

# Unsichtbares sehen

Die Laserspektroskopie revolutioniert die chemische Materialanalyse und hilft dadurch, Ressourcen zu schonen.

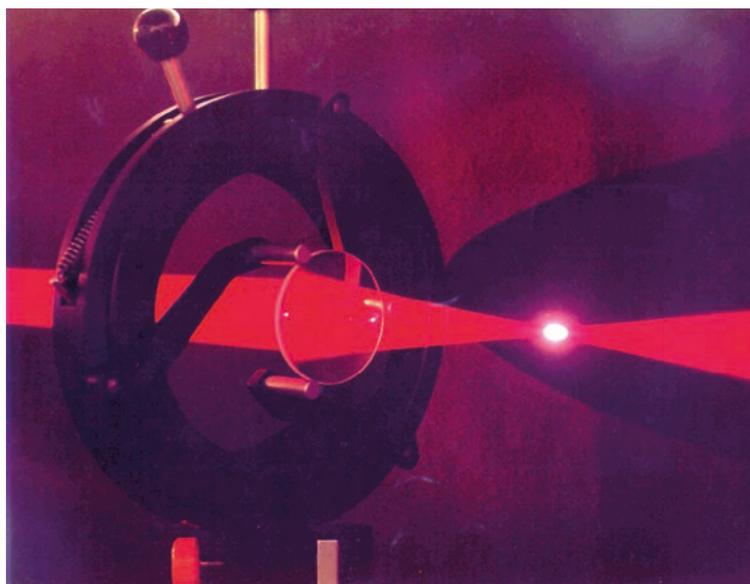
Reinhard Noll

Aus welchen Bestandteilen sich ein Material zusammensetzt, ist mit bloßem Auge nur teilweise zu erkennen. Erst eine chemische Analyse offenbart die enthaltenen Elemente und Verbindungen sowie ihre Konzentrationen. Mit dieser Information lässt sich ein Material identifizieren, bewerten sowie über seine Verarbeitung und Verwendung entscheiden. Dieses Unsichtbare bereits in Sekundenbruchteilen berührungslos sichtbar zu machen, gelingt mittels Laserspektroskopie.

Das Thema Ressourcenverbrauch ist mit Blick auf den Einsatz fossiler Energieträger allgegenwärtig. Im politischen Diskurs über die Energiewende nimmt der Aspekt Materialverbrauch meist nur eine nachrangige Position ein. Die Auswirkungen auf unsere Gesellschaft sind jedoch erheblich, da Industrieproduktion und Konsumgüter essenziell davon abhängen. Materialressourcen sind endlich, sie verknappen mit der Zeit, der Aufwand bei Gewinn und Transport steigt ebenso wie der Energiebedarf, um diese Prozesse anzutreiben.

Unter Materialien verstehen wir hier vor allem Rohstoffe, Mineralien, anorganische und organische Werkstoffe und daraus hergestellte Halbzeuge (also vorgefertigte Rohmaterialien und Werkstücke) sowie Komponenten für Industrie- und Konsumgüter. Das Beispiel Rohstoffe zeigt die dramatische Entwicklung für Deutschland: 99,7 Prozent der Metallerze müssen importiert werden, bei Mineralien sind es 67 Prozent [1]. Dies bedingt Abhängigkeiten von den Erzeugern vor allem aus dem Asien-Pazifik-Raum. Regelmäßig bewertet die EU die Kritikalität von Rohstoffen in Bezug auf das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung [2]. Als kritisch gilt die Situation beispielsweise für Gallium, Kobalt, Lithium, Magnesium, Vanadium, seltene Erden, Platingruppenmetalle, Tantal, Titan und Wolfram.

Daher gilt es, die Gewinnung, Verarbeitung und das Recycling dieser Rohstoffe sowie anderer aus Primärstoffen synthetisierter Materialien zu optimieren. Für Aluminiumwerkstoffe beträgt die globale Recyclingquote nur 42 bis 70 Prozent [3], bei Elektrokleingeräten sind es etwa 58 Prozent – der Rest geht in gemischten Müllfraktionen verloren, landet auf Deponien oder in Müllverbrennungsanlagen [4]. Verluste in den Materialrouten führen zu einem erhöhten Energieaufwand für die Primärgewinnung – bei Aluminium sind diese z. B. 20-fach höher als bei Sekundäraluminium.

