

1. Bedeutung von Gold

Gold wird seit Jahrtausenden als wertvolles Material geschätzt und heute vor allem als Wertanlage verwendet: Finanzinvestoren sind verantwortlich für 30 bis 40% der Nachfrage, meist in Form von Goldbarren und Münzen, aber auch Medaillen und börsengehandelten Fonds (Exchange Traded Funds, ETFs) (Abb. 1).³⁸ Die Produktion von Schmuck (als Edelmetall behält Gold seinen Glanz und ist weich, dehnbar und geschmeidig) macht ca. 40% des Bedarfs aus. Die Nachfrage von Nationalbanken beläuft sich auf etwa 10%, von der Industrie werden ebenfalls etwa 10% verbraucht.²¹



Abb. 1 Weltproduktion und Verwendung (in Prozent) von Gold im Jahr 2012 (38).

Eine häufige Masseinheit im Goldhandel sind Feinunzen (engl.: Troy ounces, oz tr) wobei eine Feinunze in SI-Einheiten 31.1035 g entspricht. Pures Gold (24 Karat) hat eine Dichte von 19.32 g/cm³ und wird bergfachmännisch aus goldhaltigem Gestein (Golderz oder Berggold) oder in gediegener Form aus Sedimentlagerstätten (Seifengold bzw. Waschgold) gewonnen.²⁰

Bis 2011 wurden schätzungsweise 171 300 t Gold^{14,31} mit einem Wert von über 4 800 Milliarden CHF (2004-2014: 877 CHF/tr oz)¹³ aus Lagerstätten gewonnen.

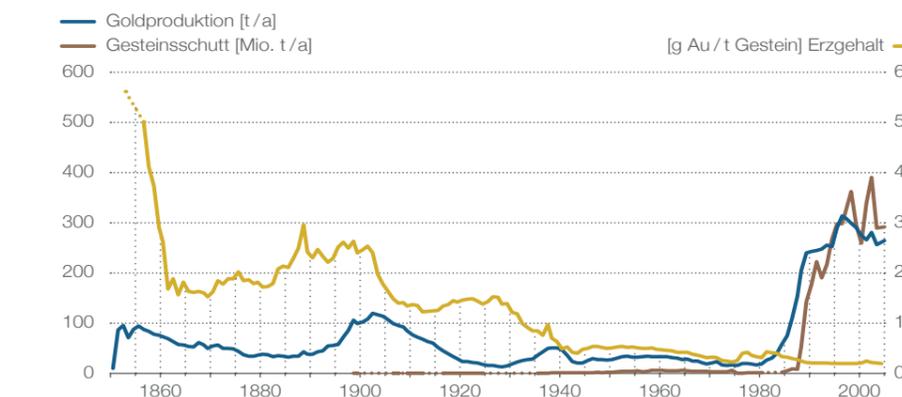


Abb. 2 Produktion, Gesteinsschutt und Erzgehalt von Gold, 1850–2005 (18).

2. Systemverständnis

Die in der Schweiz natürlich auftretenden Goldvorkommen weisen zwar teilweise technisch nutzbare Goldgehalte auf, sind jedoch meist von der gewinnbaren Goldmenge her eher klein und daher international unbedeutend.¹⁵ Im Gegensatz dazu ist die Schweiz international die wichtigste Golddrehscheibe; anders als beim Transithandel durchlaufen beim Goldhandel mengenmässig über zwei Drittel der jährlichen Weltproduktion physisch die Schweiz. So wurden gemäss dem U.S. Geological Survey USGS beispielsweise im Jahr 2012 weltweit 2 690 t Gold gewonnen, der World Gold Council gibt hierfür 2 827 t an.^{32,36} In die Schweiz wurden im Jahr 2012 rund 2 299 t importiert und 1 631 t exportiert.^{7,8} Die Goldhandelsflüsse sind von der Aussenhandelsstatistik seit 2014 nach Ländern aufgeschlüsselt und abrufbar (Abb. 3)⁶; Aussagen über die Lagerbestände werden jedoch keine gemacht⁵.

