

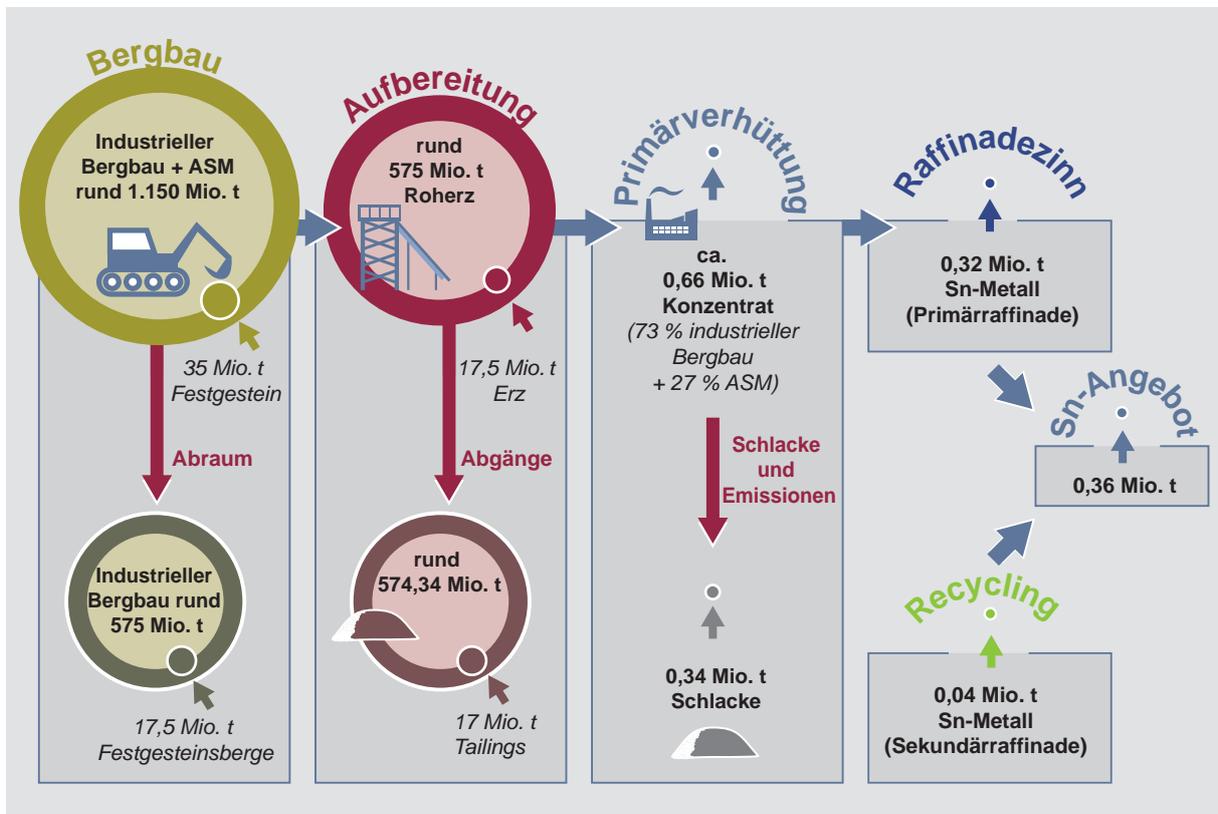
# Zinn

Informationen zur Nachhaltigkeit



50 118,7  
**Sn**  
Zinn

## AUF EINEN BLICK



**Abb. 1:** Massenströme in der Zinnproduktion und Hauptauswirkungen auf die Umwelt, Daten für 2017, ASM = artisanaler Bergbau und Kleinbergbau. Quellen: siehe Kap. 4 und 5.

- Die Hauptproduzenteländer für Zinn – China (32 % der Weltproduktion in 2018 in Höhe von 305 Tsd. t), Indonesien (25 %), Myanmar (15 %), Bolivien (6 %), Peru (5 %), und Brasilien (5 %) – sind bis auf China nicht die Hauptverbraucherländer für Zinn. Diese sind China (45 % des Weltverbrauchs), USA (9 %), Japan (8 %) und Deutschland (6 %).
- Durch den Bergbau können wertvolle Natur- oder Kulturräume beeinträchtigt oder negativ beeinflusst werden. Am augenscheinlichsten ist das in Indonesien der Fall, wo durch die Kiespumpengewinnung von Lockermaterial an Land und durch die off-shore Gewinnung vom Meeresboden große Flächen geschädigt werden.
- Der artisanale Bergbau und Kleinbergbau (ASM) hat mit rund 27 % einen hohen Anteil an der weltweiten Zinnproduktion. Damit ist der Sektor besonders relevant für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung, z. B. auf den indonesischen Zinninseln Bangka und Belitung, in Zentralafrika oder auch in Bolivien. Andererseits ist dieser Sektor auch besonders kritisch zu sehen aufgrund schlechter Arbeitsbedingungen, unkontrollierten Abbaus und fehlender Renaturierung.
- Im Osten der Demokratischen Republik Kongo haben sich bewaffnete Gruppen auch durch Abbau und Handel von Zinnerz finanziert. Daher fällt Zinn als eines der sogenannten „Konfliktminerale“ unter die entsprechende EU-Verordnung, nach der EU-Importeure entsprechende Sorgfaltspflichten in ihren Lieferketten einhalten müssen.

### INHALT

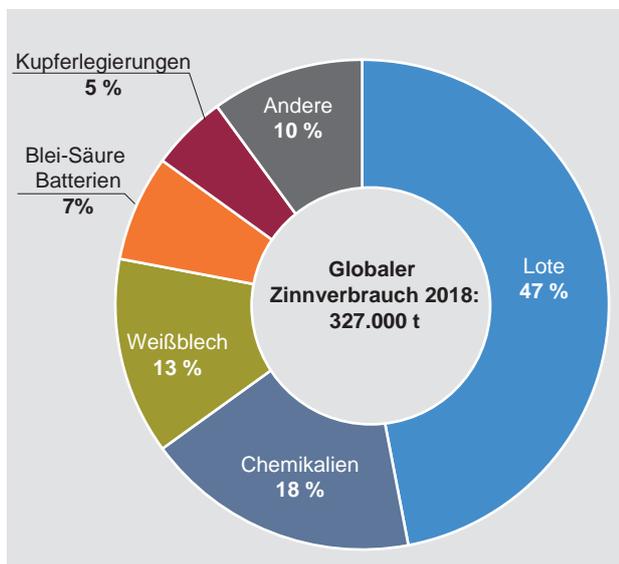
1. Relevanz von Zinn	S. 3
2. Von der Lagerstätte zum Metall	S. 3
3. Recycling	S. 7
4. Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	S. 7
5. Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung	S. 12

## 1 RELEVANZ

Zinn (Sn) ist ein silbrig-weißes Metall, das einen für Metalle sehr niedrigen Schmelzpunkt (231,9 °C) aufweist. Eine Hauptverwendung ist Lötzinn. Durch die Bildung einer dünnen Oxidschicht auf der Oberfläche ist Zinn chemisch relativ inert und wird daher auch zum Verzinnen von lebensmittelechten Konservendosen (Weißblech) und in der Medizin eingesetzt. Auch für die Produktion von Legierungen, wie z. B. für Bronzen und Lagermetallen, wird es verwendet. Zunehmend wird Zinn bei der Erzeugung von Chemikalien (Stabilisator bei PVC), bei der Floatglasherstellung und in der Elektronik eingesetzt. Relativ neue Anwendungen finden sich aufgrund der optisch-elektrischen Eigenschaften von Indium-Zinn-Oxid (ITO) als Nanofilmbeschichtung bei der Herstellung von Solarzellen sowie in Batterien und als Treibstoffzusatz (Abb. 2) [1].

Die Zinnnachfrage wird durch die aus Umweltschutzgründen zunehmende, gesetzlich geforderte Substitution von Blei und Antimon durch Zinn und andere Legierungsbestandteile in den Weichloten, die nicht in sicherheitsrelevanten Funktionen eingesetzt werden, stimuliert.

Zinn und anorganische Zinnverbindungen werden im Allgemeinen als nicht toxische Stoffe und somit als umweltverträglich eingeschätzt. Organische Zinnverbindungen können allerdings toxisch sein. Gesundheitsrisiken sind bei der Anwendung von Zinnverbindungen, besonders beim Pflanzenschutz, zu berücksichtigen. Allerdings gibt es keine Anhaltspunkte für karzinogene Wirkungen von anorganischen und organischen Zinnverbindungen.



