

Lavoisier und die Anfänge der Agrikulturchemie

Prof. Dr. Klaus Dieter Schwenke, Klaus-Groth-Str.1, 14513 Teltow

Die landwirtschaftliche Chemie hatte eine lange Vorgeschichte, bevor sie als Agrikulturchemie den Charakter einer wissenschaftlichen Disziplin erhielt.¹ Ihre Geschichte ist dabei eng mit der Entwicklung der Chemie verknüpft, die selbst erst zur Wissenschaft werden musste. Dazu hat Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) mit seinem System der antiphlogistischen Chemie entscheidend beigetragen,² indem er eine pragmatische Definition der Elemente zur Grundlage einer neuen chemischen Nomenklatur machte und mit der ‚Bilanzmethode‘ neue Wege in der Quantifizierung chemischer Reaktionen beschritt.³ In der Historiographie wird Lavoisier nicht nur als Initiator der ‚chemischen Revolution‘ apostrophiert, sondern auch zu den Vätern der Agrikulturchemie gezählt.⁴ Mit der ‚neuen Chemie‘ als Fundament konnte sich die Agrikulturchemie im 19. Jahrhundert herausbilden. Die Zeitspanne, in der das geschah, lässt sich durch die Namen zweier bedeutender Chemiker markieren: Davy und Liebig. Einen der wissenschaftlichen Höhepunkte in dieser Entwicklung bedeuten die Arbeiten von Carl Sprengel, der als Landwirt und Chemiker den praktischen Erfordernissen des Feldbaues kritisch und ideenreich durch sinnvolle Anwendung chemischen Denkens und chemischer Analytik entsprach.

Lavoisiers Beiträge zu Agrikulturchemie und Tierphysiologie

Im Jahre 1769 übernahm Lavoisier das Amt eines Generalsteuerpächters, das ihn zu regelmäßigen Inspektionen der französischen Provinzen verpflichtete und ihn mit der ökonomischen Situation der französischen Landwirtschaft vertraut machte. Seine Tätigkeit als praktizierender Landwirt begann im Jahre 1778 mit dem Erwerb eines eigenen Landgutes. Durch Zukauf weiterer Ländereien stand ihm bald eine Fläche von mehr als 1500ha für seine agronomischen Experimente zur Verfügung.⁵ Bald erkannte er, dass zwischen der Mangelernährung des Nutztviehs und der schlechten Ertragsfähigkeit des Bodens, dem der natürliche Dünger fehlte, ein Zusammenhang bestand. In einem mehrjährigen Versuch konnte er diesen Missstand abstellen, indem er mit dem Anbau von Futterpflanzen (Legu-

minos) eine Grundlage der Tiernahrung und mit der Erhöhung des Viehbestandes die Voraussetzung für die Düngerproduktion schuf.⁶ Als Mitglied des Comité d'Administration de l'Agriculture (1785-1787) galt sein Interesse an der Agronomie in besonderem Maße ihrem ökonomischen Stellenwert in Frankreich, wie bereits der Titel seiner Arbeit „Erggebnisse einiger landwirtschaftlicher Versuche und Reflektionen über ihre Beziehung zur politischen Ökonomie“ verrät.⁷ Diesen Bericht verband er mit einer scharfen Kritik an dem höchst unökonomischen System der französischen Landwirtschaft. Lavoisiers Vorhaben, seine gesammelten praktischen Erfahrungen als experimentierender Landwirt in einem zusammenfassenden Werk zu publizieren, wurde durch das Revolutionstribunal, das ihn 1794 als Sekretär der Generalsteuerpächter hinrichten ließ, zunichte gemacht.

Es war die Aufklärung der Natur des Verbrennungsprozesses,⁸ nach Entdeckung des Sauerstoffs⁹ als ein Kernstück seines ‚Systems‘, die Lavoisier über die reine Chemie hinaus zur Tierphysiologie führte. Dazu erbrachte er in einer gem einsamen Arbeit mit Seguin,¹⁰ der die Methodik der Gasanalyse verbessert hatte, den Beweis, dass die tierische Atmung als eine langsame Verbrennung anzusehen ist.¹¹ Demnach ist es in beiden Fällen die atmosphärische Luft, die den Sauerstoff und die Wärme liefert; bei der Atmung ist es die eigene Substanz des Tieres, d.h. das Blut, die den brennbaren Stoff zur Verfügung stellt. Ähnlich einer Lampe, die ständig mit Öl versorgt werden müsse, um zu brennen, so müsse dem Tier kontinuierlich brennbarer Stoff in Form von Kohlenstoff und Wasserstoff durch die Nahrung zugeführt werden, anderenfalls erlösche sein Leben wie eine Lampe ohne Öl. Während des Verdauungsprozesses ebenso wie bei körperlicher Bewegung sei die Atmung des Tieres beschleunigt, es nehme eine größere Menge Sauerstoff auf als im Ruhezustand.¹²

Lavoisier betrachtete den tierischen Organismus als chemische Maschine, in der drei Regulationsmechanismen wirken, die Atmung, die Transpiration und die Verdauung.¹³

Die Respiration bewirkt eine für die Aufrechterhaltung der Körperwärme des Tieres absolut nötige Freisetzung von Wärme, indem sie in der Lunge und wahrscheinlich auch in anderen Körperteilen eine langsame Verbrennung eines Teils des im Blut enthaltenden Wasserstoffs und Kohlenstoffs verursacht. – Die Transpiration führt zum Verlust transpirierbarer Körperflüssigkeit und erleichtert so die Abgabe einer bestimmten, für die Auflösung derselben in der umgebenden Luft benötigten Wärmemenge; sie verhindert folglich durch kontinuierliche Abkühlung, die dieser Verlust bewirkt, dass das Individuum eine höhere Temperatur annimmt als die von der Natur festgelegte. – Die Verdauung gibt der Maschine gewöhnlich das zurück, was sie durch Respiration und Transpiration verloren hat,

indem sie dem Blut Wasser, Wasserstoff und Kohlenstoff liefert, und stößt darauf durch Entleerung die Substanzen nach außen ab, die uns schädlich oder überflüssig sind.¹⁴

In einem postum erschienenen, abschließenden Artikel über seine Arbeiten zur Transpiration der Tiere einschließlich der Insekten zieht Lavoisier den Schluss,

dass die Fähigkeit zu atmen über das gesamte Reich der belebten Wesen verbreitet ist und es wahrscheinlich eine ununterbrochene Kette vom Insekt, das nur durch die Haut atmet, bis zu den großen Vierfüßlern und den Vögeln, die hauptsächlich durch die Lunge atmen, gibt.¹⁵

Dazu schrieb H. Sticher in einem Beitrag zur ‚chemischen Tradition‘ in der Bodenkunde im Jahre 2005:

