

Metallzeiten – von der Kupferzeit zum All Metals Age

1 Einleitung

Metallzeiten – das klingt nach einem historischen Paradigma zur Kennzeichnung von Zeiteinheiten einer fernen Vergangenheit aufgrund von erhalten gebliebenen Artefakten: Bronzezeit und Eisenzeit. Dies klingt nach Spezialdiskussionen von Archäologinnen, Archäologen, Spezialistinnen und Spezialisten anderer Disziplinen. *Tempi passati*. Vergangene Zeiten, die nichts mehr mit unserem Leben zu tun haben. Doch das ist weit gefehlt. Metallzeiten waren seit ihren Anfängen auf der Bühne der Menschheit eine wichtige Einflussgröße. Metalle sind fortdauernd aktuell und herausfordernd.

»Der Nahe Osten hat Öl, China hat Seltene Erden.« In seiner berühmt gewordenen Rede formulierte der damals führende Politiker Chinas, Deng Xiaoping, im Januar 1992 diese vorausschauende Einsicht (zitiert nach Vogel 2012). Seine Reise nach Südchina wurde zum Auftakt des wirtschaftlichen Reformprozesses in China. Es sei dahingestellt, ob diese Poin-tierung Dengs seine Wurzeln darin hat, dass in einem Hauptstrang der chinesischen Kultur, dem Daoismus, Metall eines der fünf grundlegenden Elemente ist. Tatsächlich war Bronze für China identitätsstiftend und sie ist bis zum heutigen Tag kulturell bedeutsam.

Während in anderen Ländern in den 1990er- und 2000er-Jahren Minen zur Gewinnung von Seltenerdmetallen geschlossen wurden, vielfach aufgrund umweltpolitischer Rege-lungen, baute China den Erzbergbau in diesem Segment systematisch aus. Die anhaltende Elektronifizierung brachte China gegen Ende der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts in die vorteilhafte Situation, zum bestimmenden und für einige Seltenerdmetalle nahezu ein-zigen Anbieter zu werden. Dies schreckte die Öffentlichkeit, Unternehmen und Politik in vielen Industriestaaten um das Jahr 2010 auf. Kritische Metalle und die Versorgungssicher-heit strategischer Ressourcen wurden in den Industrieländern zu einem brisanten Thema. Recycling von Metallen und Ressourceneffizienz avancierten zu Politikzielen.

Die Verfügbarkeit von Metallen wird bisher vorrangig am Indikator Preisentwicklung festgemacht. Die öffentliche Aufmerksamkeit nahm deshalb in den Folgejahren angesichts sinkender Preise bei den Seltenen Erden rasch wieder ab. Steigende Preise etwa für Kobalt und Lithium im Jahr 2017 führten zu einer erneut zunehmenden öffentlichen Aufmerksam-keit an Metallen. In diesem Fall wurde die Entwicklung durch die Erwartung ausgelöst, dass

die Elektrifizierung der Automobile in den kommenden Jahren ernstlich Fahrt aufnehmen wird und deshalb der Bedarf an Rohstoffen für die Batterien der Elektroautos steigen wird.

Parallel sind erste Schritte zu einer Ressourcenpolitik auf verschiedenen Politikebenen festzustellen (nationale Ebene etwa BMUB 2016). Studien befassen sich mit der Versorgungssicherheit kritischer Metalle. Die Systemgrenzen dieser Studien sind zeitlich zumeist für einen Zeitrahmen von 15 bis zu 30 Jahren ausgelegt und räumlich steht die Versorgung deutscher beziehungsweise europäischer Unternehmen im Mittelpunkt (etwa Angerer et al. 2016; übergreifend zur Thematik kritische Metalle Exner et al. 2016).

Diese Studien und die darauf aufbauende Ressourcenpolitik sind ein erfreulicher erster Einstieg. Die Tragweite der Herausforderungen im Umgang mit Metallen hat jedoch eine ganz andere, grundlegendere Dimension. Denn am Anfang der Großen Transformation zur Nachhaltigkeit und der Digitalen Transformation ist die Art der Nutzung der Metalle trotz allem nach wie vor tendenziell nichtnachhaltig.

Metalle sind die materielle Voraussetzung der menschlichen Zivilisation. Sie spielen auf der Bühne der Menschheit eine tragende Rolle; und wie nachfolgend kurz ausgeführt wird, darüber hinaus übergreifend auf der Bühne des Lebens und des Kosmos. Dies ist keine bloße, gut klingende Metaphorik, sondern betrifft die Grundlagen des Lebens und Wirtschaftens. Gerade Metalle (und ebenso die Halbmetalle) nehmen in der beginnenden Großen Transformation – weg von der fossilen, nichtnachhaltigen Entwicklung, hin zu einer postfossilen, nachhaltigen Entwicklung – eine zentrale Rolle ein. Dies gilt gleichermaßen für deren ineinandergreifende Bausteine Energie-, Mobilitäts-, Stoff-, Agrar- und Ernährungswende sowie für die Digitale Transformation.

Kurz gefasst: Postfossil geht und ist dringlich! Postmetallisch geht nicht!

Aus einer rein instrumentellen Sicht – solange der Nachschub der Metalle für die deutsche beziehungsweise europäische Industrie für die kommenden zwei oder drei Jahrzehnte gesichert ist, ist alles gut – lässt sich eine Stoffwende nicht realisieren. Lässt sich keine grundlegende Fundierung einer der Tragweite der Herausforderungen entsprechenden Ressourcenpolitik gründen: Warum sollten sich die Bürgerinnen und Bürger – der Souverän in der Demokratie – für Metalle interessieren, wenn doch alles so reichlich angeboten wird? Warum sollten sich Vertreter der Unternehmen, von Spezialisten abgesehen, dafür interessieren, solange der Nachschub an Rohstoffen, Vor- und Endprodukten für die kommenden Jahre gewährleistet ist? Warum sollten sich die politischen Akteure angesichts eines geringen öffentlichen Interesses und dementsprechend geringem aktuellen Problemdruck damit befassen?