**Abb. 2:** Hauptverwendung von Zinn 2018, modifiziert nach [1].

In vielen Ländern gibt es trotzdem Richtlinien zur Begrenzung der Zinnbelastung durch Konservendosen. Verzinnete Konservendosen sollten zusätzlich lackiert sein. Zinnsalze sollten nicht als Lebensmitteladditiv eingesetzt werden.

## 2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

Die Gewinnung von Zinnmetall erfolgt aus Zinnerzen aus dem Festgestein sowie aus Zinnseifen aus Lockersedimenten. Nach der Gewinnung wird das Zinnerz durch eine Aufbereitung zu einem Konzentrat angereichert. Diese Konzentrate werden in Zinnhütten über einen mehrstufigen Prozess aufgeschmolzen, wobei das Hauptmineral Kassiterit (Zinndioxid) zu metallischen Zinn reduziert wird. Da für viele Anwendungen der Zinngehalt nach der Verhüttung noch zu niedrig ist, muss eine weitere Raffination für die Erzeugung eines Zinnproduktes mit mindestens 99 % Zinninhalt stattfinden.

### 2.1 Geologie

Zinn ist ein relativ wenig verbreitetes Element und liegt an ca. 50. Stelle in der Häufigkeitsverteilung der Elemente in der Erdkruste. Der Durchschnittsgehalt von Zinn in der Erdkruste muss für den wirtschaftlichen Abbau von Festgestein um einen Faktor von mindestens 1.000 und bei Seifen um einen Faktor von mindestens 50 erhöht sein.

Primäre Zinnvorkommen (Festgestein) umfassen Greisen-, hydrothermale Gang- und seltener auch Skarn- und vulkano-exhalative Lagerstätten (VHMS). Die Greisenlagerstätten und die hydrothermalen Gänge sind ein Produkt der späten Kristallisation von Magmen oder der Spätphase von hydrothermalen Ereignissen. Da das wirtschaftlich bedeutendste Zinnmineral Kassiterit  $\text{SnO}_2$ , auch Zinnstein genannt, ein sehr stabiles Schwermineral ist, stammt ein großer Teil der Zinnproduktion (45%) aus sekundären Seifenlagerstätten. Diese sind aus der Verwitterung von Festgestein und dem Transport sowie der anschließenden Ablagerung des Kassiterits in Sedimentschichten entstanden. In einigen primären Lagerstätten besitzt auch das Sulfidmineral Stannit eine Bedeutung für die Zinnproduktion. Auf primären Zinnlagerstätten kommt das Mineral oft mit Arsen, Wolfram, Bismut, Silber, Zink, Kupfer und Lithium vergesellschaftet vor. Die wirtschaftlich wichtigsten Seifenlagerstätten befinden sich in Indonesien, Malaysia, Thailand und Brasilien, die bedeutendsten Festgesteinslagerstätten in Peru, China, Myanmar, der

Demokratischen Republik Kongo (DR Kongo), Australien und Bolivien (Abb. 3).

Die drei wichtigsten Bergbauländer sind derzeit China, Indonesien und Myanmar, die zusammen rund 72 % der Gesamtproduktion (2018) in Höhe von 305.000 t Zinninhalt produziert haben. Aus Südamerika kamen 16 % und aus Afrika 6 % der weltweiten Bergbauproduktion. Die europäische Produktion liegt bei rd. 0,5 % [3].

Die beiden Erztypen, Festgestein und Seifen, bedingen in der Regel unterschiedliche Abbau- und Aufbereitungsprozesse. Festgesteinserze werden im konventionellen Bohr- und Sprengbetrieb gewonnen. Je nach Lagerstättentyp und Teufenlage der Lagerstätte wird das Zinnerz in Tagebauen abgebaut, z. B. beim porphyrischen Lagerstättentyp, der an der Oberfläche ausbeißt, oder mit untertägigen Abbauverfahren gewonnen, z. B. aus Gangerzlagerstätten.

Die durchschnittliche Betriebsgröße im Zinnbergbau ist im Vergleich zur Gewinnung anderer Metallrohstoffe (z. B. Kupfer) als eher klein bis mittelgroß einzuordnen. Nach der Gewinnung des Erzes aus dem Festgestein findet meistens eine schonende Zerkleinerung des Erzes statt, um den relativ spröden Zinnstein herauszulösen, ihn dabei aber nicht zu sehr aufzureiben, weil dies eine nachfolgende Anreicherung erschweren wür-

de. Für grobkörnigen Zinnstein im Erz kommen Dichtesortierverfahren (Setzrinnen, Setzmaschinen, Herde, Schütteltische) zur Vorkonzentration zum Einsatz. Für die weitere Erhöhung des Zinngehaltes in den Vorkonzentraten wird häufig das Flotationsverfahren bzw. die Magnetsortierung eingesetzt (Abb. 4), um verkaufsfähige Konzentrate zu produzieren oder Beiprodukte zu gewinnen und abzutrennen. Die Aufbereitung mit diesen vergleichsweise einfachen mechanischen Verfahren ist auch ein Grund dafür, dass ein wesentlicher Anteil der globalen Zinnförderung aus dem Kleinbergbau stammt. Komplexe Zinnerze sind dagegen charakteristisch für porphyrische Lagerstätten, die fast immer im Tagebau gewonnen werden und viele Beiprodukte haben. Die Aufbereitung dieser Erze ist wesentlich komplizierter, da unterschiedliche Zinnprodukte und Metallkonzentrate erzeugt werden (Abb. 5).

Die Aufbereitung von Zinnseifen erfolgt normalerweise in zwei Schritten. Zuerst wird mittels Dichtesortierverfahren ein Schwerminerkonzentrat erzeugt. Anschließend findet die Mineralseparation der Schwerminerale unter Nutzung der unterschiedlichen physikalischen Mineraleigenschaften statt, sodass sortenreine Mineralkonzentrate aus Zinnstein, Monazit und Zirkon produziert werden können [5].

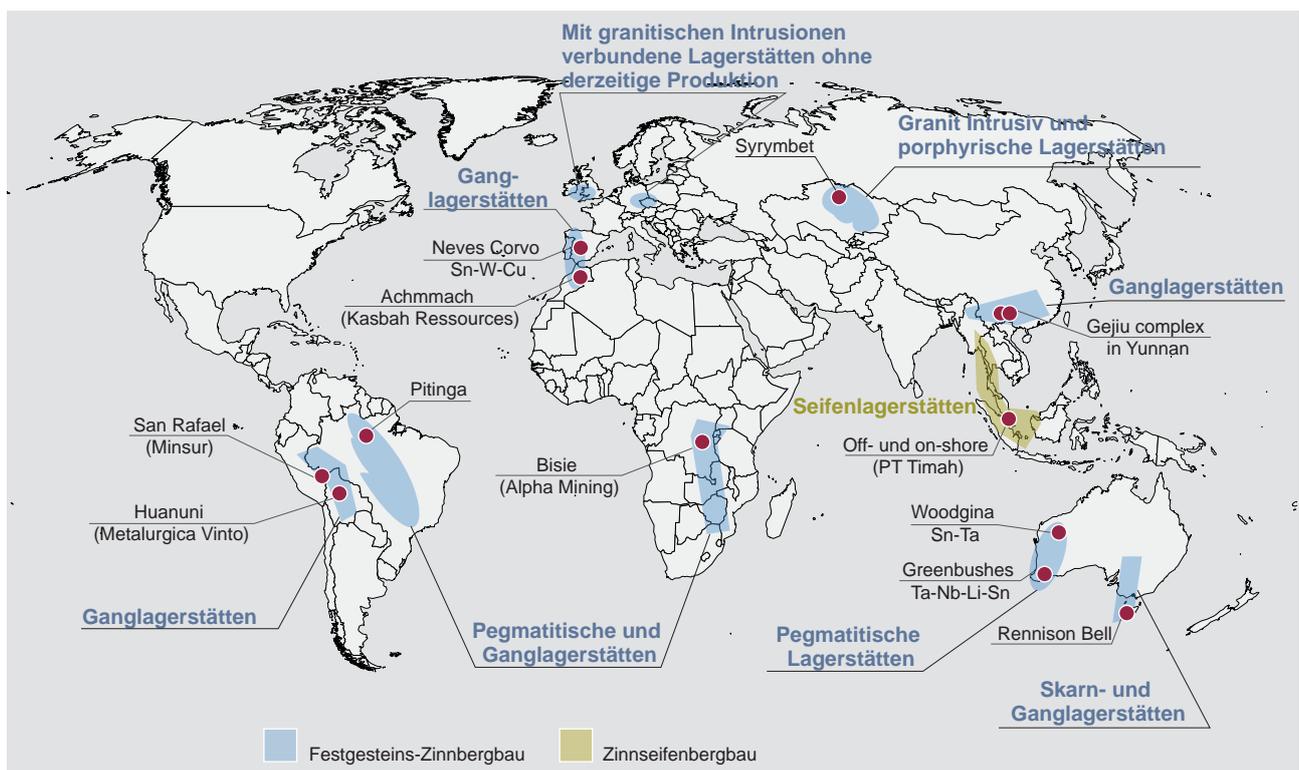


Abb. 3: Die 10 größten Zinnproduzenten und Lage der Zinnprovinzen und -distrikte, modifiziert nach [2].