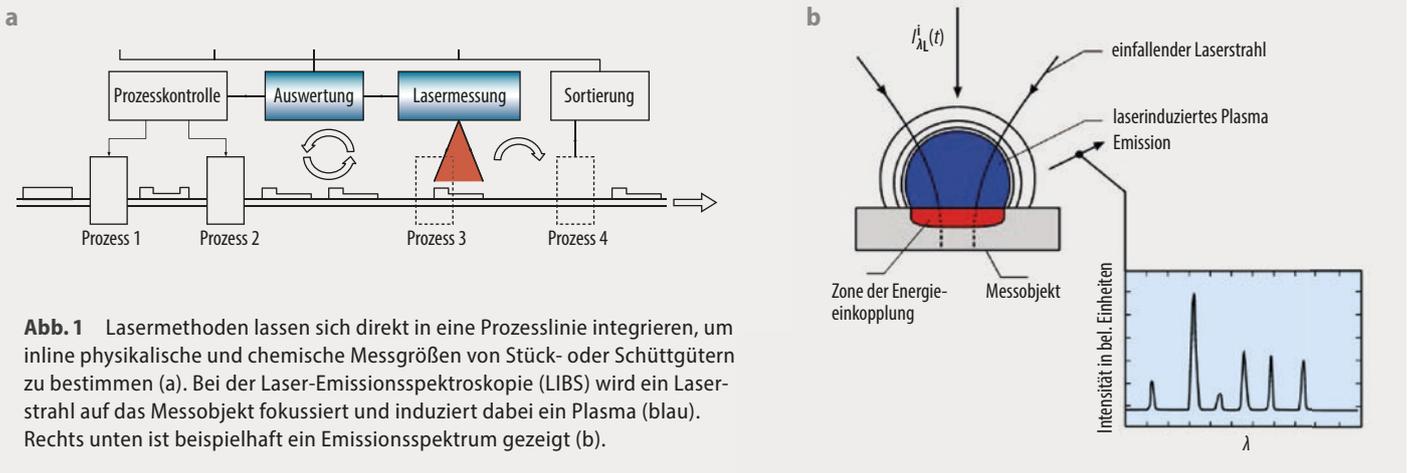


Ein kurzer Impuls eines roten Laserstrahls (von links) induziert in der Umgebungsluft ein Plasma. Dieses erstrahlt fast weiß, da es eine Vielzahl von Wellenlängen emittiert.

Um Materialien effizient zu prozessieren, ist es wichtig, ihre chemische Zusammensetzung zu kennen, bestenfalls vor Ort und in Echtzeit. Erst damit lassen sich Gewinnung, Verarbeitung und Recycling optimieren. Konventionelle analytische Methoden erfordern die Entnahme einer Probe und ihren Transport zu einem Labor oder Analysegerät, um dort die chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Dies bedeutet einen Zeitverzug und die Schwierigkeit, eine aussagekräftige Stichprobe zu nehmen.

## Messen mit Lasern

Berührungslose Messmethoden, die über freie Abstände zu einem Messobjekt von einigen zehn Zentimetern oder gar Metern einsetzbar sind, lassen sich gut in Verfahrenslinien integrieren. Laserstrahlung ist zeitlich und räumlich schnell zu steuern und über optische Elemente in größeren Entfernungen auf ein Objekt zu bündeln. Laserspektroskopische Verfahren liefern in Sekundenbruchteilen berührungslos über Entfernungen bis zu einigen Metern Multielementinformationen fester, flüssiger oder gasförmiger Materialien, die ruhen oder sich bewegen [5]. Ein Beispiel ist der Marsrover Curiosity, dessen ChemCam diese Lasermetho-



den erfolgreich seit fast zehn Jahren einsetzt, um unseren Nachbarplaneten geologisch zu erkunden [6].

