

Dietmar Höttecke

Universität Hamburg

Forschend-entdeckenden Unterricht authentisch gestalten Ein Problemaufriss

Authentisch Physik und über Physik lernen?

In der Literatur kursiert der Begriff der Authentizität als Schlüssel zur Überbrückung der Kluft zwischen Wissenschaftskultur, -praxis, Laboren, Experimenten und Forschen auf der einen Seite und Schule, Unterricht, Lehrkraft, Schüler und Lernen auf der anderen. Authentizität wird oft als Schlagwort verwendet, um Lernumgebungen schüler- oder auch wissenschaftsadäquater, als es die Regel ist, zu beschreiben. Intuitiv löst dieser Begriff Zustimmung aus, wird aber nur selten geklärt. Buxton (2006) unterscheidet dagegen drei nützliche Dimensionen dieses Begriffs: *canonical*, *youth-centered* und *contextual*. Die curricularen Referenzpunkte der drei Dimensionen ließen sich auch mit Naturwissenschaften, Kind/Schüler und Kontext übersetzen.

Eine Orientierung des Authentizitätsbegriffs am Kind/Schüler liegt vor, wenn deren Interessen, Perspektiven, Erfahrungen und Bedürfnisse zum Ausgangspunkt des Lernens werden. Brickhouse (1994) fordert vor diesem Hintergrund:

"To teach students science in relation to the world, scientific knowledge and technologies ought to be taught together. In this way, scientific knowledge is not construed as disembodied knowledge, but as intimately related to the students' experiences. Teachers need to learn ways of making science a part of the student's experience-useful truths for solving real problems." (Brickhouse, 1994, S. 408)

Eine konsequente Orientierung am *Kind/Schüler* verbindet sich auch mit dem Konzept des genetischen Unterrichts (Wagenschein, 1968) und mit konstruktivistischen Ansätzen eines an Schülervorstellungen orientierten Unterrichts (Duit & Treagust, 2012). Entsprechend betont das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al., 1997) die konsequente Berücksichtigung von Schülerperspektiven als Mittel der Generierung didaktischer Strukturierungen.

Eine Alternative dazu ist *Kontext* als curricularer Referenzpunkt für authentischen Unterricht. Nawrath (2010, S. 26) hebt die tragende Rolle technischer, gesellschaftlicher und anwendungsbezogener Fragestellungen hervor. Müller (2006, S. 106) stellt den Begriff der Authentizität als Abgrenzungsfigur zu fachlich orientiertem Lernen mit Alltagsbezügen heraus. Letztlich haben Kontextprojekte wie z.B. *Chemie im Kontext* (Demuth et al., 2008) in den letzten Jahren dafür gesorgt, dass *Kontext* als zentraler curricularer Referenzpunkt große Anerkennung gefunden hat.

In Bezug auf die Authentizitäts-Dimension *Naturwissenschaften* haben Chinn und Malhotra (2002) eine umfassende Analyse und Kritik vorgelegt, die belegt, dass die Praxen von Schülern und Schülerinnen im naturwissenschaftlichen Unterricht von den Forschungspraxen in den Naturwissenschaften weit entfernt sind. Naturwissenschaftler arbeiten z.B. an eigenen Fragestellungen und müssen ihre Messprozeduren selbst entwickeln. Schülerinnen und Schülern werden diese eher vorgegeben. Messapparaturen sind in den Naturwissenschaften variabel, unsicher und immer wieder selbst Gegenstand der Forschung, während sie im Kontext Schulunterricht wie oben gezeigt statisch und auf sichere Phänomenerzeugung angelegt sind. In der Schule werden Schlüsse zumeist auf der Basis nur eines Experiments und nur weniger Messungen gezogen, wobei nur eine einzige Variable variiert wird. In den Naturwissenschaften gestaltet sich dieser Prozess komplex und

multidimensional. Schlüsse werden selten nur auf einem einzigen Experiment gegründet, sondern in Netzwerke aus Theorien und zahlreichen Experimenten eingebettet. Entsprechend folgern Chinn und Malhotra, "that much work remains to be done to transform schools into places that nurture epistemologically authentic scientific inquiry" (ebd., S. 214).

Ähnlich wird im Bereich inquiry-based learning bzw. forschend-entdeckendem Unterricht naturwissenschaftliche Forschungspraxis als curricularer Referenzpunkt zitiert.

„Scientific inquiry, in short, refers to the systematic approaches used by scientist in an effort to answer their questions of interest. [...] the primary focus is on knowledge about SI, because it is this perspective of SI that is most often ignored in the classrooms and in methods of assessments.“ (Lederman & Lederman 2012, S. 338f).