Wenn Lavoisier heute (vor allem in Frankreich) als Vater der Agrikulturchemie bezeichnet wird, so beruht dieser Ruf aber weniger auf seiner Beschäftigung mit Böden und Pflanzen, als vielmehr auf seinen Untersuchungen zur Respiration tierischer Organismen.¹⁶

Fallen Lavoisiers im Schrifttum erwähnte Beiträge zur Pflanzenernährung und seine Untersuchungen an Dünger im Wesentlichen in das Gebiet der praktischen Landwirtschaft,¹⁷ wozu letztlich auch die Nutzung der Abfälle aus den zahlreichen, der Schießpulverherstellung dienenden Salpêtrières als Düngemittel zu zählen ist,¹⁸ so wird bei Verfolg der einschlägigen Literatur deutlich, dass die von Lavoisier initiierte Bearbeitung tier physiologischer Fragestellungen innerhalb der Agrikulturchemie des 19. Jahrhunderts explizit erst wieder durch den bedeutenden französischen Forscher Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887) aufgenommen worden ist.¹⁹

In einer frühen Untersuchung „Über die Natur des Wassers“ geht Lavoisier auf die von den Vorvätern der Agrikulturchemie vertretene Theorie über die Rolle des Wassers als wesentliche Nahrungsquelle der Pflanzen ein.²⁰ Nach einer seit Johan Baptista van Helmont (1577-1644) und Robert Boyle (1627-1691) verbreiteten, dem alchimistischen Denken verpflichteten Ansicht erfolgte das Pflanzenwachstum allein aufgrund der Transmutation des Wassers. Lavoisiers Zeitgenosse Johann Gottschalk Wallerius²¹ (1709-1785) hatte in Weiterentwicklung der Transmutationstheorie die Ansicht vertreten, dass Wasser im Zuge des Vegetationsprozesses in ‚Erden‘ transformiert würde.²² Lavoisier unterzog Wasser unterschiedlicher Herkunft einer sorgfältigen Untersuchung und mehrfachen Reinigung durch Destillation und stellte fest, dass die darin enthaltenen „erdigen“ Bestandteile, d.h. mineralischen Stoffe, von außen, z.B. aus den Glasgefäßen, in das Wasser gelangte Fremdkörper seien. In seinem Hauptwerk wies er schließlich die

„wahre Natur des Wassers“ durch dessen „Zerlegung“ sowie durch Synthese aus Wasserstoff und Sauerstoff nach, wodurch die Auffassung vom Wasser als einem „Element“ widerlegt wurde.²³

In zwei Berichten an die französische Akademie über experimentelle Arbeiten von Hassenfratz²⁴ und Séguin²⁵ zu Fragen der Pflanzenernährung äußerte sich Lavoisier zu einem Kernproblem der Agrikulturchemie, nämlich der Herkunft des pflanzlichen Kohlenstoffs,²⁶ das trotz der Untersuchungen von Priestley,²⁷ Ingen-Housz²⁸ und Senebier²⁹ zur Photosynthese wissenschaftlich noch ungeklärt schien. Dabei ging er auch auf die Auffassung des Kohlenstoffs als (echtes) Element ein, die sich nur allmählich durchzusetzen begann. In seinem Statement zur Arbeit von Séguin heißt es:

Man hat lange geglaubt, dass der Kohlenstoff, den man aus den Pflanzen, sei es durch Destillation, sei es durch unvollständige Verbrennung erhält, ein Produkt des Feuers wäre. Heute ist die Meinung allgemein verbreitet, dass der Kohlenstoff in den Pflanzen vor der Destillation oder der Verbrennung präexistiert. Die Mehrheit der Chemiker betrachtet ihn als eine einfache Substanz (*un être simple*) [als Element] zum mindesten als eine solche, die noch nicht zerlegt werden konnte. – Nehmen wir diese letzte Meinung an, müssen wir die Quelle bestimmen, aus welcher die Pflanzen den Überfluß an Kohlenstoff, den wir in ihrer Zusammensetzung finden, beziehen. – Zunächst schien es natürlich, zu vermuten, dass sie ihn aus der pflanzlichen Erde, dem Humus, dem Boden und dem Mist, in welchem sie wachsen, ziehen; diese Ansicht bereitet jedoch eine Schwierigkeit, die unlösbar scheint, da es sicher ist, dass mehrere Pflanzen in reinem Wasser und in der Luft wachsen, ohne dass eine sie umgebende Substanz ihnen den Kohlenstoff zu liefern scheint. [...] Aus den Versuchen scheint zu folgen, dass der Kohlenstoff nicht durch die Wurzeln in die Zusammensetzung der Pflanzen gelangt. Es bleibt zu bestimmen, ob diese Substanz, was wahrscheinlich ist, aus der Zersetzung der Kohlensäure stammt, die die Pflanzen umgibt.³⁰

Man könnte hier Lavoisier einen frühen Kritiker der von Wallerius und Hassenfratz vertretenen Lehre vom Bodenumus als wichtigster Quelle der Pflanzernahrung (Humustheorie) nennen. Allerdings basiert Séguins Arbeit statt auf schlüssigen experimentellen Beweisen für die Herkunft des pflanzlichen Kohlenstoffs aus dem CO₂ der Luft im Wesentlichen auf der interessanten Grundannahme, dass die Pflanze die Kohlensäure, die bei ihrer Verbrennung entsteht, während der Vegetation wieder zersetzen könne.³¹ Tatsächlich wurde die Humustheorie im 19. Jahrhundert ein lang andauernder Streitpunkt und Diskussionsgegenstand unter Landwirten, Physiologen und Chemikern.³²

Lavoisiers chemisches „System“, mit dem er der unter seinen Zeitgenossen noch fest etablierten Phlogistontheorie eine Absage erteilte,³³ wurde zu einer wichti-

gen chemischen Grundlage der sich entwickelnden Agrikulturchemie. So enthielt der 1808 erschienene *Grundriß der Chemie für Landwirthe* von Heinrich Einhof, ein erstes chemisches Vademecum der Schule Albrecht Thaers, den expliziten Hinweis „nach dem Lavoisierschen System“ erstellt.³⁴

Davy und die *Elemente der Agrikulturchemie*

Von 1802 bis 1812 hielt Sir Humphry Davy (1778-1829) vor dem britischen *Board of Agriculture* acht Vorlesungen unter dem Titel *Elements of Agricultural Chemistry*, die 1813 in Buchform erschienen und 1814 als deutsche Übersetzung vorlagen.³⁵ Davy hat damit nicht nur den Namen dieser Wissenschaftsdisziplin geprägt sondern ihre wesentlichen Bestandteile, „Elemente“, in einem ersten, ausschließlich der Agrikulturchemie gewidmeten Lehrbuch definiert. Schon 1803 gründete Sigismund Hermbstädt (1760-1833), angeregt von Davys Vorlesungen, sein *Archiv der Agrikulturchemie* als Publikationsorgan, in dem er bis 1818 einschlägige Artikel aus dem gesamten europäischen Raum publizierte und kommentierte.³⁶ Davy hat die Agrikulturchemie wie folgt definiert:

Agricultural chemistry has for its object – all those changes in the arrangements of matter connected with the growth and nourishment of plants; – the comparative value of their produce as food; – the constitution of soils; – the manner in which lands are enriched by manure, or rendered fertile by the different processes of cultivation.³⁷

Von Johann Bartholomäus Trommsdorf (1770-1837) wurde diese Definition in sein Lehrbuch über die *Anfangsgründe der Agrikulturchemie* übernommen.³⁸ Sie umfasst außer den späteren Säulen der Agrikulturchemie, nämlich Pflanzenernährung, Bodenkunde und Düngerlehre, auch die Untersuchung und Bewertung der Pflanzeninhaltsstoffe, die allmählich zu Bestandteilen eigenständiger Wissenschaftsdisziplinen wie Pflanzenbiochemie, Lebensmittelchemie und Ernährungsphysiologie werden sollten. Die Schule von Fourcroy und Vauquelin hatte an der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert Pionierarbeit auf diesem Gebiet geleistet. Einhof lieferte durch seine Untersuchungen über die Bestandteile der Ackerfrüchte wesentliche Beiträge zur Entwicklung der Chemie pflanzlicher Proteine und nahm eine erste vergleichende Bewertung des relativen Nährwertes landwirtschaftlicher Produkte auf Grund ihres Gehaltes an Kohlenhydraten und Eiweißstoffen vor.³⁹ In seiner dritten Vorlesung hat Davy diese Entwicklung zusammenfassend dargestellt.

Der Zusammensetzung des Bodens und der chemischen Analyse seiner anorganischen und organischen Bestandteile hat Davy ein umfangreiches Kapitel seines Buches gewidmet. Einhof hatte als erster eine systematisch aufgebaute Methodik der Bodenanalyse veröffentlicht.⁴⁰ Davys analytische Untersuchungen brachten nun auch ein vertieftes Verständnis der chemischen Natur der Bodenminerale in die Agrilkulturchemie. Damit erfuhr die Auffassung, nach der die ‚feuerbeständigen‘ Alkalien und Erden einfache, durch keines der bis dahin bekannten Mittel zerlegbare Stoffe seien, eine wesentliche Korrektur. Nach Darstellung der Alkalielemente Kalium und Natrium und der Erdalkalielemente Calcium, Strontium und Barium durch Schmelzflusselektrolyse, konnte Davy argumentieren, dass die zugrunde liegenden Salze und Mineralien Verbindungen eines metallartigen Elements mit Sauerstoff sind.⁴¹ Die Beschreibung der Kieselerde ergänzte er durch den Hinweis auf seine Isolierung des Siliziums: „Ich habe gezeigt, dass sie eine Zusammensetzung aus Sauerstoff und einem eigentümlichen brennbaren Körper ist, den ich Silicum genannt habe.“⁴² Davys Nachweis des Chlors als sauerstofffreies Element musste zwangsläufig am Beispiel der Salzsäure zu einer Neufassung des Säurebegriffs führen, der im Lavoisierschen System mit dem Gehalt an Sauerstoff gekoppelt war: Nicht der sauerstoffhaltige Säurerest, sondern der Wasserstoff bestimmt die Säurenatur.⁴³

Davys Untersuchungen führten ihn zur Erkenntnis von Wechselwirkungen zwischen den erdigen (mineralischen) und den animalischen und vegetabilischen Bodenbestandteilen (dem Humus). Diese beeinflussen die physikalische Struktur und damit die Wassersorption des Bodens, verhindern die rasche Zersetzung des Humus und machen – bei dem richtigen Verhältnis dieser Komponenten – letztendlich die Bodenfruchtbarkeit aus:

Außer dieser Wirksamkeit, welche man als mechanisch betrachten kann, gibt es noch eine andere zwischen dem Erdreich und der organischen Materie, welche ihrer Natur nach als chemisch betrachtet werden kann. Die Erden, sogar die kohlen-sauren erdigen Verbindungen, haben einen gewissen Grad chemischer Anziehung für mehrere Bestandteile der animalischen und vegetabilischen Substanzen. [...] Der Extrakt aus den sich zersetzenden vegetabilischen Substanzen bildet, wenn er mit Pfeifenton gekocht wird, eine chemische Zusammensetzung, durch welche die vegetabilische Substanz schwerer auflösbar und zersetzbar wird. [...] Derjenige Boden, welcher die meiste Alaunerde und kohlensaure Kalkerde enthält, ist der, welcher die größte in Erhaltung des Düngers zeigt. Ein solches Erdreich verdient ein reiches genannt zu werden; denn die vegetabilische Nahrung wird lange Zeit in einem solchen erhalten, so dass sie von den Organen der Pflanzen aufgenommen werden kann.⁴⁴

Das Phänomen der Wechselwirkung zwischen den organischen und mineralischen Komponenten des Ackerbodens hat Sprengel später wissenschaftlich weiterentwickelt in seine agrikulturchemischen Lehren eingebracht (s.u.).

Die Tatsache, dass sich in der Pflanzenasche mineralische ‚feuerfeste‘ Stoffe nachweisen ließen, führte zu Beginn des 19. Jahrhunderts zu einer Diskussion über die Herkunft der Salze und Erden in den Pflanzen, die die Berliner Akademie zur Ausschreibung einer Preisfrage zur Klärung dieses Problems veranlasste.⁴⁵ Preisträger war der Berliner Apotheker und königliche Medizinalassessor Johann Christian Karl Schrader (1762-1826) mit einer umfangreichen analytischen Untersuchung, in der er nachwies, dass in reinem Wasser kultivierte Pflanzen einen höheren Gehalt an verschiedenen Erden und Metalloxiden aufwiesen als die unvegetierten Pflanzensamen.⁴⁶ Er zog aus seinen Ergebnissen den Schluss, dass die ‚vegetative Kraft‘ zur Erzeugung dieser Mineralien in der Lage sei.⁴⁷ Dieser Ansicht trat Théodore de Saussure (1767-1845) entgegen, der in seinen profunden *Chemischen Untersuchungen über die Vegetation* überzeugende Argumente für die Herkunft der Pflanzenmineralien aus dem Boden beibrachte.⁴⁸ Auch für Davy gab es genügend „Beweisgründe“ für die Annahme, dass

die verschiedenen erdigen und salzigen Substanzen, welche in den Pflanzen gefunden werden, von dem Boden herrühren, auf dem sie wachsen; dass sie aber in keinem Falle durch neue Anordnungen der Elemente der Luft oder des Wassers gebildet werden. [...] In allen Fällen enthält die Asche der Pflanzen etwas von dem Erdreich, in welchem sie wachsen...⁴⁹