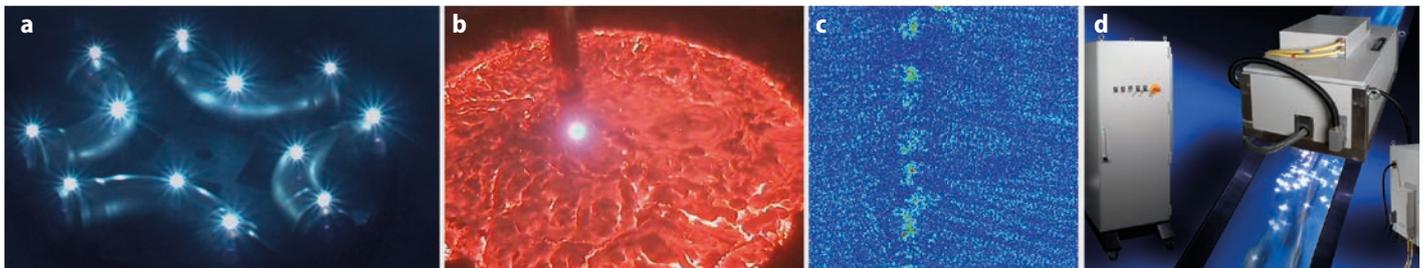
Für industrielle Anwendungen sind Lasermethoden direkt in Verarbeitungslinien für Stück- oder Schüttgüter integriert (**Abb. 1a**). Messobjekte in einer Verarbeitungslinie werden hierbei per Laser gemessen. Ausgehend von den ausgewerteten Messdaten zu Abstand, Geometrie und chemischer Zusammensetzung ist es möglich, vorgelagerte Prozessschritte zu optimieren oder das Messobjekt zu klassifizieren und zu sortieren. Dieser Ansatz ist vielfältig einsetzbar: vom Bergbau über die Aufbereitung von Rohstoffen, die Verhüttung, Metallherzeugung, Halbzeugherstellung, chemische Industrie, Produktionslinien für Konsumgüter bis zur inversen Produktion mit der zielgerichteten Demontage von Konsumgütern und dem Recycling werthaltiger Materialien und Komponenten.

Die Forschung zielt aktuell vor allem darauf ab, die analytische Quantifizierung der spektroskopischen Messungen unter stark variierenden Messbedingungen (Messabstände, Umgebungsatmosphäre oder große Variationsbandbreiten der chemischen Zusammensetzung der Messobjekte) beim Einsatz *in situ* zu steigern sowie die Messfrequenzen bis in den Multikilohertzbereich zu erhöhen. Eine weitere Herausforderung ist der „Blick ins Innere“ eines Materials: Deckschichten an der Oberfläche wie Schmutz, Lacke oder Oxide unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung vom Grundmaterial. Diese

nicht-repräsentativen Schichten sind lokal zu entfernen, um darunter liegende Substanzen zu erreichen.

Im Weiteren geht es vor allem um die Laser-Emissionsspektroskopie (Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS). Ihr historischer Vorläufer ist die von Kirchhoff und Bunsen erfundene spektrochemische Methode, bei der sie erstmals Substanzen in einem Bunsenbrenner zur Strahlungsemission angeregt und diese Emission mit einem Spektrometer beobachtet haben [7]. Sie identifizierten spezifische Linienemissionen chemischer Elemente und entdeckten hierbei neue Elemente.

Statt einer stationären thermischen Quelle nutzt die Laser-Emissionsspektroskopie Nanosekunden-Laserpulse, um die zu analysierende Substanz – weitgehend unabhängig von ihrem ursprünglichen Aggregatzustand – in ein transientes näherungsweise punktförmiges Plasma zu überführen (**Abb. 1b**). Hierbei trägt ein intensiver Laserpuls innerhalb kurzer Zeit Energie in das Targetmaterial ein, sodass eine mikroskopische Materialmenge lokal verdampft, atomisiert, aufgeheizt und in den Plasmazustand überführt wird. Das Emissionsspektrum der im Plasma angeregten Atome und Ionen wird zeitaufgelöst detektiert und ausgewertet. Eine mikrometeregenaue Ortsauflösung resultiert aus der Kenntnis des Probenortes. Bei einem Festkörper verbleibt ein kleiner Krater auf dem Messobjekt. Die abgetragenen Materialmengen betragen etwa 10 ng bis 10 µg. Im strengen Sinne ist die Methode nicht



**Abb. 2** Bei der Verwechslungsprüfung von Rohrkomponenten (a) werden pro Komponente drei Plasmen induziert, deren Strahlung es erlaubt, die enthaltenen Elemente zu bestimmen. Während der In-line-Analyse flüssiger Schlacke aus der Sekundärmetallurgie in einer drei Meter großen Gießpfanne (b) wird das Plasma auf der Schlackenoberfläche aus einem Abstand von mehreren Metern gezündet. Eine Stranggussprobe wurde in einer Schrittweite von 20 µm abgerastert (Scanfeld 40 × 40 mm<sup>2</sup>, c) und an jeder Stelle die Phosphorkonzentration gemessen: Grün entspricht einer hohen Konzentration. Hierbei treten Seigerungen und Dendriten zutage. Die Lasermessung erlaubt es, Legierungen von Schrottstücken direkt auf dem Förderband zu identifizieren (d). Helle Punkte zeigen die induzierten Plasmen auf den sich bewegenden Teilen.

zerstörungsfrei, doch das Messobjekt verändert sich nur vernachlässigbar.