Das Recycling von Gold spielt in der Schweiz eine wichtige Rolle, und das von Schweizer Raffinerien verarbeitete Gold dürfte mit schätzungsweise 50% einen signifikanten Anteil Altgold enthalten.⁹ Für die rückgewinnbaren Mengen Gold aus Abfällen, insbesondere aus dem Technologiebereich (z.B. Elektro- und Elektronikaltgeräte), fehlen öffentlich zugängliche Daten

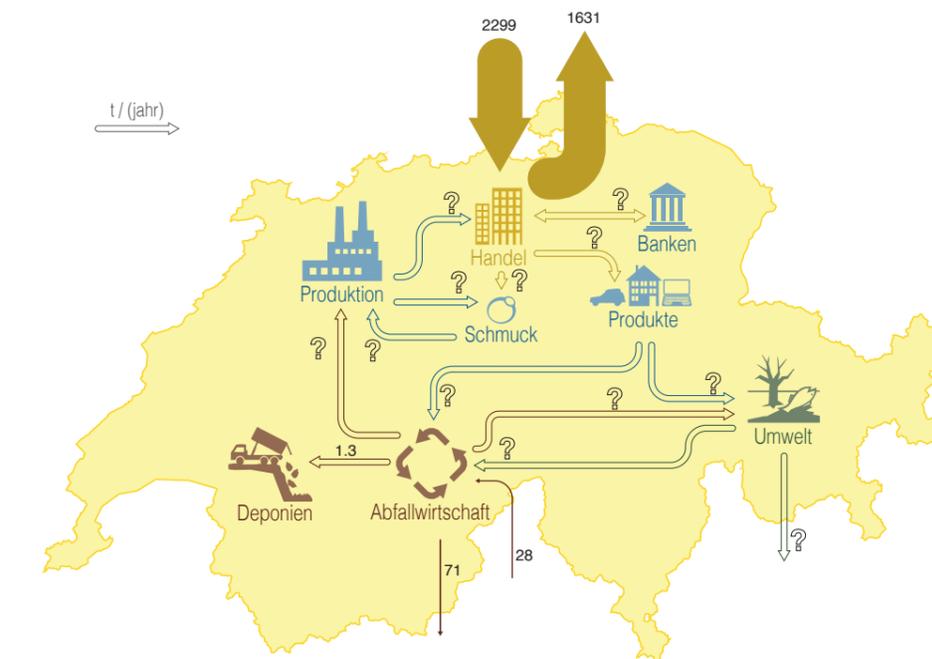


Abb. 3 Provisorisches Stoffflussdiagramm (auch der Handel goldhaltiger Abfälle wird aufgeführt) der Schweiz mit Daten aus der Zollstatistik (7,8,17): Die Massenflüsse und Lager innerhalb der Schweiz können derzeit nicht quantifiziert werden.

zu Materiallagern und -flüssen weitgehend. Die variablen Goldgehalte in verschiedenen Produkten sowie die heterogene Materialzusammensetzung der daraus resultierenden Abfälle stellen bezüglich Datenbeschaffung und Modellierung eine grosse Herausforderung dar. Das Rückgewinnungspotenzial aus

Abfällen ist folglich schwierig zu beziffern, und Grundlagenstudien für die Modellierung der Goldflüsse sind erforderlich. Derzeit ist die Schweiz bezüglich der inländischen Materialflüsse eine «Black Box», und lediglich über die deklarierten Zoll- und Handelsstatistiken sind jährliche Zahlen verfügbar.

7. Gesellschaft

Die weltweite Goldgewinnung durch selbständige Mineure und Kleinbergbau (handwerklicher Goldabbau) beschäftigt 10-20 Mio. und liefert die Lebensgrundlage für über 100 Mio. Menschen.^{2,22} Die Goldminenindustrie (exklusive handwerklichem Goldabbau) beschäftigte im Jahr 2012 etwa 528 000 Angestellte mit einer durchschnittlichen Pro-Kopf-Wertschöpfung von 124 oz tr (3.875 kg; rund 195 000 CHF).³⁵ Im Vergleich lag der jährliche Einstiegslohn eines Goldminenarbeiters im 2012 in Südafrika bei etwa 5 900 CHF⁴ und der südafrikanische Durchschnitt bei rund 14 500 CHF³³.

