



Geometallurgie – warum Metallurgen mit Geowissenschaftlern kommunizieren sollten

Professor Jens Gutzmer

Helmholtz Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

Halsbrücker Straße 34

09599 Freiberg (Sachsen)

Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie

TU Bergakademie Freiberg

Brennhausgasse 14

09596 Freiberg (Sachsen)

1 Einführung

Der Begriff der Geometallurgie wurde von McQuiston und Bechaud [1] geprägt – basierend auf der Erkenntnis, dass die effiziente Nutzung der in einer Erzlagerstätte enthaltenen Rohstoffe nur erreicht werden kann, wenn die an Abbau und Verarbeitung beteiligten Fachgebiete eng miteinander abgestimmt sind. Heute bezeichnet der Begriff Geometallurgie ein multidisziplinäres Forschungsfeld, welches die Disziplinen entlang der Wertschöpfungskette mineralischer Ressourcen eng miteinander vernetzt. Die Optimierung von Ressourcen- und Energieeffizienz bei der Nutzung primärer mineralischer Rohstoffe ist dabei das primäre Ziel der Geometallurgie.

Ihren Ausgang hat die geometallurgische Forschung in ihrer jetzigen Ausprägung in Australien und in Südafrika genommen. Insbesondere in Ländern mit sehr aktiver Explorations- und Bergbauindustrie hat sich ihre Anwendung in den letzten 10 Jahren stark etabliert. In der Tat geht inzwischen kein größeres Bergbauprojekt mehr ohne intensive geometallurgische Betrachtungen in die Umsetzung (siehe Bild 1). Umso erstaunlicher ist es, dass die Geometallurgie im deutschsprachigen Raum bisher nur wenig etabliert ist, obwohl in dieser Region ein weltweit führender Technologiesektor für die Rohstoff- sowie metallurgische Industrie entwickelt ist.

Als relevante Fachgebiete, die an der geometallurgischen Forschung beteiligt sein sollten, werden meist die geowissenschaftliche Erkundung, Bergbauplanung, Aufbereitung und extraktive Metallurgie genannt [2], aber auch die Umweltwissenschaften spielen eine wichtige Rolle [3]. Allerdings lag der Fokus bei der geometallurgischen Forschung der letzten Jahre zumeist darauf, eine Verbindung zwischen Rohstoffcharakteristika und physikalischer Aufbereikbaarheit herzustellen. Nur wenige Studien betrachteten dagegen die Implikationen geologisch bedingter Rohstoffcharakteristika für die metallurgische Verarbeitung [z.B. 4].

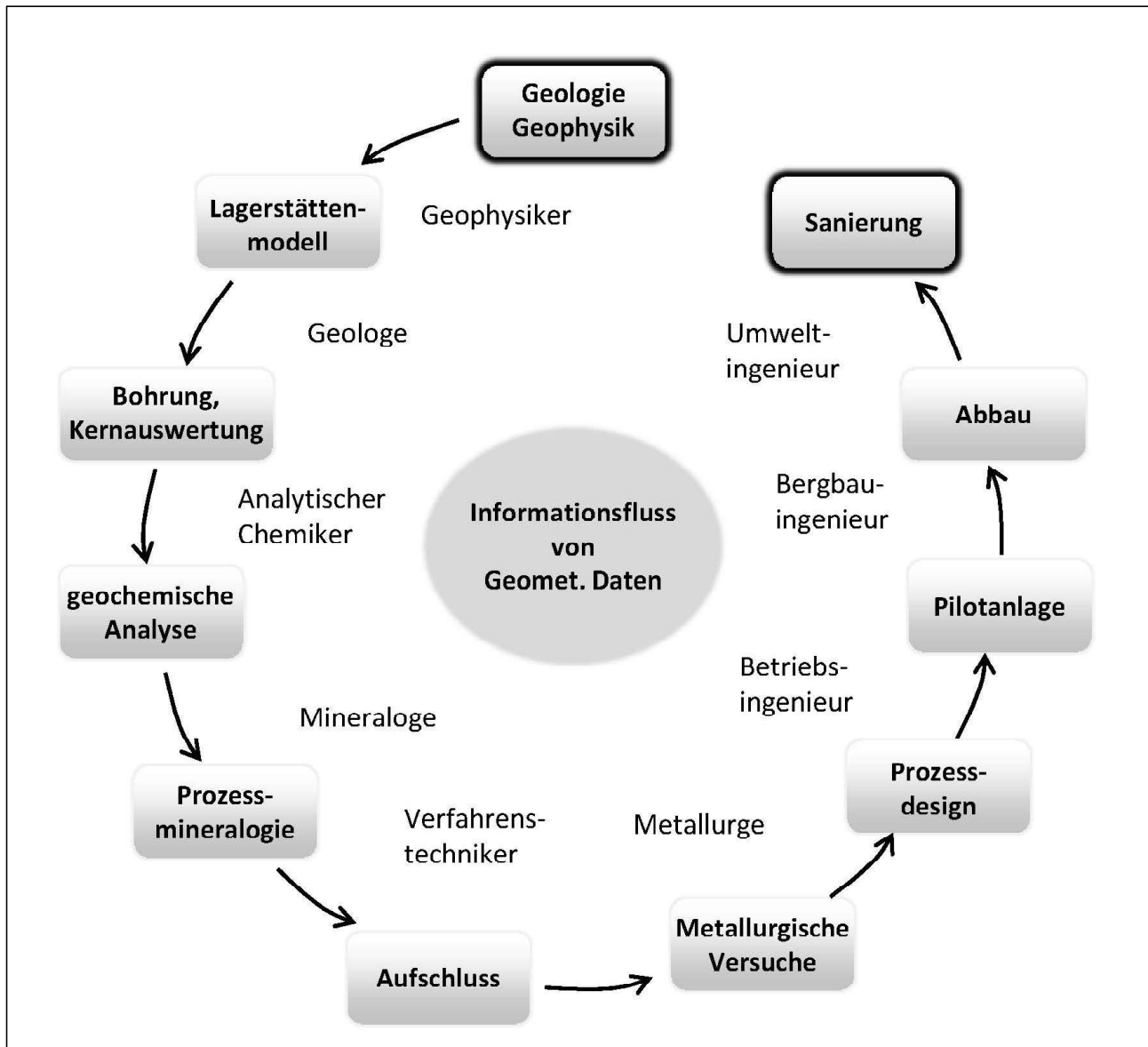


Bild 1: Der Fluss geometallurgischer Information bei Planung und Umsetzung von Rohstoffprojekten (nach [3]).

Vor diesem Hintergrund stellt der folgende Beitrag die Herangehensweise geometallurgischer Forschung vor. Anhand von ausgewählten Fallbeispielen – insbesondere aus dem Bereich der Hochtechnologie-Metalle – werden Effizienzpotenziale exemplarisch aufgezeigt.

2 Geometallurgie – eine Definition

Gegenstand der Geometallurgie ist die Erfassung und kritische Bewertung aller für die Aufbereitung und Metallurgie relevanten Einflussgrößen, die sich aus den natürlichen Eigenschaften der in einer Lagerstätte beinhaltenen Rohstoffe ergeben (Bild 2). Es ist das Ziel der Geometallurgie, ein räumliches und zugleich prädiktives Modell eines Lagerstättenkörpers zu erstellen, welches zuverlässig



über die zu erwartenden Eigenschaften des zu verarbeitenden Rohstoffes informiert. Besondere Relevanz hat die Abschätzung der inhärenten Variabilität aller relevanten Eigenschaften über den gesamten Rohstoffkörper hinweg. Geometallurgische Modelle werden eingesetzt, um die Ressourcen- und Energieeffizienz von Bergbauprojekten (und damit ihre Wirtschaftlichkeit) zu optimieren. Gerade bei komplexen Rohstoffkörpern, also Rohstoffkörpern mit sehr großer Variabilität, ist eine Minimierung des technischen und finanziellen Risikos möglich, da das Verhalten des gewonnenen Rohstoffes bei der folgenden Aufbereitung und Verhüttung vorhersagbar wird [z.B. 5-7].

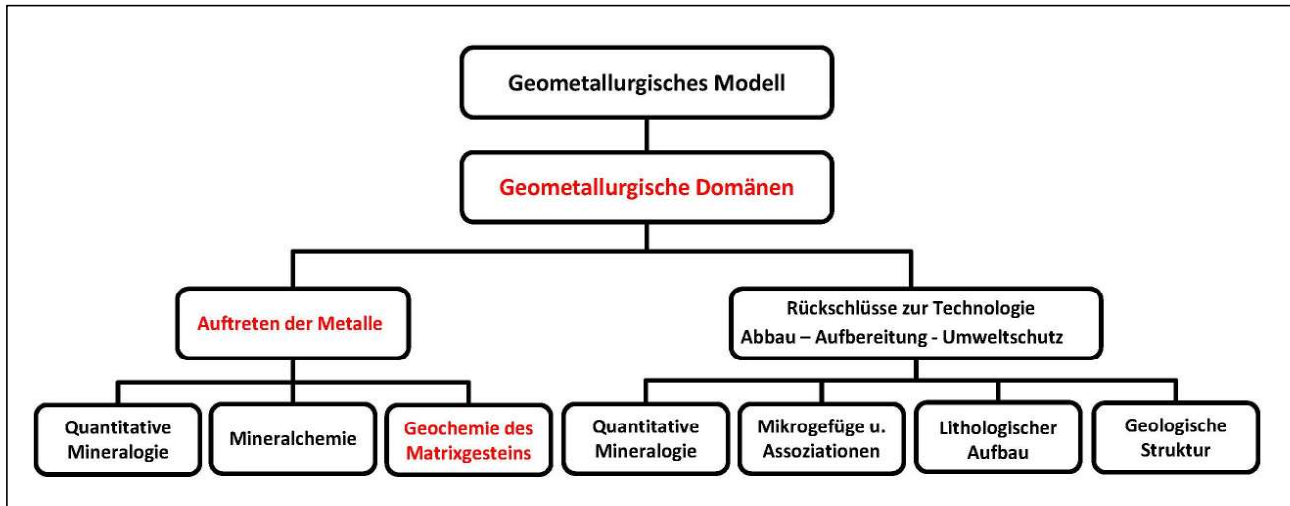


Bild 2: Datenarchitektur zur Definition eines geometallurgischen Modells.

Die Erstellung eines geometallurgischen Modelles basiert auf der Untersuchung einer Auswahl von Proben, an denen die relevanten Eigenschaften quantifiziert werden. Probenanzahl und -größe werden bestimmt durch das profunde Verständnis von geologischer Architektur und relevanten geostatistischen Verfahren (Bild 3).

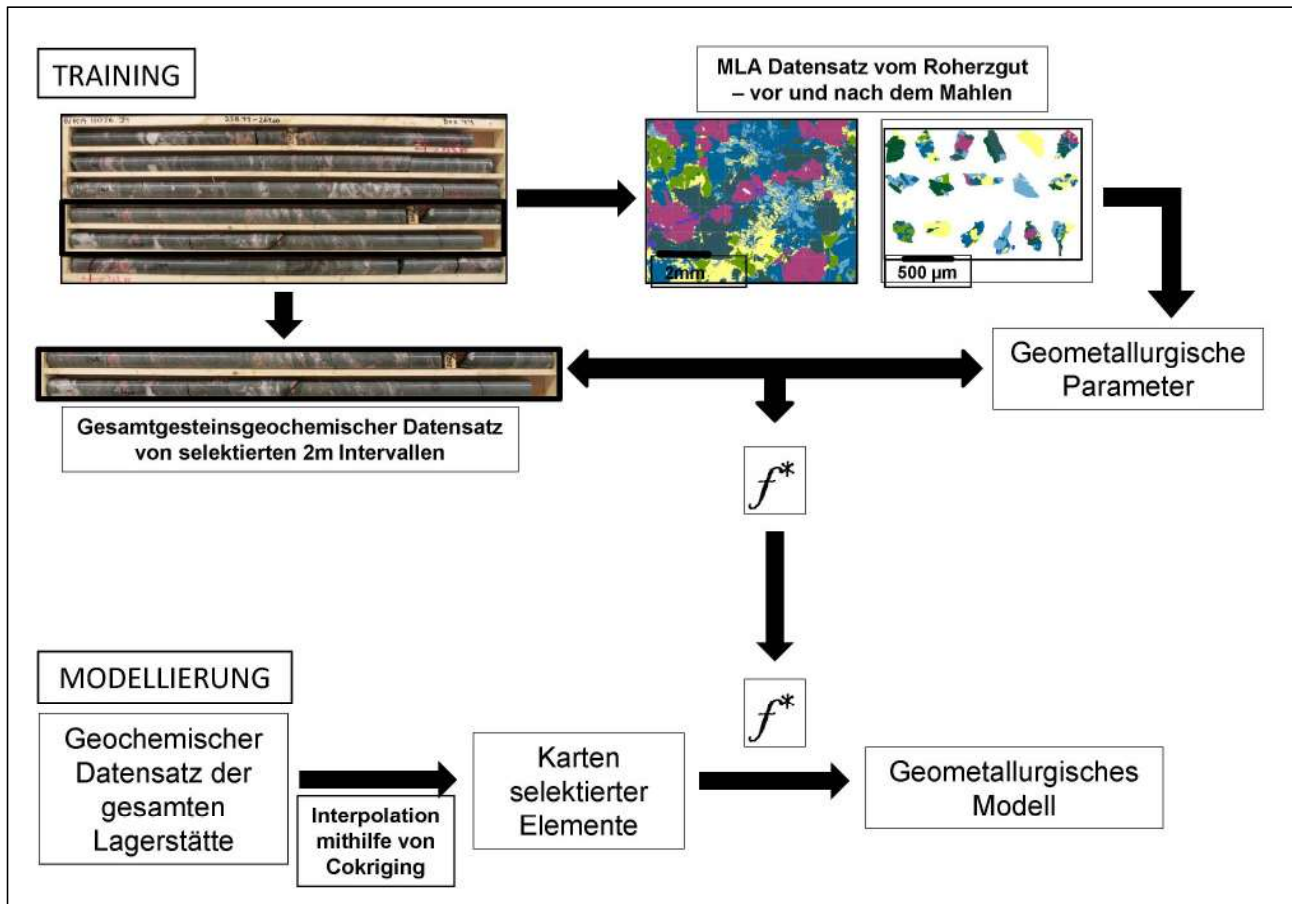


Bild 3: Schritte zur Umsetzung eines geometallurgischen Modells. f^* steht für mathematische Funktionen, MLA ist „Mineral Liberation Analysis“ also Bildanalyse gestützt auf rasterelektronenmikroskopischen Bildern und Kompositionsdaten.

2 Relevante Rohstoffeigenschaften

Das Verhalten eines Rohstoffes bei der Aufbereitung und Verhüttung leitet sich grundsätzlich aus seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie z.B. chemischer Zusammensetzung, Festigkeit, Zerkleinerungsverhalten etc. ab. Diese können aus der Untersuchung einer vorbestimmten Anzahl von Erzproben mittels standardisierter Tests an Probenkollektiven ermittelt werden. Gerade bei der chemischen Zusammensetzung ist es möglich, und auch spätestens im Zuge der wirtschaftlichen Machbarkeitsstudie notwendig, die Quantifizierung an sehr großen Probenkollektiven durchzuführen, die den gesamten Rohstoffkörper systematisch umfassen. Zu den relevanten Einflussgrößen gehören aber auch die Mineralogie und das Mikrogefüge des Rohstoffes. Wichtig sind insbesondere

- Qualitative Mineralogie
- Quantitative Mineralogie
- Mineralkorngrößenverteilungen



- Mikrogefüge/Verwachsungsverhältnisse
- Mineralchemie
- Deportment (d.h. Verteilung von Wert- und Schadelementen über die vorhandenen Mineralien)
- Porosität/Permeabilität.

Nachdem der Rohstoff in die Verarbeitung eingetreten und zumindest zerkleinert worden ist, treten die folgenden wichtigen Attribute hinzu

- Partikelgrößenverteilungen
- Mineralassoziationen
- Aufschlussgrade (Liberation).

Zur Quantifizierung der oben genannten Eigenschaften werden modernste analytische Methoden eingesetzt, z.B. die teil-automatisierte Bildanalyse mittels Rasterelektronenmikroskopie und die quantitative Röntgenpulverdiffraktometrie, aber auch lokalanalytische Methoden wie die Elektronenstrahlmikroanalytik. Da der Einsatz solcher analytischer Methoden recht zeit- und kostenintensiv ist, werden solche Daten zumeist nur für kleinere Probenkollektive gesammelt. Es ist daher zunächst notwendig, die Probenauswahl sorgfältig durchzuführen, um später mögliche Zusammenhänge ableiten zu können, mittels derer Mineralogie und Mikrogefüge aus den Resultaten der chemischen Analyse abgeleitet werden können. Unter Einsatz geeigneter Indikatoren und geostatistischer Methoden (z.B. cokriging, siehe Bild 3) können dann geometallurgische Domänen abgegrenzt werden, d.h. Regionen im Rohstoffkörper, die ähnliche Eigenschaften aufweisen, ergo auf gleiche Art und Weise verarbeitet werden können. Aus diesen Domänen kann dann ein geometallurgisches Modell für den gesamten Rohstoffkörper aufgebaut werden.

3 Relevanz für die Aufbereitung

Die Relevanz der meisten der oben genannten Rohstoffcharakteristika für die Effizienz der physikalischen Aufbereitungsprozesse ist evident. Zahllose Publikationen der letzten Jahre belegen den Erfolg des Geometallurgie bei Auswahl und Optimierung von Technologien für die Aufbereitung insbesondere komplexer Rohstoffe. Tabelle 1 liefert eine kleine Auswahl, die zeigt, wie Rohstoffcharakteristika die Aufbereikbaarheit mineralischer Rohstoffe bestimmen.



Tabelle 1: Einfluss von Rohstoffcharakteristika auf die physikalische Aufbereitbarkeit (Auswahl)

Einflussgröße	Art des Einflusses	Aufbereitungsprozess
Mineralogie, Mikrogefüge	Härte	Brechen, Mahlen
Korngrößenverteilung, Mikrogefüge	Liberation	Mahlen
Qualitative Mineralogie	Wirksamkeit von Prozessen	Auswahl von Flotation, Magnetscheidung etc.
Quantitative Mineralogie	Erzminerale	Auslegung der Prozessroute
Quantitative Mineralogie	Schadminerale	Modifikation der Prozessroute
Mineralchemie	Spezifikation von Prozessen	Optimierung von Prozessrouten
Variabilität der Charakteristika	Prozesssteuerung	Alternative Prozessrouten

4 Relevanz für die Metallurgie

Obwohl dies zunächst weniger offensichtlich erscheint, sind die inhärenten Eigenschaften des primären mineralischen Rohstoffes ebenfalls maßgeblich für die metallurgischen Verarbeitungsschritte. Bei hydrometallurgischen Prozessrouten stehen hierbei neben der Mineralogie auch die Liberation der Erzminerale, die Identität, Häufigkeit und Verteilung von Gangartmineralien, sowie die Porosität/Permeabilität im Vordergrund. Diese Eigenschaften bestimmen u.a. das Laugungsverhalten, aber auch das Regime bzw. den Konsum der eingesetzten Chemikalien. Dies trifft bei der (bio-)chemischen Haufenlaugung von nur grob zerkleinertem Rohstoff genauso zu, wie bei der Tanklaugung von Erzmineralkonzentraten.

Aber auch pyrometallurgische Prozessrouten können durch eine geometallurgische Herangehensweise optimiert werden. So kommt der quantitativen Mineralogie der eingesetzten Rohstoffe eine besondere Bedeutung beim Energiebedarf der Verhüttung zu. Dies wurde von [8] für den Fall des spezifischen Energiebedarfs bei der pyrometallurgischen Reduktion von oxidischen Manganerzen klar dargestellt.



Tabelle 2: Einfluss von Rohstoffcharakteristika auf die Verhüttung (Auswahl).

Einflussgröße	Art des Einflusses	Metallurgischer Prozess
Porosität/Permeabilität	Laugbarkeit	Haufenlaugung
Mineralogie	Laugbarkeit von Erzmineralien	Haufenlaugung/ Tanklaugung
Mineralogie	Chemikalienverbrauch	Haufenlaugung/ Tanklaugung
Mineralogie	Energieverbrauch	Pyrometallurgische Prozesse
Quantitative Mineralogie/Mineralchemie	Schadelemente	Modifikation der Prozessroute, Emissionsschutz
Department der Wertelemente	Spezifikation von Prozessen, Limitation des erzielbaren Ausbringens	Optimierung von Prozessrouten
Variabilität der Charakteristika	Prozesssteuerung	Alternative Prozessrouten

Die Rohstoffe für die sogenannten Hochtechnologiemetalle liefern viele instruktive Beispiele. Hier soll auf die Rohstoffe der Seltenen Erden und auch auf den Fall der Buntmetallerze als Rohstoff für die Erzeugung von Indium näher eingegangen werden.

4.1 Fallbeispiel – Seltene Erden

Lagerstätten der Seltenen Erden (SEE) zeichnen sich durch ungewöhnliche mineralogische Komplexität und Vielfältigkeit aus. Aus mineralogischer Perspektive lassen sich vier große Gruppen von Rohstoffen unterscheiden, nämlich

- SEE-Phosphatrohstoffe
- SEE-Karbonatrohstoffe
- SEE-Silikatrohstoffe
- SEE-Rohstoffe ohne dominante mineralische Erscheinungsform.

Phosphatische SEE-Rohstoffe (insbesondere reich an Monazit, Xenotim und SEE-reichem Apatit) treten in verschiedenen geologischen Milieus auf. Sie finden sich insbesondere in orthomagmatischen Lagerstätten (Karbonatite, Apatit-Magnetit oder Fluorit-Magnetit Lagerstätten), aber auch in hydrothermalen Gängen und Breccien, sowie lateritischen Verwitterungslagerstätten und sogar Sei-



fen. SEE-Karbonatrohstoffe werden durch das Auftreten von Bastnäsit dominiert. Wirtschaftlich interessante Konzentrationen sind beschränkt auf orthomagmatische Karbonatite. Beide Rohstoffgruppen sind mineralogisch recht einheitlich und ihre physikalische Aufbereikbaarheit und hydrometallurgische Verarbeitung ist gut etabliert. Die Abtrennung der SEE aus Apatit bei der Herstellung von Phosphatdüngern, die zwar möglich erscheint aber bisher nirgendwo industriell umgesetzt wird, stellt hier eine Ausnahme dar.

Die Gruppe der silikatischen SEE-Rohstoffe ist dagegen mineralogisch in der Regel sehr komplex und Rohstoffkörper sind in ihrem internen Aufbau sehr variabel und extrem feinkörnig. Es kommt eine große Vielzahl von Mineralien als signifikante Träger von SEE in Frage. Eine gezielte und effiziente Aufbereitung und hydrometallurgische Verarbeitung kann erst erfolgen, wenn das Department – also die quantitative Verteilung der SEE auf die möglichen Trägerminerale – verstanden ist. Hierbei ist insbesondere zu bedenken, dass geologische Prozesse bei der Genese der SEE Lagerstätten durchaus zu starken Fraktionierungen der SEE führen können, d.h., die SEE treten zwar im gleichen Rohstoffkörper (makroskopische Ebene), aber nicht unbedingt im gleichen Mineral (meso- bis mikroskopische Ebene) auf. Da solche Department-Studien sehr zeitaufwändig sind, begnügen sich die beteiligten Firmen mit sehr kostspieligen hydrometallurgischen Prozessrouten. Bei diesen wird der gesamte Rohstoff – ein granitähnliches Silikatgestein mit hohen Si, Al und F Konzentrationen – bei hohen Temperaturen und unter hohem Säureinsatz zersetzt, um die SEE zu mobilisieren.

Als Extrembeispiel der Komplexität können die SEE-reichen Tone gelten, in denen moderne analytische Verfahren bisher keine eindeutige Aussage zum Department der SEE liefern können. Diese sehr komplexen Rohstoffe sind nur deswegen als Rohstoffquelle geeignet, da Sie oberflächennah auftreten und die SEE sich durch eine einfache *in situ* Laugung mit $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ mobilisieren lassen. Eine Optimierung dieser Verfahren scheint – aus wirtschaftlicher Sicht – zunächst unnötig, aber wäre aus Gründen des Umweltschutzes sicher wünschenswert. Ein quantitatives Verständnis der Verteilung der SEE (mineralbildend vs. substituiert vs. adsorbiert) wäre eine Grundvoraussetzung für die zielgerichtete Entwicklung alternativer Prozessrouten.