Per Laserstrahlung entsteht eine nahezu ideale Strahlungsquelle für die schnelle Analyse, da das Plasmavolumen nur einen kleinen Raumbereich (Durchmesser  $\leq 100 \mu\text{m}$ ) einnimmt, eine hohe Strahldichte aufweist, an definiertem Ort erzeugt wird und die gesamte Zeitspanne von Plasmaentstehung bis Zerfall nur wenige  $10 \mu\text{s}$  dauert.

Für die Detektion sind Plasmatemperaturen wünschenswert, die zu intensiven Linienemissionen im Spektralbereich von 200 bis 900 nm führen. Dort ist der Absorptionskoeffizient der Luft gering, sodass sich die Plasmaemission einige Meter weit isotrop ausbreitet. Die erforderliche Plasmatemperatur kann über das Wiensche Verschiebungsgesetz abgeschätzt werden. Demnach nimmt die wellenlängenbezogene spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers ein Maximum bei  $\lambda_{\text{max}} = 249,7 \text{ nm} \cdot \text{eV}/kT$  an. Auch wenn das laserinduzierte Plasma kein schwarzer Strahler ist, gibt dieser das Maximum der emittierbaren Linienstrahlung des optisch dünnen Plasmas vor. Für  $\lambda_{\text{max}} = 550 \text{ nm}$  liegt es bei etwa 5500 K. Unter der Annahme eines lokalen thermischen Gleichgewichts wird experimentell die mittlere Temperatur des Plasmas bestimmt: Sie liegt zwischen 5000 und 10 000 K. Doppel- oder Mehrfachpulse können den Plasmazustand gezielt beeinflussen, um das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis im Linienspektrum zu verbessern.

Je nach Zusammensetzung des Messobjekts gibt es dutzende bis zehntausende von Spektrallinien – jede ist einem Element des Periodensystems zuzuordnen. Die Höhe der Linien ist ein Maß für die Konzentration des Elements im Messobjekt. Referenzproben erlauben es, die Messung zu kalibrieren. Aufgrund der zahlreichen Spektralinformationen lassen sich alternativ multivariate Methoden, Hauptkomponentenanalyse, neuronale Netzwerke und Methoden der künstlichen Intelligenz verwenden, um die Spektren quantitativ auszuwerten.

Ein stationärer Laserstrahl und die Bewegung des Messobjekts in mehreren Dimensionen erlauben eine Rasteranalyse, um Elementverteilungen mit Auflösungen im Mikrometerbereich zu bestimmen. Schneller als ein Messobjekt sind die Laserstrahlen per Strahlablenkung zu bewegen. Abtragsgeometrien sind damit gezielt steuerbar, um auch dickere Deckschichten so abzutragen, dass die Zusammensetzung der Deckschicht nicht die induzierten Plasmen des Grundmaterials stört [8].

Bewegliche Laserstrahlen und Messobjekte sind für die Inline-Analyse prädestiniert, weil sie es ermöglichen, Objekte auf einer Förderstrecke bei Geschwindigkeiten von 3 m/s und mehr zu analysieren [5].

### Die chemische Zusammensetzung entschlüsseln

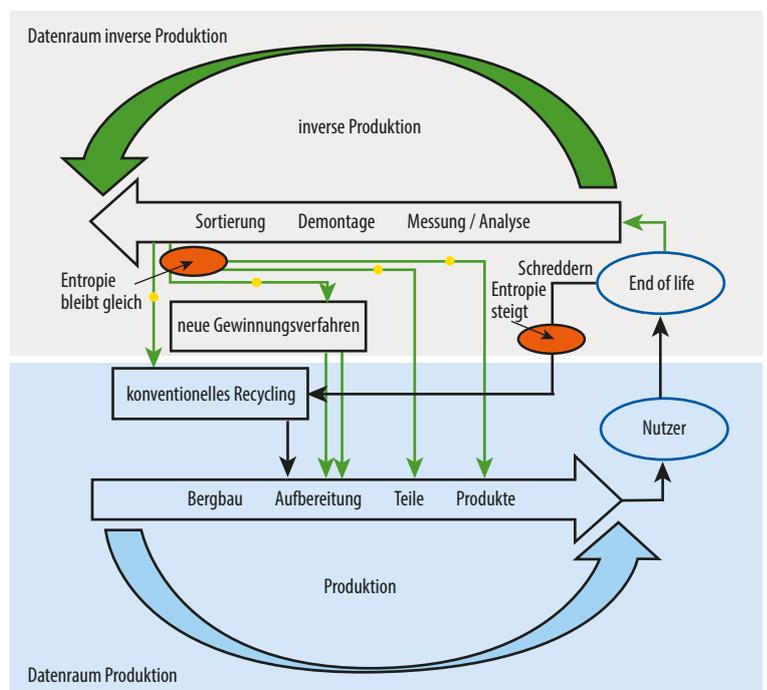
Bei der Prüfung metallischer Halbzeuge werden Rohrkomponenten aus hochlegierten Stählen analysiert, um sicherzustellen, dass keine Materialverwechslungen vorliegen (Abb. 2a). Wenn ein solches Rohr nicht aus dem Sollmaterial besteht oder nicht der geforderten Stahlgüte entspricht, kann dies beispielsweise zu Bauteilversagen führen. Für die Rohre werden abhängig von ihrem Einsatz in