Auch hier wird der Bezugspunkt für Authentizität durch Epistemologie und Naturwissenschaft und die Reflexion darauf festgelegt.

Forschend-entdeckender Unterricht gilt als Kandidat, um Authentizität im Sinne der Naturwissenschaften zu maximieren. Entsprechend werden in diesem Kontext gern Begriffe wie "Kleine Forscher" oder "Forscherwerkstatt" verwendet, um forschend-entdeckende Lernumgebungen zu charakterisieren. Wie ist nun der Ist-Stand eines Unterrichts, der im Sinne der Naturwissenschaften authentisch heißen darf?

Forschen und Entdecken im Unterricht

Selbstständiges Forschen und Entdecken wird in der Physikdidaktik seit langem als erfolgversprechendes Konzept bewertet. Historisch betrachtet verbinden sich damit bekannte Namen wie Dewey oder Kerschensteiner (Bell, 2007).

Der Begriff des Forschens scheint zunächst unproblematischer zu sein. Forschen, das auf das althochdeutsche *forsca* – fragen – zurückgeht, bezeichnet in den Naturwissenschaften methodisch kontrolliertes und zielorientiertes Handeln. Naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen und von z.B. ethischen, gesellschaftlichen oder sozialen Fragen abzugrenzen, gilt als wichtige Kompetenz. Forschen als methodisch kontrolliertes Handeln wird im Unterricht aber viel zu wenig sichtbar. Stattdessen dominieren instruktions-orientierte Schüler- oder Lehrerexperimente (Tesch & Duit, 2004).

Dem Begriff des Entdeckens haftet auf metaphorische Weise an, etwas bereits Vorhandenes nur noch freilegen zu müssen (Höttecke, 2010). Entsprechend wird gern ein "Nach-" vorangestellt, um zu kennzeichnen, dass es in Lehr-Lern-Kontexten um bereits Bekanntes gehe, das es zu ent-decken gelte (z.B. Berger, 2007). Die didaktisch motivierte Unterscheidung des Begriffs "Versuch" (im Unterricht) vom Begriff "Experiment" (in der naturwissenschaftlichen Forschung) (Bleichroth et al., 1991, S. 218) hat sich im deutschen Sprachraum m.E. nicht konsequent durchgesetzt. Ein klar umrissenes englischsprachiges Pendant gibt es ebenfalls nicht. Dort werden Begriffe wie experiment, experimentation, lab work, practical work oder (guided) inquiry-based learning verwendet.

Gyllenpalm und Wickman (2011) untersuchen im Rahmen einer Interviewstudie die Vorstellung vom Experiment bei schwedischen Lehramtsstudierenden mit naturwissenschaftlichem Bezug. Sie zeigen:

What this analysis shows is that the term "experiment" is habitually used as a synonym to "laboratory task" and equated more or less explicitly with a *method of teaching* rather than a *method of scientific*

inquiry. [...] When asked specifically about the meaning of "experiment," this term was given everyday connotations like "trying" or "testing" in a nontechnical sense" (ebd., S. 920).

Es ist bemerkenswert, dass die Lehramtsstudierenden dieser Studie über umfangreiche Erfahrungen im Experimentieren verfügen, dies aber kaum zu einem elaborierten Verständnis experimenteller Tätigkeit geführt hat.

Beim Experimentieren kommt der expliziten Reflexion auf Aspekte der Natur der Naturwissenschaften eine besondere Rolle zu.¹ Entsprechend verweisen empirische Studien auf die hohe Bedeutung der Lehrkraft, die Unterrichtsphasen expliziter Reflexion anleiten und moderieren soll, und ihrer Orientierungen (Bencze & Giuseppe, 2006; Bianchini & Colburn, 2000; Kang & Wallace, 2005; Roehrig & Luft, 2004).

Lehrkräfte durchdenken das Thema Experimentieren aus der Perspektive der Vermittlung von Fachwissen (Flick, 2000). Es besteht generell ein Mangel an Schüler- und Lernorientierungen bei Lehrkräften (Jonas-Ahrend, 2004; Kang, Orgill & Crippen, 2008). Eine klare Orientierung am Lehren und Lernen über die Natur der Naturwissenschaften ist kaum zu erkennen. Es verwundert daher nicht, dass auch Schülerinnen und Schüler einen klaren Unterschied machen zwischen Experimentieren im Unterricht und Experimentieren in den Naturwissenschaften (Henke & Höttecke, 2013, in diesem Band). Das eigene Experimentieren der Schülerinnen und Schüler kann dann aber nicht ohne weiteres als Ressource verwendet werden, um auf Experimentieren in der Forschung zu reflektieren.