Stammen nun die anorganischen Stoffe in den Pflanzen aus dem Boden, so schließt sich als eine weitere Frage an, welche Rolle sie für die Vegetation spielen. Dass sie eine direkte Funktion in der Pflanzenernährung haben könnten, wurde von maßgeblichen Agrarwissenschaftlern lange verneint; vielmehr erklärte man ihren positiven Einfluss auf das Pflanzenwachstum mit ihrer bodenverbessernden Wirkung (physikalisch durch Auflöckerung, chemisch im Falle der Zersetzung organischer Bestandteile durch Kalk) sowie durch eine mögliche Reizwirkung auf das Pflanzenwachstum.⁵⁰ Davy ging in seiner Interpretation darüber hinaus, indem er den Mineralstoffen des Bodens eine Art Nahrungsfunktion zumäß:

Es entsteht die Frage: Sind die reinen Erden in dem Erdreiche bloß als mechanische, oder indirekte chemische Agenzien wirksam, oder gewähren sie wirklich Nahrung der Pflanze? [...] Die chemische Wirkung der einfachen Düngerarten, [...] welche in kleinen Quantitäten wirken, wie der Gips, die Alkalien und mehrere salinische Substanzen, war bis jetzt noch in tiefes Dunkel gehüllt. Die gewöhnlichere Meinung ist die, dass diese Substanzen auf die vegetabilische Ökonomie

auf eben die Art wie Gewürze oder Reizmittel auf die tierische Ökonomie wirken und dass sie die gewöhnliche Speise der Pflanzen [den Humus] nährender machen. – Die Meinung scheint jedoch der Natur der Sache ungleich angemessener zu sein, dass sie wirklich einen Teil der Pflanzennahrung ausmachen, und dass sie für die Pflanzenfaser diejenige Art von Stoff hergeben, welche im tierischen Körper der Substanz der Knochen analog ist.⁵¹

Zwischen der Erschöpfung des Ackerbodens durch Getreideanbau und dem Verlust an organischen Substanzen besteht nach Davy ein kausaler Zusammenhang. Unter Hinweis auf die Untersuchungen von Hassenfratz und Saussure führt er aus:⁵²

Several philosophical inquirers have shown, by satisfactory experiments, that animal and vegetable material deposited in soils are absorbed by plants, and become a part of their organized matter [...]. All manures from organized substances contain the principles of vegetable matter, which, during putrefaction, are rendered soluble in water or aeriform – and in those states they are capable of being assimilated by the vegetable organs [...]. The soil is the laboratory in which the food is prepared.⁵³

Obwohl Davy an gleicher Stelle auch auf die Bedeutung der Aufnahme von Kohlenstoff durch die Blätter hinweist („These elements, they gain either by their leaves from the air or by their roots from the soil.“), hatte seine Akzentsetzung auf den Humus zur Folge, dass seine große wissenschaftliche Autorität in den folgenden Jahrzehnten als wesentliche Stütze der Humustheorie gewertet wurde.⁵⁴

Sprengel und die Mineralstofflehre

Carl Sprengel (1787-1859) trat 1826 mit einer neuen Lehre vom Humus an die Öffentlichkeit.⁵⁵ Sein Lehrer Albrecht Thaer (1752-1828) hatte die zentrale Rolle dieses Bodenbestandteils in der Pflanzenernährung explizit hervorgehoben, indem er die Fruchtbarkeit des Bodens auf die Anwesenheit des Humus als dem eigentlichen – da organischen – Pflanzennährstoff zurückführte.⁵⁶ Der Vorstellung vom Humus als eines kaum definierten organischen Gebildes setzte Sprengel nun seine auf umfangreichen chemischen Analysen basierende Lehre entgegen. Danach stellte sich derselbe als ein komplexes System aus der Humussäure und den mineralischen Bodenbestandteilen dar, welches – nach heutigen Vorstellungen – durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen den organischen und den anorganischen Komponenten charakterisiert ist. Was von Davy als Phänomen erkannt worden war, wurde hier von Sprengel als wissenschaftlich fundiertes Prinzip etabliert, mit dem er eine Reihe für die Pflanzenernährung wichti-

ger Reaktionen in der Ackererde, wie die Auflösung schwerlöslicher Bodenminerale und die Freisetzung von Kohlensäure und Ammoniak, erklären konnte.⁵⁷ Diese Untersuchungen führten ihn 1828 direkt zu seiner Mineralstofflehre der Pflanzenernährung. Dass die aus dem Boden stammenden, in den Pflanzen nachweisbaren mineralischen Substanzen in der Regel nicht zufällig darin enthalten sind, sondern eine Funktion in den Pflanzen haben und somit auch zu den Substanzen der Pflanzenernährung gezählt werden müssen, stand für Sprengel fest. Seine Untersuchungen führten ihn zu dem Schluss, dass 18 Elemente und chemische Stoffe essentiell für die Pflanzen sind. Zu diesen zählte er neben den Bestandteilen der organischen Pflanzensubstanz Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff unter anderem die Elemente Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Silicium, Aluminium, Eisen, Mangan, Phosphor, Chlor und Jod.⁵⁸ Dass die Entwicklung der Wissenschaft das Spektrum der essentiellen Elemente, z.B. durch Spurenelemente, erweitern würde, hielt er für sehr wahrscheinlich. Zwei Maximen der Pflanzenernährung hat Sprengel in diesem Zusammenhang aufgestellt. Die erste betrifft die Nichtaustauschbarkeit dieser Stoffe:

Der Verfasser war eine zeitlang der Meinung, dass sich einige dieser Stoffe bei der Vegetation wohl vertreten könnten, so z.B. Kalium und Natrium, allein Versuche haben ihn überzeugt, dass ein Gewächs, welches Kalium zu seiner Ausbildung bedarf, [...] nicht fortkommt, sobald dem Boden [...] dieser Stoff mangelt.⁵⁹

Sprengels zweite Maxime betrifft das Gesetz vom Minimum:

[Er] ist durch viele [...] Versuche belehrt worden, dass keine der aufgeführten Substanzen übersehen werden dürfe, weil selbst ein Minimum derselben oft einen bedeutenden Einfluss auf die Vegetation ausübt.⁶⁰

Er war überzeugt:

...es ist nicht zu bestreiten, wenn eine Pflanze 12 Stoffe zu ihrer Ausbildung bedarf, so wird sie nicht aufkommen, wenn nur ein einziger an dieser Zahl fehlt, und stets kümmerlich wird sie wachsen, wenn einer derselben nicht in derjenigen Menge vorhanden ist, als es die Natur der Pflanze erheischt.⁶¹