Gravierende langfristige Umwelt- und sowie Gesundheitsschäden bei handwerklichem Goldabbau sind häufig auf die Verwendung von Quecksilber zurückzuführen. Diese Schäden sowie die Folgen von Unfällen im industriellen Goldbergbau beeinträchtigen in vielen Fällen neben der Umwelt auch die einheimische Bevölkerung.^{2,9}

Im Vergleich zum handwerklichen Goldabbau sind die Arbeitssicherheit und Arbeitsbedingungen der Mineure grosser Minengesellschaften grundsätzlich deutlich besser. Dennoch sind beispielsweise Staublungerkrankungen durch den Abbau von Quarzgesteinen (Silikose) bei unzurei-

chendem Gesundheitsschutz ein häufig mit dem unter Tage stattfindenden Goldabbau verbundenes Risiko, welches jährlich zu tausenden Todesfällen führt. International geltende Mindeststandards werden vielfach vor allem umgesetzt, um Reputationsschäden und Streiks zu vermeiden.

Komplexe Firmenstrukturen mit lokalen Tochtergesellschaften sowie intransparente Handelsketten können dazu führen, dass auch Gold aus Konfliktregionen, mit entsprechend schwerwiegenden Konsequenzen für Umwelt- und Arbeitergesundheit, auf dem Weltmarkt gehandelt wird.

Die Schweiz ist weltweit die wichtigste Golddrehscheibe. Das mit dem Goldabbau aufgrund möglicher Menschenrechtsverletzungen und Umweltverschmutzungen verbundene Reputationsrisiko ist in der Schweiz bekannt. Um diesem entgegenzuwirken engagiert sie sich aktiv für die Verbesserung von Arbeitsbedingungen von handwerklichem Goldabbau und die Zertifizierung von Handelsketten, sowie für die Entwicklung und Umsetzung internationaler Instrumente und Standards zur Förderung von verantwortungsvoller Unternehmensführung.^{1,5}

Die Zertifizierung von Gold aus fairem und nachhaltigem Abbau kann über das Verleihen von Labels einen Mehrwert generieren, welcher vermarktet werden kann. Dies ist der Ansatz der «Better Gold Initiative»²⁵, welche von der Schweiz im Jahr 2013 lanciert wurde. Sie soll genossenschaftlich organisierten, handwerklichen Goldmineuren bessere Arbeitsbedingungen ermöglichen und dem Abnehmer «Ethical Gold» mit einem höheren Preis attraktiv machen. Dadurch wird ein Beitrag zur Umsetzung der «OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas» geleistet.

Neben dem OECD Gold Supplement gibt es verschiedene Regelwerke (RJC Chain of Custody Zertifizierung, LBMA Responsible Gold Guidance und die Section 1502 des Dodd Frank Act), welche sich mit dem Goldhandel befassen.⁹ Auf internationaler Ebene besteht jedoch derzeit keine verbindliche Verpflichtung beispielsweise zur Einhaltung von Menschenrechten beim Goldabbau.⁹

8. Ressourcenmanagement: Das Ganze im Überblick

Der hohe Wert von Gold begünstigt, dass beispielsweise Schmuck fast vollständig recycelt wird, da er sich über Rückkaufmechanismen gut sammeln lässt und geringe Aufbereitung erfordert. Dagegen ist die Rückgewinnungsrate von Gold aus Abfällen eher tief. Gold wird häufig nur in einzelnen Produktkomponenten verwendet; die in der Regel komplexe Materialzusammensetzung und zeitliche Variabilität der Goldmenge im Abfall erfordern einen grösseren Gewinnaufwand.

