTech-Verfahren bereits jetzt ein hohes Verwertungspotenzial.