## 2.2 Weiterverarbeitung

Das Verfahren zur Erzeugung von Rohzinn aus Konzentraten richtet sich in erster Linie danach, ob es sich um

- saubere, hochangereicherte Konzentrate,
- arme, aber im Wesentlichen nur durch Schlackenkomponenten verunreinigte Konzentrate oder
- komplexe, d. h. mindestens ein weiteres Wertmetall (z. B. Wolfram, Niob, Tantal) enthaltende Erzkonzentrate handelt.

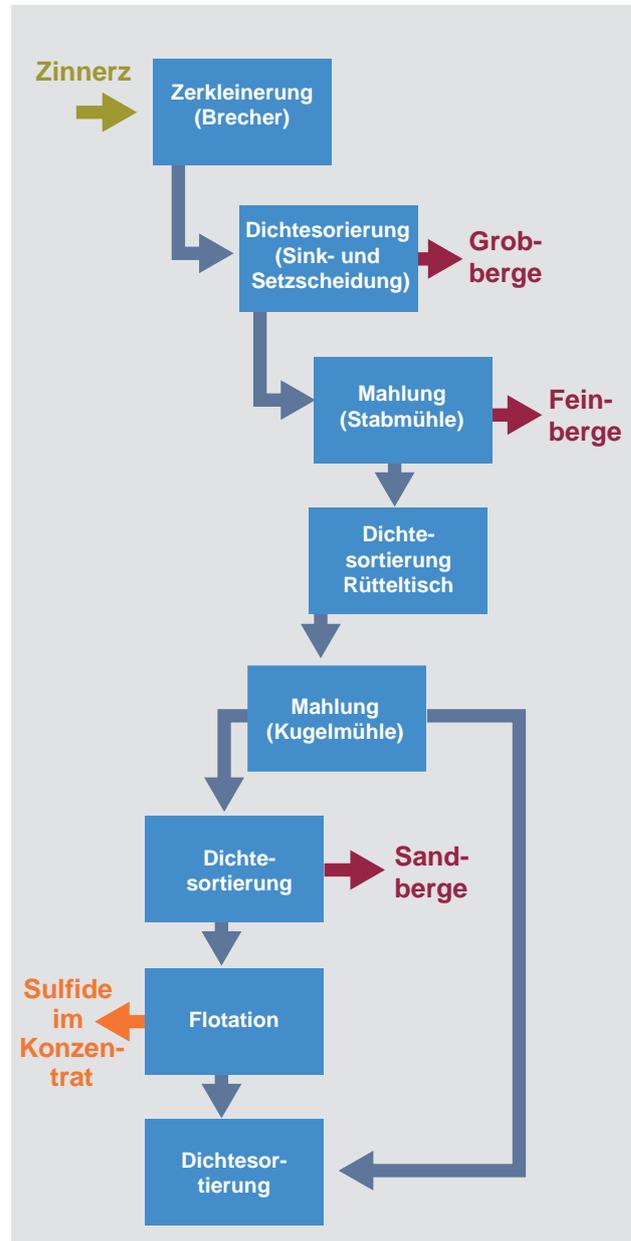
Flotationskonzentrate aus der Aufbereitung müssen vor der Verhüttung teilweise noch gereinigt werden. Durch eine oxidative Röstung des Konzentrats können Schwefel und Arsen entfernt werden und aus dem Röstisinter lassen sich durch die nachfolgende Magnetscheidung Eisenminerale abtrennen. Lösliche Verunreinigungen sind auch durch Säurelaugung abtrennbar.

Die zinnreichen Konzentrate werden nach der Abröstung in der Regel zweistufig verhüttet (Abb. 6). In der ersten Schmelzstufe wird Rohzinn und Primärschlacke produziert. Die Primärschlacke wird in der 2. Schmelzstufe in eine zinnarme Schlacke und ein zinnreiches Zwischenprodukt (Härtlinge) getrennt, welches in die 1. Schmelzstufe zurückgeführt wird. Das flüssige Rohzinn wird entweder pyrometallurgisch raffiniert, indem die Beilemente wie Kupfer, Eisen oder Arsen abgetrennt werden, oder das Rohzinn wird alternativ zuerst in Anodenform gegossen und dann elektrolytisch raffiniert. Typische Produkte der Hütten sind Zinnbarren mit unterschiedlichen Reinheitsgehalten (98 % – 99,95 % Sn) [4].

Ein neueres Verhüttungsverfahren für zinnarme Konzentrate vermeidet das übliche mehrstufige Röst-, Schmelz- und Verblaseverfahren durch Einsatz eines Ofens mit Schmelzzyklon und Aufblaslanzen für Reduktionsgas, in dem kontinuierlich Rohzinn sowie zinnarme Schlacke produziert werden.

Sekundär-Rohstoffe, wie zinnhaltige Flugstäube, Aschen, Rückstände und Schlacken, werden in Elektroöfen oder Rotationskonvertern (TBRC-Verfahren) eingeschmolzen und zu Rohzinn reduziert. Als weitere Möglichkeit Zinn aus komplexen Erzen oder sekundären Rohstoffen zu gewinnen wird das Zinn durch Schwefelzusatz als Zinnsulfid verflüchtigt (Fumer) und im Flugstaub angereichert, der danach reduzierend zu Rohzinn verschmolzen wird.

Die Gesamtproduktion an Raffinadezinn in 2018 betrug 346.000 t. Die wichtigsten Produzentenländer sind China mit 48 %, Indonesien mit 21 % und Malaysia mit 7 % [3].



**Abb. 4:** Aufbereitung von Zinnerzen aus Ganglagerstätten.

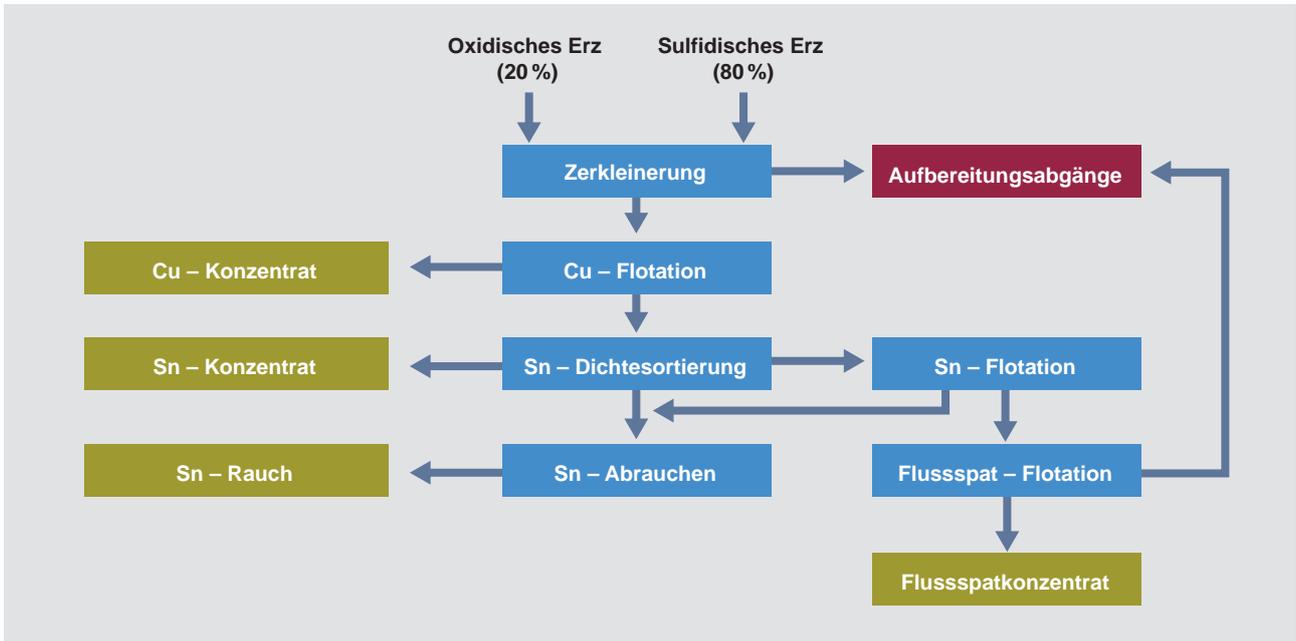


Abb. 5: Beispiel der Aufbereitung eines feinkörnigen, komplexen Zinnerzes.