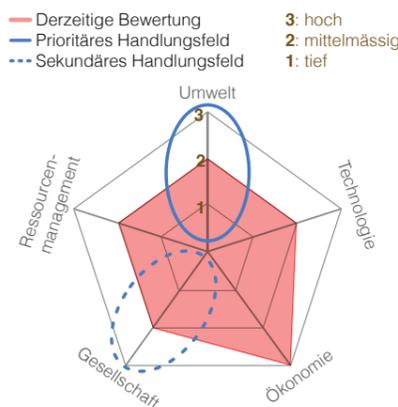
Der aktuell hohe Goldpreis von rund 37 000 CHF/kg (Januar-März 2014)¹³ ist ein besonderer Anreiz auf privatwirtschaftlicher Basis Gold aus Abfällen zurückzugewinnen, sofern diese eine gewisse Konzentration und Menge aufweisen (Abb. 4). Die Primärproduktion weist bezüglich Umweltbelastung, Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen massiv schlechtere Werte als die Sekundärproduktion aus trockener KVA-Schlacke und Elektronik-Schrott (Abb. 5).³⁴ Dies rechtfertigt Investitionen der öffentlichen Hand in die Entwicklung von Rück-

gewinnungstechnologien für Recycling von Gold aus KVA-Schlacke und Elektroschrott. Die Bemühungen des Zentrums für eine nachhaltige Abfall- und Ressourcenwirtschaft ZAR haben gezeigt, dass Gold aus einzelnen Schlackenfraktionen, (z.B. der Nicht-Eisen-Metallfraktion <5 mm) gewinnbringend nutzbar ist. Goldgewinnung aus elektrischen und elektronischen Geräten kann in der Schweiz rentabel betrieben werden. Altgeräte werden aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen von privaten Organisationen gesammelt. Die Entwicklung besserer Recyclingtechnologien könnte hier aus den vorgezogenen Entsorgungsgebühren für elektrische und elektronische Abfälle finanziert werden.

► **Abb. 8** Beurteilung des Urban Mining Potenzials von Gold (KVA-Schlacke und Elektroaltgeräte) aufgrund qualitativer Experteneinschätzung. **Kriterien:** Umwelt: Informeller Abbau schlecht, Minengesellschaften besser; Technologie: Rückgewinnung aus Schlacke und Elektroschrott; Ökonomie: braucht keine Massnahmen, läuft von selbst; Gesellschaft: Informeller Abbau schlecht, Minengesellschaften besser; Ressourcenmanagement: Erarbeitung von Zertifikaten für „sauberes“ Gold, Potenzial in Schlacke ist noch vorhanden.

Offene Fragen:

1. Wie hoch sind Konzentrationen und Mengenflüsse von Gold im Elektroschrott; welcher Anteil ist rezyklierbar?
2. Sind Recyclingtechnologien elektrischer und elektronischer Geräte ausgereift?
3. Wie kann der Trockenschlackeaustrag bei weiteren Anlagen verbreitet werden?
4. Kann Recycling von exportiertem Elektroschrott mit hohen ökologischen und sozialen Standards garantiert werden?



3. Primär-/Sekundärrohstoffe

Gold (Au) gehört zu den selteneren Elementen der Erde und tritt in der Natur in Form von «primären» und «sekundären» Goldvorkommen auf. Bei primären (ursprünglichen) Goldvorkommen spricht man von Berggold (Vererzung), wobei das Gold meist in mikroskopisch kleinen Mengen durch hydrothermale Prozesse im Gestein angereichert wurde und durch Bergbau und chemische Verfahren aus dem Fels herausgelöst werden muss. Typische Golderz-Mineralien sind Sylvanit ((Au, Ag)Te₂) und Calaverit (AuTe₂). In seltenen Fällen kommt von Auge sichtbares, gediegenes Gold (Freigold; Au (Ag,Cu,Hg,Pd)) in Goldadern und Klüften vor.

Sekundäre Wasch- oder Seifengoldlagerstätten werden durch Verwitterung und Erosion von goldhaltigem Gestein an der Oberfläche gebildet und angereichert. Die derzeitigen Durchschnittsgehalte von abbaubaren Golderzen in Lagerstätten wichtiger Minen liegen bei etwa 3 g/t.²¹