Offene Experimentierumgebungen wie *inquiry-based learning* sind bislang kaum implementiert (Capps & Crawford, 2012), obwohl sie zumindest von den amerikanischen Standards vehement gefordert wurden. Die Konsequenzen dieses Mangels an *inquiry-based learning* mit klarem Bezug zur Natur der Naturwissenschaften sind seit langem bekannt und oft beklagt worden. Wenn Schülerinnen und Schüler experimentieren, wissen sie oft gar nicht was und warum sie etwas tun.² Stark vorstrukturierte Experimentierumgebungen wurden daher mit Begriffen wie "cookbook-style", "verification lab" oder als Indoktrination in korrekte Arbeitsabläufe gebrandmarkt.³ Dabei betrifft diese Vorstrukturierung nicht nur die Vorgabe detaillierter Arbeitsschritte zur Durchführung oder Auswertung eines Experiments durch Schülerinnen und Schüler. Vorstrukturiert sind die Lehrmittel zum Experimentieren selbst, um Phänomene und Gesetzmäßigkeiten zeitlich ökonomisch und mit möglichst großer Klarheit zu inszenieren. Unter dieser Prämisse werden sie von den Herstellerfirmen in der Regel so konzipiert. Diese Vorgehensweise impliziert allerdings auch,

- dass Phänomene zweifelsfrei in Erscheinung treten ohne sich zu überlagern,
- dass Phänomene zeitökonomisch und zuverlässig hergestellt, beobachtet und vermessen werden können,
- dass Messdaten vorgegebenen Auswertungsroutinen entsprechen und

¹ Vgl. z.B. Khishfe & Abd-El-Khalick (2002); Schwarz, Lederman & Crawford (2004); Hößle, Höttecke & Kircher (2004); Höttecke, (2001a); Höttecke, Henke & Rieß (2012). Zu Schülervorstellungen siehe Höttecke (2001b).

² Vgl. Gallagher & Tobin (1987), Flick (2000), Hart et al. (2000), Hofstein & Kind (2012), Hofstein & Lunetta (2004), Lunetta, Hofstein & Clough (2007), Schauble et al. (1995).

³ Vgl. Clough (2006), Hofstein & Lunetta (2004), Hofstein & Kind (2012), Kang & Wallace 2005, Metz et al. (2007), Metz & Stinner (2006), Nott & Wellington (1996).

- dass Fragen nach der Stabilisierung von Messapparaturen gar nicht erst entstehen.

Diese apparative Seite der Vorstrukturiertheit experimenteller Lernumgebungen bewirkt eine Stringenz physikalischer Erkenntnisprozesse, die der Forschung selbst gar nicht eigen ist (Habben & Mehrle, 1994, S. 8).

Den empirischen Kern der Naturwissenschaften macht der Begriff der Evidenz aus (Ruhrig, Ohlsen & Höttecke, 2013, in diesem Band). Der Evidenz-Begriff erschöpft sich nicht in rohen Daten, sondern schließt Aushandlung und Anerkennung ihrer jeweiligen Bedeutung vor dem Hintergrund theoretischer Annahmen und experimenteller Expertise ein. Dieser Prozess des Anerkennens und Aushandelns wird aber durch stark vorstrukturierte Routinen der Phänomenerzeugung, -vermessung und -interpretation systematisch ausgeschlossen. So gehen potenzielle Chancen des Lernens über die Natur der Naturwissenschaften verloren.

Die Motive für eine starke Vorstrukturierung experimenteller Lernumgebungen kann man auf fachkulturelle Eigenschaften des Schulfachs Physik zurückführen (z.B. Willems, 2007; Höttecke & Silva, 2011). Dabei hat es eine gewisse Tradition, Unsicherheit zu vermeiden. Beim Experimentieren im Unterricht darf nichts schief gehen, denn vermeintlich gilt:

„durch nichts wird die Disziplin und damit der Erfolg des ganzen Unterrichts so gefährdet, als durch unsicher umhertastende oder unklare Fragestellung und durch misslungene Experimente.“ (Baumeister, 1898, S. 10)

Dass Lehrkräfte in Physik und Chemie der Herstellung von Sicherheit hohe Bedeutung zubilligen, konnte bereits in einer Gruppendiskussionsstudie gezeigt werden (Krüger, Ruhrig & Höttecke, 2013, in diesem Band). Die Prozessqualität der Naturwissenschaften, in der Evidenz unsicher sein kann, geht dabei verloren. Die Folge ist ein Mangel an Authentizität im Sinne des Referenzpunktes Naturwissenschaften (Edelson, 1998).