Immerhin könnten sich Umweltschützerinnen und gegebenenfalls Anwohner von belastenden Anlagen sowie generell Bürgerinnen, die Gesundheitsgefahren aufgrund von (Schwer-)Metallbelastungen befürchten, dafür interessieren. Dem steht einerseits

gegenüber, dass die Belastungen zum großen Teil in Raum und Zeit fern sind. Die Probleme sind vielfach nur kognitiv vermittelt und nicht direkt spürbar. Andererseits wäre dies ein rein negatives Interesse an Metallen. Die grundlegende Bedeutung der Metalle als materielle Voraussetzung des Wirtschaftens, Lebensstils, der Kultur erschließt sich damit nicht.

Die Menschheit steht vor einer *existenziellen Herausforderung*: Es gilt ein grundlegendes Verständnis für die Metallisierung zu entwickeln und den Übergang zu einer klugen, nachhaltigen Nutzung von Metallen als Teil der Großen Transformation zur Nachhaltigkeit auf den Weg zu bringen. Dies ist in einer – historisch betrachtet – extrem kurzen Zeitspanne zu bewerkstelligen. Mit Materialien und Werkstoffen, die wie die Metalle in den für uns Menschen relevanten Zeitskalen nicht erneuerbar sind. Metalle sind jedoch, dies sei vorab angemerkt, nach der Nutzung noch vorhanden und können erneut genutzt werden. Wenn sie klug gebraucht und nicht faktisch verbraucht (dissipiert) werden.

Ein Bewusstsein für diese Herausforderung ist die Voraussetzung, dass die Aufgabe eines nachhaltigen Umgangs mit Metallen verstanden und angegangen wird: *Metallbewusstsein*. Metallbewusstsein in der Breite der Bevölkerung, Politik, Wissenschaft, Technik, Unternehmen, Medien, in allen Bereichen der Gesellschaft.

Mit unserem Buch wollen wir Metallbewusstsein fördern und damit zu einem nachhaltigen Umgang mit Metallen in der Großen Transformation zur Nachhaltigkeit und in der Digitalen Transformation beitragen. Die Zielrichtung ist mit der übergreifenden Maxime umschrieben:

Metalle wertschätzen und klug nutzen.

Im einführenden Beitrag begeben mich auf eine Spurensuche zu den Metallzeiten auf der Bühne der Menschheit (als Beispiel für eine Spurensuche ist zu empfehlen Savoy 2015). In dieser Spurensuche stößt man auf etwas Neues: Die Menschheit lebt heute in einem neuen Metallzeitalter – im *All Metals Age*.

2 Metallzeiten – die Anfänge

»Heavy Metal – Wie Kupfer die Welt veränderte« – mit dieser Sonderausstellung ergänzte das Südtiroler Archäologie Museum, Bozen, die Dauerausstellung zum »Mann aus dem Eis« (Februar 2016 bis Januar 2018). Ausgangspunkt ist der spektakuläre Fund einer Gletschermumie am 19. September 1991 in Südtirol auf großer Berghöhe. Aufgrund der Fundstelle in der Nähe der Ötztaler Alpen, an der Fineilspitze, wird der Mann aus dem Eis umgangssprachlich Ötzi genannt. Die plastische Rekonstruktion wird in den Medien vielfach verbreitet. Sie hat es zu einem hohen Bekanntheitsgrad gebracht.



Abbildung 1: Plastische Rekonstruktion des Mannes aus dem Eis
 Rekonstruktion by Kennis © Südtiroler Archäologiemuseum/Augustin Ochsenreiter

Der Fund ist in vielfacher Hinsicht spektakulär: Ötzis Lebenszeit wird in die Zeit von circa 3320–3050 v. Chr. datiert. Durch die besonderen Umstände war die Person mumifiziert, Kleidungsstücke, Hölzer et cetera gut konserviert. Ötzi hatte ein Kupferbeil bei sich (siehe Abb. 2 Beitrag Putzer in diesem Band). Aus dieser Zeit gibt es wenig vergleichbare Funde. Dies hat unter anderem mit einer charakteristischen Besonderheit der Metalle zu tun: Sie können wieder eingeschmolzen und neu verwendet werden. Diese Eigenschaft war für den Beginn der Metallzeit in der Menschheitsgeschichte eine wichtige Eigenschaft (und ist es auch heute noch). Sie kennzeichnete einen kategorialen Unterschied zu anderen Arten von Mineralien und Steinen.

Seit der Entdeckung der Gletschermumie haben sich die Methoden der analytischen Chemie sowie der Metall- und Montanarchäologie enorm weiterentwickelt und erlauben eine immer tiefer gehende Spurensuche (vgl. Beiträge Putzer, Stöllner und Goldenberg in

diesem Band). Deshalb konnte zur 25-jährigen Jubiläumsveranstaltung des Fundes eine neue Studie vorgestellt werden: Das Kupfer des Beils stammt demnach nicht aus Bergbaugebieten der Alpen sondern aus der metallreichen Region der südlichen Toskana (Artioli et al. 2016). Das Kupferbeil Ötzi ist ein Beleg dafür, wie die Verwendung von Kupfer zum Fernhandel beitrug.

Die entscheidende Frage ist: *Wie kam es dazu, dass Menschen lernten, Metalle zu nutzen?* (zum Folgenden Roberts/Thornton 2015; Stöllner/Oeggel 2015).

Funde belegen, dass Malachit ($\text{Cu}_2[(\text{OH})_2/\text{CO}_3]$) mit seiner grünen und Azurit ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) mit seiner blauen Färbung im Mittleren Osten als Schmuckstücke im späten II. Jahrtausend v. Chr. verwendet wurden (Killick in Roberts/Thornton 2015: 19). Elementare Metalle finden sich in der Natur für einige Elemente: Gold, Silber sowie Kupfer. Die frühzeitige Nutzung dieser elementaren Form von Metallen ist in unterschiedlichen Teilen der Erde nachgewiesen. Neben den Farben faszinierte die Menschen vermutlich der Glanz dieser Materialien und war ihre Plastizität auffällig.

Gerade die Nutzung von gediegenem Kupfer ist zum Verständnis der Metallzeiten hilfreich: Im Bereich der Großen Seen in Nordamerika gab es große Lagerstätten von gediegenem Kupfer (Ehrhardt in Roberts/Thornton 2015: 303–328). Beginnend etwa ab 5000 v. Chr. entwickelte sich daraus eine eigenständige Kupferkultur mit Nutz-, Schmuck- und Kultobjekten mit einer hohen Kunstfertigkeit in der Bearbeitung des Kupfers. Dies sind weltweit die einzigen Lagerstätten von elementarem Kupfer in dieser Größenordnung. Deshalb konnte sich eine derartige Kultur nur dort entwickeln.