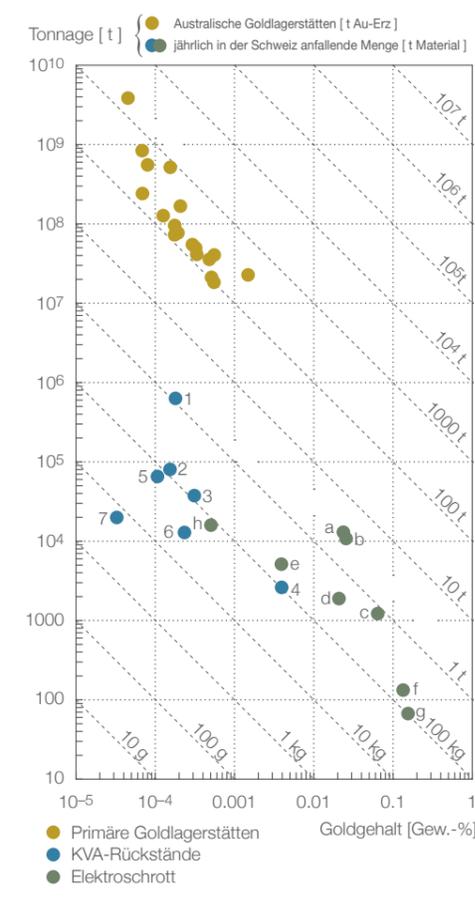
In der Schweiz wurden beispielsweise in Salanfè oberhalb Martigny in den Jahren 1904 bis 1929 im ganzen 53.4kg Gold gewonnen. Das dafür abgebaute Erz hatte einen vergleichbar hohen Goldgehalt von bis zu 35 g/t.²³ Allgemein sind die Schweizer Goldvorkommen jedoch häufig kleinräumig (unvorteilhafte geotektonische Voraussetzun-

gen) und grösser angelegte Minenoperationen aus regulatorischen und gesellschaftlichen Gründen nicht möglich.

Die Rückgewinnung von Gold aus dem urbanen Lager ist vor allem bei Elektronik- und Elektroaltgeräten (Waste Electric and Electronic Equipment, WEEE) interessant, da diese extrem hohe Goldgehalte aufweisen können (Abb. 4). So wurden beispielsweise in Mobiltelefonen Goldgehalte von 982 g/t, und aus separierten Mobiltelefon-Leiterplatten Konzentrationen von 347 g/t gemessen,²⁹ mehr als das Hundertfache der derzeit abbauwürdigen Golderzgehalte. Auch Kehrichtverbrennungsanlagen (KVAs) sind aufgrund der grossen jährlichen Massenflüsse eine interessante Rohstoffquelle (Abb. 4).

Für den totalen Goldfluss durch KVAs in der Schweiz ergab eine erste Schätzung 1.3 t pro Jahr,¹⁷ mit einem theoretischen Wert von über 65 Mio. CHF (2012: 1 668.98 US\$/tr oz)¹³.

► **Abb. 4** KVA-Rückstände: 1 Grobschlacke > 5mm 2 Feinstschlacke < 0.7mm 3 Feinstschlacke < 5mm 4 Nicht-Eisen-Metall-Fraktion < 5mm 5 Elektrofilterasche 6 Eisen-Metall-Fraktion < 5mm 7 Kessel-Asche; **Elektroschrott:** a Desktop-Computer b Unterhaltungselektronik (allgemein) c Laptop d LCD Fernseher e Drucker f Foto-/Videokamera g Mobiltelefon h CRT Fernseher (11,16-19,26). Diagonale Linien: Gesamte Goldmenge in ausgesuchten geologischen Lagerstätten, respektive jährlich in ausgesuchten Abfällen in der Schweiz anfallende Goldmenge.



4. Umwelt

Goldabbau durch selbstständige Mineure und Kleinbergbau (Handwerklicher Goldabbau; engl.: Artisanal and Small-Scale Gold Mining, ASGM) emittiert jährlich zwischen 640 und 1 350t Quecksilber in die Umwelt.²⁸ Davon werden etwa 350t in die Atmosphäre und 650t in die Hydrosphäre (Flüsse, Seen Böden und Halden) ausgetragen.²⁸ Dort entstehende organische Quecksilberverbindungen sind hochgiftig und stellen ein Umwelt- und Gesundheitsrisiko dar.

