



---

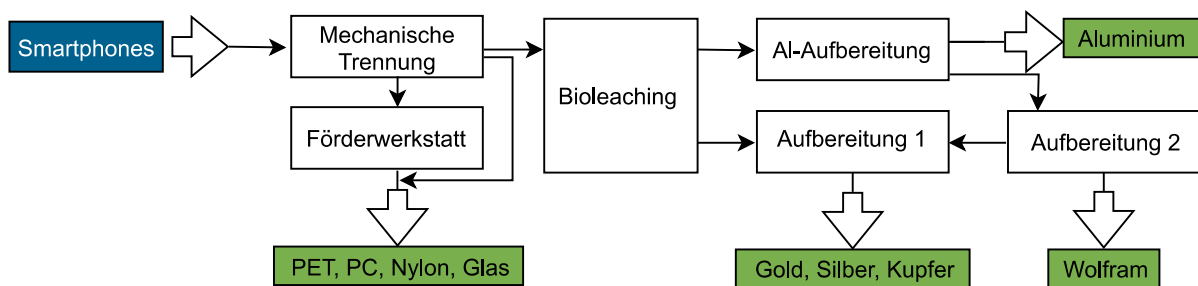
Team: **TUK LTD**

Ferdinand Breit, Simon Eberweiser, Alexander Reihle,  
Johannes Stüber, Christian Weibel

---

## Abstract

Der entwickelte BMR-Prozess (*Biotechnical Metal Recovery Process*) zum Recyclen von Smartphones stellt ein innovatives, nachhaltiges und soziales Konzept zur Umsetzung eines geschlossenen Rohstoffkreislaufes dar. Das Verfahren ermöglicht es über 91 % der in einem Smartphone enthaltenen Rohstoffe zu recyceln. Den zentralen Prozessschritt des Konzeptes stellt dabei das biotechnologische Metallrecycling “Bioleaching” dar. Das entwickelte Verfahren lässt sich in fünf folgenden Prozessschritte einteilen:



Die bereits ohne Akkumulator gelieferten Smartphones werden in der Mechanischen Trennung für die nächsten Verfahrensschritte vorbereitet und die Hauptmassenströme, Glas und Polymere, abgetrennt.

Die Geräte werden nach einer Detektion eines “Machine Vision Kamerasystems“ orientiert und die in Form eines QR- oder Barcodes vorliegende IMEI-Nummer [1] gescannt. Zum Abtrennen einfach zerlegbarer Smartphones werden die QR- und Barcodes mit einer Big-Data-Datenbank, abgeglichen. In dieser Datenbank ist ein Faktor für die Zerlegbarkeit hinterlegt. Einfach zu zerlegende Geräte werden in einer Werkstatt für behinderte Menschen von Hand in die einzelnen Fraktionen Leiterplatten (PCB’s), Metalle, Polymere und Glas zerlegt. Durch Mühlen werden die nicht von Hand demontierbaren Smartphones zerkleinert und optisch sortiert. Die PCB- und Metall-Fraktion wird feingemahlen und in einem biotechnologischen Aufbereitungsprozess, dem Bioleaching, weiterverarbeitet.

Während des Bioleachings werden unter Zuhilfenahme von Mikroorganismen die Metalle Gold, Silber und Kupfer gelöst. Im Sinne von „Green Chemistry“ kann hierdurch der Einsatz von Säuren und Basen reduziert werden. Die Mikroorganismen scheiden Cyanide aus, welche mit den Metallen wasserlösliche Cyanidkomplexe bilden. Kupfer wird zuerst gelöst, danach zeitgleich Gold und Silber. Dadurch werden zwei Lösungen erhalten, eine kupferreiche und eine gold- und silberreiche. Die Lösungen werden der Aufbereitung 1 zugeführt und dort weiter aufgereinigt.

In der Al-Aufbereitung wird der verbleibende Schlamm aus dem Bioleaching mit einer wässrigen Salzsäurelösung versetzt, wodurch sich das Aluminiumoxid löst. Es schließt sich eine Fest-Flüssig-Trennung an. Der feste Rückstand wird der Aufbereitung 2 zugeführt. Das in der wässrigen salzsauren Phase gelöste Aluminiumoxid wird durch Neutralisation mit Natronlauge zu Aluminiumhydroxid gefällt. Der Niederschlag wird abgetrennt, getrocknet und in einem Wirbelschichtofen erneut zu Aluminiumoxid kalziniert. Das Aluminiumoxid wird, mit dem aus der Primäraluminiumgewinnung bekannten Hall-Héroult-Prozess zu hochreinem Aluminium verarbeitet.

In der Aufbereitung 2 wird der feste Rückstand der Aluminiumoxid-Lösung aus der Al-Aufbereitung weiter behandelt. Dieser wird getrocknet, pyrolysiert und hydrometallurgisch weiterverarbeitet. In der Pyrolyse werden der in der mechanischen Aufbereitung nicht abtrennbare Kunststoffanteil der PCB's sowie die im Bioleaching entstandene Biomasse verbrannt. Die dabei entstehende Abwärme wird durch eine Wärmeintegration in den Trocknern genutzt.