Zurück zu den Ursprüngen der Hauptlinien der Metallisierung. Die Nutzung von metallhaltigen Mineralen wie Malachit und Azurit sowie gediegen vorkommenden Metallen als eine Art »besonderer Steine« ist Teil der Menschheitsgeschichte. Aber wie kam es dazu, dass Erze geschmolzen, daraus Metalle gewonnen, verarbeitet und genutzt wurden? Unsere frühen Vorfahren hatten noch kein Wissen über »Metalle«, konnten noch keine Vorstellung von dieser besonderen Klasse von Werkstoffen haben. Bis heute ist es trotz modernster Methoden noch nicht klar, wie *genau* es dazu kam, dass Kupfer aus Erzen geschmolzen wurde? Für diesen Prozess sind viele Schritte erforderlich: Erkundung metallhaltiger Erzlagerstätten, Abbau, Aufbereitung, insbesondere Schmelzen bei entsprechend hohen Temperaturen, wofür wiederum Holzkohle und Brenntechniken notwendig sind sowie metallurgische Verarbeitungstechniken wie Gießen und Schmieden. Tatsächlich gelang dies unabhängig voneinander mindestens in zwei Regionen der Erde (Anden in Südamerika; Anatolien/Iranische Hochebene/Mittlerer Osten). Die Techniken und kulturellen Praktiken entwickelten sich, wurden verbreitet sowie kulturell in unterschiedlichsten Regionen adaptiert und spezifisch weiterentwickelt.

Das Schmelzen von Kupfer war ein grundlegender Übergang in der Entwicklung der Menschheit. Was bedeutet dies genau? Es bedeutet zunächst nicht, dass mit der beginnenden Kupferzeit schlagartig mit Kupfer ein Metall der bestimmende Werkstoff wurde. Dies

waren in diesem Zeitraum möglicherweise noch nicht einmal die Steine der »Steinzeit«. Mengenmäßig und von der Bedeutung her war vermutlich Holz als Werkstoff gewichtiger. Organische Stoffe sind aber weniger beständig als Metalle oder auch Keramik. Deshalb wurden in der prähistorischen Forschung regionale Kulturen vielfach anhand der Fundorte von Keramiken benannt.

Im wahren Wortsinn grundlegend ist der Beginn der Metallzeit aus einem anderen Grund: Die Entwicklung des Bergbaus und die Entwicklung eines Verständnisses für die Besonderheit von Materialien, die eine eigene Klasse mit spezifischen Eigenschaften bilden – im Laufe der Entwicklung »Metall« genannt – war die *Voraussetzung* für spätere Entwicklungen in der Menschheitsgeschichte. Für die Entwicklung der Techniken zum Schmelzen der Erze und der Verarbeitung der Metalle war wiederum Voraussetzung, dass in der Menschwerdung die Hominiden lernten, die Angst vor dem Feuer abzubauen, natürlich entstehendes Feuer zu nutzen und im Verlauf der Evolution Techniken des Feuerentfachens, Herde, Brennöfen et cetera zu entwickeln (Parzinger 2015; Pyne 2012).

Die Kupferzeit war menscheitsgeschichtlich die erste Metallzeit (zum Teil immer noch als Kupfersteinzeit benannt; etwa Neukirchen 2016). Die Abfolge der technologischen Entwicklung war dabei nicht eindeutig determiniert. Lange Zeit war dagegen eine einheitliche Abfolge folgender Art vermutet worden: (1) Am Anfang steht in dieser Sicht die Verwendung von metallhaltigen Mineralen als Schmuckstücke. (2) Dann folgt die Nutzung elementar vorkommender, gediegener Metalle. (3) Erst danach kommt es zum eigentlichen Übergang zur Metallurgie mittels Schmelzen von Erzen und daraus Gewinnung von Metallen wie Kupfer und Blei (dazu Killick in Roberts/Thornton 2015: 19 f.; Kienlin in Roberts/Thornton 2015: 448 ff.).

Tatsächlich gab es unterschiedliche Abfolgen in verschiedenen Regionen der Erde. Gleiches gilt für die weiteren Entwicklungen der folgenden Metallzeiten. Es gab unterschiedliche Entwicklungspfade, bedingt durch unterschiedlich zusammengesetzte Erzlagerstätten, sonstige naturräumliche Bedingungen und kulturelle Unterschiede.

Zugleich gilt: Bestimmte Entwicklungsschritte sind ihrerseits die Voraussetzung für gewisse nachfolgende Entwicklungsschritte. So musste beispielsweise der Schmelzvorang von kupferhaltigen Erzen beherrscht und von Generation zu Generation erfolgreich tradiert werden (*tacit knowledge*). Erst daraus konnte sich das Verständnis für unterschiedliche Verarbeitungs- und Materialeigenschaften entwickeln.

Es ist zu vermuten, dass die Metallurgen der Kupferzeit im Lauf der Zeit die Unterschiede in den Verarbeitungsqualitäten und den Materialeigenschaften verschiedener Erzlagerstätten zunehmend besser verstanden und sich zunutze machten. Dies war wiederum Voraussetzung für den nächsten großen Entwicklungsschritt in der Metallisierung: die Legierung. Am Beispiel Fahlerze aus dem Tiroler Montanrevier Schwaz-Brixlegg wird diskutiert, dass damit eine Art Legierung von Kupfer mit Arsen beziehungsweise zum Teil auch mit Antimon mit verbesserten Eigenschaften (höherer Härtegrad et cetera) gelang.

Auf diesem Erfahrungswissen aufbauend war der eigentliche Übergang dann die *gezielte Legierung* von Kupfer mit Zinn zu Bronze. Der Beginn der Bronzezeit ist räumlich und zeitlich – vergleichbar mit den Anfängen der Kupferzeit – sehr unterschiedlich. Deshalb kann man für die frühen Metallzeiten – Kupfer-, Bronze-, Eisenzeit – keine allgemeingültige Periodisierung vornehmen. Vielmehr ist dies nur für bestimmte Regionen möglich. So begann die Kupferzeit auf dem Balkan etwa im 5. Jahrtausend v. Chr. und breitete sich von da ausgehend über große Teile Europas aus (vgl. Abb. 3 Beitrag Stöllner in diesem Band). Auf unterschiedliche Entwicklungspfade im anderen Ursprungsraum der Anfänge der Metallzeiten bis zur Bronzezeit, den Anden, kann ich in dieser kurzen Einführung nicht eingehen (Lechtman in Roberts/Thornton 2015: 361–422).