Kraftwerken, Chemieanlagen oder der Lebensmittelindustrie mehr als 30 verschiedene Stahlgüten eingesetzt. Das optische Erscheinungsbild der Halbzeuge offenbart diese nicht. Mittels Laser lassen sich aber in Sekundenbruchteilen bis zu 25 Legierungselemente simultan erfassen. Liegen die Elementkonzentrationen im spezifizierten Bereich, wird die Charge freigegeben und weiterverarbeitet. Andernfalls gilt es, die Teile auszuschleusen.

Die Zusammensetzung flüssiger LD-Schlacken (Rohstahlherstellung nach Linz-Donawitz) bei Temperaturen bis zu 1400 °C lässt sich über eine freie Strecke von vier Metern inline analysieren (Abb. 2b) [10]. Innerhalb von zwei Minuten ist es möglich, die Analyten CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe, MgO, Mn und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu bestimmen und daraus die Schlackenbasizität zu ermitteln. Deren Wert ist für die vorgelagerte Prozessführung und zur Entscheidung über die weitere Verwendung der Schlacke erforderlich.

Ein stationärer Laserstrahl kleiner Pulsenergie verbunden mit lateraler Bewegung des Messobjekts erlaubt eine rasternde Elementanalyse (Abb. 2c). Dies ist wichtig, um in Proben aus einer Stahlproduktionslinie oxidische Seigerungen und Dendriten schnell zu ermitteln, also Unterschiede in der mikroskopischen und makroskopischen Zusammensetzung oder verästelte Kristallbildungen. Dies geschieht in Minuten statt Stunden oder Tagen wie bei konventionellen Verfahren. Bei einer Messfrequenz von 1 kHz entstehen innerhalb weniger Minuten  $2 \times 10^5$  Messpunkte/cm<sup>2</sup> und simultan werden >20 Elementlandkarten gewonnen.

Hochwertiges Recycling von Aluminiumschrott, der in der Regel aus einem Gemisch von Guss- und Knetlegierungen mit unterschiedlichen Legierungselementen



**Abb. 3** Bei der inversen Produktion (oben) werden Produkte am Ende ihrer Nutzungsdauer (End of life) gezielt demontiert, um bei näherungsweise gleichbleibender Entropie (gelbe Punkte) Teile oder Produkte zu gewinnen, die sich rückführen lassen in die Produktion (unten). Beim konventionellen Recycling erhöht sich die Entropie stark.

besteht, erfordert die sortenreine Trennung (Abb. 2d), um ein Downcycling zu verhindern, also die Umwandlung des Materials zu einem qualitativ schlechteren Endprodukt. Die Schrottstücke werden auf einem Förderband vereinzelt, auf bis zu 3 m/s beschleunigt und mit scannenden Laserstrahlen analysiert. Die Spektralinformation lässt sich stückbezogen in Echtzeit auswerten und mit der gemessenen 3D-Geometrie kombinieren. Auf Basis dieses Datensatzes schleusen Druckluftimpulse die Teile automatisch in verschiedene Legierungsklassen aus. Die Methode erlaubt es, bis zu 40 Schrottstücke pro Sekunde legierungsspezifisch zu sortieren [11]. Aus Unordnung wird so Ordnung.

### Invers produzieren

Als Materialressource gewinnen Konsum- und Investitionsgüter am Ende ihrer Nutzungsphase zunehmend an Bedeutung. Hierfür gilt es, die bisherigen Recyclingansätze zu verbessern, zum Beispiel durch inverse Produktion: Darunter sind alle Arten von Transformationsprozessen der Produktionstechnik zu verstehen, mit denen aus Fertigerzeugnissen am Ende ihrer Nutzungsphase wieder Rohstoffe, Halbzeuge, Bauteile oder neue Produkte entstehen. Produktion und inverse Produktion sind mit ihren Datenräumen eng zu verzahnen (Abb. 3).