Als nächstes soll dieser Referenzpunkt Naturwissenschaften genauer untersucht werden. Die folgenden Abschnitte bemühen sich daher um eine fachliche Klärung naturwissenschaftlicher Praxis v.a. im Hinblick auf den Begriff des Experiments.

Naturwissenschaftliche Forschungspraxis – Auf dem Weg zu einem zeitgemäßen Experiment-Begriff

Der naturwissenschaftlichen Forschung ist selbst eine Tendenz eigen, die Entstehungs- und Herstellungsbedingungen bereits erarbeiteter Wissens- und Könnensbestände zu verdecken, und das sogar mit einer gewissen Notwendigkeit. Naturwissenschaftliche Forschungs-Publikationen sind keine Abbilder dessen, wie in Laboren, Büros und Besprechungsräumen tatsächlich gearbeitet worden ist. Publikationen sind vielmehr Rekonstruktionen post hoc. Naturwissenschaftliche Publikationen stellen oft den Forschungsstand an den Anfang, formulieren dann Hypothesen, die es zu prüfen gilt, schildern dann die Methoden und Resultate und schließen mit einer Diskussion der Ergebnisse. Medawar (1963) hat darauf hingewiesen, dass wir einer Täuschung unterliegen, wenn wir diese Konstruktion für eine Chronologie der Forschung halten, entlang derer sich ein induktivistisches Forschungsparadigma entfalten könnte: "the scientific paper is a fraud in the sense that it does give a totally misleading narrative of the processes of thought that go into the making of scientific discovery" (ebd., S. 233).

Lehrbücher können ebenfalls dazu beitragen, dass die Forschungspraxis in den Naturwissenschaften nur verzerrt wiedergegeben wird. In der Regel liegt ihnen keine

historische, sondern eine systematische Rekonstruktion der jeweiligen Bezugsdomäne zugrunde. Sollte dennoch von Forschungsprozessen die Rede sein, kann es zu regelrechten Fällen der Mythenbildung kommen, wie Heering (1995) anhand einer Fallstudie über die Entstehung und Rezeption des Coulombschen Gesetzes zeigt. Coulomb hatte als empirischen Beleg seines $1/r^2$ -Gesetzes nur drei Messwerte publiziert. Die Replikation⁴ des Experiments durch Heering zeigte, dass die von Coulomb entwickelte Torsionsdrehwaage erhebliche messtechnische Probleme erzeugt, die an der Validität seiner Messungen Zweifel aufkommen lassen. Das Instrument wie auch die Datenanalyse war bereits in erheblichem Maße von der Annahme durchdrungen, dass das zu bestätigende Gesetz gelten müsse. Lehrbuch-Rekonstruktionen verbreiten dagegen den Mythos eines auf der Basis solider Empirie etablierten Coulombschen Gesetzes.

Latour und Woolgar (1986, S. 242) haben den Prozess des Verzerrens oder Unsichtbar-Werdens wissenschaftlicher Praxis mit dem Begriff *black-boxing* belegt. Etablierten wissenschaftlichen Prozeduren und Apparaten wie z.B. einem Massenspektrometer wird ein hohes Maß an Vertrauen entgegen gebracht. Die Theorien, Konzepte und Praktiken, die in die Konstruktion eines Massenspektrometers eingegangen sind, werden nicht mehr in Frage gestellt, sondern als gesichert angenommen. Ein Phänomen wird zum Instrument, indem es die Bearbeitung weiterer wissenschaftlicher Fragestellungen ermöglicht, für deren Beantwortung es selbst nur noch instrumentelle Funktion besitzt.

Diese Situation ergibt sich, wenn in einem Testlabor mit Hilfe eines Massenspektrometers eine Dopingkontrolle durchgeführt wird. Die Validität und Reliabilität der Messergebnisse setzen ein gesichertes theoretisches Verständnis des Instruments und etablierte, gesicherte Messprozeduren voraus. Die gleiche Situation kennt man in der fachdidaktischen Forschung, wenn beispielsweise ein Chi-Quadrat-Test oder eine Power-Analyse mit einer Computersoftware durchgeführt wird und man dabei den in die Software integrierten statistischen Routinen vertraut, ohne sie im Detail verstehen zu müssen. Diesen Werkzeugcharakter können auch wissenschaftliche Objekte haben, selbst wenn man sie nicht unmittelbar beobachten kann. Hacking (1984, S. 156) weist darauf hin, dass Existenzannahmen über ein wissenschaftliches Objekt nicht unbedingt nötig sind, wenn man über dieses Objekt experimentiert. Erst wenn dieses Objekt so weit stabilisiert und anerkannt ist, dass es selbst Werkzeugcharakter haben kann, setzt dies eine Existenzannahme voraus. Als James Chadwick sich - wie andere Physiker/innen auch - in den frühen 1930er Jahren mit einer neuen Art energiereicher Strahlung befasste, war noch keineswegs geklärt, worin die Natur dieser Strahlung bestehen könne. 1935 wurde ihm als "Entdecker" des Neutrons der Nobelpreis für Physik verliehen. Heute wird das Neutron als Werkzeug in der Nuklearmedizin, Kerntechnik oder Hochenergiephysik verwendet, ohne dass die Frage nach seiner Existenz sich noch stellen müsste.