Vergleichbar zum Kupferbeil Ötzi aus der Kupferzeit gibt es aus der Bronzezeit den spektakulären Fund der Himmelscheibe von Nebra (Sachsen-Anhalt). Diese wurde etwa in der Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr. zu rituellen Zwecken zusammen mit wertvollen Beigaben vergraben (Meller 2004). Das Kupfer stammt aus der zu dieser Zeit überregional bedeutsamen Montanregion Mitterberg (Salzburger Land).



Abbildung 2: Himmelscheibe von Nebra, Bronze und Gold, circa 1600 v. Chr.
© Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Juraj Lipták

Der Übergang von der Bronzezeit zur *Eisenzeit* markiert den nächsten großen Entwicklungsschritt in der Metallgeschichte. Obwohl Eisen in der Erdkruste einen erheblich höheren Anteil hat als etwa Kupfer, dauerte es aufgrund spezifischer Anforderungen, bis

Eisenerze im großen Stil geschmolzen und genutzt werden konnten (die frühere Nutzung von Eisen aus Meteoriten war sehr selten). Dieser Übergang begann erstmalig im östlichen Anatolien (etwa ab dem 14. Jahrhundert v. Chr.). Die weiteren Entwicklungen – Herstellung von Stahl, Gusseisentechnik, unterschiedlichste Anwendungen etwa in der Waffenproduktion und Landwirtschaft – waren wirtschaftlich, kulturell und politisch prägend.

Kupferzeit, Bronzezeit, Eisenzeit – sie kennzeichnen technologische Entwicklungen, die den Möglichkeitsraum der Kulturen erweiterte. Sie trugen wesentlich zu einer weitergehenden Arbeitsteilung und Spezialisierung bei, beeinflussten Siedlungsstrukturen und großräumige Transportwege (Bronzezeit: Stöllner 2005), religiöse Praktiken und kulturelle Identitätsbildung. So entstand im Lauf dieser aufeinander folgenden Metallzeiten ein erstes Metallbewusstsein. Ein Bewusstsein davon, dass es sich bei den unterschiedlichen Werkstoffen wie Kupfer, Gold, Silber, Zinn, Eisen, Quecksilber, Zink sowie Blei, Arsen und Antimon ebenso wie bei Verbindungen aus diesen Stoffen (Legierungen) um etwas Besonderes, Gemeinsames handelt: *Metall*. Der Entwicklung vorgreifend sei angemerkt: Erst im Zuge der Entwicklung der Chemie als Wissenschaft wurde dann klar, dass einige Elemente davon metallische und andere Eigenschaften haben. Sie sind Halbmetalle (Arsen, Antimon).

Dieses Metallbewusstsein schlug sich beispielsweise in der frühen Dichtung der griechischen Antike von Hesiod in *Werke und Tage* nieder (Hesiod 2011 [ca. 700 v. Chr.]), der die Menschheitsentwicklung durch metallene Menschengeschlechter kennzeichnete (vgl. Beitrag Bichler in diesem Band). Dies ist bis heute – in einem abgewandelten Verständnis – als metallene Zeitalter geläufig, insbesondere das Goldene Zeitalter. Im antiken China fand, wie eingangs bereits angetönt, die hohe kulturelle und wirtschaftliche Bedeutung ihren Niederschlag darin, dass in der daoistischen Traditionslinie Metall eines der fünf Elemente neben Holz, Feuer, Wasser und Erde ist.

3 Metallzeiten – von den Anfängen zum All Metals Age

Die Bedeutung der aus Erzen geschmolzenen Metalle kann für die Menschheitsgeschichte auf allen Kontinenten – mit Ausnahme Australiens – im wahrsten Wortsinn als elementar bezeichnet werden. Dies sei an wenigen Stichworten beispielhaft angedeutet:

- Im Gebiet des heutigen Chinas wurde bereits seit etwa dem 6. Jahrhundert v. Chr. eine spezifische Technik zur Produktion von Gusseisen entwickelt, die in der Zeit der Han-Dynastie (207 v. Chr. bis 220 n. Chr.) zu einer Art Massenproduktion von landwirtschaftlichen Geräten und Werkzeugen aus Eisen führte. Kohle wurde dort ebenfalls historisch singular in einem Teilprozess des Schmelzvorgangs eingesetzt. Dieser frühe Durchbruch beim Eisenguss bereits in der Antike Chinas war bezogen auf die Produktivität insbesondere der Landwirtschaft und damit wirtschaftlich sowie machtpolitisch folgenreich. Vergleichbare Gusstechniken hatten ihre Anfänge in Europa erst im

12. Jahrhundert, die Nutzung von Koks aus Steinkohle entwickelte sich in Großbritannien ab dem Beginn des 18. Jahrhunderts (Smil 2016: 5–9, 19–28).

- Gold, Silber, Kupfer und Edelmetalllegierungen wie Elektron ermöglichten den Übergang von der Naturaltauschwirtschaft zur Geldwirtschaft. Papiergeld konnte sich im Fernen Osten erst in einer Münzgeldwirtschaft entwickeln (frühe nördliche Song-Dynastie, ab etwa Ende 10. Jahrhundert). Noch im 20. Jahrhundert war das Edelmetall Gold als physische Grundlage des Goldstandards eine weltwirtschaftlich wichtige Größe.
- Die mechanische Uhr wurde, neben der doppelten Buchführung, für die Herausbildung moderner Wirtschaftsformen und die Rationalisierung der Lebensführung im Spätmittelalter und der beginnenden Neuzeit prägend. Metalle bildeten das Ausgangsmaterial der Räderuhr.
- Frühe Formen des Buchdrucks sind aus Korea und China bekannt. Den entscheidenden Durchbruch brachte die Erfindung des Goldschmieds Johannes Gutenberg, der um die Mitte des 15. Jahrhunderts den Buchdruck mit beweglichen Metalllettern erfand (Schmidtchen 1997: 573–587). Lettern aus einer Bleilegierung (Blei mit Zinn, Wismut, Antimon legiert) garantierten eine hohe Produktivität, Kupfer wurde für die Vorform, Messing für Druckstöcke der Initialen, Eisen für die Platte des Lettern-Rahmens verwendet. Ebenso wichtig waren Papier, verschiedene Hölzer und Druckfarben, aber auch die Einführung normierter Schrifttypen.
- Die Entwicklung der Feinmechanik war in der beginnenden Neuzeit – zusammen mit der Optik – für die Erfindung von neuen Geräten aus Messing wie dem Fernrohr, Mikroskop, Kompass et cetera für die Navigation ebenso wichtig wie für die Herausbildung einer auf Experimenten beruhenden Wissenschaft.
- Und so könnte ich fortfahren: barocke Pracht des 17. und 18. Jahrhunderts, Dampfmaschine als Leitmaschine der beginnenden Industriellen Revolution, Eisenbahn, Dampfschiff, Telegraf, elektrische Beleuchtung, Elektromotoren – die Nutzbarmachung von Metallen war die Voraussetzung für all diese Entwicklungen und die durch sie ausgelösten Umwälzungen.