Charakteristisch für die bisher dominante Route vom Produkt zum konventionellen Recycling ist ein hoher Massenstrom durch Schredderanlagen, der mit einem Anstieg der Entropie verbunden ist. Denn hier vermischen sich verschiedene Stoffe, die anschließend mit hohem Energieaufwand erneut zu trennen sind oder die gar aufgrund der Zerkleinerung als Stäube verloren gehen. Demgegenüber zielt die inverse Produktion darauf ab, den Ordnungszustand der Teile eines Produktes am Ende seiner Nutzungsphase möglichst aufrechtzuerhalten und es gezielt zu demontieren. Das Ergebnis sind wiederverwendbare Bauteile und Sortierfraktionen mit hohen Wertstoffkonzentrationen. Hierbei bleibt die Entropie näherungsweise gleich.

Anders als bei der herkömmlichen Produktion sind für eine inverse Produktionslinie die Eigenschaften des Ein-

gangsmaterials nur zum Teil oder gar nicht bekannt. Der Datenraum ist daher lückenhaft. Die inverse Produktion benötigt aber zwingend das digitale Abbild des Produkts mit umfassenden physikalischen und chemischen Informationen seiner Bestandteile, um eine möglichst hochwertige Weiterverwendung, Aufarbeitung oder spezifisches Recycling umzusetzen. Hier kommen Lasermethoden ins Spiel.

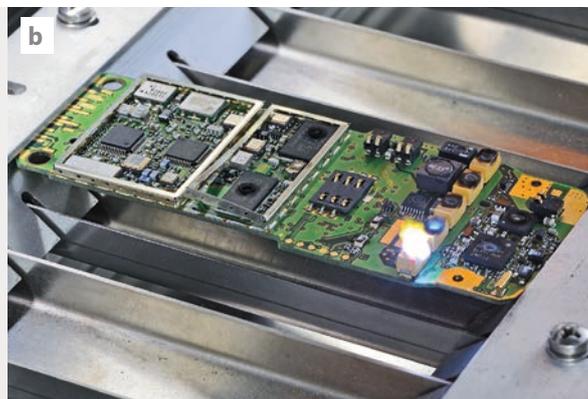
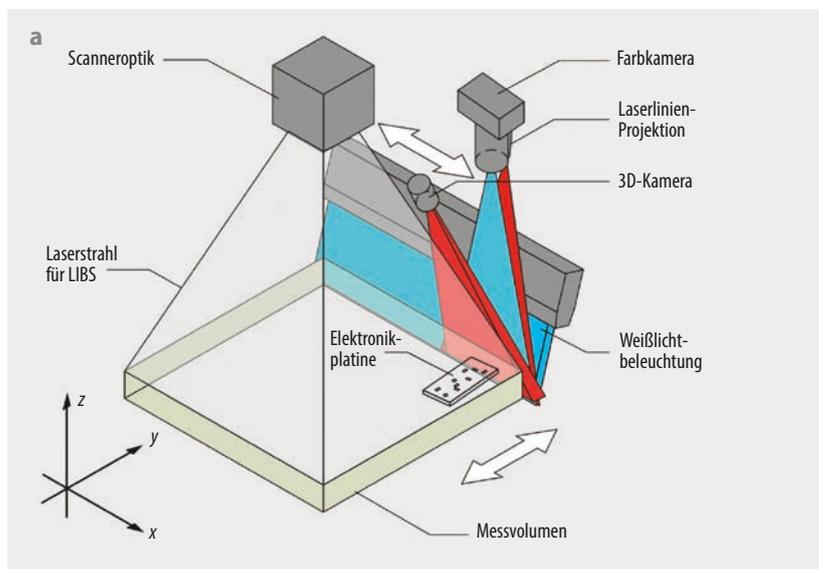
### Alte Elektronik

Bei der Demontage und Entstückung von Elektronikplatinen lassen sich bislang nicht zugängliche Sortierfraktionen mit hohen Wertstoffanreicherungen gewinnen [9]. Im Rahmen des EU-Projekts „Next generation urban mining – automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment“ (ADIR) wurde weltweit erstmals eine inverse Produktionslinie für Mobiltelefone und große Elektronikplatinen von Servern am Ende ihrer Nutzungsphase entwickelt, deren wesentliche Bausteine auf Laserverfahren beruhen [12].