In drei Monographien, der *Bodenkunde*, der *Urbarmachung* und der *Düngerlehre*, hat Sprengel seine neuen landwirtschaftlichen Lehren zusammengefasst.⁶² Zusammen mit seiner *Chemie für Landwirthe* stellen sie ein gewichtiges Gesamtwerk dar, aus dem deutlich wird, welche Schlüsselrolle die Chemie in der Landwirtschaft inzwischen eingenommen hatte.⁶³ So verwundert es nicht, dass Sprengel im agrargeschichtlichen Schrifttum als Begründer der Agrikulturchemie gilt.⁶⁴ Die *Bodenkunde* nennt er neben der *Düngerlehre* den allerwichtigsten Gegenstand der Land- und Forstwirtschaft. Seine Monographie enthält nicht nur eine

neue Bodenklassifizierung und eine präzise geschriebene Analyse der Ackererden, sondern auch – als Ergebnis 25jähriger Forschungsarbeit – eine minutiöse Auflistung der Zusammensetzung von 170 deutschen und außerdeutschen Böden mit einer Beurteilung der darauf wachsenden Kultur- und Wildpflanzen. Die Erkenntnis des Wechselspiels zwischen Boden, Pflanze und äußeren Bedingungen wurde zur Grundlage seiner Düngerlehre. So muss Sprengel zufolge die Entscheidung über die richtige Düngung von den chemischen Bestandteilen des Bodens und dem Mineralstoffspektrum der anzubauenden Früchte abhängen. „Aus diesem Grunde gibt es denn auch kein Universaldüngungsmittel“,⁶⁵ und völlig abwegig sei es, vom salpetersauren Ammoniak (dessen hoher Stickstoffgehalt die Kleberbildung befördert) zu glauben, es sei als alleiniges Düngemittel ausreichend.⁶⁶ Sprengels Erfahrungen mit humussauren Alkalien veranlassten ihn, deren Bereitung als künstliche Dünger in größerem Maßstab vorzuschlagen. Insbesondere aber gab seine Untersuchung des als Dünger in der Landwirtschaft weit verbreiteten Rindviehharns den Ausschlag zur eigenen Entwicklung von mineralstoff- und stickstoffhaltigen Kunstdüngerkompositionen für humusarme und humusreiche Böden.⁶⁷ Sprengels Vorstellung einer Produktion von künstlichem Dünger, der seiner Ansicht nach unzweifelhaft eine Revolution im Ackerbausystem hervorbringen würde, schloss auch eine Herstellung der in späterer Zeit wichtigsten Düngerkomponente, nämlich des Ammoniaks in Form seiner Salze, durch die chemische Industrie ein. Es bedurfte noch einiger Zeit und der Arbeit einer Reihe weiterer Forscher, darunter nicht zuletzt der wissenschaftlichen und publizistischen Aktivitäten Justus von Liebig (1803-1873), bis Sprengels Vision Wirklichkeit werden konnte.⁶⁸

Mit seinem Gesamtwerk und insbesondere mit der Begründung der Mineralstofflehre der Pflanzenernährung setzte Carl Sprengel einen Meilenstein in der Entwicklung der Agrikulturchemie; als Wissenschaftler stand er auf der Höhe seiner Zeit. So erstaunt es nicht wenig, in seinen Arbeiten agnostische, an die Spekulationen der römischen Naturphilosophie erinnernde, vitalistische Gedankengänge zu finden.⁶⁹ Dies allerdings dürfte nicht der Grund dafür gewesen sein, dass seine Lehren weder in der traditionellen Landwirtschaft noch in der Wissenschaft die erwartete Resonanz fanden. Vielmehr stieß seine Mineralstofflehre bei den zahlreichen Anhängern der Humustheorie auf scharfe Kritik.⁷⁰ Nach Erscheinen von Liebig's *Agrikulturchemie*,⁷¹ worin dieser postulierte, dass „die Nahrungsmittel aller grünen Gewächse anorganischer Natur“ seien und die Pflanze „von Kohlensäure, Ammoniak, Salpetersäure, Wasser, Phosphorsäure, Schwefelsäure, Kieselsäure, Kalk, Bittererde, Kali (Natron), Eisen“ lebe,⁷² entbrannte eine mit besonderer Schärfe geführte Polemik zwischen Liebig und Sprengel,⁷³ in der letzterer zu Recht seinen Prioritätsanspruch auf die Mineral-

stofflehre der Pflanzenernährung erhob. Liebigs Biograph William H. Brock schreibt dazu:

In der zweiten [englischen] Auflage [der *Agrikulturchemie*] von 1842 fügte Liebig ein langes Kapitel über die Grundbestandteile des Bodens an; es [...] brachte [...] 47 Analysen von Karl Sprengel, die dieser selbst ausgeführt oder über die er berichtet hatte. Liebig meinte, [...] Landwirte könnten solche Analysen niem als anstellen, sie müßten sich immer an professionelle Chemiker wenden, wenn sie sich über die Nährstoffgehalte des Bodens unterrichten wollten. Nur hier erkannte Liebig Sprengels Priorität hinsichtlich dessen an, was später als ‚Mineraltheorie‘ bekannt wurde. Dr. Sprengel war, sagte Liebig, ‚ein Chemiker, der sich in den letzten zwanzig Jahren ohne Ende bemüht hat darzulegen, wie wichtig die anorganischen Inhaltsstoffe des Bodens für die Entwicklung der auf ihn angebauten Pflanzen sind‘. – Trotz dieser Anerkennung wurde die Mineraltheorie, zum indest in Großbritannien und Amerika, auf Liebig zurückgeführt.⁷⁴

In einer späteren Auflage seiner *Agrikulturchemie* umriss Liebig die Geschichte der Mineraltheorie und ging dabei nochmals auf Sprengel ein:

Die Lehre, dass die Alkalien und alkalischen Erden in den Pflanzenaschen Nahrungsstoffe und nicht zufällige Bestandtheile seien, wird sehr häufig Sprengel zugeschrieben, der in der That in seiner Bodenkunde alle Aschenbestandtheile für nöthig erklärt. Seine Ansicht über die Nützlichkeit oder Nothwendigkeit dieser Stoffe für das Pflanzenleben fand aber weder in der Wissenschaft noch in der Landwirthschaft Anklang, weil nach den Versuchen von de Saussure die Wurzeln der Pflanzen das Vermögen besitzen, aus Salzlösungen der verschiedensten Art das aufgelöste Salz aufzunehmen, und darnach die Anwesenheit eines Aschenbestandtheils nicht als ein Beweis für die Nothwendigkeit angesehen werden konnte. Dies schliesst natürlich nicht aus, das die Landwirthschaft grossen Vortheil aus Sprengel's Ansicht hätte ziehen können, wenn die Wirksamkeit der einzelnen Aschenbestandtheile von den Landwirthen geprüft und festgestellt worden wäre...⁷⁵