»Allein der Mensch vermag ohne Metalle nicht die Dinge zu beschaffen, die zur Lebensführung und zur Kleidung dienen.« (Agricola 2015: 10 [1556]) In seinem zum Klassiker avancierten Buch zum Bergbau, Hüttenwesen und Metallen betonte Agricola bereits 1556, dass Werkzeuge aus Metallen, insbesondere aus Eisen, zur Produktion erneuerbarer Ressourcen Voraussetzung sind (Grober 2015: 22–24).

Der weitere Verlauf der Nutzbarmachung der Metalle steht in enger Verbindung mit der Etablierung der Physik und der Chemie als Wissenschaften. Sauerstoff und das Prinzip der Oxidation wurde gegen Ende des 18. Jahrhunderts entdeckt. Im 19. Jahrhundert ging es dann Schlag auf Schlag: Immer mehr Elemente wurden im 19. Jahrhundert gefunden und ihre Eigenschaften wissenschaftlich bestimmt, eine einheitliche Nomenklatur der Elemente

entwickelt, die Analysemethoden verbessert, die Synthesechemie gestartet. Im Jahr 1869 wurde das Periodensystem unabhängig voneinander von Dmitri Mendelejew und Lothar Meyer entdeckt. In der Folge wurden weitere Elemente des Periodensystems gezielt gesucht, rein dargestellt und ihre Eigenschaften beschrieben. In Abbildung 3 wird der heutige Stand des Periodensystems wiedergegeben.

Das Periodensystem der Elemente

Hauptgruppen		Nebengruppen								Hauptgruppen							
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1																2	
3	4											5	6	7	8	9	10
11	12											13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	114					
Lanthanoide		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
Actinoide		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	

Hintergrundfarbe = Metall	Schriftfarbe = Festkörper
Hintergrundfarbe = Halbmetall	Schriftfarbe = Flüssigkeiten
Hintergrundfarbe = Nichtmetall	Schriftfarbe = Gase

Abbildung 3: Periodensystem unterschieden nach Metallen, Halbmetallen und Nichtmetallen

Quelle: <http://www.hpwt.de/Kern2.htm>

Von den stabilen Elementen sind etwa 75 Prozent Metalle, etwas mehr als 5 Prozent Halbmetalle (zum Beispiel Silicium und Arsen). Verschiedene Elemente sind entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften zu (Haupt- beziehungsweise Neben-)Gruppen zusammengefasst wie etwa Erdalkalimetalle, Alkalimetalle, die Platingruppe, Seltenerdmetalle. Bei den in der Natur vorkommenden radioaktiven Elementen, wie Thorium und Uran, handelt es sich ebenfalls um Metalle. Eine ausgesprochen schöne wie anschauliche Einführung in die Elemente des Periodensystems findet sich in Gray (2010). Je nach Perspektive und Nutzungsgesichtspunkten werden Metalle auch anders kategorisiert: Edelmetalle und Industriemetalle, Eisen- und Nichteisenmetalle et cetera.

Die Forschung führte nach der Entdeckung des Periodensystems nicht nur zu einer immer detaillierteren Bestimmung der Eigenschaften der Elemente. Vielmehr wurden die Möglichkeiten der Anwendungen, ihr *Funktionalisierungspotenzial* (Reller 2013; Zepf et al. 2014: 11) im Lauf der Zeit zunehmend besser verstanden. Das Verständnis für die Zusammenhänge von Materie, deren Eigenschaften und Wechselwirkungen in Raum und Zeit bildeten die Voraussetzung für die technischen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte: Elektronik, Beleuchtungssysteme, Waffensysteme, eine Vielfalt an Produktionstechniken in allen Sektoren der Wirtschaft und an Produkten für alle Lebensbereiche mit zunehmend anspruchsvolleren Vorgaben.

Abbildung 4 illustriert beispielhaft die Dynamik der zunehmenden Nutzung von immer mehr Metallen und anderen Elementen im Bereich der Energienutzung und Mobilität. Waren es vor Beginn der Industriellen Revolution nur eine vergleichsweise kleine Anzahl von Metallen, die in nennenswertem Umfang genutzt wurden und auch um die Zeit des beginnenden 19. Jahrhunderts lediglich eine begrenzte Anzahl, zeichnete sich im 19. Jahrhundert eine bis dahin beispiellose Dynamisierung in der Menschheits- und Technikgeschichte ab. So waren es um das Jahr 2000 im Bereich der Solarzellen und Windkraftanlagen bereits weit über 30 Elemente, die für ein Produkt oder Produktmodul verwendet wurden.