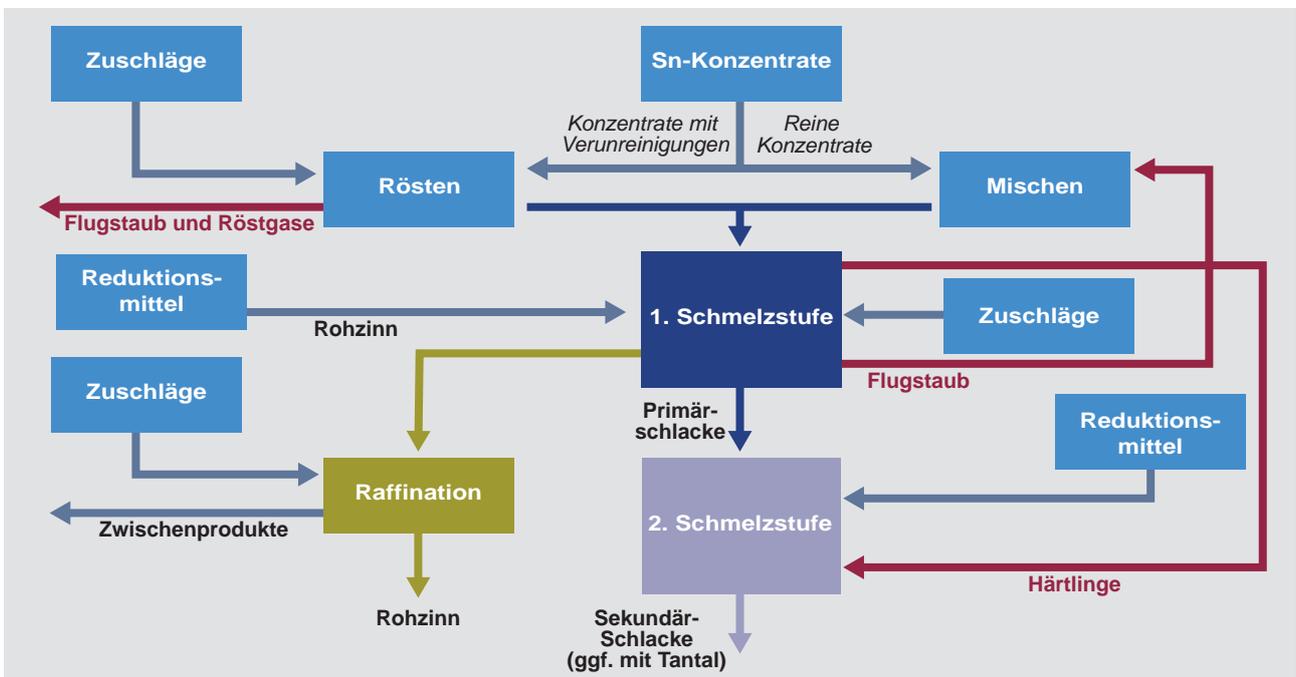


Abb. 6: Schema der Zinnverhüttung für einfache, reiche Zinnkonzentrate.

### 3 RECYCLING

Aufgrund des hohen Zinnpreises ist Zinn ein begehrtes Metall für das Recycling. Allerdings ist der Aufwand für das Recycling je nach Ausgangsmaterial unterschiedlich hoch.

Beim Recycling von Weißblech kann Zinn nur dann zurückgewonnen werden, wenn der Weißblechschrott aluminiumfrei ist. Hierbei wird das Zinn elektrolytisch in heißer Natronlauge entfernt. Aufgrund der immer dünneren Zinnüberzüge auf Weißblechen lassen sich Entzinnungsanlagen heute kaum noch wirtschaftlich betreiben. Daher wird das eingesammelte Weißblech häufig direkt zur Produktion zinnhaltiger Spezialstähle verwendet und das Zinn gar nicht entfernt [5].

Das in Legierungen enthaltene Zinn wird überwiegend recycelt, wohingegen Zinn-Lote, die aus der Elektro- und Elektronikindustrie stammen, nur zu einem relativ geringen Anteil recycelt werden. Bei der Verwendung von Zinn in chemischen Produkten findet kaum Recycling statt, da die Endverwendung fast immer dissipativ ist. Allerdings werden auch große Mengen nicht benötigter zinnhaltiger Chemikalien recycelt. Besonders hoch ist die Wiederverwendungsrate von zinnhaltigen Primärschrotten und Legierungen. Die End-of-Life (EOL) Recyclingrate für Zinn liegt im Durchschnitt aller Anwendungsfelder bei über 50%. Die Recycling Input Rate (RIR) von Zinn, einschließlich raffinierter und nicht raffinierter Handelsprodukte, wurde 2016 mit 30,7% berechnet [6].

## 4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS

### 4.1 Umweltaspekte

#### *Landnutzung*

Primärerzlagerstätten auf Zinn sind häufig gangförmige, meist steilstehende Körper mit großer Erstreckung (Teufe und Länge) sowie relativ geringer Mächtigkeit oder kommen als dreidimensional ausgedehnter Lagerstättenkörper, in denen die Zinnminerale fein verteilt (disseminiert) sind, in der Erdkruste vor. Im Allgemeinen werden die Zinnerzgänge untertägig abgebaut, können aber auch bei Oberflächennähe und starker Verwitterung im Tagebau gewonnen werden (Abb. 7). Der internationale Zinnverband (ITA) errechnete für 2010, dass ca. 56% der globalen Zinnförderung aus dem untertägigen Bergbau stammen und 6% aus Festgesteinsteingebaubetrieben. Die fehlenden 38% der Zinnförderung stammen aus dem on- und offshore Seifenabbau [6].

Diese Zahlen dürften aktuell im Wesentlichen noch immer zutreffen.

In der Regel werden die großräumigen Lagerstättenkörper mit disseminierter Mineralisation, die gegenüber den Gängen geringere Zinngehalte aufweisen, im Tagebau oder untertägig mit Blockbruchbaumethoden gewonnen. Dabei wird durch den Tagebau selbst zusammen mit den erforderlichen Abraumhalden bzw. im Blockbruchbau durch die infolge von Senkungsvorgängen der Oberfläche entstandenen Vertiefungen Fläche in Anspruch genommen.

Beim untertägigen Gangbergbau werden Flächen durch die erforderlichen Tagesanlagen in Anspruch genommen, die nach Beendigung des Betriebes rückbaubar sind. Ein zusätzlicher Faktor für den Flächenverbrauch sind auch hier Bergehalden, die für die Lagerung des anfallenden tauben Gesteins entstehen. Dieses Material kann in einigen Bergwerken durch den Versatz von Grubenräumen wieder unter Tage verbracht werden, so dass weniger Reststoff über Tage anfällt. Beim konventionellen Tagebau ist die Flächeninanspruchnahme in der Regel größer, da neben den Betriebsflächen größere Außenhalden angelegt werden müssen. Global ist die Flächeninanspruchnahme des Zinnbergbaus jedoch aufgrund der insgesamt niedrigeren jährlichen Förderung geringer als z. B. bei Eisen, Kupfer, Nickel oder Aluminium.

Die mittlere jährliche Kapazität der industriellen Erzaufbereitungsbetriebe weltweit liegt zwischen 400.000 und 800.000 t Erz. Dies bedeutet, dass je nach Gehalt und Anreicherungsfaktor zwischen 390.000 t und 780.000 t feinkörnige Aufbereitungsabgänge übertägig abgelagert oder untertägig versetzt werden müssen. Auf die gesamte globale Jahresproduktion von Zinn aus Festgestein gerechnet (mit den Annahmen eines 20 m hohen Schlammteiches und einer Dichte der schlammförmigen Abgänge von 2 t (trocken)/m<sup>3</sup>) entspräche das umgerechnet einem jährlichen Flächenverbrauch durch Schlammteiche von rd. 0,5 km<sup>2</sup>.