Tatsächlich blieb dem Werk Sprengels lange Zeit eine Anerkennung versagt. Die Ignoranz in der Wissenschaftsgeschichtsschreibung ging so weit, dass Carl Sprengel in Ernst von Meyers *Geschichte der Chemie* aus dem Jahre 1889 mit dem Botaniker Kurt Sprengel (1766-1833) verwechselt wurde. Nach den Worten des Agrarhistorikers Charles Browne war Sprengel „the forgotten man of agricultural chemistry“.⁷⁶ Erst Mitte des 20. Jahrhunderts wurde er wiederentdeckt.⁷⁷ Die zeitliche Distanz ermöglicht es uns heute, die Entwicklung der Agrikulturchemie im 19. Jahrhundert mit sachlich-kritischem Blick zu sehen und dabei auch das wissenschaftliche Werk Sprengels als Pionierleistung zu würdigen.⁷⁸ Die Stiftung einer Sprengel-Liebig-Medaille durch den Verband Deutscher

Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, mit der die untrennbaren Verdienste beider Wissenschaftler dokumentiert werden,⁷⁹ belegt die sachliche und emotionslose Einschätzung des Werkes beider Wissenschaftler auch durch die Praxis.

Summary: Lavoisier and the beginnings of agricultural chemistry

In 1789 Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) published his system of antiphlogistic chemistry, which became an essential chemical basis of the arising agricultural chemistry in the 19th century. After discovering the chemical nature of the process of combustion he proved that animal respiration is a (slow) combustion, too. In spite of his manifold occupations in the field of practical agronomy, Lavoisier's activities in clearing up the principles of animal respiration, transpiration and digestion seem to be his most important contribution to the development of agricultural chemistry.

Sir Humphry Davy (1778-1829) defined the *Elements of Agricultural Chemistry* in lectures and in a first comprehensive agricultural chemical textbook at the beginning of the 19th century. Next to topics such as the composition of the soil and its improvement by cultivation and manuring, Davy treated the problem of plant nutrition and assumed the minerals of soil to be real nutritional substances for plants. Moreover, he considered the humus to be a main plant nutrient, too.

Davy's findings and creative ideas were developed further and transformed by Carl Sprengel (1787-1859). Sprengel's original contributions set a framework for agricultural chemistry, comprising the teaching of soil composition, of cultivating soil and of its manuring. In 1826, he published on the chemical nature of humus based on his findings concerning the interaction of soil minerals and "humus acid". This led him to formulate for the first time the mineral theory of plant nutrition and the law of the minimum in 1828. Nearly forgotten at the end of his century, Sprengel was rediscovered as one of the pioneers of agricultural chemistry in the 20th century.

¹ Ch.A. Browne, *A Source Book of Agricultural Chemistry*, Chronica Botanica, Vol. 8, Nr. 1, (Waltham, Mass. 1944).

- ² A.L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, 2 Bde (Paris 1789); eine deutsche Ausgabe dieses Textes lieferte bereits Sigismund Friedrich Hermbstaedt: *Des Herrn Lavoisier [...] System der antiphlogistischen Chemie*. Aus dem Französischen übersetzt und mit Anmerkungen und Zusätzen versehen von D. Sigismund und Friedrich Hermbstädt [...] (Berlin – Stettin 1792); jüngst erschien eine moderne Kommentierung zu Hermbstädt's Übersetzung: A.L. Lavoisier, *System der antiphlogistischen Chemie*. Kommentiert von Jan Frercks, Suhrkamp Studienbibliothek 12 (Frankfurt/M. 2008).
- ³ Jan Frercks, „Historische Einführung“, in: Lavoisier/Frercks, *System*, S. 201-66; Ders., „Lavoisier und die Chemische Revolution“, in: ebd., S. 186-195.
- ⁴ H. Sticher, „Die chemische Tradition“, in: H.-P. Blume (Hg.), *Handbuch der Bodenkunde*, 21. erg. Lfg. (Landsberg/Lech 2005), S.1-24, hier S. 7; H.-P. Blume, „Die Wurzeln der Bodenkunde“, in: Ders. (Hg.), *Handbuch der Bodenkunde*, 15. erg. Lfg., (Landsberg/Lech 2003), S. 1-30, hier S. 24.
- ⁵ J. Boulaïne, *Histoire de l'Agronomie en France, Technique et Documentation* (Paris 1996), S. 215-217.
- ⁶ A.L. Lavoisier, „Résultats de quelques expériences d'agriculture, et réflexions sur leurs relation avec l'économie politique“, in: *Œuvres de Lavoisier, publiées par les soins de son excellence le ministre de l'instruction publique et des cultes, Tome 2: Mémoires de chimie et de physique* (Paris 1862), S. 812-823.
- ⁷ Lavoisier, „Résultats“.
- ⁸ Lavoisier/Frercks, *System*, S. 53-61, 66-74.
- ⁹ „Diese Luft, welche die Herren Priestley, Scheele und ich fast zu gleicher Zeit entdeckten, nannte der erste dephlogistirte Luft, der zweite Feuerluft, ich gab ihr gleich den Namen der vorzüglichst respirablen Luft (*air éminemment respirable*); nachher hat man sie aber mit dem Namen Lebensluft belegt.“ (Lavoisier/Hermbstädt, *System*, S. 53. Von Lavoisier stammt schließlich der Name *oxygène*, säureerzeugendes Gas.
- ¹⁰ A. Seguin/A.L. Lavoisier, „Sur la respiration des animaux“, in: *Œuvres* Bd 2, S. 688-703.
- ¹¹ A. Seguin/A.L. Lavoisier, „Premier mémoire sur la transpiration des animaux“, in: *Œuvres* Bd 2, S. 704-714.
- ¹² Seguin/Lavoisier, „Respiration“, S. 691-700.
- ¹³ Seguin/Lavoisier, „Respiration“, Seguin/Lavoisier, „Mémoire“.
- ¹⁴ Seguin/Lavoisier, „Mémoire“, S. 704; Übersetzung des Autors.
- ¹⁵ A.L. Lavoisier, „Second mémoire sur la transpiration des animaux“, in: *Œuvres, Bd 5: Mémoires de géologie et de minéralogie [...] (Paris 1892)*, S. 379-390.
- ¹⁶ Sticher, „Tradition“, S. 7.
- ¹⁷ Lavoisier, „Résultats“.
- ¹⁸ In seiner Eigenschaft als Verwalter der königl. Pulver- und Salpeterfabriken (seit 1776) erfasste Lavoisier die franz. Salpeterlagerstätten und erarbeitete Verfahren zur Salpeterge-