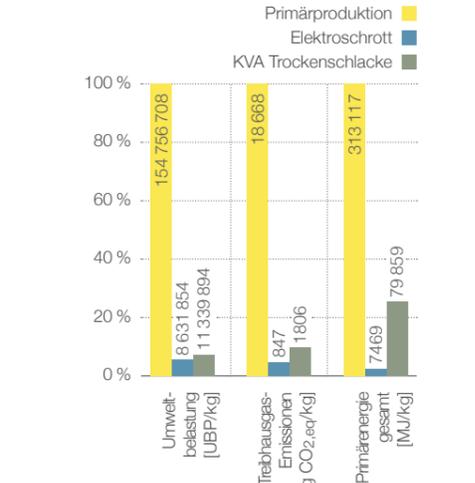
Die industrielle Gewinnung von Gold aus geologischen Lagerstätten ist in der Regel zwar besser reguliert und kontrolliert, beeinträchtigt aber dennoch die Umwelt erheblich. So ist beispielsweise die von Retentionsbecken und Abraumhalden in Anspruch genommene Fläche der Minenabfälle der «Golden Mile Superpit» in Kalgoorlie in Westaustralien deutlich grösser als die Fläche der Grube der Offentagbaumine selbst.¹⁰

Der Goldgehalt von 4.61 g/t¹⁸ bedingt, dass bei der Golden Mile Superpit pro Tonne gewonnenem Gold etwa 215 000t Gestein umgelagert und verarbeitet werden müssen (ökologischer Rucksack). Bei einer historischen Produktion von geschätzten 1 800t und nutzbaren Reserven von 500t Gold²¹ ergibt dies fast 500 Mio. t umgelagertes Gestein.

Diese Minenabfälle sind sehr heterogen und setzen sich aus Erz, taubem Nebengestein, Metallen, Kohle oder Brennstoffrückständen, losem Sediment und Mühlenrückständen, metallurgischen Schlacken, Filteraschen, Prozesschemikalien und Fluiden zusammen.¹⁰ Beim vielfach in grossen Minen angewandten Heap-Leaching-Verfahren (dt. Haufenlaugung) werden aus gemahlenem Gesteinspulver mit Zyanidlauge neben Gold häufig auch Quecksilber, Cadmium, Uran, Blei oder Arsen aus dem Gestein gelöst. Der Prozess erfordert pro kg gefördertem Gold durchschnittlich 141 kg Zyanid, und der weltweite Einsatz von Zyanid in Goldminen wird auf 182 000t pro Jahr geschätzt,⁹ wovon auch ein Teil in die Umwelt gelangt.

Zurückgelassene Abraumhalden und Waschschlämme (Tailings) führen zu Luft-, Boden- und Wasserbelastung und stellen ein Risiko für Ökosysteme und Menschen dar. Auch führt beispielsweise das Prozessieren von Arsenopyrit-haltigem Golderz durch die Aufschlüsselung des im Gestein gebundenen Arsens zu einem neuen Umweltproblem.¹²

Für das Recycling von Gold aus Abfällen gilt eine andere Ausgangslage; WEEE und KVA-Schlacke stellen für die Gesellschaft von vornherein ein Abfallproblem dar. Die Rückgewinnung von Wertstoffen unter kon-



► **bb. 5** Ökobilanzierung für primäres Gold (gelb), sowie für Gold aus Elektroschrott (blau) bzw. aus KVA-Trockenschlacke (grün), bezogen auf die Umweltwirkung der Primärproduktion (34). Umweltbelastungspunkte (UBP) beinhalten Energieaufwand, Emissionen, Land-, Wassernutzung sowie Deponien; Treibhausgaspotential: kumulative Wirkung verschiedener Treibhausgase bezogen auf CO₂; Primärenergie gesamt: kumulierter Energieaufwand (erneuerbar und nicht erneuerbar) für gesamte Bereitstellungskette.