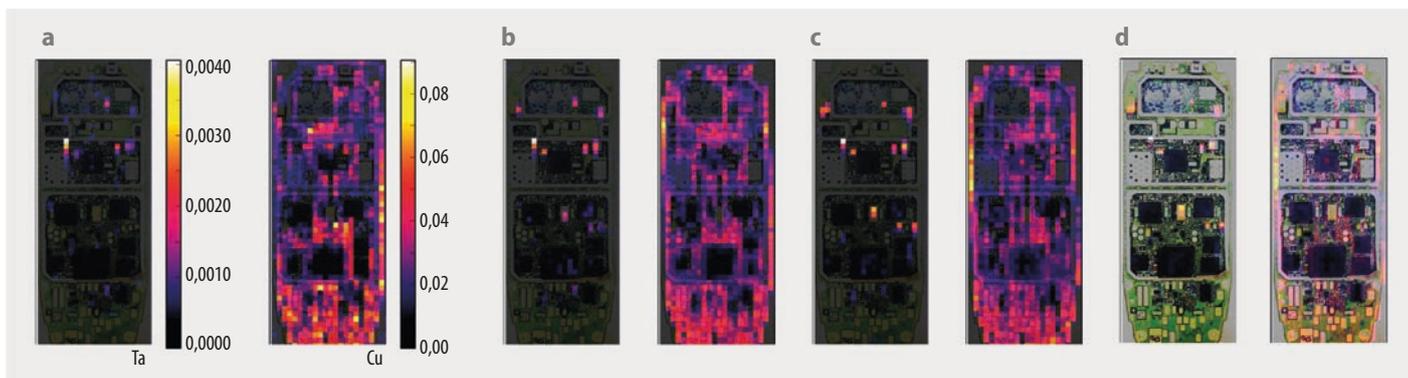
Auf Elektronikplatinen von Mobiltelefonen und Servern befinden sich etliche wertstoffhaltige Bauelemente, etwa Kondensatoren und akustische Oberflächenfilter (Tantal), integrierte Schaltkreise (Gold) und Unwuchtmassen des Vibrationsalarms (Wolfram). Im besten Falle gilt es, diese *in situ* zu ermitteln.

Kernelement der inversen Produktionslinie von ADIR ist ein kombiniertes Lasermessverfahren, das detaillierte 2D/3D-Informationen zur Geometrie der Elektronikplatinen, Position, Orientierung und Größe der elektronischen Bauteile und der lokalen chemischen Zusammensetzung der Zielkomponenten liefert (Abb. 4). In weniger als 30 Sekunden lassen sich die Platinen bis zu einer Größe von  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  abscannen, um ein vollständiges digitales Abbild ihrer Geometrie zu gewinnen (Abb. 4a).

Ein Galvanometer-Scanner dient dazu, den Strahl eines Nd:YAG Lasers (Abb. 4a) in das Messvolumen zu fokussieren. Der Laser kann Ablationspulse zum lokalen Materialabtrag liefern sowie Nanosekundenpulse zur Plasmaerzeugung für die Laser-Emissionsspektroskopie.



**Abb. 4** Der Messaufbau (a) erlaubt es, die Geometrie von Elektronikplatinen zwei- und dreidimensional zu bestimmen und Emissionsspektren *in situ* aufzunehmen. Das Foto (b) zeigt die Elektronikplatine eines Mobiltelefons während einer Messung mit laserinduziertem Plasma (heller Fleck).



**Abb. 5** Raster-scans mit einer Schrittweite von 2 mm liefern eine Tantal- und Kupferelementlandkarte in Falschfarbendarstellung (a), die sich mit einem einzigen Laserpuls an jeder Messposition gewinnen lassen. b) zeigt die Tantal- und Kupferkarte für den fünften Scan im gleichen Raster, c) für den 10. Scan. Der 10. Raster-scans wurde mit den 2D/3D-Daten der ursprünglichen Leiterplatte überlagert (d).

Die Ablationspulse durchdringen das Gehäuse eines elektronischen Bauteils lokal und gelangen so zu den Materialien im Inneren bis in eine Tiefe von einigen hundert Mikrometern. Anschließend erzeugen die kurzen Pulse das Plasma, dessen Licht über die Scannerspiegel zum Spektrometer gelangt.