Die sekundären Zinnerzlagerstätten, auch Zinnseifen genannt, werden an Land, zunehmend aber auch offshore, d. h. im Meer abgebaut. Der Abbau von Zinnseifen ist flächenintensiv, da es sich bei den Seifen um sedimentäre Lagerstätten handelt, die in relativ dünnen Ablagerungsschichten vorkommen. Da sich Zinnseifen häufig in Flussläufen oder ehemaligen Flussläufen ausgebildet haben, wird in vielen Fällen wirtschaftlich genutztes Land oder wertvoller Naturraum durch den Abbau gestört und durch einsetzende Erosion gefährdet.



**Abb. 7:** Zinntagebau auf der Insel Bangka, Foto: BGR.



**Abb. 8:** Exploration durch artisanale Bergleute in einer bereits rekultivierten Teilfläche des Unternehmens PT Timah, Foto: BGR



**Abb. 9:** Schwimmender Eimerkettenbagger vor der Küste von Bangka. Foto: BGR.

Zinnseifen auf dem Land werden häufig in sogenannten Kiespumpenbetrieben abgebaut oder auch, in geringeren Maße, in künstlichen Seen nassgebaggert. Der Anteil dieser Verfahren am globalen Gesamtzinnbergbau betrug 2010 ca. 17% und derzeit noch rd. 12% (dies wären rd. 38.000 t/a) [4]. Der Mindestgehalt für abbauwürdige Seifen an Land liegt bei 100 – 150 g Sn/m<sup>3</sup>. Der Wertanteil der Schwerminerale, zu denen auch Kassiterit gehört, ist in den Seifen relativ gering. Durch die Umschichtung der natürlichen Bodenabfolgen im Zuge der Gewinnung und Aufbereitung, die mit einer Zunahme des Bodenvolumens verbunden ist, sind die ursprüngliche Topographie und Bodenverhältnisse nicht mehr herstellbar. Daher hinterlässt der Seifenbergbau auf Zinn häufig eine ungeordnete Landschaft, die schwierig zu rekultivieren ist. Die durchschnittliche Mächtigkeit der tauben Überlagerung der Zinnseifen an Land, z. B. in Indonesien, wird auf 2 – 4 m geschätzt und die durchschnittliche Mächtigkeit der Seife auf 3 m.

Der industrielle Zinnbergbau auf den indonesischen Inseln Bangka und Belitung wird schon seit über 120 Jahren mit Kiespumpen und Wasserwerfern betrieben. Daher ist dort ein großer Teil der Inseln (hochgerechnet rd. 1.000 km<sup>2</sup> bei einer Gesamtfläche von ca. 16.400 km<sup>2</sup>) von aufgelassenen Gruben und Bergbaualllasten durchzogen.

Das durch den Kiespumpenbergbau an Land bewegte Volumen an Lockergestein liegt jährlich schätzungsweise bei rund 256 Mio. m<sup>3</sup>, was von der Masse her, bei einem angenommenen spezifischen Gewicht von 2 t je m<sup>3</sup>, in etwa dem Doppelten der Sand- und Kiesproduktion in Deutschland (rd. 260 Mio. t pro Jahr) entspräche. Die Organisation Friends of the Earth geht für Bangka und Belitung von jährlich rd. 54 km<sup>2</sup> bergbaulich genutzter Fläche aus [7].

Die Anforderungen an Umweltschutz und Rekultivierung in den südostasiatischen Ländern, in denen ein großer Teil der Zinnseifen liegt, sind erst in den letzten Jahrzehnten gestiegen. Der händische Seifenabbau ist hier jedoch schon eine Jahrhunderte dauernde Tradition und industriell wird der Seifenabbau seit dem Ende des 19. Jahrhunderts betrieben. Dies erklärt zum Teil, dass die Rekultivierung der älteren Abbauflächen, wenn sie überhaupt durchgeführt wurde, nur von minderer Qualität war. Heutzutage ist die Rekultivierung der abgebauten Flächen an Land in Indonesien, Thailand und Malaysia eine gesetzliche Vorgabe. Allerdings wurden bis vor kurzem von den Bergbauunternehmen die Vorgaben für die geplanten Rekultivierungsvorhaben selten eingehalten. Häufig waren die Ergebnisse der Rekultivierung auch mangelhaft, da die Erosionskontrolle und die Pflanzenauswahl für die Rekultivierung nicht

den notwendigen Anforderungen entsprochen haben. Der Abbau von alluvialen Zinnseifen im Binnenland der Inseln verschlechtert auch die Bodeneigenschaften. Der Humus- und Nährstoffgehalt in den gewaschenen Böden ist gering und damit die Nährstoffversorgung der Pflanzen und der Stoffhaushalt in den zur Rekultivierung vorgesehenen Flächen beeinträchtigt. Von der BGR wurde 2017 – 2019 als Teil eines wissenschaftlichen Pilotprojektes ein Rekultivierungshandbuch gemeinsam mit indonesischen Fachleuten entwickelt, das helfen soll, die Rekultivierungsleistung im indonesischen Zinnbergbau an Land zu verbessern [17].

Ein besonderes Problem für die Rekultivierung in Südostasien stellt der illegale Nachbergbau der bereits rekultivierten Flächen durch artisanale Bergleute da. Es kommt immer wieder vor, dass rekultivierte Flächen durch Kleinbergbau wieder aufgegraben werden, da noch Restbestände an Zinn vermutet werden (Abb. 8). Die wieder geöffneten Flächen werden anschließend nicht wieder rekultiviert, da das Geld und das Bewusstsein im Kleinbergbau fehlen.

### Nutzung des Meeres

Von großer Bedeutung ist derzeit noch der off-shore Bergbau auf Zinnseifen. Ungefähr 20% der globalen Zinnförderung stammte 2010 noch aus der Saugbaggerung oder der Abgrabung des Meeresbodens mit mechanischen Baggerverfahren (Abb. 9) [6]. Allerdings hat sich dieser Anteil stark verringert, da in der Zwischenzeit ein Teil der indonesischen Saugbaggerflotte außer Dienst gestellt wurde. Alleine bei dem Zinnbergbauunternehmen PT Timah in Indonesien wurden 2018 rd. 17.000 t Zinn durch off-shore Gewinnung produziert. Neben PT Timah gibt es noch weitere indonesische Firmen, die mit Saugbaggern Zinnseifen offshore gewinnen. Bei diesem Verfahren wird der Meeresboden großflächig gestört.

Der Mindestgehalt für abbauwürdige Seifen off-shore liegt in Indonesien bei rd. 250 g Sn/m<sup>3</sup> und die durchschnittliche Mächtigkeit der zinnführenden Schicht bei bis zu 10 m [12]. Als durchschnittliche Überdeckung der Zinnseife kann eine Abraummächtigkeit von 10 m angenommen werden. Unter diesen Annahmen müsste alleine von PT Timah jährlich in Indonesien eine Meeresbodenfläche von ca. 6,8 km<sup>2</sup> abgebaut und ein Gesamtvolumen von 136 Mio. m<sup>3</sup> Meeresboden umgelagert werden. Da die industrielle Nassbaggerung nur außerhalb eines 2-km-Abstandes zur Strandlinie arbeiten darf, haben sich innerhalb dieser 2-km-Zone, die auch zinnhöfzig ist, artisanale off-shore Abbaubetriebe angesiedelt (Abb. 10). Dadurch dürfte die durch die off-shore-Gewinnung betroffene Fläche des Meeresbodens noch wesentlich größer als jährlich 6,8 km<sup>2</sup> sein. Hoch-



**Abb. 10:** Cluster von auf Fischerbooten installierten Saugpumpen vor der Küste von Bangka, Foto: BGR.



**Abb. 11:** Monazitkonzentratlager von PT Timah. Hinweise auf eine mögliche Strahlenbelastung fehlen, allerdings wird vor der Schädlichkeit des Rauchens gewarnt, Foto BGR.

gerechnet mit einem Anteil von rd. 15% an der globalen Zinnproduktion würde die globale Nassbaggerung von Zinnseifen jährlich bis zu 15 km<sup>2</sup> Meeresbodenfläche umfassen und bis zu 300 Mio. m<sup>3</sup> Meeresboden bewegen. Im Vergleich hierzu beträgt das Volumen der gesamten Sand- und Kiesförderung in Deutschland rund 160 Mio. m<sup>3</sup> [8].