- winnung. Vgl. „Mémoire sur les terres naturellement salpêtrées, existant en France“, in: *Œuvres*, Bd 5, S. 498-562; „Mémoire sur les terres et pierres naturellement salpêtrées dans la Touraine et dans la Saintonge“, in: *Œuvres*, Bd 5, S. 563-604.
- ¹⁹ J.-B. Boussingault, *Économie rurale considérée dans ses rapports avec la chimie, la physique et la Meteorology* (Paris 1843-1844); dt. von N. Graeger, *Die Landwirtschaft in ihren Beziehungen zu Chemie, Physik und Meteorologie* (Halle 1844-1856).
- ²⁰ A.L. Lavoisier, „Sur la nature de l'eau et sur les expériences par lesquelles on a prétendu prouver la possibilité de son changement en terre“, in: *Œuvres*, Bd 2, S. 1-28.
- ²¹ Johann Gottschalk Wallerius (1709-1785) hatte als Professor der Chemie, Mineralogie und Pharmazie an der Universität Uppsala als erster die Agrikulturchemie als besonderes Studienfach an einer Universität eingeführt und dabei sein besonderes Interesse auf die Chemie der Ackerfrüchte und des Bodens gerichtet. Vgl. J.C. Poggendorff, *Biographisch-literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften*, Bd 2, S. 1252-1253; Browne, *Source Book*, S. 126-134.
- ²² Explizit entwickelt in der unter Wallerius' Anleitung und aktiven Mitwirkung (s. Browne, S. 128: „Wallerius is usually, and no doubt justly, accredited as author of the work...“) von seinem Schüler Gustav Adolf Gillenborg verfassten, unter dem Titel *Agriculturae fundamenta chemica* 1761 in Lateinisch und Schwedisch publizierten Dissertation; dt. *Chemische Grundsätze des Feldbaues* (Berlin 1764 und Bern 1765); franz. *Elémens d'agriculture physique et chymique* (Yverdon 1766).
- ²³ Lavoisier/Hermbstädt, *System*, 1. Bd, 8. Abschnitt: „Von dem bildenden Grundstoffe des Wassers, und von der Zerlegung des Wassers durch Kohle und Eisen“, S. 123-138, hier 136: „So kann man es nun, man mag das Wasser zerlegen oder zusammensetzen, als ausgemacht und bewiesen ansehen, so gut als es in der Chemie und Physik nur immer geschehen kann, daß das Wasser keine einfache Substanz [kein Element] ist, sondern daß es aus zwei Stoffen, dem säurezeugenden Stoffe [Sauerstoff] und dem wasserzeugenden Stoffe [Wasserstoff] zusammengesetzt ist“.
- ²⁴ Jean Henri Hassenfratz (1755-1827), „Sur la nutrition des végétaux“, *Annales de chimie* 13 (1792), S. 178-192, 318-330; 14 (1792), S. 55-64.
- ²⁵ Armand Séguin (1765-1835), „Mémoire sur la végétation“, *Annales de chimie* 89 (1814), S. 54-65.
- ²⁶ A.L. Lavoisier, „Rapport sur la nutrition des végétaux“, in: *Œuvres*, Bd 2, S. 531-535 (25.2.1792); A.L. Lavoisier, „Rapport sur la végétation“, in: ebd., S. 536-538 (7.3.1792).
- ²⁷ Joseph Priestley (1763-1804), *Experiments and Observations on different kinds of Air, and other Branches of Natural Philosophy, connected with the subject* (Birmingham 1790; erste Veröffentlichung: 1774-1786).
- ²⁸ Jan Ingen-Housz (1730-1799), *Experiments upon Vegetables discovering their great Power of Purifying the Common Air in the Sunshine and injuring it in the Shade and at Night* (London 1779); Ders., *An Essay on the Food of Plants and the Renovation of Soils* (London 1796).

- ²⁹ Jean Senebier (1742-1809), *Expériences sur l'action de la lumière solaire dans la végétation* (Genf – Paris 1788).
- ³⁰ Lavoisier, „Rapport sur la végétation“, S. 538; Übersetzung des Autors.
- ³¹ Lavoisier, „Rapport sur la végétation“, S. 537.
- ³² K.D. Schwenke, „Die Humustheorie in der Geschichte der Agrikulturchemie“, *Thaer heute* 8 (2012), S. 1-20.
- ³³ Priestley, Ingen-Housz und Senebier hingen in ihren Arbeiten noch der Phlogistontheorie an. Ebenso waren die agrikulturchemischen Themen gewidmeten Monographien von Wallerius/Gillenborg und Francis Home [(1719-1831), Browne S. 117-126; s. F. Home, *Principles of agriculture and vegetation* (Edinburgh 1757); dt.: *Grundsätze des Ackerbaues und des Wachstums der Pflanzen, aus dem Englischen übersetzt von J.Ch. Wöllner* (Berlin 1763)] vom phlogistischen Denken bestimmt.
- ³⁴ K.D. Schwenke, „Heinrich Einhof – Lehrer in Celle und Möglin: Biographische und werkgeschichtliche Studie“, *Thaer heute* 3 (2006), S. 21-51.
- ³⁵ H. Davy, *Elements of Agricultural Chemistry* (London 1813); dito in: *Collected works of Sir Humphry Davy* (ed. by his brother John Davy), Bde VII, VIII (London 1840); H. Davy, *Elemente der Agrikultur-Chemie: in einer Reihe von Vorlesungen, gehalten vor der Gesellschaft zur Beförderung des Ackerbaues, aus dem Englischen übersetzt von Friedrich Wolff; mit Anmerkungen und einer Vorrede begleitet von Albrecht Thaer* (Berlin 1814).
- ³⁶ K.D. Schwenke, „Die Agrikulturchemie im Umfeld von Albrecht Thaer: Sigismund Friedrich Hermbstädt“, *Thaer heute* 4 (2007), S. 111-143.
- ³⁷ Davy, „Elements“, in: *Works*, Bd VII, S. 178.
- ³⁸ J.B. Trommsdorf, *Anfangsgründe der Agrikulturchemie* (Gotha 1816).
- ³⁹ Schwenke, „Einhof“.
- ⁴⁰ H. Einhof, „Anleitung zur Kenntniß der chemischen Beschaffenheit des Bodens, für praktische Landwirthe entworfen“, *Archiv der Agriculturchemie* 2 (1806), S. 304-369; 3 (1807), S. 67-106.
- ⁴¹ H. Davy, “The Bakerian Lecture: on some phenomena of chemical changes produced by electricity, particularly the decomposition of the fixed alkalies, and the exhibition of new substances which constitute their bases; and the general nature of alkaline bodies”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1808), S. 1-44.
- ⁴² Davy/Wolff, *Elemente*, S. 174.
- ⁴³ H. Davy, „The Bakerian Lecture: on some of the combinations of oxymuriatic gas and oxygen, and on the chemical Relations of these principles to inflammable Bodies“, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1811), S. 1.35. Bis zu Davys Entdeckung wurde das Chlorgas für eine sauerstoffhaltige Substanz, sogenannte *oxymuriatic acid*, gehalten. Davy schlug dafür den Namen Chlorine, von *χλωρος* gelbgrün, vor (ebd. S. 32).
- ⁴⁴ Davy/Wolff, *Elemente*, S. 210-212.