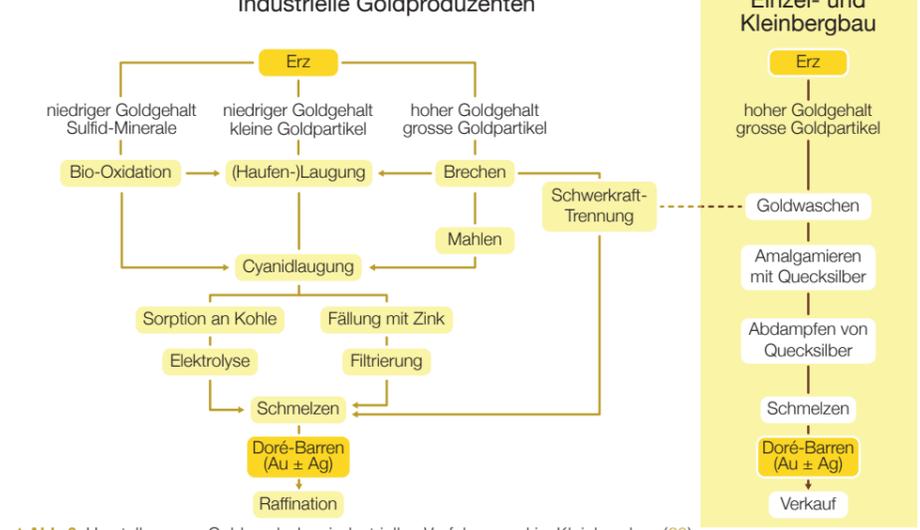
trollierten Bedingungen sowie fachgerechte Behandlung und Entsorgung (Schadstoffentfrachtung) des verbleibenden Abfalls verringert die Umweltauswirkungen. Gegenüber der Primärproduktion hat das Recycling von Gold aus KVA-Schlacke und Elektroschrott einen signifikanten Umweltvorteil (Abb. 5).³⁴

5. Technologie

Etwa 80-85 % der Goldgewinnung findet im grossindustriellen Massstab unter gut kontrollierten Bedingungen statt,⁹ wogegen schlecht kontrollierbarer handwerklicher Goldabbau (ASGM) die verbleibenden 15-20% liefert (Abb. 6).

Handwerklicher Goldabbau wird aufgrund folgender Gründe häufig unter Verwendung von Quecksilber (Hg) praktiziert.²⁸ Hg ist ein sehr effektives Extraktionsmittel welches die hohe Bindungsaffinität mit Gold (Amalgamation) nutzt und mit minimaler Ausrüstung und Ausbildung durch eine Einzelperson eingesetzt werden kann. Es ist allgemein gut verfügbar, transportierbar und ferner sehr günstig handelbar (das Quecksilber-Gold Preisverhältnis im Januar 2008 beispielsweise lag bei 1: 1650).

Industriell wird Gold in Untergrund- und Offentagbauminen aus Festgesteinslagerstätten oder durch Ausbaggern aus unverfestigten Sedimentablagerungen oder alten Mühlenrückständen gewonnen. Durchschnittliche, derzeit abbauwürdige Goldkonzentrationen wichtiger Minen liegen um 3g/t. Grosse Sedimentlagerstätten (Gold liegt in gediegener Form vor: geringere Extraktionskosten) können bis zu Gehalten von 0.2 g/m³ abgebaut werden.²¹ Der Extraktion von Gold mit Quecksilber



► **Abb. 6** Herstellung von Gold nach dem industriellen Verfahren und im Kleinbergbau (30).

wird in industriellen Prozessen die Zyanid-Gewinnung vorgezogen, welche aufwändiger aber effizienter ist (Abb. 6). Der Prozess lässt sich wie folgt zusammenfassen:²¹ Das Gold wird mit einer Kalium- oder Natriumzyanidlösung (KCN bzw. NaCN-Lauge) aus dem Erz herausgelöst, mit Aktivkohlefiltern gebunden, aufkonzentriert und durch Schmelzen gereinigt, was eine ökonomische Gewinnung bis zu Konzentrationen von unter 0.2 ppm (g/t) ermöglicht. Zyanidlösung ist jedoch nur einsetzbar sofern die Gehalte

von S, Fe, Ag, As, Cd, Sb, Ni, Co und Zn im Erz tief sind, da diese Elemente selbst mit der Zyanidlauge reagieren würden. Bei höheren Gehalten dieser Elemente wird eine Vorbehandlung durch Flotation und Rösten (Oxidation) erforderlich, was wiederum zu höheren Kosten und entsprechend auch höherem Cut-Off-Grad führt (mehr Verluste).