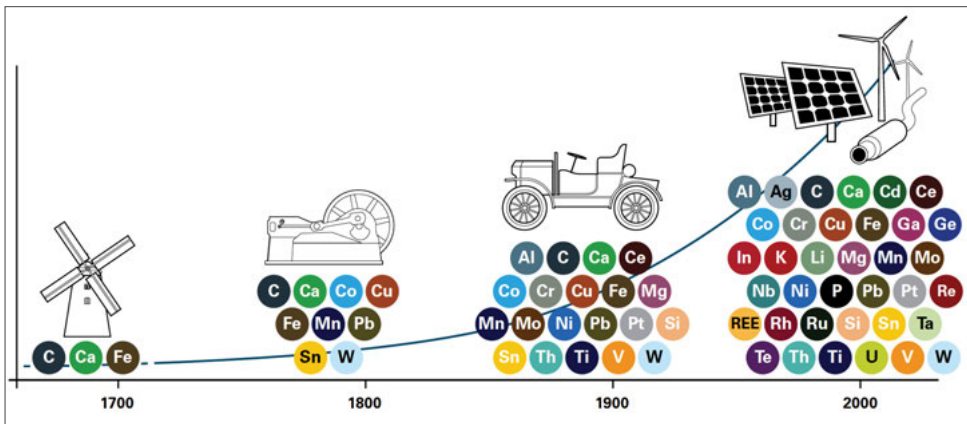


Abbildung 4: Elemente, die in starkem Maße für Energietechnologien genutzt werden
Quelle: Zepf et al. 2014: 6

Die anhaltende Beschleunigung der Digitalisierung und die beginnende Energiewende in Richtung erneuerbarer Energien trieben diese Entwicklung weiter voran: Zwischenzeitlich werden nahezu alle (stabilen) Elemente des Periodensystems genutzt (Elemente ab der Ordnungszahl 99 werden ausgeklammert; sie werden ausschließlich für Forschungszwecke verwendet). Wie eingangs geschildert, kamen durch Besorgnisse hinsichtlich der Versorgungssicherheit um das Jahr 2010 vorher nur Fachleuten bekannte Metalle, wie insbesondere Seltenerdmetalle, plötzlich in die Öffentlichkeit. So kam beispielsweise das Lanthanoid

Neodym, ein Seltenerdmetall, in die Schlagzeilen, da es in Permanentmagneten von Windkraftanlagen eingesetzt wird und damit für die Energiewende von strategischer Bedeutung ist (Stoffgeschichten zu Seltenen Erden Marschall/Holdinghausen 2018).

Trotz der sporadischen Aufmerksamkeit für bestimmte, als kritisch wahrgenommene Metalle wurde die Tragweite der übergreifenden Entwicklung noch nicht bewusst: Die Menschheit lebt heute im *All Metals Age* (Held/Schindler 2017). Sämtliche, also alle stabilen sowie einige radioaktive Metalle und alle Halbmetalle werden mittlerweile genutzt, und dies bei ihrem sehr hohen Anteil am Periodensystem. Diese Tatsache ist so weitreichend wie der Beginn der Kupferzeit und wie der Übergang zur Bronzezeit, in der die Bedeutung von Metallen als eine besondere Form von Materialien sich im Bewusstsein der Menschen mehr und mehr herausbildete.

Diese Entwicklung bezieht sich nicht nur auf die Zahl der genutzten Elemente und das Erreichen der Grenze, die durch die in der Natur vorkommenden Metalle und Halbmetalle gegeben ist (mehr halbwegs stabile Elemente gibt es nicht). Vielmehr potenzierte die Industrielle Revolution gleichermaßen das Produktionsvolumen der Metalle. Das erste Jahrhundert nach Beginn der Industriellen Revolution (ungefähr ab 1750/1760 im Pionierland Großbritannien) war durch die Kombination aus fossiler Kohle und Eisen/Stahl gekennzeichnet. Mit dem Beginn der Telegrafie, Elektromotoren und Aufbau der Elektrizitätsversorgung bekam das erste Gebrauchsmetall der Menschheitsgeschichte, das Kupfer, einen enormen Schub. Zwischenzeitlich werden immer mehr Metalle in immer größeren Mengen genutzt (Bradshaw et al. 2015: 2 ff.).

4 Metalle auf der Bühne der Menschheit, des Lebens und des Kosmos

Bevor ich abschließend zu den Perspektiven des *All Metals Age* für die beginnende Große Transformation zur Nachhaltigkeit und für die Digitale Transformation komme, lohnt es sich, bei der Spurensuche den Blick noch einmal in tiefer liegende Schichten zu richten.

Wie angesprochen wurden Malachit und Azurit bereits vor Beginn der Kupferzeit als Schmuckstücke gebraucht. Die Nutzung von Metallen reicht jedoch viel weiter zurück. Funde belegen, dass Metallfarben wie insbesondere Hämatit und Ocker bereits in den Anfängen der Herausbildung von Kultur in weiten Teilen der Erde verwendet wurden (Beispiel Bar-Yosef Mayer et al. 2009). Je nach Zusammensetzung der Farbpigmente ergab dies rote, gelbe, orangene bis bräunliche Farbtöne. Manganverbindungen ergaben schwarze Farbtöne. In Fachkreisen wird diskutiert, ob bereits Neanderthaler Pigmente aus Metallfarben nutzten und zwar möglicherweise auch für symbolische Zwecke (Appenzeller 2013; Langley et al. 2008).

Wie dem auch sei. Es führt aber auf eine wichtige Fährte: Noch ohne eine Vorstellung von Metallen als »Metall« zu haben, wurden metallhaltige Materialien früh in der Menschheitsgeschichte genutzt. Ganz einfach deshalb, da dies die Bestandteile waren, die die Menschen vorfanden und zu nutzen lernten.

Nicht anders verhielt es sich mit Metallen übergreifend auf der Bühne des Lebens zuvor: Metalle sind nicht nur Technologiewerkstoffe. Vielmehr waren sie Teil der Evolution des Lebens. Dabei fanden vorrangig solche Metalle Verwendung, die entsprechend verbreitet in allen Erdregionen in genügender Menge aufschließbar anzutreffen sind und deshalb mit der Nahrung und Wasser verfügbar waren. Oder sie sind in spezifischen Settings verfügbar und erlaubten an diese Umgebungen angepasste Lebensformen.

Für das menschliche Leben bedeutet das: Eisen ist allgegenwärtig und ist für den Transport des Sauerstoffs mit dem Blutfarbstoff Hämoglobin essenziell. Das Erdalkalimetall Calcium wiederum ist mit verschiedenen Verbindungen für die Knochenbildung und deren Stabilität bedeutsam. Mangan, Kalium, aber auch Kupfer, Zink oder Kobalt werden für die Wirkungsweise von Enzymen als Spurenelemente beziehungsweise Mikronährstoffe gebraucht. Zink spielt etwa für Immunabwehr eine Rolle. Natrium, Kalium und Magnesium sind ebenfalls essenzielle Mineralstoffe. Bei zu hohen Dosierungen können metallische Spurenelemente dagegen toxisch sein.