Der aus der Pyrolyse kommende Stoffstrom wird hydrometallurgisch behandelt. Dazu wird dieser in Salpetersäure und anschließend in Königswasser gelöst. Der gelöste Stoffstrom wird der Aufbereitung 1 zur Reinmetallgewinnung zugeführt. Der verbleibende ungelöste Rückstand besteht aus Tantal, Wolfram und ihren Oxiden. Die Oxidverbindungen werden einer "magnesiothermischen Reduktion" zugeführt. Der austretende Stoffstrom besteht zu 99,4 Gew.-% aus Wolfram und Tantal.

Eine Trennung dieser Stoffe stellt aufgrund ihrer ähnlichen chemischen Eigenschaften als Refraktärmetalle eine Herausforderung dar. Diese beiden Elemente unterscheiden sich allerdings in ihrer Verdampfungstemperatur. Wolfram verdampft bei höheren Temperaturen als Tantal [2]. Deshalb wird ein sogenanntes "Drip Melting-Verfahren" [3] gewählt, bei welchem Tantal verdampft und reines Wolfram gewonnen wird. Dies ist trotz des notwendigen Energiebedarfs aufgrund des hohen Wolframpreises wirtschaftlich.

In der Aufbereitung 1 werden die aus dem Bioleaching kommenden Edelmetall-Lösungen und der Strom aus der Aufarbeitung 2 mit Zink reduziert. Dabei fallen Gold, Silber und Kupfer aus. Durch elektrolytische Raffinationen werden diese spezifikationsgerecht zu Reinmetallen aufgereinigt.

Der Scale-up des BMR-Verfahrens wird durch den Hauptprozess, dem Bioleaching, bestimmt. Aufgrund der hierbei diskontinuierlichen Fahrweise und der entsprechenden Verweilzeit werden die Massenströme aller Verfahrensschritte festgelegt. Durch die intelligente Verschaltung von acht Fermentern kann ein Umsatz von 25 Millionen Smartphones pro Jahr erreicht werden. Dies entspricht ungefähr der Anzahl an Smartphones, die in Deutschland jedes Jahr verkauft werden [4]. Mit dem Recyceln der nicht mehr verwendeten Smartphones könnte somit ein geschlossener Rohstoffkreislauf entstehen.

Das Verfahren ist im Stande 400 kg/h Smartphones umzusetzen. Dabei fällt ein Goldmassenstrom von 0,8 kg/h an. Allein dessen Verkaufserlös ermöglicht es, das Verfahren wirtschaftlich zu betreiben. Da ein gesamtheitliches Recycling angestrebt wird, werden für alle Komponenten des Smartphones Aufbereitungsschritte konzipiert. Lediglich Tantal kann nicht zurückgewonnen werden. Durch die Erweiterung belaufen sich die endgültigen Anlagenkosten auf ca. 54 Millionen Euro, bei jährlichen Herstellungskosten von 27,5 Millionen Euro. Durch einen Umsatz von 40,2 Millionen Euro ergibt sich ein Gewinn von 12,7 Millionen Euro pro Jahr. Die Amortisationszeit des Prozesses liegt damit bei ca. 4,3 Jahren.

Durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien, anstatt dem aktuellen deutschen Strommix, kann eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission von 91 % erreicht werden. Durch den Ersatz von Erdgas mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen nochmals um weitere 12 % verringert werden.

Das vorgestellte BMR-Verfahren kann wirtschaftlich 91,2 % des Smartphones und 98,2 % der Metalle umweltschonend recyceln. Es setzt auf Kooperationen mit Förderwerkstätten, wodurch die soziale Integration und Wertschätzung beeinträchtigter Menschen unterstützt wird. Aus den zurückgewonnenen hochreinen Metallen und Wertstoffen können erneut Smartphones und andere elektronische Geräte in gleicher Qualität hergestellt werden, wodurch sich eine Kreislaufwirtschaft ergibt. Es wird ermöglicht, in Zukunft den Abbau stark begrenzter Ressourcen und den Ausstoß von CO<sub>2</sub> um ein erhebliches Maß zu reduzieren. Dadurch wird ein großer Schritt in Richtung Ressourcenschutz, Nachhaltigkeit und Umweltschutz getätigt.

## Literaturverzeichnis

- [1] IMEI.INFO: imei.info- Phonedatabase. <https://www.imei.info/phonedatabase/> (Abruf: 07.07.2019).
- [2] Zhang, Y.; Evans, J. R. G.; Yang, S.: Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks. *Journal of Chemical & Engineering Data* 56 (2011), Heft 2, S. 328–337.
- [3] Bohnet, W. J.; Bagley, G. D.: Drip-melting of refractory metals, US2866700A, 1954.
- [4] Statista: Absatz von Smartphones in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2019 (in Millionen Stück).  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77637/umfrage/absatzmenge-fuer-smartphones-in-deutschland-seit-2008/> (Abruf: 07.07.2019).