6. Ökonomie

Der Goldmarkt ist diffus und durch spekulative Preisfluktuationen gekennzeichnet. Der Gesamtmarktwert der jährlichen Goldproduktion liegt im oberen Feld aller gehandelten mineralischen Rohstoffe.²⁴ Der ökonomische Beitrag der Goldindustrie im Jahr 2012 wurde auf 110Mrd. US\$ geschätzt, und der Goldabbau hat den fünfzehn grössten Förderländern schätzungsweise 78Mrd. US\$ eingebracht.³⁵ Allein der Goldabbau in Witwatersrand in Südafrika, einer der wichtigsten Goldlagerstätten (Goldgehalt 5 g/t), beschäftigt über 145 000 Menschen³⁵ und hat durch den Abbau von über 50 000t Gold seit 1884 wesentlich zum ökonomischen Erfolg von Südafrika beigetragen.²¹

Als Goldeigentümerin stand die Schweiz im Jahr 2012 mit ihren 1040.1 t Goldreserven der Nationalbank³⁷ weltweit an siebter Stelle; dies ergab mit etwa 180 g (2012: ca. 9 600 CHF)³ die höchsten nationalen pro-Kopf Goldreserven.

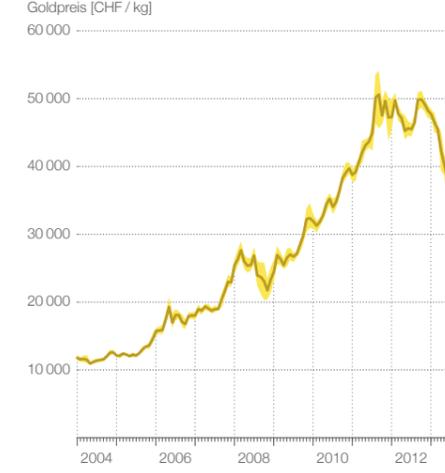
Zudem ist die Schweiz die wichtigste globale Goldscheibe; vier der neun weltweit grössten Goldraffinerien haben ihren Sitz in der Schweiz und verarbeiten über ein Drittel des jährlich abgebauten Rohgoldes.⁹ Die 2 299t Gold⁷ die im Jahr 2012 in die Schweiz importiert wurden, hatten einen Wert von etwa 115 Mrd. CHF (2012: 1668.98 US\$/

tr oz) (Abb. 7), während sich der Weltgesamthandel auf 4453 t (224 Mrd. CHF) belief, wovon 1 625 t aus Recycling stammten.³⁶

Gewerbmässiger Goldbergbau wurde in der Schweiz nur bis Anfang des 20. Jahrhunderts praktiziert (letzter Goldbergbau 1939 bei Astano) und ist aufgrund von gesellschaftlichem Widerstand und Umweltbedenken zurzeit nicht möglich.

Das Recycling von Gold aus anthropogenen Abfallströmen hingegen kann auch in der Schweiz ökonomisch rentabel betrieben werden und lohnt sich insbesondere bei einzelnen Komponenten von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Auch Schlacke aus Kehrichtverbrennungsanlagen stellt ein Recyclingpotenzial dar; allein aus der Trockenschlacke der KVA Hinwil können jährlich neben anderen Metallen etwa 10 kg Gold²⁷ mit einem Marktwert von 370 000 CHF (Januar-März 2014: 1150 CHF/tr oz) gewonnen werden. Aus der KVA Hinwil ist ferner bekannt, dass Kupfer, Gold, Silber und Palladium etwa 60% der Nichteisen-Edelmetalle in der Trockenschlacke ausmachen. Die drei Erstgenannten lassen sich zu hoher Reinheit aufbereiten und zu 80% bis 90% der Weltmarktpreise vermarkten.

Die Rentabilität der Gewinnung aus KVA-Schlacke verbessert sich zudem dadurch, dass in der Schlacke noch weitere, zu guten Konditionen verwertbare Metalle enthalten sind.



► **bb. 7** Monatliche Goldpreise von 2004 bis 2014 (13). Der schattierte Balken gibt die Differenz zwischen Höchst- und Tiefstpreis wieder, die braune Linie den Monatsabschluss.