### Emissionen

Aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung des Erzes und der Lagerstättengeologie kann es zu einer Belastung der Umwelt durch Sauerwasser oder durch erhöhte Radioaktivität kommen. Erfahrungen aus Nigeria, Großbritannien (Cornwall) und China, aber auch aus dem Erzgebirge zeigen, dass bestimmte Zinnlagerstätten (vor allem Pegmatite und Greisentyp) einen engen Zusammenhang zwischen dem Zinnabbau und der Strahlenbelastung der Umwelt aufweisen, da das

natürlich vorkommende, radioaktive Radongas durch den Abbau erst freigesetzt werden kann.

In den Zinnvorkonzentraten aus dem Seifenbergbau sind neben Zinnstein andere Schwerminerale wie Monazit und Zirkon angereichert, die beide radioaktive Elemente (Uran und Thorium) enthalten. Daher sollten nach der Abtrennung des Zinnsteins in der Schwermineralaufbereitung die sonstigen Beiprodukte der Aufbereitung entsprechend ihrer Strahlungseigenschaften zwischengelagert oder entsorgt werden (Abb. 11). Da Monazit und Zirkon einen Marktwert haben, wird von den größeren Aufbereitungsbetreibern jeweils geprüft, ob die Monazit- und Zirkonkonzentrate direkt verkauft oder weiter zu Zwischenprodukten verarbeitet werden können. Insbesondere in Thailand und Malaysia kam es in der Vergangenheit durch Aufbereitung von Zinnseifen zu radioaktiv belasteten Schwermineralhalden, die in den 1980er und 1990er Jahren saniert werden mussten.

In Indonesien wurden in den letzten Jahren Forschungsanstrengungen unternommen, Monazit-Konzentrate zu laugen, um daraus Seltene Erden zu gewinnen.

Saure Grubenwässer entstehen vor allem durch die Oxidationsprozesse von sulfidischen Mineralen, die entweder im Gestein selbst oder während der Aufbereitung mit sauerstoffhaltigem Wasser in Kontakt kommen. Das Hauptmineral Kassiterit ist ein Oxid und besitzt daher kein eigenes Säurepotential. Es gibt allerdings auch Lagerstätten mit Zinnsulfiden, die mit anderen Sulfidmineralen entstanden sind und bei denen ein gewisses Säurebildungspotential vorliegt. Meistens haben Zinnlagerstätten, wenn überhaupt, nur einen schwachsauren Charakter.

### **Biodiversität**

Durch die Off-shore-Gewinnung können Korallenbänke direkt geschädigt werden. Im Gegensatz zu anderer Meeresfauna bestehen Korallenbänke aus stationären Lebewesen, die eine Vielzahl an Funktionen im Ökosystem wahrnehmen. Der Off-shore-Seifenbergbau auf Zinn führt nur im kleineren Umfang Rekultivierungsmaßnahmen wie die Neuansiedelung von Korallen durch, wenn Korallenbänke durch den Abbau geschädigt wurden.

Vor der Aufnahme der Abbautätigkeit on- und off-shore wird in allen Zinnbergbauländern in der Regel eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt. Es besteht die Verpflichtung, die Aktivitäten der off-shore Gewinnung unter Umweltaspekten zu überwachen und nach Beendigung die Entwicklung der Biodiversität in den abgebauten Bereichen zu begutachten. Einen zeitna-

hen Nutzen hat diese Praxis allerdings nicht, denn es wird davon ausgegangen, dass eine Wiederherstellung der ursprünglichen Biodiversität oder einer gleichwertigen Nutzfläche, wenn überhaupt, erst nach langen Zeiträumen möglich ist.

Bei der Off-shore-Gewinnung von Zinnseifen gibt es auch eine Fernwirkung auf nicht direkt vom Abbau betroffene Bereiche. Durch die Gewinnung am Meeresboden bzw. die Aufbereitung der Seifen und den Durchsatz der Deckschichten an Bord der Baggerschiffe mit anschließender Verklappung der Aufbereitungsabgänge und des Abraums entsteht eine Trübfahne, die sich mit den Meeresströmungen ausbreitet. Die feinen Bodenpartikel in der Suspension setzen sich nur sehr langsam im beruhigten Wasser ab und können in einiger Entfernung von der Gewinnungsstelle Flora und Fauna wie z. B. Korallen schädigen. Es wird im Allgemeinen angenommen, dass auch aus diesem Grund die Biodiversität im Umfeld der Off-shore-Gewinnung abnimmt.

Eine Studie der Universität Bangka geht davon aus, dass bereits 50 % der Korallen um die Insel Bangka, die im Zentrum der indonesischen Off-shore-Zinnengewinnung steht, geschädigt sind [9].

Aufgrund der relativ geringen Massenbewegungen im Festgesteinsbergbau auf Zinn in anderen Zinnbergbauländern sind hier die Auswirkungen auf die Biodiversität vergleichsweise gering.

Die Küstenlinie der indonesischen Zinninseln wurde durch Abtragungen und Ablagerungen im Zuge der küstennahen Off-shore-Zinnengewinnung durch Baggerung verändert. In bis zu 70 Prozent der Küstenlinien auf Bangka und Belitung wurden die Ökosysteme negativ beeinflusst, insbesondere Korallen, Seegras und Mangroven waren betroffen.

## **4.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung**

Durch den hohen Anteil des Kleinbergbaus an der Zinnproduktion (dieser Anteil wird von der BGR auf ca. 27 % der Gesamtproduktion geschätzt) trägt die Rohstoffgewinnung zur wirtschaftlichen Entwicklung in wenig entwickelten und ländlichen Regionen durch die Schaffung von Einkommensmöglichkeiten bei. Kleinbergbau auf Zinn findet sich vor allem in Südostasien (Teile der Produktion in Indonesien und Myanmar), Zentralafrika (Ruanda, Burundi, DR Kongo) sowie Brasilien und Bolivien. Es wird vermutet, dass mehr als 250.000 Menschen im Kleinbergbau auf Zinn (industrieller Kleinbergbau und

artisanaler Kleinbergbaus) arbeiten. Die Arbeitsbedingungen im Kleinbergbau sind häufig kritisch, insbesondere bezüglich der Arbeitssicherheit. Aus Zentralafrika kommen immer wieder Nachrichten von eingestürzten untertägigen Abbaustollen aus dem Kleinbergbausektor, die von Dutzenden von verschütteten oder eingeschlossenen Bergleuten berichten [10].

Artisanale Produktion ist nicht unbedingt illegal, kann aber aus verschiedenen Gründen nicht gesetzeskonform sein. So findet der informelle Bergbau oft ohne staatliche Erlaubnis, aber zum Teil geduldet oder aber auf fremden Konzessionen ohne Zustimmung des Eigentümers statt.

Auch kommt es in Südostasien bedingt durch den Abbau im Lockergestein häufiger zu Unfällen in nicht ordnungsgemäß geschlossenen Bergbaubetrieben, zum einen verursacht durch Kleinbergleute, die riskanten Nachbergbau betreiben und zum anderen durch Anlieger, die sich den Gefahren der aufgelassenen und ungesicherten Altbergbaue nicht bewusst sind. Sehr häufig sind auch Landrutschungen in der Nähe von Tagebauöffnungen in alluvialen oder verwitterten Gesteinen.

In der DR Kongo wurde der Zusammenhang von artisanalem Bergbau, auch auf Zinn, und der Finanzierung bewaffneter Gruppen und Menschenrechtsverletzungen in zahlreichen UN-Berichten dokumentiert. Dies führte dazu, dass Zinn, wie auch Tantal, Wolfram und Gold, von der US-amerikanischen Börsenaufsicht SEC als sogenanntes „Konfliktmineral“ eingestuft wurde. An den US-Börsen gelistete Unternehmen haben demnach Berichtspflichten zu den Lieferketten dieser Rohstoffe und möglicher Konfliktfinanzierung. Auch eine entsprechende EU-Verordnung schreibt für EU-Importeure ab 2021 verbindliche Sorgfaltspflichten entsprechend der OECD-Leitsätze [16] für Lieferketten von Zinn, Tantal, Wolfram und Gold vor. Die EU-Verordnung ist global, insofern wird die Einhaltung von Sorgfaltspflichten bezüglich Konfliktfinanzierung und Menschenrechtsverletzung auch für die Lieferketten aus anderen Ländern als der DR Kongo geprüft. In diesem Kontext wird beispielsweise der Zinnabbau in Myanmar kritisch diskutiert [11].