Gräbt man noch tiefer in geologischen Zeitschichten, wird offensichtlich: Metalle spielten von Anbeginn der Erdgeschichte eine Rolle und sind Teil der geologisch aktiven Erde (zur Einführung in die Mineralogie und Petrologie Klein/Philpotts 2017). Die Sauerstoffatmosphäre der Erde, die für die heutigen Landlebewesen samt Menschen Lebensvoraussetzung ist, konnte sich erst bilden, nachdem die eisenhaltigen Gesteine oxidiert waren. Flüssiges Eisen im Erdinneren (den festen Kern umfließend) bildet ein Erdmagnetfeld, das die Erdoberfläche vor harter kosmischer Strahlung schützt.

Übergreifend spielen Metalle auch bei der kosmischen Evolution eine maßgebliche Rolle. In den Sternen bilden sich die metallischen Elemente zusammen mit Halbmetallen wie Silicium und mit Nichtmetallen wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor (Übersicht Langmuir/Broecker 2012).

5 Perspektiven

Metalle sind eine der materiellen Voraussetzungen unserer Zivilisation. In einem viele Jahrtausende währenden Prozess der Metallisierung ist die Menschheit – welthistorisch singulär – im Lauf der beiden letzten Generationen im All Metals Age angekommen. Dies ist ein Übergang vergleichbar der Tragweite der Anfänge der Metallzeiten, als die Besonderheit von bestimmten Mineralen als »Metalle« zu Bewusstsein kam.

Vergleichbar zur damaligen Zeit steht heute ein neues Verständnis von Metallen an. Metalle sind dann nicht länger nur die glänzenden Metalle in elementarer Form wie Gold, Platin, Eisen/Stahl, Kupfer et cetera beziehungsweise entsprechenden Legierungen. Vielmehr gilt es, umfassend alle Metalle und Halbmetalle des Periodensystems als Metalle und die Bedeutung ihrer Funktionalisierungspotenziale für die anstehenden Entwicklungen zu verstehen (Held/Reller in Exner 2016; Held/Schindler 2016).

Wie eingangs bereits pointiert: Postfossil ist dringlich – postmetallisch geht nicht. Vielmehr werden die Metalle in der beginnenden Großen Transformation zur Nachhaltigkeit noch notwendiger werden. Ebenso sind die Metalle in ihrer ganzen Vielfalt für die Digitale Transformation essenzielle Voraussetzung.

Das Verständnis der rechten Dosierung bei Metallen in der Ernährung kann für das zu entwickelnde Metallbewusstsein dienen: Es gilt die Metalle als Bausteine des Lebens und Wirtschaftens wertzuschätzen. Und es gilt gleichermaßen, damit klug umzugehen, keine zu hohe, im Fall der Ernährung toxisch wirkende Überdosierung anzuwenden.

Die derzeitigen Grundtendenzen sind noch immer andere: Der Umgang mit Metallen ist nichtnachhaltig. Unter positiv klingenden Labels wie »smart« und »intelligent« werden Stoffumsätze immer schneller angekurbelt: Wearables, Implantate, Kühlschränke, Heizungen – alles soll mit allem verbunden werden. RFIDs (Radio Frequency Identification), Kameras, Sensoren, Übertragungstechniken, Aktoren, Beleuchtungstechniken, Displays, Tablets, Smartphones, smarte Häuser, Kühe, Städte ... – Weiteres ist fast beliebig zu ergänzen. Auch wenn nicht alle propagierten Gerätschaften und Systeme realisiert werden, wird damit doch die Dissipation von Metallen bestimmungsgemäß immer weiter angetrieben: Metalle werden vermischt, verstreut und damit die Rückholbarkeit zum Teil extrem erschwert, zum anderen Teil praktisch unmöglich gemacht (siehe Beitrag Kümmerer in diesem Band; Hagelüken 2017: 18).

*Metalle werden damit zum großen Anteil nicht gebraucht,
sondern praktisch gesehen verbraucht.*

Bisher wird vorrangig auf die materiellen Voraussetzungen der Energiewende und der dafür benötigten Mengen und Qualitäten an Metallen beziehungsweise Metallverbindungen fokussiert (vgl. etwa Bradshaw/Hamacher 2012; Zepf et al. 2014; Angerer et al. 2016). Vergleichbares steht für die Digitale Transformation an (Wäger et al. 2010; Oswald/Reller 2011). Insbesondere auch deshalb, da hier durch die Miniaturisierung und gleichzeitige Vermischung vieler Metalle in vielen Verbindungsformen die Möglichkeiten zum wiederholten Recyceln von Metallen bei hoher Qualität extrem limitiert werden.

Die Diskussion zu kritischen Metallen ist ein Einstieg. Tatsächlich geht es nicht nur um die Seltenerdmetalle, Kobalt, Lithium et cetera, sondern um alle Metalle und alle Halbmetalle. Kupfer ist nicht einfach das älteste Gebrauchsmetall in der Menschheitsgeschichte.

Es wird vielmehr für die zunehmende Elektrifizierung des Mobilitätsbereichs und die Digitalisierung noch wichtiger. Eisen und Stahl sind nicht nur geschichtlich herausgehoben, sondern mengenmäßig am gesamten metallischen Stoffwechsel der Menschheit dominant (Smil 2016). Nun ist Eisen aufgrund seines relativ hohen Anteils in der Erdkruste eines der Elemente der Hoffnung. Aber um die vielen spezifischen Einsatzgebiete realisieren zu können, ist eine große Zahl anderer Metalle für die Legierung der Spezialstähle erforderlich (Zepf et al. 2014: 87–90).

Ein herausfordernder neuer Akt der Metalle auf der Bühne der Menschheit steht an.