Die Leiterplatte ist auf einer Verschiebeeinrichtung platziert, die sich in  $y$ -Richtung bewegt, um die Geometrie des Messobjekts zweidimensional zu vermessen. Gleichzeitig entsteht ein Bild der dreidimensionalen Form durch Projektion einer Laserlinie (rot, **Abb. 4a**) und Beobachtung dieser Linie unter einem Winkel mit einer weiteren Kamera nach dem Triangulationsprinzip. Diese Informationen stehen zu Beginn der laserspektroskopischen Messungen zur Verfügung. Der Scanner lenkt die Laserpulse für lokale spektroskopische Messungen auf ausgewählte Bauteile des Messobjekts. Neben punktuellen Messungen sind auch Raster-scans der gesamten Leiterplatte möglich, um schnell zu ermitteln, wo sich gegebenenfalls wertstoffhaltige Bauteile auf einer Platine befinden. Diese Informationen helfen, wertstoffhaltige Bauteile gezielt zu entstückeln.

Raster-scans liefern einen ganzen Satz von Elementlandkarten, anhand derer sich wertvolle Bauteile identifizieren lassen (**Abb. 5**). Die Falschfarbendarstellung von Elementlinienintensitäten offenbart lokale Konzentrationsunterschiede z. B. für Tantal und Kupfer. Schon der erste Raster-scans zeigt einige Positionen, an denen signifikante Tantal-Emissionssignale auftreten. Kupfersignale sind als Folge der Kupferleiterbahnen und -schichten der Leiterplatte an vielen Stellen sichtbar. Durch mehrfache Wiederholung der Raster-scans im gleichen Raster schreitet der Laserabtrag lokal voran und erreicht tiefere Regionen. Schließlich werden die chemischen Bilder mit den zuvor aufgenommenen 2D/3D-Bilddaten der Leiterplatte überlagert (**Abb. 5d**), um die jeweiligen elektronischen Komponenten einem bestimmten Bauteilvolumen zuzuordnen.

Die Lasermessung ist in die inverse Produktionslinie des ADIR-Projekts integriert [12]. In Feldtests gelang es, über 1000 Mobiltelefone und über 800 Elektronikplatinen von Servern in der Pilotlinie zu prozessieren. Dabei wurden etwa Tantalkondensatoren, integrierte Schaltungen und Oberflächenwellenfilter automatisch entstückelt und sortiert. In hydrometallurgischen Versuchen ließen sich

aus den hoch angereicherten Sortierfraktionen Wertstoffe zurückgewinnen: im Falle von Tantal 97,7 Prozent aus der Fraktion der Kondensatoren und bei Gold über 98 Prozent.

Laserverfahren bieten zur Inline-Messung insbesondere chemischer Größen ein hohes Potenzial entlang der gesamten Prozesskette. Sie machen Unsichtbares in Sekundenbruchteilen sichtbar, um die Herstellung, Verarbeitung und Wiedergewinnung wertvoller Materialien zu optimieren. Sie eröffnen damit die Chance für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft, um Ressourcen auf hohem Qualitätsniveau zu gewinnen.

#### Literatur

- [1] Berechnungen Exiobase 3.1, UBA Projekt „Ressourcennutzung in Deutschland“, Wirtschaftsuniv. Wien (2016)
- [2] EU's List of Critical Raw Materials, Final Report, Eur. Com. (2020)
- [3] Aluminium Factsheet, Umweltbundesamt (2019)
- [4] Recycling im Zeitalter der Digitalisierung, Studie IZT, Berlin (2019)
- [5] R. Noll et al., *J. Anal. At. Spectrom.* **33**, 945 (2018)
- [6] S. Maurice et al., *Space Sci. Rev.* **170**, 95 (2012)
- [7] J. Henning, *Der Spektralapparat Kirchhoffs und Bunsens*, Deut. Museum München (2003)
- [8] C. Meinhardt et al., *J. Anal. At. Spectrom.* **36**, 796 (2021)
- [9] R. Noll et al., *Spectrochim. Acta Part B* **181**, 106213 (2021)
- [10] V. Sturm et al., *Anal. Chem.* **86**, 9687 (2014)
- [11] P. Werheit et al., *J. Anal. At. Spectrom.* **26**, 2166 (2011)
- [12] www.ADIR.eu

#### Der Autor



**Reinhard Noll** (FV Kurzzeit- und angewandte Laserphysik) promovierte 1984 in Physik. Mit dem Gründungsteam des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik (ILT) ging er 1985 nach Aachen. Dort initiierte er 1989 die Abteilung Lasermesstechnik und entwickelte daraus das von ihm geleitete Kompetenzfeld „Lasermesstechnik und EUV-Strahlquellen“. 2012 habilitierte er sich an der RWTH Aachen und war dort seit 2017 außerplanmäßiger Professor, Mitte 2021 hat er das Pensionsalter erreicht.

**Prof. Dr. Reinhard Noll**, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen