

## Dagmar Hülsenberg

### Anwendung naturwissenschaftlicher und kameralistischer Erkenntnisse auf die Verarbeitung von Rohstoffen durch den jungen Alexander von Humboldt

#### ZUSAMMENFASSUNG

Alexander von Humboldt gehört zu den ersten Fachleuten, die für die sichere Beherrschung technischer und ökonomischer Prozesse gleichzeitig naturwissenschaftliche und kameralistische Kenntnisse anwendeten und dabei weiterentwickelten. Durch die allseitige Betrachtung von Herstellungsvorgängen gelang es ihm, für seine Vorgesetzten gut durchdachte Vorschläge zur Gestaltung der Rohstoffverarbeitung zu formulieren. Dazu gehören u. a. die Anlage von Gradierwerken, der Einsatz hochwertiger Rohstoffe in der Steingutfertigung, die Anwendung von Komplexrohstoffen zur Glasschmelze, die Auswahl effektiver Wasserräder, die Dimensionierung der Gaskanäle in Porzellanbrennöfen sowie der Einsatz von Flussmitteln für die Roheisenschmelze. Bei der Ausreichung eines königlichen Kredites für die Blaufarbenherstellung zeigte sich der Kameralist.

#### ABSTRACT

Alexander von Humboldt was one of the first experts to apply simultaneously scientific and fiscal (cameralistic) knowledge for mastering and developing technological and economic processes. Based on thorough observations of manufacturing processes he wrote reports to his supervisors which included well-founded suggestions for improving the processing of raw materials. These examples refer for instance to the installation of walls made of branches and twigs that allow salt

water to evaporate, the use of high-quality raw materials for pottery, complex raw materials for glass melting, the choice of the most efficient water wheels, porcelain furnaces with optimal gas channels and the use of fluxing agents for the melt of pig-iron. Similarly, Humboldt revealed his economic acumen by advising on loans from the Crown for cobalt blue manufacturing.

#### RESUMEN

Alexander von Humboldt fue uno de los primeros expertos en aplicar al mismo tiempo el conocimiento científico y fiscal (cameralismo) para dominar y desarrollar procesos tecnológicos y económicos. Sobre la base de observaciones exhaustivas de los procesos de fabricación, escribió informes a sus supervisores que incluían sugerencias bien fundamentadas para mejorar el procesamiento de las materias primas. Estos ejemplos se refieren, por ejemplo, a la instalación de torres de graduación salina, el uso de materias primas de alta calidad en la producción cerámica, materias primas complejas para fundir vidrio, la elección de las ruedas hidráulicas más eficientes, el dimensionamiento de los conductos de gas en hornos de porcelana con canales de gas óptimos y el uso de agentes fundentes para la fundición de arrabio. Del mismo modo, Humboldt reveló su perspicacia económica al asesorar sobre préstamos de la Corona para la fabricación de azul cobalto.



# 1 Vorbemerkungen

Notwendige Voraussetzungen für eine ingenieur-wissenschaftliche Promotionsschrift sind entweder die Aufdeckung bisher unbekannter technischer Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten oder die Nutzung bekannter Erkenntnisse für die Lösung aktueller Aufgaben. Um Letzteres geht es in erster Linie bei der Bewertung der Verdienste Alexander von Humboldts auf technischem Gebiet. Besonders in seinen jungen Jahren als Student und anschließend als preußischer Beamter, also vor seiner großen Amerika-Forschungsreise, hat Humboldt durch Nutzung erworbener Kenntnisse und deren kritische Bewertung erfolgreich technische Probleme gelöst bzw. zumindest Lösungswege aufgezeigt und das zu seiner Zeit bekannte Wissen an speziell interessierte Persönlichkeiten schriftlich weitergegeben. Neben eigenen naturwissenschaftlichen Aktivitäten bestimmten vor allen Dingen technische Aufgabenstellungen Humboldts Tagesablauf, auf die sich der vorliegende Aufsatz konzentriert.<sup>1</sup>

In (Hülseberg 2021) wurde bereits die Breite von Humboldts Arbeitsergebnissen auf technischem Gebiet zwischen 1792 und 1797 im Überblick dargestellt. Es ging der Autorin vor allem darum, Umfang und inhaltliche Vielfalt seiner Verdienste als „*Technologe*“ sichtbar zu machen. Die Nutzung auch dieser Bezeichnung neben vielen anderen für die Charakterisierung des Wirkens Alexander von Humboldts wurde ausführlich begründet.

Ottmar Ette verwendete den speziellen Begriff eines „*Montantechnologen*“ (Ette 2018, S. 12) für einen wichtigen Teil der Tätigkeit Alexander von Humboldts. Ursula Klein stellte anhand des Schaffens weltweit bekannter preußischer Gelehrter dar, wie sich im 18. und 19. Jahrhundert die Entwicklung von der Naturwissenschaft zur Technikwissenschaft im gegenseitigen Wechselspiel vollzog. Sie verwendete den Begriff des „*Naturforscher-Technikers*“ (Klein 2015, S. 60–61 und öfter), den Alexander von Humboldt wie kaum ein anderer verkörperte.

Im vorliegenden Aufsatz wird an ausgewählten Beispielen versucht nachzuweisen, dass ein großes Verdienst Humboldts darin bestand, technische Prozesse bei der Verarbeitung von Rohstoffen nicht nur aus der Erfahrung heraus beeinflusst, sondern vorher erworbene naturwissenschaftliche Kenntnisse und kameralistisches Wissen auf sie angewendet und weiterentwickelt zu haben. Er fasste die Ergebnisse in Berichten für seine Vorgesetzten zusammen und formulierte Aufgabenstellungen für die im Entstehen begriffene technologische Forschung.

Als preußischer Beamter musste er in der Regel Aufgaben lösen, die durch seine Dienstherrn vorgegeben waren. Die kritischen Analysen und anspruchsvollen Problemlösungen waren nicht für die breite Öffentlichkeit gedacht. Daraus resultiert, dass die in dieser Zeit entstandenen Berichte, Gutachten, Vorschläge und Briefe nicht in Publikationen erschienen, sondern als Originalhandschriften oder handschriftliche Kopien in Archiven abgelegt wurden, wo sie zunächst unter Verschluss blieben und wo man sie teilweise noch heute einsehen kann. Gelegentlich sind diese Ausarbeitungen über hundert Seiten lang. Ein erheblicher Teil von ihnen ist mittlerweile – in der Regel kommentiert – als Transkription veröffentlicht. Ihr Inhalt ist sehr speziell und setzt für sein Verständnis vielfach detailliertes Fachwissen und -interesse voraus.

---

1 Für Diskussionen zu diesem Thema danke ich Herrn Dr. Ingo Schwarz, Seniorwissenschaftler an der Arbeitsstelle „Alexander von Humboldt auf Reisen. Wissenschaft aus der Bewegung“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, sehr herzlich.

Wahrscheinlich deswegen sind sie nur in sehr verkürztem Umfang oder gar nicht Gegenstand allgemeinerer Darstellungen des Humboldt'schen Wirkens und seiner Bedeutung, die in erster Linie auf seinen Publikationen beruhen. Das führt dazu, dass sein Wirken auf technischem Gebiet unverdientermaßen deutlich weniger Beachtung erfährt als viele seiner naturwissenschaftlichen Forschungen. Vor allen Dingen wird unterschätzt, welche hohe Bedeutung Humboldts Beschäftigung mit technischen Problemen in jungen Jahren für die Durchführung seiner großen Forschungsreisen nach Amerika (1799–1804) und Russland (1829), d. h. seine Bewertungen des Vorgefundenen, seine Einsichten auf anderen Wissensgebieten, seine Berichte und seine Folgerungen für Staat und Gesellschaft ganz allgemein, hatte.

Zunächst wird in Abschnitt 2 sein Studium der Kameralwissenschaft betrachtet, das er im Oktober 1787 in Frankfurt/Oder begonnen hatte (Schwarz 2019). Wie die meisten Studenten im 1. Studienjahr, schätzte auch der gerade erst 18 Jahre alte Alexander von Humboldt seine anfängliche Ausbildung nicht besonders hoch. Er hatte wohl etwas anderes erwartet und war auch ein wenig überheblich. Das ihm in der Zeit von 1787 bis 1791 (mit Unterbrechungen) vermittelte oder durch Literaturstudium selbst angeeignete kameralistische Wissen war jedenfalls später eine Voraussetzung für begründete technische Empfehlungen an seine Vorgesetzten. Seine Gutachten belegen, dass Humboldt immer wieder berechnete, was die Realisierung seiner technologischen Vorschläge wohl kosten könnte und ob der zu erwartende Nutzen den Aufwand lohnte. Kosten-Nutzen-Abschätzungen verliehen seinen Empfehlungen die nötige Seriosität.

Humboldt schlägt kein Projekt vor, ohne die Kosten desselben zu beachten, und seine Vorschläge zum Abbau von Erzen sind immer mit einer Nutzen-Kosten-Rechnung verbunden. (Hein, Arnold, Zürl 1993, S. 152)

An die Erläuterungen zu seinem Studium der Kameralwissenschaft schließt sich in Abschnitt 3 anhand spezieller Beispiele aus verschiedenen Stufen der rohstoffverarbeitenden Industrie an, wie Humboldt das von ihm aus der Literatur sowie Vorlesungen und persönlichen Informationen zusammengetragene und weitergedachte Wissen anwendete. In diesem Abschnitt geht es u. a. um Beispiele für den Antrieb von Anlagen zur Zerkleinerung der Rohstoffe, das Mischen verschiedener Komponenten, das Verdampfen von Wasser aus Lösungen und um Hochtemperaturprozesse (Reduktion/Schmelzen/Sintern). Es wird nicht eine Gliederung nach verschiedenen Werkstoffen oder Erzeugnissen gewählt, da Alexander von Humboldt durch seine Dienstaufgaben gezwungen war, ständig zwischen den Industriezweigen zu pendeln.

Im Abschnitt 4 schließt sich der Kreis: Hier werden seine Vorschläge für den speziellen Fall der königlichen Unterstützung eines jungen Unternehmers bezüglich der Smalte- bzw. Blaufarbenherstellung in Schauberg/Oberfranken vorgestellt.

## **2 Kameralistische Betrachtungen als ständiger Teil von Humboldts Ausarbeitungen auf technischem Gebiet**

Alexander von Humboldts Mutter Maria Elisabeth (1741–1796) und sein Hauslehrer Gottlob Johann Christian Kunth (1757–1829) strebten an, dass er im Staatsdienst tätig werden und sich dort insbesondere um gewinnbringende Produktion kümmern sollte. Sie leiteten diese Aufgabenstellung aus damals üblichen Lebensläufen adliger Jugendlicher und vor allem aus seinem frühen Interesse für naturwissenschaftliche Themen ab. Als Studium bot sich die Ka-

meralwissenschaft an, eine Art Staatswirtschaftslehre (Lauterbach 1994, S. 71), deren Ziel vor allem darin bestand, durch staatliche Regelungen die Einkünfte des jeweiligen Regenten zu mehren. Der Studieninhalt war nicht exakt definiert. Zur Kameralwissenschaft zählten in wechselndem Umfang Kenntnisse u. a. zur Struktur und Verwaltung des Staates, zum Militär- und Polizeiwesen, zu Handel und Finanzen generell, zur Buchhaltung und Betriebsökonomie (aus heutiger Sicht die Kameralistik im engeren Sinne), zur Personalführung sowie zur Organisation spezieller Fertigungsprozesse vor Ort einschließlich der Rohstoffversorgung. Für den jungen Humboldt waren eigentlich nur die Fertigungsprozesse und die Rohstoffe interessant.

Als er mit seinem Bruder Wilhelm an die Viadrina nach Frankfurt/Oder zum Studium kam, fehlte aber gerade dieses spezielle Fach im Lehrangebot. Wie stiefmütterlich das Studium der Kameralwissenschaft an der Viadrina behandelt wurde, hat Ulrich Stottmeister in (Stottmeister 2019, S. 149–157) ausführlich dargelegt.

Joachim Georg Darjes (1714–1791) lehrte ganz allgemein Kameralwissenschaft; er war 1763 von König Friedrich II. (1712–1786) an die Viadrina für Philosophie und Rechtswissenschaften berufen worden. Parallel dazu führte er die Kameralwissenschaft wieder ein, ohne dafür speziell berufen zu sein, und war seit 1772 Rektor der Universität (Richter 1876, S. 758f.). Viele Jahre lang beriet er den preußischen König zu grundsätzlichen Fragen der Staatsführung, was ihm in Berlin hohes Ansehen verschaffte.

Viel Zeit für Vorlesungen zur Kameralwissenschaft stand Darjes jedenfalls nicht zur Verfügung. Er hatte jedoch bereits im Jahr 1756 eine Art Einführung in die Kameralwissenschaft veröffentlicht (Darjes 1756). Schwerpunkte des Buches waren die Landwirtschaft, die Stadtwirtschaft mit ihren Gewerken, Manufakturen und Fabriken, die Polizeiwissenschaft (einschließlich der „Aufmunterung der Unterthanen zur Arbeit“), das Gesundheitswesen, „die Haupt-Regeln der Landes-Oeconomie“ und das „eigentliche Cammer-Wesen“, d. h. die Kameralistik, mit dem Ziel, die fürstlichen Einkünfte zu erhöhen. Interessant ist, dass sich ein Gedanke, der später oft bei Alexander von Humboldt auftaucht, bereits bei Darjes in einem ganzen Buchkapitel mit der Überschrift *Von dem Reichthum der Unterthanen, in wie weit dieser die Quelle der Fürstl. Einkünfte*. (Darjes 1756, S. 610–638) findet. Vielleicht hat Alexander von Humboldt in Frankfurt/Oder das Buch gelesen. In jedem Fall wurden ihm dort Grunderkenntnisse nahegebracht, etwa, dass man Steuern nur von einer Bevölkerung eintreiben kann, die auch etwas verdient. Es war also ein kameralistischer Lehrsatz, auf dem viele spätere Überlegungen Humboldts zur betriebswirtschaftlich sinnvollen Gestaltung technischer Prozesse fußten.

Parallel zu Darjes beschäftigte sich Georg Heinrich Borowski (1746–1801) an der Viadrina mit ökonomischen Fragen. Er war aber zunächst nicht für Kameralwissenschaft, sondern für Naturgeschichte berufen worden. Erst 1789, nachdem die Humboldt-Brüder die Viadrina verlassen hatten, erhielt er dort auch einen Ruf für Kameralwissenschaft (Carus 1876, S. 176f.). Sein Buch zur Kameralistik erschien sechs Jahre nach seiner Berufung (Borowski 1795). Es behandelte sehr ausführlich das Steuerrecht, das Finanzwesen, aber auch die Rolle der Polizei und des Militärs im Staat. Die Produktionsabläufe im engeren Sinne spielten keine Rolle. Es ist wohl eher unwahrscheinlich, dass Borowski schon vor seiner Berufung auf diesem Gebiet Vorlesungen gehalten hat, die Alexander von Humboldt in den Jahren 1787/1788 hätte hören können. Er erwähnte jedenfalls dessen Namen in seinen noch verfügbaren Aufzeichnungen aus dieser Zeit nicht.

Der Mangel an ausreichender kameralwissenschaftlicher Expertise an der Viadrina war für Humboldts Mutter und den Erzieher Kunth so unbefriedigend, dass sich Alexander von Hum-

boldt schon 1788 mit seinem Hauslehrer Johann Friedrich Zöllner (1753–1804) – wieder in Berlin – mehr der für ihn interessanteren Seite der Kameralwissenschaft, nämlich der Technologie, zuwandte. Um das von der Mutter gewünschte Ziel, dem preußischen Staat als Verwaltungsfachmann zu dienen, erreichen zu können, musste er aber zum weiteren Studium Preußen verlassen.

Sein nächster Studienort war die Universität in Göttingen. Dort existierte zwar kein Lehrstuhl für Kameralwissenschaft – aber der Ökonom Johann Beckmann (1739–1811) lehrte dort (Bayerl 2009, S. 305). Er gilt als Begründer des Studienfaches „Technologie“, was in (Hülseberg 2021, Abschnitt 2) genauer dargelegt ist. Schon 1777 verfasste er ein Buch unter dem Titel *Anleitung zur Technologie, oder zur Kenntniß der Handwerke, Fabriken und Manufacturen, vornehmlich derer, die mit der Landwirthschaft, Polizey und Cameralwissenschaft in nächster Verbindung stehn* (Beckmann 1777). Für einzelne Fertigungszweige, z. B. die Wollfärberei, Papierherstellung, Seifensiederei, Kalkbrennerei, Porzellankunst, Glasmacherkunst, Salzsiederei, Salpetersiederei und Münzkunst, beschrieb er in diesem Buch sehr genau und gut verständlich ihre Historie im europäischen Raum, die technischen Schritte und Zusammenhänge ihrer Herstellung, Kosten für Rohstoffe und die Fertigung sowie den Absatz der Produkte.

In Vorbereitung früherer Veröffentlichungen hat sich die Autorin oft gefragt, wie es Alexander von Humboldt z. B. in den fränkischen Fürstentümern gelang, in kürzester Zeit so viele verschiedene Fertigungsverfahren, die er nicht explizit studiert hatte, zu verstehen und sich kompetent dazu zu äußern. Unter Nutzung des bei seinen Hauslehrern zuvor erworbenen naturwissenschaftlichen Grundwissens verinnerlichte Humboldt wahrscheinlich sowohl in Beckmanns Vorlesungen als auch durch das Studium des eben genannten Buches die informativen „Anleitungen“ für die verschiedenen Industriezweige, ohne dass er das irgendwo besonders erwähnte. Auch die vielen Besichtigungen von Betrieben, beispielsweise in Offenbach am Main eine Gelddruckerei, eine Wachsbleicherei, eine Gold- und Silbergespinnstfabrik, eine Wachstuchfabrik, eine Schnupftabakfabrik und eine Tapetendruckerei (Geuns 2007, S. 37), Salinen in Nauheim (Geuns 2007, S. 91) und Kreuznach (Geuns 2007, S. 155) sowie Porzellanbetriebe in Höchst (Geuns 2007, S. 18) und Frankenthal (Geuns 2007, S. 19) während der Exkursion gemeinsam mit Steven Jan von Geuns (1767–1795), belegen die Anregungen durch Beckmann und den mütterlichen Auftrag, sich auf eine Tätigkeit im Staatsdienst für die Industrie vorzubereiten.

Letztlich fällt auf, dass Humboldt in seinem großen Befahrungsbericht über den Bergbau und das Hüttenwesen in den ab 1791 zu Preußen gehörenden Fürstentümern Ansbach und Bayreuth aus dem Jahr 1792 im Auftrag von Friedrich Anton Freiherr von Heinitz (1725–1802) für Gutachten zu einzelnen Fertigungsprozessen genau die Gliederung wählte, die Beckmann in seinem Buch immer wieder benutzte. Im Detail ist das z. B. am Kapitel *Porzellankunst* (Beckmann 1777, S. 219–239) und für Humboldts Gutachten über die Porzellanmanufaktur in Bruckberg (Humboldt 1792c, Bl. 178r–210v)<sup>2</sup> nachzuweisen. Die Vorgehensweise, sich nach Darstellung der Historie und der technischen Zusammenhänge auch zur betriebswirtschaftlichen Seite sowie zum Absatz von Erzeugnissen und zur volkswirtschaftlichen Einbettung zu äußern, behielt Alexander von Humboldt, wo es sich anbot, sein ganzes Leben über bei.

Um die volkswirtschaftlichen Zusammenhänge besser zu verstehen, setzte Humboldt sein Studium an der Hamburger Handelsakademie bei Johann Georg Büsch (1728–1800) (Hempel 2001, S. 74 f.) fort. Dieser hatte bereits 1780 eine sehr umfangreiche *Abhandlung von dem Geldumlauf*

---

2 r für recto = Vorderseite, v für verso = Rückseite.

*in anhaltender Rücksicht auf die Staatswirtschaft und Handlung* (Büsch 1780) in zwei Bänden veröffentlicht, untergliedert in sechs Bücher; 1784 folgte noch ein dritter Band. Sehr anschaulich beschrieb der Autor die Notwendigkeit des Handels und der Geldwirtschaft; er stellte dar, dass Lohnarbeit gesellschaftlicher Fortschritt war. Auch hier findet man, dass ein Staat nur floriert, wenn seine Bürger gut verdienen. Büsch überschrieb einen Paragrafen folgendermaßen: „Möglich größter Wolstand einer Nation ist, wenn in ihr die möglichst größte Zahl der Menschen ein Auskommen hat.“ (Büsch 1780, S. 13, §7) Alexander von Humboldt hat also sein Leben lang die Basis-Erkenntnisse seiner Kameralistiklehrer anhand eigener Erfahrungen untersetzt.

### **3 Vorschläge zu technischen Prozessen auf der Basis naturwissenschaftlicher Zusammenhänge durch Alexander von Humboldt**

#### **3.1 Einführung**

Durch seine Hauslehrer konnte sich Alexander von Humboldt gemeinsam mit seinem Bruder Wilhelm über viele Jahre exakte Grundkenntnisse in Mathematik und Naturwissenschaften aneignen. Die Übertragung dieses Wissens auf technische Prozesse wird für die beiden Schüler zu diesem Zeitpunkt jedoch kaum eine Rolle gespielt haben. Anders gestaltete sich die Situation wahrscheinlich erst nach Alexanders Rückkehr aus Frankfurt/Oder nach Berlin. Im Zusammenhang mit den Exkursionen in Betriebe in und in der Umgebung von Berlin (Stottmeister 2019) lag es nahe, dass der bereits genannte private Technologielehrer Johann Friedrich Zöllner seinem wissbegierigen Schüler Hinweise zum Wirken naturwissenschaftlicher Gesetze in technischen Prozessen und ihrer gezielten Anwendung gab. Das setzte sich während seines Studiums an der Universität in Göttingen unter Beckmanns Anleitung und insbesondere an der Bergakademie in Freiberg fort.

Dort studierte Alexander von Humboldt vom 14. Juni 1791 bis zum 26. Februar 1792 (Schwarz 2019). Es wird wohl kaum eine Lehrveranstaltung gegeben haben, in der nicht mit den damaligen Möglichkeiten und Kenntnissen auf die Wirkung von naturwissenschaftlichen Gesetzen, Zusammenhängen und Erfahrungen in technischen Abläufen eingegangen worden wäre – Fehlinterpretationen und Vermutungen eingeschlossen.

Humboldt verwies in seinem Brief vom 25. August 1791 an Dietrich Ludwig Gustav Karsten (1768–1810) u. a. auf seine Ausbildung in Mechanik bei Johann Friedrich Lempe (1757–1801), die die Basis für das Verständnis der Wirkung von Wasserkünsten generell und die statisch begründete Zimmerung von Grubenbauen legte (Humboldt 1973, S. 143–149). Bei Christlieb Ehregott Gellert (1713–1795) erfuhr er Grundlegendes zu metallurgisch-chemischen Vorgängen, die in allen Hüttenbetrieben eine Rolle spielen.

In seinen Gutachten und technischen Ausarbeitungen wandte Humboldt die Denkweisen an, die er an der Bergakademie verinnerlicht hatte. Das wird an einigen aus Humboldts umfangreichem Schaffen gewählten Beispielen gezeigt.

### 3.2 Überlegungen des Studenten zum temperaturabhängigen Aufnahmevermögen der Luft für Wasserdampf über Salzsiedepfannen

Der Gesamtdruck in einem beliebigen, mit Gasen gefüllten Raum setzt sich aus den Anteilen zusammen, den die Moleküle oder Atome der einzelnen Gasarten (z. B. Sauerstoff, Stickstoff, Wasserdampf, Kohlenmonoxid, Helium) entsprechend ihrer Anzahl in einem gegebenen Volumen dazu beisteuern. John Dalton (1766–1844) formulierte nach vorab auch Humboldt bekannten Untersuchungen den Zusammenhang im Jahr 1807 in dem nach ihm benannten Gesetz so, dass die Summe aller Partialdrücke, d. h. der Druckanteile der einzelnen Gase, gleich dem Gesamtdruck eines Gasgemisches ist (z. B. Grimsehl 1962, S. 427). Dabei spielt die Masse der Individuen keine Rolle. Mit der Temperatur ändert sich bei konstantem Druck nicht nur das Volumen einer gegebenen Gasmenge (Gesetz nach Amadeo bzw. auch Amedeo Avogadro (1776–1856) (z. B. Grimsehl 1962, S. 363), sondern auch die mögliche Aufnahme eines Gasgemisches für bestimmte Moleküle oder Atome einer anderen Gasart. So kann eine definierte Luftmenge bei höherer Temperatur mehr Wassermoleküle (Wasserdampf.) aufnehmen als bei tieferer. Kühlt man mit Wasserdampf gesättigte Luft ab, kondensieren die überschüssigen Wassermoleküle an den kalten Stellen eines Reaktionsraumes, d. h. sie werden wieder zu flüssigem Wasser.

Diesen Effekt erkannte Alexander von Humboldt spätestens zu Beginn seines Freiburger Studiums als Problem des Salzsiedens. Das Ziel dieses Verfahrens besteht im Verdampfen des Wassers aus einer hochkonzentrierten Salzlösung (Sole), um feinkristallines Kochsalz herzustellen. Man benutzte dazu eine auf einem Herd stehende Pfanne. Der Student beschäftigte sich mit Aussagen zum Salzsieden in der Fachliteratur und teilte das Ergebnis seiner Überlegungen in dem o. g. Brief an Dietrich Ludwig Gustav Karsten mit:

Bei unseren Siedpfannen steigen die Dämpfe aus der warmen Region in eine kältere, werden dort, statt in luftförmigen, permanenten Zustand überzugehen wieder tropfbar und vermehren nun den der Verdampfung schon so schädlichen Druck der atmosphärischen Luft auf der Pfanne. (Humboldt 1973, S. 146)

Den Wasserdampfpartialdruck erwähnte der Student nicht. Ebenso war der Begriff der Kondensation noch nicht geläufig, so dass Humboldt von wieder „tropfbarem“ Wasser sprach. Er hatte aber das temperaturabhängige Aufnahmevermögen der Luft für Wasserdampf verstanden und folgerte, dass man die durch das Sieden der Sole stark mit Wasserdampf angereicherte Luft sofort, also noch bei Verdampfungstemperatur, von der Siedepfanne wegführen muss, damit der Wasserdampf nicht wieder als Tropfen in sie zurückfällt.

Der Brief an Karsten enthält Lösungsvorschläge, teils aus der Fachliteratur und teils durch eigene Überlegungen. Er erwähnte u. a. den von Ignaz von Born (1742–1791) für das Rösten von Silbererzen beschriebenen „Flammen-“ bzw. „Reverberi-Ofen“ (Born 1790, S. 119 ff.). Angewandt auf den speziellen Fall des Salzsiedens wird die mit Wasserdampf beladene heiße Luft sofort horizontal von der Verdampfungsoberfläche der siedenden Sole abgezogen. Der Briefschreiber nannte aber auch die Möglichkeit, die Dämpfe weiter zu erhitzen, wodurch „[...]<sup>3</sup> sie an Elastizität gewinnen, [...]“ (Humboldt 1973, S. 146). Damit meinte er das Aufnahmevermögen der Luft für Wasserdampf, um eine Kondensation sicher zu verhindern.

---

3 Mit eckigen Klammern sind Auslassungen in Zitaten, Ergänzungen und Erläuterungen der Autorin gekennzeichnet.

### 3.3 Eine Überlegung Humboldts zur verbesserten Positionierung von Gradierwerken in der Landschaft

Sehr eindrucksvoll lässt sich Alexander von Humboldts Bestreben, naturwissenschaftliche Erkenntnisse mit der Lösung technologischer Aufgaben zu verknüpfen, an seinem 90seitigen Aufsatz über das Salinenwesen nachweisen, den er bereits als Student im Januar und Februar 1792 im Bergmännischen Journal (Humboldt 1792a) veröffentlichte. Humboldts Pionierrolle bei der Verbindung von Naturwissenschaft und Technik wurde noch 54 Jahre später von Carl Johann Bernhard Karsten (1782–1853) betont:

Die wichtige Abhandlung von A. v. Humboldt brach zuerst die tiefe Finsterniß, in welcher sich die wissenschaftliche Behandlung des Salinenwesens bis dahin befunden hatte. Der geistreiche Verfasser zeigt bei der Bearbeitung dieses rein technischen Gegenstandes die nothwendigen Beziehungen desselben zu den Grundlehren der Physik und Chemie, von denen man vor ihm kaum nur Begriff gehabt hatte. Wäre man einem so glänzend vorleuchtenden Beispiel gefolgt, so würden die Fortschritte in der Salinenkunde größer geworden sein, als es der Fall gewesen ist. (Karsten 1846, S. 32)

Ausführlicher wird auf Humboldts Aufsatz in (Hülseberg, Schwarz 2020, Abschnitt 5. 3.) eingegangen; hier ist nur Platz für ein Beispiel aus Betrachtungen des Studenten über die Verbesserung der Anordnung von Gradierwerken im Gelände. Diese haben die Aufgabe, den Wassergehalt der Sole vor dem Sieden durch Verdunstung (Humboldt sprach meist von Verdampfung) zu verringern, um das für das Sieden nötige, teure Holz zu sparen. Gradierwerke sind meist über 100 m lange und etwa 10 m hohe, dicht mit Bündeln aus Dornenreisig gepackte Wände, auf die die Sole unter Zuhilfenahme perforierter, d. h. gezielt durchlöcherter, horizontaler Leitungen tropft. Durch die vom Reisig unterstützte Zerstäubung der Tropfen vergrößert sich die zur Verdunstung des Wassers zur Verfügung stehende Oberfläche. Sommerliche Temperaturen und eine günstige Richtung des Windes, der die mit Wasserdampf beladene Luft wegführt, erleichtern den in der Regel sehr kostengünstigen Vorgang.

Humboldt benutzte in seinen Erläuterungen noch den Begriff „Wärmestoff“. Dass Wärme eine spezielle Form der *Energie* und kein *Stoff* ist, wurde erst 1842 mit den Arbeiten von Julius Robert Mayer (1814–1878) erkannt. Der Student erläuterte zunächst die zu seiner Zeit verstandenen Zusammenhänge:

Die Quantität des Wärmestoffs, welche die atmosphärische Luft enthält, ist im Ganzen gering. Daher können nur wenige Dämpfe sich bilden. Uiberdies wird durch die Verdampfung selbst Kälte erregt. Denn das Wasser geht von einem tropfbar flüssigen in einen gasartigen elastischen Zustand über und da durch [richtig: dadurch wird] Wärmestoff gebunden – ein Umstand, der wenig bemerkt und dem Gradiren doch sehr hinderlich ist.

Humboldt folgerte:

Um so wichtiger scheint es daher, da der Wärmestoff das Hauptagens bey der Verdampfung ist, und die Abendwinde überdies viel Feuchtigkeit bringen, die Gradirhäuser (wenn es sonst das Lokal erlaubt) mit den Giebeln gegen Abend und Morgen zu stellen. Die Sonnenstrahlen fallen dann unmittelbar auf die Dornwände. (Humboldt 1792a, S. 24–25)

Und weiter zur Wegleitung der wasserdampfhaltigen Luft:

[Winde] verjagen die feuchte, schon gesättigte Luftschicht, deren Stelle eine trockenere und ungesättigte einnimmt. Daher die vorteilhafte Lage der Gradirhäuser in der Ebene, wie ich sie zu Schönebek, Nauheim, Bruchsal, Salz der Helden, Sülbek und Pyrmont sahe. In bergigten Gegenden wie zu Allendorf, oder gar in schmalen Thälern, wie an der Nahe bey Kreuznach müssen sie nach der Oefnung des Thals oder dem Hauptstreichen des Windes erbaut werden – [...] (Humboldt 1792a, S. 27)

Er griff sowohl auf erlerntes Wissen als auch auf eigene Beobachtungen während Exkursionen zurück. Ihm gelang es, mit wachem Blick das Wesentliche einer Situation zu erfassen.

### **3.4 Humboldts Stellungnahme zum Einsatz teurerer Rohstoffe, wenn sich dadurch der Erlös für Steingut überproportional erhöhen ließ**

Ein grundlegender betriebswirtschaftlicher Zusammenhang besagt, dass sich aus der Differenz von Erlösen minus Kosten das Ergebnis der Tätigkeit eines Unternehmens ergibt, das natürlich positiv sein soll. Nur auf die Kosten zu schauen, wäre also der falsche Weg, wenn es möglich ist, durch bessere (meist teurere) Rohstoffe, Maschinen oder qualifiziertere Arbeitskräfte, die in der Regel mehr Lohn erhalten, überdurchschnittlich erhöhte Erlöse durch bessere Produkte zu erzielen, für die man dann einen höheren Preis verlangen kann und/oder nach denen die Nachfrage und damit der Absatz steigt.

Mit solch einem Problem wurde der ein viertel Jahr zuvor im preußischen Bergbau- und Hütten-departement angestellte Alexander von Humboldt konfrontiert, als er am 6. Juni 1792 (Schwarz 2019) das Steingut- und Fayencewerk in Rheinsberg nördlich von Berlin besuchte. Er sollte Vorschläge für die Verbesserung der Qualität des Steinguts unterbreiten, dessen Herstellung Carl Friedrich Lüdicke (1739–1797) wenige Jahre zuvor aufgenommen hatte.

In seinem am 17. Juni 1792 vorgelegten Bericht (Humboldt 1792b) erläuterte der Gutachter zunächst fachkundig die Zusammensetzung von Steingut in Rheinsberg auf der Basis von Ton, Kreide und Feuerstein sowie die Vor- und Nachteile der beiden im Unternehmen verwendeten Rohstoffe Abraumton aus Bennstedt und Bunzlauer Ton. Mit beiden konnte man Steingut herstellen, jedoch mit deutlich unterschiedlicher Qualität und damit Erlösen aus dem Absatz der Steinguterzeugnisse. Humboldt beschrieb beide Tone:

Der erstere [der Bennstedter Abraumton], welcher über der Porzellan-Erde liegt, ist gelblichweis, bisweilen leider! schon ins okkergelbe übergehend, ziemlich grob-erdich, und sehr mager im Anfühlen. Er leidet beim Schlemmen einen sehr beträchtlichen Verlust, da er übermäßig mit Sand vermengt ist und die metallischen, wahrscheinlich Eisenhaltigen Theile, welche er enthält, geben der Masse beim Brennen (wo sie sich verkalchen) eine gelbliche *nuance*. Der *Bunzlauer* Thon ist röthlichweis, bisweilen schneeweis, sehr feinerdich, auf den Strich glänzend und fühlt sich fetter an. Er scheint metallfreier zu sein und giebt weniger Verlust beim Schlemmen. (Humboldt 1792b, Bl. 4v)

Auf die fachliche Seite dieser speziellen Aussagen wird in (Hülseberg, Schwarz 2012, S. 17–20) genauer eingegangen. Hier sei nur kurz zusammengefasst, dass der Bennstedter Abraumton (das ist Ton aus der Deckschicht über einer Lagerstätte – hier von weißbrennendem Porzellanton) für das weiße Steingut schädliche färbende Oxide enthält und dass sich im Abraumton Sand befindet, der durch Schlämmen (Absetzen in Wasser) entfernt werden muss, um nicht die Zusammensetzung des Steingutes zu verfälschen. Außerdem ist er „mager“, lässt sich also

schlecht formen. Der Bunzlauer Ton weist alle diese Nachteile nicht auf, garantiert also die Herstellung von qualitativ besseren Steinguterzeugnissen.

Der Vorteil des Bennstedter Abraumtons bestand in seinem niedrigen Preis. Er liegt im Tagebau direkt auf der Bennstedter Porzellanerde, die für die Herstellung von Porzellan in der Königlichen Porzellanmanufaktur Berlin abgebaut wurde. Er musste also ohnehin als scheinbar wertloses Beiprodukt beräumt werden. Zusätzliche Kosten fielen für seine Gewinnung kaum an. Außerdem waren die Transportkosten sowohl nach Berlin als auch nach Rheinsberg gering, denn Bennstedt liegt in der Nähe von Halle. Bennstedter Abraumton belastete also die Kosten in der Rheinsberger Manufaktur wenig.

Für Bunzlauer Ton dagegen konnten die Grubenbesitzer seiner besseren Qualität wegen einen höheren Preis verlangen; er wurde extra zweckgebunden abgebaut, und der Transportweg von Bunzlau in Schlesien nach Rheinsberg war deutlich weiter und aufwändiger.

Betriebsleiter Lüdicke musste eine wichtige betriebswirtschaftliche Entscheidung treffen, die Alexander von Humboldt folgendermaßen beschrieb:

Herr *Lüdeke* hat seit diesem Jahr ganz aufgehört, Bestellungen von *Bennstedter* Abraum zu machen, von dem ihm der Karren an der Grube [nur] 6 Groschen kostet. Er zieht den *Bunzlauer* Thon, ohnerachtet des weiten Transports, der von der Oder, [...] zu Wasser, von da an aber zur *Axe* geschieht, und anderer ihn vertheuernder Umstände vor [...]. (Humboldt 1792b, Bl. 4v)

Humboldt unterstützte als Kameralist im Vertrauen auf eine verbesserte Erzeugnisqualität und damit einen erhöhten Absatz Lüdicke's Entscheidung. Ganz speziell für seinen Dienstherrn, der gleichzeitig über die Königliche Porzellanmanufaktur in Berlin die Oberaufsicht führte, und weil sich aus dem Tagebau Bennstedt durchaus besserer, billigerer Ton liefern ließ, formulierte er außerdem:

Es würde sehr wichtig sein, da die Klagen des *p Lüdeke* über den Hallischen Abraum nicht ungegründet scheinen, ihm denselben reiner, weniger mit der darüber liegenden Schicht Letten (von der ohne Zweifel die gelbe Farbe herrührt) vermengt zu schaffen. (Humboldt 1792b, Bl. 5r)

Alexander von Humboldt wies somit gleichzeitig einen Weg zur Qualitätsverbesserung der Erzeugnisse und Kostensenkung der Steingutfertigung in Rheinsberg.

### **3.5 Vergrößerung der freien Oberfläche zur Erhöhung der Auslaugeschwindigkeit von Vitriolschiefer**

Am 11. Juli 1792 besuchte Alexander von Humboldt die Vitriolschiefergrube bei Schmiedefeld in der Nähe von Saalfeld, die *Morassina*. Das Gebiet befand sich nicht im Königreich Preußen, lag aber nahe am Weg im Herzogtum Sachsen-Coburg Saalfeld, als der Dienstreisende im Auftrag von Staatsminister von Heinitz die Bergbau- und Hüttenbetriebe in den 1791 an Preußen gefallenen Fürstentümern Ansbach und Bayreuth besuchte. Sein Bericht über diese spezielle Befahrung befindet sich deshalb „nur“ als „Beilage“ an dem ausführlichen Reisebericht (Humboldt 1792c). Die Transkription enthält (Humboldt 1959, S. 204–207).

In der *Morassina* wurden sowohl die Rohstoffe bergmännisch gewonnen als auch Kupfervitriol durch Auslaugen derselben und Sieden der Lauge hergestellt. Es handelt sich um ein blaues Kupfersulfat, das reich an Kristallwasser ist. Kupfervitriol verwendete man vor allen Dingen zum Imprägnieren von Holz, aber auch zum Färben von Stoffen allgemein, zur Herstellung von Tinte, zur Desinfektion, zur Konservierung von Tierhäuten und zur Unkrautbekämpfung.

In Schiefer umgewandelte Tone enthalten in der Regel weder Kupfer noch Schwefel. Es gibt aber Vorkommen, in denen sich zusätzlich Kupferkies, ein Kupfer-Eisen-Sulfid, befindet – wie hier in der *Morassina*. Dieser Kupferkies ist chemisch weitaus weniger stabil als der Schiefer-ton. Er lässt sich in einer über eine längere Zeit dauernden Reaktion in seine Bestandteile zerlegen, wenn man ihn nach Zerkleinerung des abgebauten Rohstoffs auf „Bühnen“ legt und dabei gleichzeitig der Luft, dem Regen und der Sonne aussetzt. Erst überließ man in dem Unternehmen die Schiefer sich selbst, um die Zersetzungsreaktionen einzuleiten. Dann wurde gezielt Wasser (z. B. aus Bächen) auf die Bühnen geleitet, um die anreagierten Kupferkiese im Wasser zu lösen, d. h. eine Lauge zu bilden. Die Lauge wurde in Vorratskästen abgezogen, vom Schlamm befreit und dann gesiedet. Humboldt beschrieb die Bühnen in der *Morassina*:

Der gewonnene Schiefer wird sogleich auf 24 Fuß [ca. 8 m] langen und breiten Bühnen gestürzt, [...] Der Grund ist mit Kalksteinen gemauert, steigt zu beiden Seiten unter 20° an und hat in der Mitte ein gemauertes Gerinne.

Eben dieser Grund wird noch mit Schwarten, die nahe in einander gefalzt sind, genau verschlagen, damit keine Lauge durchdringe, sondern alle in das Siedhaus läuft. (Humboldt 1959, S. 205)

Auf diesen Bühnen lag der zerkleinerte Vitriolschiefer dicht geschüttet. Damit das nach etwa 1½ Jahren gezielt zugeleitete Wasser die Reaktionsprodukte gut auslaugen konnte, wurde in der *Morassina* die Schüttung von Zeit zu Zeit durch das Ziehen von Rinnen (man bezeichnete den Vorgang als Rigolen) aufgelockert. Das Wasser kam zur Laugenbildung mit „frischer“, vermehrter Oberfläche des Vitriolschiefers in Kontakt. Für die Auslaugung gab es zusätzliche Kontakt-, d. h. Angriffspunkte. Humboldt erinnerte sich an in Freiberg für ähnliche Vorgänge Gelerntes und schrieb lobend in seiner Beilage: „Das Rigolen der Bühnen, welches nach der Theorie am vorteilhaftesten sein muß, ist es hier auch im vorigen Jahre gewesen.“ (Humboldt 1959, S. 206)

Da er sich im „Ausland“ befand, formulierte Humboldt hier keine Verbesserungsvorschläge, sondern kommentierte lediglich das Vorgefundene sachkundig.

### **3.6 Verringerung der Schmelzzeit von Glas durch innige Mischung der Oxide in einem Komplexrohstoff**

Die Vergrößerung der Anzahl an Kontaktpunkten zwischen verschiedenen zusammengesetzten Rohstoffpartikeln unterstützt auch Schmelzvorgänge. Man erreicht das durch gute Zerkleinerung der Rohstoffe und intensive Mischung derselben. Das hatte Alexander von Humboldt wahrscheinlich in Freiberg gelernt. Sein Lehrer Christlieb Ehregott Gellert hatte weiterhin in Versuchen festgestellt, „[...] daß Gemische eine niedrigere Schmelztemperatur als die Einzelkomponenten haben.“ (Lauterbach 1994, S. 55)

Warum sich aber eine Verringerung der Schmelztemperatur und eine Verkürzung der notwendigen Schmelzzeit einstellen, wusste man nicht, denn hier spielen Vorgänge aus der damals noch nicht geläufigen chemischen Thermodynamik eine Rolle. Es geht um eutektische (aus dem Griechischen etwa: gut schmelzbar) Reaktionen, die stattfinden, wenn einem zu schmelzenden oder zu sinternenden Material sogenannte Flussmittel in geeigneter Zusammensetzung und Menge zugegeben werden. Ihr Effekt wurde im 18. Jahrhundert vor allen Dingen bei der Eisenerzverhüttung, s. auch Abschnitt 3. 9., und eben bei der Glasschmelze genutzt.

Eine eutektische Reaktion zur Absenkung der Schmelz- oder Sintertemperatur nutzt aus, dass es Stoffpaarungen bzw. verschiedene Rohstoffe gibt, die bei inniger Mischung in einem definierten Mengenverhältnis bei tieferer Temperatur *gemeinsam* schmelzen als jede der verschiedenen Komponenten *einzel*n. Es gilt die von Josiah Willard Gibbs (1839–1903) erst im Jahr 1876 formulierte Phasenregel (Holleman, Wiberg 1960, S. 190f.).

Je mehr Berührungspunkte zwischen den Rohstoffkörnern vorliegen, umso intensiver ist die Reaktion. Selten liegt jedoch für die gesamte betrachtete Stoffmenge an jedem (Mikro-)Ort das definierte eutektische Mischungsverhältnis vor. Stattdessen entsteht bei der eutektischen Schmelztemperatur an vielen Stellen eine lokal begrenzte Initialschmelze, in der sich die noch nicht aufgeschmolzenen Rohstoffanteile mit steigender Temperatur Schritt für Schritt lösen. Die endgültige Schmelze aller Rohstoffe erfolgt dennoch bei einer Temperatur, die unter der Schmelztemperatur der einzelnen Komponenten liegt. Die Vorgänge werden heute in sogenannten Mehrstoffsystemen beschrieben (siehe z. B. relativ leicht verständlich in Hinz 1963, Kapitel 3).

Will man nicht die gesamte Rohstoffmischung schmelzen, sondern nur eine geringere Schmelzmenge als Basis für die sogenannte Flüssig- oder Schmelzphasensinterung erhalten, muss der Anteil an eutektischer Mischung bei der Zusammensetzung z. B. der Porzellanmassen entsprechend optimiert werden.

Nun speziell zum Glas. Man könnte heute den transparenten Werkstoff allein aus Quarzsand herstellen. Dazu benötigt man aber für homogene Erzeugnisse Schmelztemperaturen über 2000 °C, die zu Humboldts Zeiten technisch nicht erreichbar waren. Aber schon vor etwa 6000 Jahren beobachtete man, dass eine Mischung aus Sand und Holzasche bei mit Holzfeuer erreichbaren Temperaturen schmolz. Das konnte man gezielt zur Herstellung von Gefäßen, Glasuren und Schmuck nutzen.

Die Technik verbesserte sich über die Jahrtausende, indem man spezielle Rohstoffe, die z. B. Kalium- und Natriumoxid sowie auch Kalziumoxid enthielten, einsetzte und Öfen baute, die die durch Holzfeuer erzielbare Wärme in Schmelzgefäßen, sogenannten Häfen, konzentrierte. Die Erfahrung lehrte, dass sich z. B. Flaschenglas aus Sand, Soda und Kalk mit einigen von Ort zu Ort variierenden Zusätzen in der vor 250 Jahren akzeptierten Qualität auf diese Art und Weise schmelzen ließ. Man wusste noch nicht, dass man etwa 1250 °C benötigte und konnte den Schmelzzustand nur durch Probieren abschätzen.

Die Wirkung von Natrium- und Kaliumoxid besteht darin, dass sie – im richtigen Mischungsverhältnis – mit dem Siliziumdioxid des Sandes eutektisch schmelzen. Während reines Siliziumdioxid theoretisch bei 1710 °C eine extrem zähflüssige, blasige Schmelze ergibt, bildet sich durch Zugabe von Natriumoxid die erste Schmelze schon bei 789 °C (Hinz 1961, S. 559). Setzt man noch Kalziumoxid hinzu, entsteht die erste Schmelze bereits bei 725 °C (Hinz 1961, S. 577–579), in der sich mit steigender Temperatur die Rohstoffanteile, die nicht dem eutektischen

Mischungsverhältnis entsprechen, lösen. Würde man nur Kalzium- und Siliziumdioxid gemeinsam schmelzen, tritt eine solche dramatische Absenkung der Temperatur der ersten Schmelze nicht auf.

Alexander von Humboldt besuchte am 21. Juli 1792 die Knopfglashütte in Bischofsgrün im Fichtelgebirge (Humboldt 1959, S. 146). Dort stellte man farbige Glasknöpfe und -perlen auf der Basis von speziell eingefärbtem, zunächst farblosem Ausgangsglas her. Die Schmelze wurde mindestens eine Nacht lang bei möglichst hoher Temperatur gehalten. War die erreichbare Temperatur für die Schmelze eines akzeptabel homogenen Glaserzeugnisses nicht hoch genug – z. B. bei Feuerung mit nassem Holz –, wurden häufig die Rohstoffe sogar erst gemeinsam vorgeschmolzen und dann die noch inhomogene Schmelze aus den Häfen in Wasser gegossen. Durch das Abschrecken entstanden innere Spannungsrisse. Sie unterstützten die anschließende Zerkleinerung der vorgeschmolzenen Rohstoffmischung (Gemenge) zu Feinkorn. Das bewirkte die Vergrößerung der Anzahl der Berührungspunkte der verschiedenen Bröckchen bei der erneuten Aufschmelze. Sie wurden anschließend wieder rein mechanisch durchgemischt und also nochmals geschmolzen, um die Homogenität des Glases zu erhöhen.

Humboldt fand aber auch die Herstellung von schwarzen Knöpfen und Perlen vor – Letztere auch Batterle genannt –, bei denen eine geringere Haltezeit bei erreichbarer Höchsttemperatur für eine qualitativ genügende Schmelze ausreichte. Das Ausgangsgemenge war nicht eine Mischung verschiedener Rohstoffe, sondern *ein* zerkleinerter Rohstoff, der selbst ein Mineral-*Gemisch* darstellte. Heute würde man von einem Komplexrohstoff sprechen. Auf engstem Raum, also in inniger Mischung, befinden sich im *Grünstein*, auch *Proterobas* oder *Batterlestein* genannt, in einer Diabas-Matrix feinste Einschlüsse von Augit und Feldspat. Ohne hier auf die komplizierte chemische Zusammensetzung der Minerale eingehen zu können, die auch das in größeren Mengen schwarz färbende Eisenoxid enthalten, sei nur gesagt, dass Diabas, Augit und Feldspat alle zur Bildung eutektischer Glasschmelzen notwendigen Oxide enthalten.

Der Batterlestein vom Fichtelgebirge wies zusätzlich eine mineralogische Besonderheit auf. Er enthielt wenig Feldspat, dafür aber Hornblende, die eine ähnliche Wirkung wie Feldspat für die Schmelze hat. Humboldt formulierte in seinem Gutachten über die Knopfglashütte die wichtige Erkenntnis:

Das *Material*, Batterlestein, wird von Schneeberg und Ochsenkopf geholt. Es ist ein ächter Grünstein, mit wenig Feldspat, und mit vieler innig beigemengter Horn-Blende, der dort in Butzen umher liegt, [...]. (Humboldt 1792c, Bl. 157r)

Diese „innig beigemengte Hornblende“, die zu vielen Berührungs- und damit Reaktionspunkten zwischen den Mineralen führt, ist es nun, die die Schmelze an unzähligen Stellen im zerkleinerten Rohstoff gleichzeitig bei der eutektischen Temperatur einsetzen lässt und es somit erlaubt, die Haltezeit bei der höchsten Temperatur erheblich zu verkürzen. Nicht eine ganze Nacht mussten die Glasschmelzer die hohe Temperatur aufrechterhalten, sondern der Gutachter konnte formulieren: „[Das Glas wurde] in gewöhnlichen Häfen 2–3. Stunden lang ohne allen Zusatz geschmolzen. In dieser Zeit ist er [gemeint ist der Grünstein] völlig im Fluß.“ (Humboldt 1792c, Bl. 157r) Die geringe Schmelzzeit machte die Herstellung billiger – ein Fakt, der für Humboldt offensichtlich war. Weitere Zusammenhänge sind in (Hülsenberg, Schwarz 2016, Kapitel 6) dargestellt.

### 3.7 Gut durchdachte Auswahl von Wasserrädern für den Antrieb von Zerkleinerungsanlagen durch Alexander von Humboldt

Seit vielen Jahrhunderten werden Wasserräder genutzt, um vor allen Dingen im Bergbau und der Aufbereitungstechnik Förderanlagen oder Zerkleinerungsaggregate zu betreiben. Man erkannte zwei Varianten der im Wasser enthaltenen Energie, die man später als kinetische und als potenzielle bezeichnete. Die kinetische Energie leitet sich aus der z.B. durch einen Kanalquerschnitt strömenden, halben Masse des Wassers, multipliziert mit dem Quadrat seiner Fließgeschwindigkeit, ab; die potenzielle ebenfalls aus seiner Masse und dessen Fallhöhe, wobei die Erd- oder Schwerebeschleunigung einzubeziehen ist. Multipliziert man diese drei Größen, erhält man die potenzielle Energie (siehe u. a. Grimsehl 1962, S. 69).

Grubenbetriebe befanden sich im 18. Jahrhundert in der Regel in bergigen Gebieten. Bäche stürzten von den Bergen ins Tal, wobei vor allem die lokale Fallhöhe des zuvor angestauten Wassers die für den Antrieb nutzbare potenzielle Energie beeinflusst. Der mögliche Durchmesser des Wasserrades hängt von der an dieser Stelle erreichten Fallhöhe des Wassers ab. Die zur Verfügung stehende Wassermasse war meist nicht allzu groß. Es kamen *oberschlächtige* Wasserräder zum Einsatz, während sich für die Nutzung der kinetischen Energie von wasserreichen Bächen oder gar Flüssen im Flachland in der Regel *unterschlächtige* Wasserräder anboten. Beide Typen stehen senkrecht und drehen sich mit einer horizontalen Welle in zwei Lagern.

Beide Prinzipien unterscheiden sich in der Art der Leitung des Wassers auf die Schaufeln des Rades. Bei oberschlächtigen Rädern wird das Wasser möglichst weit oben auf die Schaufeln geführt, bei unterschlächtigen kommen nur die unten in den Bach eintauchenden Schaufeln mit dem Wasser in Berührung. Es gab und gibt unterschiedlichste Arten von Konstruktionsprinzipien für beide Arten von Wasserrädern.

Wichtig war die bereits im 18. Jahrhundert gewonnene Erkenntnis, dass man bei oberschlächtigen Wasserrädern nur etwa die Hälfte der vorhandenen Fallhöhe für die Übertragung der Energie des Wassers auf z. B. Zerkleinerungsaggregate nutzen kann, da bereits nach einer Vierteldrehung des Rades das Wasser wieder aus den Schaufeln fließt. Oberschlächtige Wasserräder besitzen also von Haus aus nur etwa 50 % des möglichen energetischen Wirkungsgrades, sodass schon eine erhebliche Fallhöhe des Wassers vorhanden sein muss, um mehrere Antriebe von *einer* Welle aus mit *einem* Rad zu betreiben. Dieses Wissen hatte sich Alexander von Humboldt nicht nur in Vorlesungen, sondern auch bei Untertage-Befahrungen an der Bergakademie in Freiberg angeeignet.

Als er zwischen dem 1. und dem 3. August 1792 die Porzellanmanufaktur Bruckberg westlich Nürnberg besichtigte, fand er dort Pochwerke für die Grobzerkleinerung der unplastischen Rohstoffe Quarzit, Kalk sowie Gips und rotierende Scheibenmühlen für die Feinmahlung derselben vor, die mit einem oberschlächtigen Wasserrad bewegt wurden. Es reichte bei der damals geringen Porzellanproduktion für den Antrieb der Zerkleinerungsaggregate gerade aus. Den Bericht verfasste der Gutachter am 3. August 1792 (Humboldt 1959, S. 37).

Humboldts ausführliche Analysen zur Herstellung des Porzellans in der Manufaktur und seine Vorschläge für die Verbesserung der einzelnen Prozessstufen sind in (Hülseberg, Schwarz 2014) ausführlich diskutiert. Er machte sich u. a. Gedanken darüber, ob die Antriebsenergie für die Aggregate zur Rohstoffzerkleinerung noch ausreiche, falls sich die Nachfrage nach besserem Porzellan und damit die Produktion wieder erhöhe:

Sollte man mehrere Erfahrungen machen, daß es an Bewegkräften bey stärkerem Betriebe des Werks fehlet, so würde ich rathen, das 8 Fuß hohe oberflächliche Rad, 16. Fuß hoch zu machen, und als Kropfrad wirken zu laßen. (Humboldt 1792c, Bl. 202v–203r)

Das Kropfrad wirkt wie ein mittelschlächtiges Wasserrad mit umgekehrter Drehrichtung, bei dem das Wasser am äußeren Umfang in halber Höhe des Rades (identisch mit dem Radius) auf die Schaufeln trifft. Da – nach Humboldt – der Radius (und damit auch der Durchmesser) doppelt so groß wie bisher sein sollte, nutzt man die gesamte Fallhöhe des Wassers für die Umdrehung des Rades. Der energetische Wirkungsgrad würde damit seine mögliche Höhe erreichen – natürlich mit einem deutlich teureren Wasserrad. Diese Investition rentierte sich aber, so der Kameralist, sehr schnell, da sich an der Wasserzufuhr nichts ändern müsste, aber deutlich mehr Rohstoffe durch Anschluss weiterer Aggregate an ein und dieselbe Welle zerkleinert werden könnten. Alexander von Humboldt hatte eine aus dem Bergbau bekannte Gesetzmäßigkeit und Erfahrung auf die Zerkleinerung von Porzellanrohstoffen übertragen.

### **3.8 Exakte Dimensionierung der Querschnitte von Luftzutrittsöffnungen und Verbrennungsgaskanälen in Keramikbrennöfen entsprechend den chemischen Reaktionen der Brennstoffe und Temperaturen**

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurden Industrieöfen einschließlich der Öffnungen für den Luftzutritt zur Feuerstelle und der Kanäle für die Verbrennungsgasführung lediglich aus der Erfahrung heraus dimensioniert. Wie das erfolgte, lernte Alexander von Humboldt z. B. für Öfen zur Verhüttung von Erzen und Schmelze von Metallen bei Gellert an der Bergakademie Freiberg (Gellert 1750, S. 135 ff.). Zum Zeitpunkt seines Studiums war aber noch nicht lückenlos bekannt, wie die Verbrennung tatsächlich funktionierte.

Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) hatte seit etwa 1771 Verbrennungsvorgänge untersucht (Szabadváry 1987) und 1777 bewiesen, dass dabei Sauerstoff als Reaktionspartner eine Rolle spielt, also eine Oxidation stattfindet (Lauterbach 1994, S. 65). Er prägte den französischen Begriff *oxygène* für Sauerstoff. Dieser ist mit rund 21% in der Luft enthalten. Den Stickstoff mit rund 78% hatte schon 1771 Carl Wilhelm Scheele (1742–1786) als Hauptbestandteil der Luft entdeckt und ihn als „schlechte Luft“ bezeichnet (Lockemann 1984, S. 274 ff.). Wie sich mit dieser Erkenntnis herausstellte, ist Stickstoff ungewollt bei jeder Verbrennungsreaktion in Luft als in diesem Fall inertes Gas vorhanden (er nimmt nicht an der Reaktion teil) und steuert seinen Anteil zum Gasvolumen bei, das durch traditionelle Industrieöfen strömt.

Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711–1765) hatte schon 1748 das Prinzip der Massenerhaltung bei chemischen Prozessen (Shiltsev 2012) erkannt, das Lavoisier 1789 als Gesetz von der Erhaltung der Massen bei chemischen Reaktionen ausformulierte. Es geht somit bei der Verbrennung des Heizmaterials in Industrieöfen nichts verloren. Aus den damals ausschließlich verwendeten festen Brennstoffen (meist Holzkohle, gelegentlich Steinkohle) entstehen durch Verbrennung/Oxidation in Luft Asche, ggf. nicht oxidiertes Ruß und vor allen Dingen die Gase Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasserdampf. Obwohl aus der Erfahrung schon länger intuitiv genutzt, formulierte erst Joseph Louis Proust (1754–1826) im Jahr 1797 das Gesetz der *konstanten* Proportionen (Proust 1799, S. 31). Man konnte, als Humboldt in Freiberg studierte, noch nicht exakt aus der chemischen Zusammensetzung der Brennstoffe und der Menge des verbrauchten Sauerstoffs das Volumen der Reaktionsgase (einschließlich des mitgeschleppten Stickstoffs aus der Luft) berechnen. Es dauerte bis 1808, als Dalton schließlich das Gesetz der *multiplen* Proportionen veröffentlichte:

Wenn zwei Elemente verschiedene chemische Verbindungen bilden können, stehen die Massen des einen Elements, die sich mit einer gleichbleibenden Masse des anderen Elements verbinden, zueinander im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen. (Pauling 1988, S. 18)

Für die Dimensionierung der Gaskanäle in Öfen ist weiterhin wichtig, dass sich mit der Temperatur auch das Volumen der durch die Öfen strömenden Verbrennungsgase ändert. Das entsprechende Gesetz (Grimsehl 1962, S. 361) wurde etwa gleichzeitig ebenfalls von Dalton und auch von Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) im Jahr 1801 veröffentlicht und besagt, dass sich reine Gase bei konstantem Druck mit steigender Temperatur proportional ausdehnen bzw. bei Abkühlung zusammenziehen. Dieselbe Verbrennungsgasmenge benötigt also bei ihrer Passage durch den Ofen mit fallender Temperatur sich verengende Abgaskanäle, wenn der Druck konstant bleiben soll. Es spielt somit auch das schon in Abschnitt 3.2. genannte Avogadro'sche Gesetz eine Rolle. Über die Dimensionierung der Gaskanäle kann man somit auch den Ofenraumdruck einstellen und z. B. verhindern, dass Flammen aus Rissen in der Ofenwandung in die Werkhalle herausschlagen.

Diese Gasgesetze waren also, als Alexander von Humboldt 1792 die Porzellanmanufaktur in Bruckberg besuchte, noch nicht exakt erforscht, sondern nur vielen Betreibern von Hüttenbetrieben aus der Erfahrung bekannt. Durch Vergleiche mit der Dimensionierung der Öffnungen für den Luftzutritt und der Verbrennungsgaskanäle in den Brennöfen der Königlichen Porzellanmanufaktur in Berlin konnte Humboldt ableiten, welche Verschleißerscheinungen und Konstruktionsfehler die sogenannten Wiener Öfen in Bruckberg aufwiesen. Ausführliches dazu kann man (Hülensberg, Schwarz 2014, S. 58f.) entnehmen. Für eine Generalreparatur empfahl er:

Er ist 1781 gebaut, aber schon sehr *expandirt*, und rissig. Ich glaubte die Wirkung davon selbst mit ungeübten Augen, an dem Gange des Feuers zu beobachten. Die Flamme schlägt über den Feuerkasten *vertical* in die Höhe, welches bey gehörigem Luft-Wechsel und Druk der Atmosphäre nicht möglich ist. [...] Die nöthige Vorrichtung eines Ständers, die Erhöhung der Feuer-Eße, auf welche gegenwärtig ein unregelmäßiger – von den vielen Fenstern des Bränhaußes herrührender Luft-Zug stößt, die untern Schürlöcher, die hier weiter und vielfacher, als bey den Berliner Öfen sind, würden eine eigene Untersuchung verdienen. (Humboldt 1792c, Bl. 203v–204r)

Durch die vielen, großen Schürlöcher trat also unkontrolliert und zu viel Luft in den Porzellanbrennofen ein. Diese für die Verbrennung des Holzes nicht benötigte Luft musste mit erwärmt werden und senkte die insgesamt erreichbare Temperatur ab.

### **3.9 Hinweise Alexander von Humboldts zur Verbesserung der Produktion von Roheisen nach gedanklicher Trennung von Reduktion und Schmelze**

Der hier nicht näher zu behandelnde, sehr komplexe Hochofenprozess zur Herstellung von Roheisen erfüllt zwei entscheidende Aufgaben: Die Erzeugung von metallischem Eisen aus meist oxidischen Erzen durch in erster Linie Reduktionsvorgänge mittels Koks (Abspaltung des Sauerstoffs und Bindung desselben an den Kohlenstoff) und das Herausschmelzen des nunmehr metallischen Eisens aus der Stoffmischung bei gleichzeitiger Entstehung von Schlacke. Zu diesem Zweck wird der Hochofen nicht nur mit Erz und Koks (damals Holzkohle, ggf. auch Steinkohle), sondern auch mit Flussmitteln beschickt. Zu Letzteren erfolgten bereits Erläuterungen in Abschnitt 3.6.

Ende des 18. Jahrhunderts wurden die Vorgänge zur Erzeugung des metallischen Eisens im Zusammenhang mit Lavoisiers Erklärung der Verbrennung, d. h. der Oxidation und Reduktion, immer besser verstanden. Es wurde offensichtlich, dass die Bindung einzelner Elemente an Sauerstoff unterschiedlich stark ist. Eine Quantifizierung dieser Bindung in elektrochemischen Spannungsreihen (Holleman, Wiberg 1960, S. 165–170) sowie die Ermittlung von Reaktionswärmern als Ausdruck für die Stärke der Bindung der Elemente an Sauerstoff erfolgte jedoch erst deutlich später.

Es war auch noch nicht bekannt, dass die Reaktion zwischen oxidischen Erzen und dem Kohlenstoff der festen Brennstoffe nicht unmittelbar erfolgt, sondern erst, nachdem sich bei maximaler Temperatur im Hochofen (heute bei 1600 °C) das Gas Kohlenmonoxid gebildet hat, das sich räumlich verteilt und eine flächige Reaktion, von der Oberfläche der zerkleinerten Erzbröckchen ausgehend, im atomaren Maßstab erlaubt. Ebenso wusste man nichts über das Boudouard-Gleichgewicht (Holleman, Wiberg 1960, S. 136), das die Dissoziation des Kohlenmonoxids mit fallender Temperatur zu Kohlendioxid und feinstem Rußpulver beschreibt. Dieses Nanopulver kann die Reduktion der Eisenoxide ebenfalls herbeiführen. Natürlich wird dem Hochofen (heute stark vorgewärmt) Wind/Luft zugeführt. Eine gut verständliche Beschreibung des Hochofenprozesses findet man ebenfalls bei (Holleman, Wiberg 1960, S. 527–530).

Als Alexander von Humboldt im Sommer 1792 die Hüttenbetriebe im Fürstentum Bayreuth inspizierte, wusste er, dass die Verbrennung eine Reaktion mit Sauerstoff (*Oxygène*) ist und damit die Metallerzeugung aus oxidischen Erzen das Gegenteil, die Abgabe (Reduktion) von Sauerstoff bedeutet. Diesen Sauerstoff nimmt aufgrund seiner stärkeren Bindung an ihn der Kohlenstoff bei hohen Temperaturen auf. Humboldt war aber noch von der Existenz eines Wärmestoffs, s. a. Abschnitt 3.3., überzeugt. In seinem Bericht informierte er von Heinitz und Carl August Freiherr von Hardenberg (1750–1822) in 18 Punkten zu speziellen Vorgängen und zu einer aus seiner Sicht sinnvollen Gestaltung des Hochofenprozesses. Hier einige Auszüge:

6) Fast in allen Eisen-Erzen [...] ist die Basis der dephlogistisierten Luft (*Oxygène*) gegenwärtig. Die Verbindung des [...] reinen Eisens mit derselben nennen wir Eisenkalk, [...]

7) Ein Stoff wie die Kohle, zu dem die Basis der dephlogistisierten Luft mehr Verwandtschaft als zum Eisen hat, entzieht ihm dieselbe [...] und reduziert es. Ein Teil der Kohle, mit der dephlogistisierten Luft aus dem Eisenkalke verbunden, bildet während dieses Prozesses [...] Kohlensäure-Luft [hier genauer: Kohlenmonoxid].

12) Da der Eisenkalk bei seinem Durchgange durch den Ofenschacht allmählich seines *Oxygènes* beraubt und zur vollkommenen Reduktion (Entkalkung) vorbereitet wird, so ist es ungemein wichtig, den Punkt, wo die Reduktion vorgehen soll, zu bestimmen. Darauf bezieht sich die Zustellung, der innere Bau des Schachtes, das Schlagen des Rostes und vornehmlich, das Ansteigen der Form. (Humboldt 1959, S. 215–216)

Des Weiteren bemerkte Humboldt, dass die Erze keine reinen Oxide sind. Sie enthalten mehr oder weniger Gangart, d. h. unter Tage nicht ausgesondertes taubes Gestein, sog. Berge. Auch die Kohle ist nicht ohne anorganische Bestandteile verfügbar. Das kann, neben Tonen und Sanden, z. B. auch Salz sein. Bei feiner Körnung der Feststoffe und guter Vermischung derselben führt das bereits ab etwa 800 °C zu einer ersten Schmelzphase, siehe nochmals Abschnitt 3.6. Auch für Humboldt folgte aus diesen Tatsachen, dass die Kohle bereits von sich aus – unkontrolliert – Flussmittel in den Hochofen einbringt. Außerdem enthalten die Eisenerze zum Beispiel Aluminium- und Siliziumverbindungen, die mit dem als Flussmittel gezielt zugegebenen

Kalk ein niedriger schmelzendes, ternäres Eutektikum ergeben. Alexander von Humboldt fuhr in seinem Bericht fort:

13) Die Kohle wirkt als eingemischter Körper, nicht bloß zur Entziehung des Oxygène, sondern auch durch ihren alkalischen Bestandteil zur Leichtflüssigkeit der Erze. [...]

14) Kalk wirkt auf die Leichtflüssigkeit nicht für sich, sondern indem er Tonerde bei den meisten Eisenerzen antrifft, [...]. (Humboldt 1959, S. 216)

Ohne auch nur die geringste Vorstellung zu Mehrstoffsystemen und eutektischen Schmelzen haben zu können, interpretierte der gerade erst von der Bergakademie kommende Beamte des Berliner Bergbau- und Hüttendepartements auf der Basis der in Freiberg vermittelten Kenntnisse bereits ihre Wirkung sachlich richtig und machte seine Vorgesetzten auf diesen Effekt aufmerksam, um ihn gezielt zu nutzen.

Und auch hier ging es um möglichst viele Berührungspunkte zwischen den miteinander reagierenden festen Bestandteilen Eisenerz und Kohle:

15) Mängel, welche bei dem Schmelzprozeß in hohen Ofen unausbleiblich sind, scheinen: [...] b) daß die Eisenerze nach den Gesetzen der spezifischen Schwere in der Mitte, die Kohlen, ziemlich für sich, an den Seiten des Ofenschachtes durchgehen und nicht Berührungspunkte genug mit den Erzen haben, [...]. (Humboldt 1959, S. 216)

Das Problem der Entmischungen ist auch heute noch in Rohstoff- und Gemengebunkern gefürchtet.

Im Hochofen wird Roheisen erzeugt. Der Prozess führt zu einem so hohen Kohlenstoffanteil (größer 1,7%) im Eisen, dass es sich nicht schmieden lässt. Durch eine vorsichtige Oxidation in heißen Flammen, die etwas Luft und damit Sauerstoff im Überschuss enthalten, und Zugabe geringer Mengen von oxidischem Erz oder Schrott versucht man, den Kohlenstoffanteil im Eisen auf das für Stahl angestrebte Niveau zu senken. Heute spricht man vom diffizilen Siemens-Martin-Verfahren, früher wurde „gefrischt“ (Holleman, Wiberg 1960, S. 530). Dabei entstand Frischeisen, das häufig nun wieder zu wenig Kohlenstoff (kleiner 0,5%) enthielt.

Darum erläuterte Humboldt, wie man mit damaligen Möglichkeiten ohne großen Aufwand, also mit geringen Kosten, aus dem stark kohlenstoffhaltigen Roheisen und dem nahezu kohlenstofffreien Frischeisen einen Stahl mit dazwischen liegendem Kohlenstoffgehalt lediglich durch Zusammenschmelzen beider Substanzen im richtigen Verhältnis erhalten konnte. Er legte die allgemein gültige Mischungsregel zugrunde:

18) Roheisen und Frischeisen gemengt geben, ohne Zusatz, Stahl, denn der Kohlenstoff, der dem Frischeisen ganz fehlt und dessen Übermaß im Roheisen dasselbe von Stahl unterscheidet, verteilt sich durchs ganze Volumen und bringt das im Stahl vorhandene Verhältnis hervor. (Humboldt 1959, S. 216)

### 3.10 Vorschläge Alexander von Humboldts zur möglichst vollständigen Nutzung der durch Verbrennung von Holz freiwerdenden Wärme beim Sieden von Salpeter

Beim Sieden von Salpeter (Kaliumnitrat, wichtig für Schießpulver) hat man das Ziel, nach verschiedenen chemischen Reaktionen und Reinigungsprozessen das Wasser aus der Lösung zu verdampfen, um anschließend das feinkristalline Material abzuscheiden. Die notwendigen Siedetemperaturen liegen um 100 °C, unterscheiden sich also signifikant von denen der Erzverhüttung und Glasschmelze.

Man verwendete zum Beheizen der Siedepfannen meist Holz. Aber Holz war knapp, und Humboldt unterbreitete immer wieder Vorschläge, wie man es sparsam einsetzen konnte. Dabei wendete er Erkenntnisse zur *allseitigen* Ausbreitung der Wärme von einer Feuerstelle/Wärmequelle her, zum Wärmeübergang an Grenzflächen zwischen Lösungen und festen Wandungen sowie zur Wärmeleitung in Medien an. Die hier von ihm genutzten Zusammenhänge gelten unabhängig davon, ob man – wie Ende des 18. Jahrhunderts – Wärme als Stoff oder – was sie tatsächlich ist – als Energie betrachtete. Von den vielen möglichen Beispielen, die Humboldt immer wieder erläuterte, wird hier auf seine Vorschläge zur Positionierung des Ortes der Verbrennung (Ofen) *in* der Salpetersiedepfanne und zur Leitung der Verbrennungsgase in schlangenförmigen Rohren *durch* die Flüssigkeit verwiesen – beides, um die Wärme aus der Verbrennung des Holzes maximal in die Salpeterlösung zu übertragen. Humboldt ging richtigerweise davon aus, dass

- man nur dann die Wärme verlustfrei in ein Medium eintragen kann, wenn man sie *in* ihm freisetzt, d. h. *nicht* von einem Rost her von außen, wo Kontakt mit der kalten Umgebungsluft besteht, in eine Siedepfanne führt, und
- man die Grenzfläche für die Wärmeübertragung in die Flüssigkeit durch Führung der heißen Verbrennungsgase in Rohrschlangen möglichst groß gestalten sollte. Weiterhin
- bewirkt eine konzentrische Wärmefreisetzung in der Siedepfanne eine gleichmäßigere Temperaturverteilung in ihr, die für die Kristallisation des Salpeters bei gleichzeitiger Verdampfung des Wassers von Bedeutung ist.

Am 15. Oktober 1797 informierte Humboldt seinen ehemaligen Dienstherrn von Heinitz in einem Brief aus Wien, dass er gerade seine Überlegungen bei der Wiener Salpeter-Gesellschaft umgesetzt gefunden habe (Humboldt 1797). Der Brief wurde in (Hülseberg 2019) transkribiert und kommentiert. Hier folgt nur ein kurzes Zitat daraus:

Die Grundsätze der neuen Coktur waren mir keineswegs neu. E[ure] Excellenz werden sich gnädigst erinnern, daß ich gegen Sie u[nd] den H[errn] Pr[äsidenten] v. Stein mehrmals geäußert, wie ich die höchste Benetzung von Wärmestoff darinn suchen würde daß ich 1. die Quelle der Wärme mitten in die Pfanne verlegte [...] u[nd] 3. daß ich die Wärme der aufsteigenden Dämpfe, die nach meinen Versuchen 74–75 °R betragen, bremste. (Humboldt 1797, Bl. 40v)

Unter „aufsteigenden Dämpfe[n]“ verstand der Briefschreiber die die Siedeanlage verlassende, mit Wasserdampf gesättigte Luft über der Pfanne. „74–75 °R“ entsprechen 92,50–93,75 °C. Einen Vorschlag für die Führung der Verbrennungsgase in gebogenen Metallröhren F zeigt Fig. 2 auf den von Humboldt dem Brief beigelegten Skizzen (Humboldt 1797, Bl. 42r).

Da sich die heißeste Stelle der in Wien genutzten Pfannen in deren Zentrum befand und die Temperatur in Richtung Wand abfällt, konnten außerdem billigere Holzpfannen genutzt werden. Dazu informierte Humboldt:

Die Konstruktion der neuen hölzernen Pfannen ist unendlich einfach u[nd] wird selbst hier mannichfaltig abgeändert. Es kommt alles auf die gute aber gemeine Botticherarbeit an, u[nd] da das *factum*, daß solche Gefäße halten, fest steht, so werden E[ure] Excellenz durch die vortreflichen Techniker[,] die in den verschiedenen Provinzen angestellt sind, leicht noch vorteilhaftere ersinnen lassen können. (Humboldt 1797, Bl. 46v)

#### 4 Zur Einschätzung der Kreditwürdigkeit des Blaufarbenunternehmers Pensel durch Humboldt

Als etwas anders gelagertes Beispiel und damit in einem gesonderten Abschnitt wird gezeigt, wie der Kameralist Alexander von Humboldt als ein wichtiges Kriterium für die Kreditwürdigkeit eines Unternehmers nicht nur dessen ökonomische Basis, sondern vor allem seine technischen Kenntnisse und Fähigkeiten heranzog.

Als Humboldt im Sommer 1792 das Fürstentum Bayreuth besuchte, existierte in Schauberg in Oberfranken ein Smalte- oder Blaufarbenwerk, das aufgrund zu teurer Kobaltrohstoffe aus dem „Ausland“, schlechter technischer Anlagen und auch fachlicher Unfähigkeit des Besitzers stillstand. Smalte ist ein pulverisiertes Kaliumsilikatglas, das durch Kobaltoxid seine kornblumenblaue Farbe erhält. Smalte war ein wichtiger Hilfsstoff z. B. zum Bleichen von Papier und Tuchen, so dass der preußische König großes Interesse an der Wiederaufnahme der Produktion in Schauberg besaß. Er hatte bereits an Christoph Samuel Pensel (geb. um 1742, auch der „alte“ Pensel genannt) einen Kredit ausgereicht, den dieser jedoch nicht zielführend einsetzte.

Um das Problem der Kobalterze zu lösen, kümmerte sich der Oberbergmeister von Humboldt in spektakulären Aktionen (siehe Hülsenberg, Schwarz 2016, Abschnitt 4. 5. 3.) um die Wiederaufnahme der Förderung von Erdkobalt und Glanzkobalt aus der Königszeche im Roten Berg bei Kaulsdorf. Das Gebiet lag im Nordwestzipfel des Fürstentums Bayreuth und gehörte damit seit 1791 zu Preußen. Das erlaubte es prinzipiell, die Kobaltrohstoffe billiger als in der Vergangenheit zu beziehen. Humboldt hatte auch durchgesetzt, dass der „alte“ Pensel billiges Bauholz zum Wiederaufbau der Glashütte beziehen konnte (Hein, Arnold, Zürl 1992, S. 396) und bat weiterhin um die *iura cessa* (speziell eingeräumte Rechte) für den Besitzer.

Aber erst als Johann Theodor Friedrich Pensel (der „junge“ Pensel) das Unternehmen übernahm, änderte sich die technische Situation erfolgsversprechend. Der König bewilligte weitere 500 F (Franken) Vorschuss (Hein, Arnold, Zürl 1992, S. 396), um das Hüttengebäude zunächst erst einmal notdürftig vor dem Verfall zu retten.

Um zu verstehen, warum Alexander von Humboldt seine kameralistischen Abschätzungen für die Ausreichung weiterer Kredite sehr großzügig handhabte, ist es wichtig, seine positive Grundhaltung zu den Fähigkeiten des jungen Unternehmers in die Überlegungen einzubeziehen. Er formulierte in seinem *Generalbefahrungsberichte*:

[...] ich bin überzeugt, da die technische Kenntniß des *entrepreneurs* der wichtigste Punkt bei einer Anlage ist, welche der Landesherr unterstützen kann, [...dass] der junge *Pensel*

das Blaufarbenwerk ohne Zubeuße [spätere finanzielle staatliche Unterstützung] betreiben [wird ...]. (Humboldt 1795, Bl. 67v)

Der Berichterstatter schloss dann, untersetzt durch Abschätzungen, an, warum er die Ausreichung eines weiteren Kredits durch den König befürwortete. Da man an diesem Beispiel gut nachvollziehen kann, was Alexander von Humboldt in Hamburg bei Büsch bezüglich der Kriterien zur Kreditvergabe gelernt hatte, folgt hier zum Abschluss ein ausführliches Zitat:

Das Blaufarbenwerk ist (freilich etwas niedrig) zu 4006 F taxirt, da aber noch einige Posten von 1100 F abgehen, so bleibt *taxations* Werth 2906 F. Dagegen beträgt die Kön. Schuld 9036 F  $7\frac{5}{8}$  x. Die *illata* [Mitgift] der Hofreithe [Anwesen] *Pensel* sind laut ihren von Kön[iglicher] Regierung 1763 bestätigten Ehepakten zu 9653 F gesichert. Gehen demnach diese *illata* und die Kön[igliche] Schuld ab, so bleibt für die andern *Creditoren*, welche 18 000 F zu fordern haben, = 0 übrig. Diese haben daher schon in einem bei der L[andes] H[aupmannschaft] *Hof* abgehaltenen *Termin* vorläufige Hofnung gegeben, sich mit 10 p. C. zu begnügen. Da nun ohnedies diese Schulden noch durch Behandeln gemäßigt sind, so kann das *Creditwesen* mit 8–900 F abgethan sein. Um das Blaufarbenwerk so herzurichten, daß gearbeitet werden kann, sind an 1000 F erforderlich. 400 Th hat der junge *Pensel* noch bar und 500 F sind ihm aus der Kön[iglichen] *Casse* verheißen, also könnte der vorläufige Bau auch vollendet werden. Erhält der *Pensel* die *iura cessa* selbst, so kann er auf Lehns = *Consens* ohne Gefahr ein [etwa] 1500 F aufnehmen und sieht sich im Stande, Kobalte und Holz zugleich zu bezahlen. So bald sein Haushalt zu übersehen ist, ist keine Gefahr, sich mit ihm einzulassen. Aber eine Rechnung muß erstellt sein. (Humboldt 1795, Bl. 68r–v)

Alexander von Humboldt rechnete zunächst den Kredit, den der „alte“ *Pensel* in Höhe von 9036 F erhalten hatte, gegen den Wert des Hüttengrundstücks („*Hofreithe*“), so dass er aus den weiteren Betrachtungen herausfiel. Sehr großzügig ging er mit dem früher vorgeschossenen Geld der anderen Kreditgeber um. 18 000 F reduzierte er auf 900 F. Die Kreditgeber seien schon einverstanden, nur 10 % (also 1800 F) zurückzuerhalten, was auch noch auf 900 F verhandelbar wäre.

Viel wichtiger war es dem Gutachter, dass der „junge“ *Pensel* genug Geld haben würde, um das Unternehmen wieder zum Laufen zu bringen. 500 F hatte der König – wie schon erwähnt – als neuen Kredit zugesagt, und 400 Th (Humboldt wechselte die Währung!) besaß er selbst noch, um die Hütte baulich zu sichern. Weiterhin schätzte Humboldt ein, dass *Pensel* außerdem etwa 1500 F benötigen würde, um im Roten Berg abgebaute Kobalterze und Holz für das Betreiben der Glasschmelzöfen zu kaufen. Der Gutachter schlug vor, dass der König diesen Kredit ausreicht.

Als eine weitere Sicherung erwähnte Humboldt noch, dass der „junge“ *Pensel* ein so guter Fachmann sei, dass er auch andere Farben, wie Braunschweiger Grün und Mineralgelb, herstellen könne, falls die Smalte nicht gelingen sollte (Humboldt 1795, Bl. 68v). „Aber eine Rechnung muss erstellt sein.“, s. o. Dass das Blaufarbenwerk in Schauberg wieder in Betrieb gehen konnte, war also auch das Verdienst Alexander von Humboldts.

## 5 Fazit

In seinen jungen Jahren als Bergbeamter war Alexander von Humboldt durch seine dienstlichen Verpflichtungen gezwungen, sich mit handfesten praktischen Problemen auseinanderzusetzen. Das Ziel bestand in der Herstellung verkaufsfähiger Produkte, deren Erlöse in die Hände einzelner Personen und – über Steuern – in das „Staatssäckel“ flossen. Zu schöngestigen Betrachtungen über die Verfahrensabläufe bestand in der Regel weder Veranlassung noch Zeit. Stattdessen ging es um die sichere Beherrschung von Technologien, um hervorragende ökonomische Ergebnisse in den Betrieben und um die Effizienzsteigerung des staatlichen Handelns generell.

Es gelang Humboldt hervorragend, die Wechselwirkung zwischen einer besser beherrschten Technologie und den ökonomischen Ergebnissen aufzuzeigen. Die in Abschnitt 4 besprochene Befürwortung der Ausreichung eines königlichen Kredits für den Blaufarbenproduzenten Pensel lässt das besonders gut erkennen. Damit befand sich Alexander von Humboldt im Trend der sich Ende des 18. Jahrhunderts gerade herausbildenden Industrienationen. Der Bergbau und die Rohstoffverarbeitung, für die der junge Humboldt in Preußen tätig war, spielten dabei eine zentrale Rolle. Das bedeutete für den Bergbeamten die Anwendung gezielt erworbener naturwissenschaftlicher Kenntnisse auf technische Vorgänge, den wohlüberlegten Einsatz von Rohstoffen und Energie (meist Holz) in Produktionsprozessen sowie die Beachtung kameralistischer Regeln und Gesetzmäßigkeiten in der Kosten-Nutzen-Abschätzung. Durch eine umfassende Analyse und zahlreiche Vorschläge zur wissenschaftlich begründeten Gestaltung der Rohstoffverarbeitung leistete Alexander von Humboldt einen wichtigen Beitrag zur Herausbildung des ökologischen Denkens und Handelns.

## 6 Literatur- und Quellenverzeichnis

Bayerl, Günter (2009): *Johann Beckmann (1739–1811)*. In: *Technikgeschichte*, Bd. 76, H. 4, S. 305–310.

Beckmann, Johann (1777): *Anleitung zur Technologie, oder zur Kentniß der Handwerke, Fabriken und Manufacturen, vornehmlich derer, die mit der Landwirthschaft, Polizey und Cameralwissenschaft in nächster Verbindung stehn*. Im Verlag der Wittve Vandenhoeck, Göttingen, <https://www.digitale-sammlungen.de/en/view/bsb10304372?page=6,7>, (zuletzt aufgerufen am 19.08.2021).

Born, Ignaz von (1786): *Ueber das Anquicken der gold- und silberhältigen Erze, Rohsteine, Schwarzkupfer und Hüttenspeise*. Wappler, Wien, <https://www.digital.wienbibliothek.at/wbrobv/content/pageview/2951230>, (zuletzt aufgerufen am 24.08.2021).

Borowski, Georg Heinrich (1795): *Abriß des praktischen Cameral- und Finanzwesens nach den Grundsätzen, Landesverfassungen und Landesgesetzen in den Königlich-Preußischen Staaten, oder Preußische Cameral- und Finanzpraxis*. Pauli, Berlin, [https://books.google.de/books?id=\\_wv-NxA6-cC&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=_wv-NxA6-cC&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false), (zuletzt aufgerufen am 25.08.2021).

Büsch, Johann Georg (1780): *Abhandlung von dem Geldumlauf in anhaltender Rücksicht auf die Staatswirtschaft und Handlung*. Erster und zweiter Teil (1780), dritter Teil (1784), Carl Ernst Bohn, Hamburg und Kiel, [https://books.google.de/books?id=Jmh9OgdYFdAC&pg=PP9&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=Jmh9OgdYFdAC&pg=PP9&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), (zuletzt aufgerufen am 25.08.2021).

Carus, Julius Victor (1876): *Borowski, Georg Heinrich*. In: *Allgemeine Deutsche Biographie* (ADB). Bd. 3. Duncker & Humblot, Leipzig, <https://www.deutsche-biographie.de/sfz5353.html#adbcontent>, (zuletzt aufgerufen am 03.01.2022).

- Darjes, Joachim Georg (1756): *Erste Gründe der Cameral-Wissenschaften, darinnen die Haupt-Theile so wohl der Oeconomie als auch der Policity und besondern Cameral-Wissenschaft in ihrer natürlichen Verknüpfung zum Gebrauch seiner academischen Fürlesung entworfen v. Joachim Georg Darjes*. verlegt Johann Adam Melchior Wittwe, Jena, Nachdruck: Scientia-Verlag Aalen 1969, [https://www.deutschestextarchiv.de/book/view/darjes\\_cameralwissenschaften\\_1756?p=5](https://www.deutschestextarchiv.de/book/view/darjes_cameralwissenschaften_1756?p=5), (zuletzt aufgerufen am 21.08.2021).
- Ette, Ottmar (Hrsg.) (2018): *Alexander von Humboldt – Handbuch. Leben – Werk – Wirkung*. J. B. Metzler Verlag, Stuttgart.
- Gellert, Christlieb Ehregott (1750): *Anfangsgründe zur Metallurgischen Chimie. In einem theoretischen und practischen Theile nach einer in der Natur gegründeten Ordnung*. Johann Wendler, Leipzig, [https://books.google.de/books?id=Ja1QAAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=Ja1QAAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false), (zuletzt aufgerufen am 28.08.2021).
- Geuns, Steven Jan van (2007): *Tagebuch einer Reise mit Alexander von Humboldt durch Hessen, die Pfalz, längs des Rheins und durch Westfalen im Herbst 1789*. Hrsg. von Bernd Kölbl und Lucie Terken. Akademie-Verlag, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 26).
- Grimsehl, Ernst (1962): *Lehrbuch der Physik, Erster Band: Mechanik – Wärmelehre – Akustik*. 18. Aufl., hrsg. von W. Schallreuter, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- Hein, Wolfgang-Hagen; Arnold, Eberhard; Zürl, Fritz (1992): *Alexander von Humboldts Generalbefahrungsberichte der fränkischen Gruben im Jahre 1795. Teil I: Bericht über das Nailaer Bergamts-Revier*. Historischer Verein für Oberfranken, Sonderdruck aus „Archiv für Geschichte von Oberfranken“, Bd. 72, Bayreuth.
- Hein, Wolfgang-Hagen; Arnold, Eberhard; Zürl, Fritz (1993): *Alexander von Humboldts Generalbefahrungsberichte der fränkischen Gruben im Jahre 1795. Teil II: Bericht über das Wunsiedler und das Goldkronacher Bergamts-Revier*. Historischer Verein für Oberfranken. Sonderdruck aus „Archiv für Geschichte von Oberfranken“, Bd. 73, Bayreuth.
- Hempel, Dirk (2001): *Büsch, Johann Georg*. In: *Hamburgische Biografie. Personenlexikon*. Wallstein, Göttingen.
- Hinz, Wilhelm (1963): *Silikate – Einführung in Theorie und Praxis*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Holleman, Arnold; Frederik; Wiberg, Egon (1960): *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 47. bis 56. sorgfältig durchgesehene, verbesserte und erweiterte Aufl., Berlin.
- Hülseberg, Dagmar (2019): *Information Alexander von Humboldts zum Sieden von Salpeter im Jahr 1797 in Wien*. In: *Abhandlungen der Humboldt-Gesellschaft für Wissenschaft, Kunst und Bildung e. V.*, Bd. 42, TZ-Verlag, Roßdorf, S. 183–203.
- Hülseberg, Dagmar (2021): *„Da ich bestimmt bin, meinem Vaterland im Fabrikfache zu dienen [...]“ – Alexander von Humboldt an J. F. Pfaff, Göttingen, d. 11.05.1789*. In: *Abhandlungen der Humboldt-Gesellschaft für Wissenschaft, Kunst und Bildung e. V.*, Bd. 44, TZ-Verlag, Roßdorf, S. 255–287.
- Hülseberg, Dagmar; Schwarz, Ingo (Hrsg.) (2012): *Alexander von Humboldt – Gutachten zur Steingutfertigung in Rheinsberg 1792*. Unter Mitarbeit von Eberhard Knobloch und Romy Werther. Akademie Verlag, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 35).
- Hülseberg, Dagmar; Schwarz, Ingo (Hrsg.) (2014): *Alexander von Humboldt – Gutachten und Briefe zur Porzellanherstellung 1792–1795*. Mit einer Studie von Dagmar Hülseberg. De Gruyter Akademie Forschung, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 42).
- Hülseberg, Dagmar; Schwarz, Ingo (Hrsg.) (2016): *Alexander von Humboldt – Gutachten und Briefwechsel zur Glasherstellung 1792–1797*. Mit einer Studie von Dagmar Hülseberg. De Gruyter Akademie Forschung, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 45).

- Hülseberg, Dagmar; Schwarz, Ingo (Hrsg.) (2020): *Alexander von Humboldt – Gutachten zur Salzgewinnung 1789–1794*. Mit einer Studie von Dagmar Hülseberg. De Gruyter Akademie Forschung, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 48).
- Humboldt, Alexander von (1792a): *Versuch über einige physikalische und chemische Grundsätze der Salzwerkskunde*. In: *Bergmännisches Journal*, 5, Bd. 1, S. 1–46 und S. 98–141, [https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/humboldt\\_salzwerkskunde\\_1792](https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/humboldt_salzwerkskunde_1792) (zuletzt aufgerufen am 22.08.2021). Wiederabdruck in: *Alexander von Humboldt, Sämtliche Schriften.*, Hrsg. von Oliver Lubrich und Thomas Nehrlich, München 2019, Bd. 1, S. 91–130.
- Humboldt, Alexander von (1792b): *Der B[erg]-A[ssessor] v. Humboldt berichtet über den gegenwärtigen technischen Betrieb der Steingutfabrik zu Rheinsberg*. Stiftung Stadtmuseum Berlin, Archiv, Reg.-Nr. IV 74/804Q, Bl. 4–19.
- Humboldt, Alexander von (1792c): *Bericht. Über den Zustand des Bergbaus und Hütten-Wesens in den Fürstenthümern Bayreuth und Ansbach nebst Beylagen über die Saline zu Gerabronn und Schwäbischhall, die Porzellan Fabrike zu Bruckberg, das Vitriolwerk am Schwefelloch, die Natur des Eisens, der Schmalte und die Entstehung der Schwefel-Säure bey der Alaun- und Vitriol-Fabrication (vom 12. Juli bis 5. August 1792). Eingereicht von dem Ober-Bergmeister A. v. Humboldt mittelst Bericht vom 17. April 1793*. Berlin GStA PK, I. HA, Rep. 121, Ministerium für Handel und Gewerbe, Berg-, Hütten- und Salinenverwaltung, Nr. 6970.
- Humboldt, Alexander von (1795): *Generalbefahrungsberichte der fränkischen Gruben im Jahre 1795*. Bamberg, Staatsarchiv. Rep. C 9, VI, Bd. 9/10, Nr. 17167 Naila.
- Humboldt, Alexander von (1797): *Über eine neue Siedemethode der Salpeter-Gesellschaft zu Wien*. Bericht an Friedrich Anton Freiherr von Heinitz vom 15. Oktober 1797. Berlin. GStA PK. I. HA, Rep. 121, Ministerium für Handel und Gewerbe, Berg-, Hütten- und Salinenverwaltung. Nr. 8149, Bl. 40r–42r und 46r–v.
- Humboldt, Alexander von (1959): *Über den Zustand des Bergbaus und Hüttenwesens in den Fürstentümern Bayreuth und Ansbach im Jahre 1792*. Eingeleitet und bearbeitet von Herbert Kühnert in Verbindung mit O[scar Walter] Oelsner. Akademie-Verlag, Berlin (Freiberger Forschungshefte D 23).
- Humboldt, Alexander von (1973): *Die Jugendbriefe Alexander von Humboldts 1787–1799*. Hrsg. von Ilse Jahn und Fritz G[ustav] Lange. Akademie-Verlag, Berlin (Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung, Bd. 2).
- Karsten, C[arl] J[ohann] B[ernhard] (1846): *Lehrbuch der Salinenkunde. Über das Vorkommen und die Gewinnung des Kochsalzes auf der Erde*. Bd. 1. G[eorg] Reimer, Berlin, [https://books.google.de/books?id=z409AAAAYAAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=z409AAAAYAAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false), (zuletzt aufgerufen am 22.08.2021).
- Klein, Ursula (2015): *Humboldts Preußen. Wissenschaft und Technik im Aufbruch*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Lauterbach, Werner (1994): *Bergrat Christlieb Ehregott Gellert*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig und Stuttgart (Freiberger Forschungshefte D 200).
- Lockemann, Georg (1984): *Scheele*. In: *Das Buch der großen Chemiker*, Bd. 1. Hrsg. von Günther Bugge, Verlag Chemie, Weinheim (1. Auflage 1929), S. 274–290.
- Pauling, Linus (1988): *General Chemistry*. Dover Publications, New York.
- Proust, Joseph Louis (1799): *Recherches sur le cuivre*. In: *Annales de chimie* 32 (1799), S. 26–54. [https://books.google.de/books?id=ZBki5255ZXgC&pg=PA30&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=ZBki5255ZXgC&pg=PA30&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false), (zuletzt aufgerufen am 03.01.2022).

- Richter, Arthur (1876): *Darjes, Joachim Georg*. In: *Allgemeine Deutsche Biographie* (ADB). Bd. 4. Duncker & Humblot, Leipzig, [https://www.deutsche-biographie.de/sfz\\_23219.html#adbcontent](https://www.deutsche-biographie.de/sfz_23219.html#adbcontent), (zuletzt aufgerufen am 03.01.2022).
- Schwarz, Ingo (Hrsg.) (2019): *Alexander von Humboldt – Chronologie*. In: *edition Humboldt digital*. Hrsg. von Ottmar Ette. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin. Version 5 vom 11.09.2019, <http://edition-humboldt.de/v5/H0000002>.
- Shiltsev, Vladimir (2012): *Mikhail Lomonosov and the dawn of Russian science*. *Physics Today*, Bd. 65, Februar 2012, S. 40–46.
- Stottmeister, Ulrich (2019): *Der junge Alexander von Humboldt und die Technologie – Die brandenburgischen Exkursionen 1788*. In: *Abhandlungen der Humboldt-Gesellschaft für Wissenschaft, Kunst und Bildung e. V.*, Bd. 42, TZ-Verlag Roßdorf, S. 147–182.
- Szabadváry, Ferenc (1987): *Antoine-Laurent Lavoisier. Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner*, Bd. 84. Teubner, Leipzig.