Literatur

- Agricola, Georg** (2015): *De Re Metallica Libri XII*. Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. 4. Auflage. Unveränderter Nachdruck Ausgabe 1928. Wiesbaden: marix [lat. Original 1556].
- Angerer, Gerhard et al.** (2016): Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft, Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse. München: acatech – Deutsche Akademie der Wissenschaften.
- Appenzeller, Tim** (2013): Old Masters. *Nature* 492: 302–304.
- Artioli, Gilberto et al.** (2016): Long-distance Connections in the Copper Age: New Evidence from the Alpine Iceman's Copper Axe. *PLoS One* 12: e0179263.
- Bar-Yosef Mayer, Daniella E.; Vandermeersch, Bernard; Ofer, Bar-Yosef** (2009): Shells and Ochre in Paleolithic Qafzeh Cave, Israel: Indications for Modern Behavior. *Journal of Human Evolution* 56: 307–314.
- BMUB** (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Bradshaw, Alex M.; Hamacher, Thomas** (2012): Nonregenerative Natural Resources in a Sustainable System of Energy Supply. *CHEMSUSCHEM* 5: 550–562. DOI: 10.1002/cssc.201100563.
- Bradshaw, Alex M.; Reuter, B.; Hamacher, Thomas** (2015): Could the Extensive Use of Rare Elements in Renewable Energy Technologies Become a Cause for Concern? *EPJ Web of Conferences* 98: 04007. DOI: 10.1051/epjconf/20159804007.
- Exner, Andreas; Held, Martin; Kümmerer, Klaus** (Hg.) (2016): *Kritische Metalle in der Großen Transformation*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gray, Theodore** (2010): *Die Elemente. Bausteine unserer Welt*. Köln: Fackelträger.
- Grober, Ulrich** (2015): *Wider den Raubbau. Der Beitrag Freibergs zum modernen Leitbild Nachhaltigkeit*. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg.
- Hagelüken, Christian** (2017): Bedeutung des EU-Kreislaufwirtschaftspakets für das Metallrecycling. *Chemie Ingenieur Technik* 89/1-2: 17–28.
- Held, Martin; Schindler, Jörg** (2016): *Kritische Metalle in der Großen Transformation*. Manuskript. Tutzing, Neubiberg: Die Transformateure.
- Held, Martin; Schindler, Jörg** (2017): All Metals Age: Die postfossile Gesellschaft braucht alle Elemente des Periodensystems. *GAIA* 26: 305–308.
- Hesiod** (2011): *Werke und Tage*. Stuttgart: reclam [ca. 700 v. Chr.].
- Klein, Cornelis; Philpotts, Anthony R.** (2017): *Earth Materials: Introduction to Mineralogy and Petrology*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press.

- Langley, Michelle C.; Clarkson, Christopher; Ulm, Sean** (2008): Behavioural Complexity in Eurasian Neanderthal Populations: a Chronological Examination of the Archaeological Evidence. *Cambridge Archaeological Journal* 18: 289–307.
- Langmuir, Charles H.; Broecker, Wally** (2012): *How to Build a Habitable Planet. The Story of Earth from the Big Bang to Humankind.* Princeton NJ: Princeton University Press.
- Marschall, Luitgard; Holdinghausen, Heike** (2018): *Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters.* München: oekom.
- Meller, Harald** (Hg.) (2004): *Der geschmiedete Himmel. Die weite Welt im Herzen Europas vor 3 600 Jahren.* Stuttgart: Theiss.
- Neukirchen, Florian** (2016): *Von der Kupfersteinzeit zu den Seltenen Erden. Eine kurze Geschichte der Metalle.* Berlin, Heidelberg: Springer.
- Oswald, Irina; Reller, Armin** (2011): E-Waste: A Story of Trashing, Trading, and Valuable Resources. *GAIA* 20: 41–47.
- Parzinger, Hermann** (2015): *Die Kinder des Prometheus. Eine Geschichte der Menschheit vor der Erfindung der Schrift.* 2. Auflage. München: C. H. Beck.
- Pyne, Stephen J.** (2012): *Fire. Nature and Culture.* London: Reaktion Books.
- Reller, Armin** (2013): Ressourcenstrategie oder die Suche nach der tellurischen Balance. In: Reller, Armin; Marschall, Luitgard; Meissner, Simon; Schmidt, Claudia (Hg.): *Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen.* Darmstadt: WBG: 211–219.
- Roberts, Benjamin W.; Thornton, Christopher P.** (eds.) (2015): *Archaeometallurgy in Global Perspective. Methods and Syntheses.* New York: Springer.
- Savoy, Lauret E.** (2015): *Trace. Memory, History, Race, and the American Landscape.* Berkely CA: Counterpoint.
- Schmidtchen, Volker** (1997): Technik im Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit zwischen 1350 und 1600. In: Ludwig, Karl-Heinz; Schmidtchen, Volker: *Metalle und Macht 1000 bis 1600.* Berlin: Propyläen: 209–598.
- Smil, Vaclav** (2016): *Still the Iron Age. Iron and Steel in the Modern World.* Amsterdam u. a. O.: Elsevier.
- Stöllner, Thomas** (2005): Mineralische Rohstoffe in der Bronzezeit – ein Überblick. In: Yalcin, Ünsal; Pulak, Cemal; Slotta, Rainer (Hg.): *Das Schiff von Uluburun. Welthandel vor 3 000 Jahren. Katalog der Ausstellung des Deutschen Bergbau-Museums Bochum.* Bochum: 2005: 451–473.
- Stöllner, Thomas; Oeggel, Klaus** (Hg.) (2015): *Bergauf bergab. 10.000 Jahre Bergbau in den Ostalpen.* Bochum: Verlag Marie Leidorf.
- Vogel, Michael** (2012): *Lange Nase für die Chinesen. Bild der Wissenschaft Online.* http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1606061/Lange-Nase-für-die-Chinesen/ – Zugriff: 8.1.2018.
- Wäger, Patrick A. et al.** (2010): *Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien.* SATW Schrift 41. Zürich: Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften.
- Zepf, Volker; Simmons, John; Reller, Armin; Ashfield, Morag; Rennie, Cameron** (2014): *Materials Critical to the Energy Industry. An Introduction. Second Edition.* London: BP and University of Augsburg.

Dank

Für wertvolle Hinweise zu meinem Beitrag danke ich Heinrich Hauser, Maximilian Hempel, Reto D. Jenny, Klaus Kümmerer, Franz Mauelshagen, Johanna M. Platzgummer, Armin Reller, Jörg Schindler und Thomas Stöllner. Ebenso danke ich allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Spurensuche in Tirol für die anregenden Diskussionen, die ihren Niederschlag in meiner persönlichen Metallgeschichte fanden. Insbesondere danke ich Werner Zittel, von dem der erste Impuls für die Exkursion nach Tirol kam.