4.2 Fallbeispiel – Indium

Indium ist ein typisches Beiprodukt, welches in der Regel aus Sulfidkonzentraten der Zink- oder Kupferverhüttung gewonnen wird. Obwohl das Auftreten von Indium in wirtschaftlich interessanten Konzentrationen für einige im Abbau stehende Buntmetallagerstätten sehr wohl bekannt ist, fehlt in der Regel das grundlegende Verständnis für die Verteilung des Indiums im Rohstoffkörper. Weiterhin ist das konkrete Department des Indiums nach wie vor oft Gegenstand von Spekulationen. Obwohl die Substitution von Indium in das Kristallgitter von Zinkblende (ZnS) sehr wohl bekannt ist, kann das Indium auch mineralbildend auftreten. Hier ist insbesondere der Roquesit, CuInS_2 zu nennen, der mineral- und kristallchemisch große Ähnlichkeit mit Kupferkies (CuFeS_2) aufweist. Wiederum ist ein gründliches Verständnis sowohl der Makroebene (Verteilung von Indium im Erzkörper)



per) als auch der Mikroebene (Mineralogie, Mineralchemie, Department) notwendig, bevor eine Prozessroute für die mögliche Darstellung von Indium als Beiprodukt aus den Rohstoffen einer bestimmten Lagerstätte erstellt werden kann.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Primäre Rohstoffkörper sind Gesteine von ungewöhnlicher Zusammensetzung. Sie verdanken ihre Entstehung natürlichen Prozessen, die gemeinsam wirken, um eine lokale Anreicherung von Mineralien hervorzubringen, die dann ihres Inhalts an Wertmetallen wegen wirtschaftlich gewonnen werden können. Genauso wie sein geologischer Rahmen sind auch die immanenten Eigenschaften jedes mineralischen Rohstoffkörpers einzigartig. Diese Einsicht, die jedem Geologen selbstverständlich erscheint, sollte auch von den Fachdisziplinen, die für die Verarbeitung des Rohstoffes verantwortlich zeichnen, stets beherzigt werden. Die Geometallurgie bietet die Möglichkeit, im Vorlauf der Gewinnung und Verarbeitung relevante quantitative Datensätze zu gewinnen. Diese Datensätze ermöglichen den Aufbau von geometallurgischen Modellen, mit Hilfe derer sowohl die Ressourcen- als auch die Energieeffizienz der Rohstoffverarbeitung optimiert werden können. Ein solches Vorgehen wird insbesondere für die angestrebte holistische Nutzung komplexer, polymetallischer Rohstoffe, die als Quellen von Hochtechnologiemetallen in Frage kommen, eine dringende Notwendigkeit sein. Dafür ist es angebracht, die interdisziplinäre Kommunikation und Kooperation zwischen Metallurgen und Geowissenschaftlern dahingehend zu stärken, dass beide Disziplinen ein besseres Verständnis für einander entwickeln.



Literatur

- [1] MCQUISTON, F. W., JR. AND BECHAUD, L. J., JR. (1968): Metallurgical sampling and testing. - in: PFLEIDER, E. P. (Hrsg.): Surface mining: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: 103-121, New York.
- [2] DUNHAM, S., AND VANN, J. (2007): Geometallurgy, geostatistics and project value – does your block model tell you what you need to know? - in: Project Evaluation Conference: 189-196, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [3] CHETTY, D. (2008): A geometallurgical evaluation of the ores of the northern Kalahari manganese deposit, South Africa. Unpubl. Diss., 271 S.: University of Johannesburg,
- [4] HOAL, K. O. (2008): Getting the Geo into Geomet. SEG Newsletter 73: 11-15.
- [5] CHETTY, D., GRYFFENBERG, L., LEKGETHO, T.B., MOLEBALE I.J. (2009): Automated SEM study of PGM distribution across a UG2 flotation concentrate bank: implications for understanding PGM floatability. SAIMM, 109: 587-593, South African Institute of Mining and Metallurgy
- [6] SMITH, A. J. B., VILJOEN, K. S., SCHOUWSTRA, R., ROBERTS, J., SCHALKWYK, C., GUTZMER, J. (2013): Geological variations in the Merensky Reef at Bafokeng Rasimone Platinum Mine and its influence on flotation performance. Minerals Engineering, 52: 155–168.
- [7] COETZEE, L. L., THERON, S. J., MARTIN, G. J., MERWE, J. D. V. D., STANEK, T. A. (2011): Modern gold departments and its application to industry. Minerals Engineering, 24: 565-575.
- [8] CHETTY, D., AND J. GUTZMER (2008): Quantitative X-ray diffraction as a tool for smelting optimisation of Kalahari Manganese ores. Proc. 9th International Congress for Applied Mineralogy: 419-427.