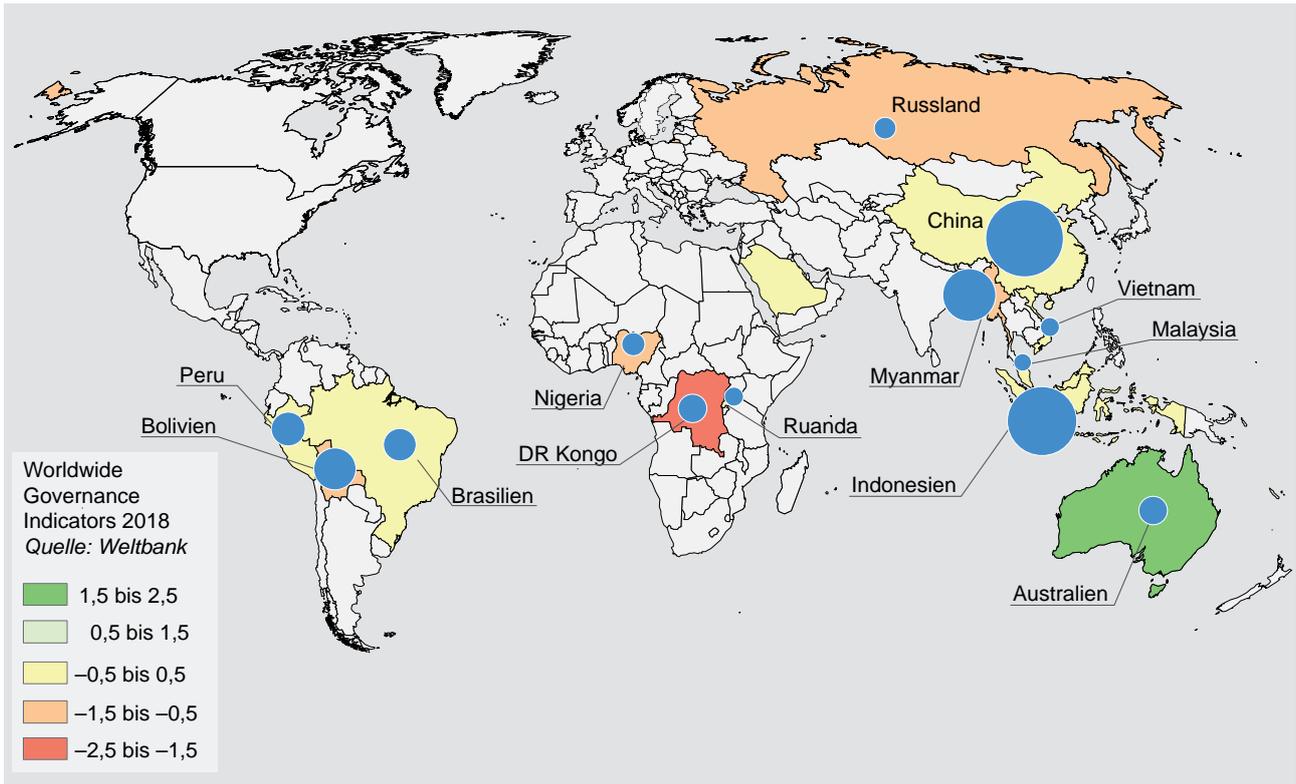
Rund 90 % des Wertes der Raffinadezinnproduktion wird als Nettoerlös von den Hütten an den Bergbausektor des jeweiligen Landes weitergereicht, nur rd. 10 % der Wertschöpfung bleibt bei den Hüttenstandorten. Die Einnahmen aus dem Zinnbergbau können auf allen Verwaltungsebenen beträchtlich sein. Der Wert des 2018 von PT Timah auf Bangka und Belitung produzierten Raffinadezinns (rd. 45.000 t) lag bei rd. 0,9 Mrd. USD.

Der Wert der gesamten indonesischen Zinnproduktion bei rd. 1,5 Mrd. USD. Alleine der Wert der Förderabgabe der Zinnproduktion für Indonesien würde somit rd. 45 Mio. USD betragen. Hinzu kommen noch die Gewinnsteuern der Zinnbergbauunternehmen sowie im Falle des halbstaatlichen Unternehmens PT Timah die Unternehmensdividenden.

### 4.3 Governance

Fast die gesamte weltweite Produktion stammt aus Ländern mit mittlerer bis schwacher Governance (Mittelwert der World Governance Indikatoren < 0,5 [13, 14]; Abb. 12). Insbesondere das mit schwacher Regierungsführung eingeschätzte Myanmar ist in den letzten Jahren zum drittgrößten Zinnproduzenten aufgestiegen. Die dortige Zinnförderung stammt in erster Linie aus dem sog. „Wa-Staat“, einer autonomen Region im Shan-Staat in Myanmar. Die Wa-Armee wurde von den Vereinten Nationen als eine Konfliktpartei identifiziert, die keinerlei Maßnahmen gegen den Einsatz von Kindersoldaten ergriffen hat. Dies impliziert entsprechende Risiken der Sorgfaltspflicht für Lieferketten aus dieser Region [11]. Für Lieferketten aus Konflikt- und Hochrisikogebieten, die entsprechend der OECD Leitsätze eine Nachverfolgbarkeit und ein erhöhtes Risikomanagement erfordern, hat der internationale Zinnverband (ITA – International Tin Association) seit 2011 die Initiative ITSCI (International Tin Supply Chain Initiative) etabliert. Diese umfasst die Barcode-Kennzeichnung der Lieferkette vom Abbau bis zur Verhüttung und ein Risikomonitoring vor Ort in den Produktionsländern. Das System wurde sukzessive ausgeweitet und wird derzeit in Burundi, der DR Kongo, Ruanda und Uganda für Lieferketten von Zinn, Tantal und Wolfram eingesetzt.

Die ITA hat eine Politik für verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung (Code of Conduct, [15]) etabliert. Eine Bewertung der Unternehmen (unter Beteiligung von externen Gutachtern) nach den 10 Prinzipien und 70 Standards erfolgt in den Nachhaltigkeitsberichten und ist für 10 der 11 Unternehmen öffentlich verfügbar. Das Mitgliedsunternehmen Minsur (Peru) ist darüber hinaus Mitglied beim ICMM (International Council for Mining and Metals), einem internationalen Bergbauverband, der seine Mitglieder hinsichtlich der Einhaltung von Nachhaltigkeitsprinzipien prüft.



**Abb. 12:** Governance der wichtigsten Bergbauländer für die Zinnproduktion, 2018, [13], blaue Kreise kennzeichnen den Umfang der Zinnförderung im Bergbau 2018 (Gesamtförderung 2018: 323.000 t Zinn-Inhalt), [3].

## 5 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DER WEITERVERARBEITUNG

Für die Raffination des Rohzinns kommen sowohl pyrometallurgische als auch hydrometallurgische Verfahren zum Einsatz. Die allgemeinen Nachteile der pyrometallurgischen Verfahren im Vergleich zu den hydrometallurgischen Verfahren liegen im schlechteren Zinnausbringen, der Komplexität des Prozesses sowie den höheren Anforderungen an den Arbeitsschutz. Die semikontinuierliche elektrolytische Zinnraffination beim hydrometallurgischen Verfahren ist weniger kompliziert, weist aber eine geringere Durchsatzmenge pro Zeit auf. Mit ca. 350.000 t (2018) ist der Umfang der weltweiten Raffinade von Zinn im Vergleich zu anderen Basismetallen (Kupfer ca. 20,5 Mio. t, Eisen ca. 2,2 Mrd. t Eisenerz) von der Menge und damit auch von den Auswirkungen global betrachtet eher gering.

### 5.1 Umweltaspekte

#### Emissionen

Liegen in den Zinnkonzentraten Sulfide vor, so werden diese geröstet. Die Röstprozesse bezwecken eine Umwandlung der Sulfide in Oxide oder eine Vorraffination, in der z. B. Arsen- oder andere Metalloxide (Wismut, Blei, Antimon) verflüchtigt oder Verunreinigungen so oxidiert werden, dass sie durch Laugung entfernt

werden können. Die Röstprozesse produzieren u. a. Schwefeldioxid als Abgas sowie Flugstäube, die eine Gefährdung der Arbeitenden oder auch der Umwelt darstellen können. Eine Filterung der Prozessabgase ist aus ökonomischen wie auch aus Umweltgründen erforderlich.