- ⁴⁵ Titel der Preisfrage: „Von welcher Art sind die erdigen Bestandtheile, welche man mit der chemischen Zergliederung in den verschiedenen inländischen Getreidearten findet? Treten diese in solche ein, wie man sie darin findet, oder werden sie durch die Lebenskraft und durch die Organe der Vegetation erzeugt?“ Erste Ankündigung der Preisfrage für das Jahr 1797 durch die physikalische Klasse der Akademie (Direktor: Achard) in der Hamburger Zeitung vom Jahr 1796, zweite Ankündigung derselben 1797 in der Berliner Zeitung Nr. 177.
- ⁴⁶ J.Ch.K. Schrader, *Über die eigentliche Beschaffenheit und Erzeugung der erdigen Bestandtheile in verschiedenen inländischen Getreidearten* (Berlin: Maurer, 1800), 120 S.
- ⁴⁷ J.Ch.K. Schrader, „Ueber die erdigten Bestandtheile des Roggens“, *Archiv der Agriculturchemie* 1,1 (1803), S. 85-98; Ders., „Ueber die erdigen Bestandtheile der Gewächse“, *Archiv der Agriculturchemie* 2,1 (1805), S. 189-216.
- ⁴⁸ Th. de Saussure, *Recherches chimiques sur la végétation* (Paris 1804); dt: *Chemische Untersuchungen über die Vegetation, übersetzt von A. Wieler*, Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften 15 u. 16 (Leipzig 1890).
- ⁴⁹ Davy/Wolff, *Elemente*, S. 203, 359.
- ⁵⁰ Schwenke, „Agriculturchemie“.
- ⁵¹ Davy/Wolff, *Elemente*, S. 202.
- ⁵² Hassenfratz, „Nutrition“; und Saussure, *Recherches*.
- ⁵³ Davy, „Elements“, in: *Works*, Bd VII, S. 186-189.
- ⁵⁴ Schwenke, „Humustheorie“.
- ⁵⁵ C. Sprengel, „Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure Salze“, *Archiv für die gesammte Naturlehre* 8 (1826), S. 145-220.
- ⁵⁶ A. Thaer, *Grundsätze der rationellen Landwirthschaft*, 4 Bde (Berlin 1809-1812), hier: Bd 2, S. 396-397.
- ⁵⁷ Sprengel, „Pflanzenhumus“; C. Sprengel, „Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes...“, *Journal für technische und ökonomische Chemie* 2 (1828), S. 423-474; dto, „Fortsetzung“: 3 (1828), S. 42-99, 313-352, 397-421; C. Sprengel, *Chemie für Landwirthe, Forstmänner und Cameralisten, 1. Teil: Anorganische Chemie* (Göttingen 1831); 2. Teil: *Organische Chemie* (Göttingen 1832).
- ⁵⁸ Sprengel, *Chemie*, Bd 2, S. 432.
- ⁵⁹ Sprengel, *Chemie*, Bd 2, S. 431.
- ⁶⁰ Sprengel, *Chemie*, Bd 2, S. 438.
- ⁶¹ Sprengel, *Chemie Bd. 1*, S. 93.
- ⁶² C. Sprengel, *Die Bodenkunde oder die Lehre vom Boden* (Leipzig, 1837); Ders. *Die Lehre von den Urbarmachungen und Grundverbesserungen* (Leipzig, 1838); Ders., *Die Lehre vom Dünger* (Leipzig 1839).
- ⁶³ Sprengel, *Chemie*.

- ⁶⁴ B. Wendt, *Carl Sprengel und die von ihm geschaffene Mineraltheorie als Fundament der Pflanzen-Ernährung* (Wolfenbüttel 1950).
- ⁶⁵ Sprengel, „Substanzen, Fortsetzung“, S. 94.
- ⁶⁶ Sprengel, „Substanzen, Fortsetzung“, S. 71-72, 94.
- ⁶⁷ C. Sprengel, „Untersuchungen über den Rindviehharn“, *Journal für technische und ökonomische Chemie* 7 (1830), S. 1-34, 171-195.
- ⁶⁸ W.H. Brock, *Justus von Liebig: Eine Biographie des großen Naturwissenschaftlers und Europäers*, aus dem Englischen übersetzt von G. E. Siebeneicher (Braunschweig 1999), S. 121-149; H.-W. Schütt, „Anfänge der Agrikulturchemie in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts“, *Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie* 21 (1973), S. 83-89.
- ⁶⁹ K.D. Schwenke, „Carl Sprengels Mineralstofflehre, ein Meilenstein in der Geschichte der Agrikulturchemie“, *Thaer heute* 5 (2008), S. 23-50.
- ⁷⁰ Wendt, *Sprengel*.
- ⁷¹ J. Liebig, *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie* (Braunschweig 1840).
- ⁷² J. v. Liebig, *Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*, 9. Auflage (postum) (Braunschweig 1876), Einleitung, S. 9.
- ⁷³ Wendt, *Sprengel*; J. Liebig, „Abfertigung der Herren Gruber und Dr. Sprengel, in Beziehung auf ihre Kritiken meines Werkes *Die organische Chemie ...*“, *Annalen der Chemie und Pharmacie* 38 (1841), S. 216-256.
- ⁷⁴ Brock, *Liebig*, S. 136.
- ⁷⁵ Liebig, *Chemie*, 9. Aufl. 1876, Einleitung, S. 13, Hervorhebung im Original.
- ⁷⁶ Browne, *Source Book*, S. 231.
- ⁷⁷ Wendt, *Sprengel*.
- ⁷⁸ Schwenke, „Mineralstofflehre“; R.R. van der Ploeg, W. Böhm, M.B. Kirkham, „On the Origin of the Theorie of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum“, *Soil Science Society of America Journal* 63 (1999), S. 1055-1062; A. Jungk, „Carl Sprengel – The founder of agricultural chemistry“, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172 (2009), S. 633-636; W. Böhm, „Leben und Wirken von Carl Sprengel“, *ZALF-Berichte (Müncheberg)* 50 (2003), S. 7-9.
- ⁷⁹ Böhm, „Leben“.