#### Energieträger und -bedarf

Folgende Einsatzstoffe und Energiemengen werden für die Erzeugung von 1 t Rohzinn benötigt:

- Reduktionskohle: 220 – 290 kg (ca. 15 – 20 % der Ofenbeschickung bei einem 70 % Sn-Konzentrat.)
- Heizöl 110 – 145 kg
- Bei einer Reduktion im Elektroofen werden größere Mengen an elektrischer Energie eingesetzt: 1.300 – 1.860 kWh (4.700 – 6.700 MJ)

Unter Berücksichtigung der spezifischen Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe bedeuten diese Einsatzmengen, dass direkt rund 2 – 2,5 t CO<sub>2</sub> je Tonne Raffinadezinn emittiert werden.

#### Rückstände

Die anfallende Primärschlackenmenge bei reinen Zinnkonzentraten beträgt zwischen 150 und 200 kg je Tonne Rohzinn. Global gesehen dürften daher jährlich mindestens 45.000 – 60.000 t Primärschlacke produziert werden. Da die Primärschlacke noch viel Zinn

(8 – 25%) enthält, muss diese in mindestens einer weiteren Verfahrensstufe aufgearbeitet werden. Die Rückgewinnung des Zinns aus der Primärschlacke kann 5 – 10 % des gesamten Zinnvorlaufs ausmachen und in einer oder zwei Prozessstufen geschehen.

Die endgültig zu entsorgende Menge an Sekundärschlacke aus der Zinnverhüttung ist gering und liegt global zwischen 35.000 und 50.000 t. Die finale Schlacke enthält zum größten Teil Eisenoxid und Siliziumdioxid sowie Calcium-, Aluminium- und Magnesiumverbindungen und ist somit ungefährlich. Der Zinnanteil der Sekundärschlacke liegt bei < 1 %.

Neben der Schlacke fallen auch Flugstäube an (3 – 5 (max. 10)% der Konzentratmenge), die zu einem hohen Anteil aus Zinnverbindungen (40 – 70%) bestehen, aber auch Schwermetalle (Arsen, Antimon, Blei, Wismut), Eisen und andere Metalloxide enthalten. Die Flugstäube werden in Sackfiltern aufgefangen und im Normalfall nach einer Brikettierung oder Pelletierung in den Hüttenprozess zurückgeführt.

Das Gesamtausbringen an Zinn liegt bei Konzentraten mit hohem Zinngehalt bei über 99,6% und kann bei niedrigprozentigen Konzentraten auf 92% absinken. Echte Zinnverluste sind nur in der abzusetzenden Schlacke, eventuell weiteren Deponieprodukten sowie in den Verstaubungsverlusten zu finden.

In manchen Schlacken können etwa 10% Niob-Tantaloxide enthalten sein, die durch weitere Prozesse aus den Schlacken gewonnen werden können. Daher sind Zinnschlacken eine wichtige Tantalquelle (ca. 9% der weltweiten Tantalproduktion).

## 5.2 Governance

Von den zehn weltweit größten Zinnhütten liegen sieben in Südostasien und zwei in Südamerika. Das Zertifizierungsprogramm der Responsible Minerals Initiative, der Responsible Minerals Assurance Process (RMAP), zertifiziert auch Zinnhütten (die Erzkonzentrate verarbeiten, nicht Recyclinghütten) bezüglich der Einhaltung des OECD-Standards für Rohstofflieferketten aus Konflikt- und Hochrisikogebieten [11]. Dies umfasst v. a. menschenrechtliche und konfliktbezogene Risiken (z. B. Kinderarbeit, Finanzierung bewaffneter Gruppen). Im Programm sind aktuell 78 Hütten erfasst, allerdings davon 37 Hütten in Indonesien, von denen viele nicht mehr in Produktion sind, so dass von rund 60 aktiven Hütten ausgegangen werden kann. Rund 80% der Hütten sind derzeit nach dem RMAP zertifiziert bzw. befinden sich im Prozess der Auditierung [14].

## 6 QUELLENACHWEIS

- [1] INTERNATIONAL TIN ASSOCIATION (2019) Tin demand to decline, <https://www.mining.com/tin-demand-to-decline-ita/> [Stand 18.10.2019].
- [2] POHLWL (1992) W. & W.E. Petrascheck's Lagerstättenlehre - Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen, E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [3] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019) Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover. [Stand 02.12.2019].
- [4] ULLMANN F (1972-1984) Enzyklopädie der Technischen Chemie, 4. Auflage (1972-1984), Band 24, Zinnverhüttung, Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- [5] DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR IN DER BGR (2014) DERA Rohstoffinformationen Zinn – Angebot und Nachfrage bis 2020, [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?blob=publicationFile&v=9](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-20.pdf?blob=publicationFile&v=9) [Stand 18.10.2019].
- [6] INTERNATIONAL TIN RESEARCH INSTITUTE ITRI (2017) Tin for Tomorrow, Contributing to Global Sustainable Development, <https://www.greenfieldsresearch.com/itris-tin-for-tomorrow-contributing-to-a-global-sustainable-future/> [Stand 18.10.2019].
- [7] FRIENDS OF THE EARTH (2012) Mining for smartphones: the true cost of tin, <https://goodelectronics.org/mining-for-smartphones-the-true-cost-of-tin-damage-to-forests-and-coral/> [Stand 18.10.2019].
- [8] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2016) Pressemitteilung, Hannover, 01.12.2016, Neuer BGR-Bericht zur Rohstoffsituation: Industrie profitiert weiterhin von niedrigen Rohstoffpreisen, [https://www.pebs-eu.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-2016-12-01\\_rohstoffsituationsbericht-2015.html;jsessionid=AAE58E0F24646C8A25C0903CCD9FBE7D.1\\_cid331?nn=1554918](https://www.pebs-eu.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-2016-12-01_rohstoffsituationsbericht-2015.html;jsessionid=AAE58E0F24646C8A25C0903CCD9FBE7D.1_cid331?nn=1554918) [Stand 19.02.2020].
- [9] NURTJAHYA E, FRANKLIN J, UMROH & AGUSTINA, F (2017) The Impact of tin mining in Bangka Belitung and its reclamation studies. MATEC Web of Conferences, vol. 101, no. 04010, <http://dx.doi.org/10.1051/matec-conf/201710104010> [Stand 19.10.2019].

[10] AL JAZEERA (2019) Rwanda News, Rwanda tin mine collapse kills fourteen workers <https://www.aljazeera.com/news/2019/01/rwanda-tin-collapse-kills-dozen-workers-190121151223385.html> [Stand 19.10.2019].

[11] HEIMIG C, SCHÜTTE P, FRANKEN G, KLEIN C (2019) Zinn aus Myanmar – ein Anwendungsszenario zur EU-Verordnung zur Sorgfaltspflicht in Rohstofflieferketten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News 61, Hannover.

[12] MARDIAH, STMT (2018) Karakteristik endapan timah sekunder, Kebaputen Bangka, <http://eprints.upnyk.ac.id/1658/> [Stand 19.10.2019].

[13] WORLD BANK GROUP (2020) Worldwide Governance Indicators, <https://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand 25.03.2020].

[14] RESPONSIBLE MINERALS INITIATIVE (2020) Smelter-Refiners List <http://www.responsiblemineralsinitiative.org/smelters-refiners-lists/> [Stand 20.02.2020].

[15] OECD (2016) OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas, Third Edition. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264252479-en>, [Stand 19.10.2019].

[16] International Tin Association (ITA) (2020) Code of Conduct, <https://www.internationaltin.org/code-of-conduct/> [Stand 25.03.2020].

[17] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019), Handbuch zur besten verfügbaren Praxis in der Rekultivierung alluvialer Zinnminen (onshore) in Indonesien [https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/studie\\_Reclamation\\_Handbook\\_Indonesia\\_2019.html](https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_Reclamation_Handbook_Indonesia_2019.html) [Stand 10.02.2020].

## IMPRESSUM

### Herausgeber:

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe  
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit  
Stilleweg 2  
30655 Hannover

E-Mail: [mineralische-rohstoffe@bgr.de](mailto:mineralische-rohstoffe@bgr.de)  
[www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de)

### Autoren:

Jürgen Vasters und Gudrun Franken

### Unter Mitarbeit von:

Harald Elsner

### Layout:

Jolante Duba

### Titelfoto:

BGR

### Stand:

Juli 2020

### DOI:

10.25928/nsr1-0h81