Instrumente in den Naturwissenschaften dürfen überhaupt nur deshalb den Charakter einer black-box annehmen, weil sie selbst das Vertrauen in bereits erreichte Arbeitsstände der Forschung verkörpern. Sie sind während ihrer eigenen Entwicklungsphase einmal Forschungsobjekte gewesen, aber nunmehr zu technischen Objekten transformiert, die vertrauensvoll genutzt und selten in Frage gestellt werden. Rheinberger (1997) spricht in diesem Zusammenhang von einem Stabilisierungsprozess, innerhalb dessen epistemische

⁴ Unter Replikation wird eine etablierte Forschungsmethode der Wissenschaftsgeschichte gefasst. Sie umfasst die möglichst quellengetreue Rekonstruktion von Instrumenten und jeweiliger experimenteller Praktiken und deren historische Kontextualisierung. Vgl. Heering & Höttecke (2013).

Dinge zu technischen Dingen werden. Erstere verkörpern, was man noch nicht weiß, während letztere den Bereich möglicher Repräsentationen epistemischer Dinge begrenzen. Repräsentationen epistemischer Dinge im Forschungsprozess bleiben dabei vage und unscharf. Epistemische Dinge stellen für Rheinberger keine Abbilder realer Objekte und schon gar nicht diese Objekte selbst dar. Sie verkörpern sich gleichsam im Zwischenraum zwischen Zeichen und Objekten. Rheinberger (2006) wie auch Latour und Woolgar (1986, S. 51) stellen entsprechend die Rolle zeichen-generierender Instrumente und Inskriptionen in den Naturwissenschaften heraus. "Das Wissenschaftsobjekt selbst besteht aus einer Konfiguration von Spuren" (Rheinberger, 2006, S.136).

Wissenschaftsobjekte manifestieren sich im Labor im Rahmen einer Semantik aus Zeigerausschlägen, Tabellen, Computer- oder Plotterdiagrammen. "Die epistemischen Dinge selbst sind Bündel von Inskriptionen" (ebd., S. 137), die dann entsprechend einer Hermeneutik der Dinge und ihrer zeichenhaften Repräsentation zugänglich gemacht werden müssen, deren Ziel es ist, Kohärenz zwischen Theorien, Gedanken, Praktiken, Materialien und Zeichen herzustellen. Hacking (1992) leitet aus dieser Idee einen kohärenztheoretischen Wahrheitsbegriff für die Naturwissenschaften ab, betont dabei die Rolle von Inskriptionen aber weit weniger als Latour oder Rheinberger. Er weist darauf hin, dass die eigentlichen Resultate in den Naturwissenschaften nicht die Objekte (z.B. das Elektron) sind, sondern eben diese Kohärenz. Dabei ist den Naturwissenschaften eine Tendenz der Selbst-Stabilisierung oder auch Selbst-Rechtfertigung eigen, denn Theorien, Instrumente und Methoden der Datenanalyse

are self-vindicating in the sense that any test of theory is against apparatus that has evolved in conjunction with it – and in conjunction with modes of data analysis. Conversely, the criteria for the working of the apparatus and for the correctness of analyses is precisely the fit with theory" (Hacking, 1992, S. 30).

Ähnlich betont Pickering (1993, S. 276ff), dass der Erfolg eines Experiments sich in der Kohärenz dreier Faktoren zeigt, die bei ihm "material procedure" (experimentelle Vorrichtungen mit konkreten Materialien und Objekten), "instrumental model" (Theorie der Instrumente) und "phenomenal model" (theoretisch-konzeptionelles Verständnis eines Phänomens) heißen. Für unabgeschlossene Experimente ist es demnach typisch, dass diese drei Bereiche nicht oder noch nicht kohärent zueinander stehen. Kohärenz wird durch "interactive stabilization" hergestellt und bezeichnet gleichsam den Zielzustand eines Experiments. Experimente enden nach dieser Idee nicht einfach, in dem ein Objekt unter gegebenen instrumentellen Erzeugungsbedingungen ein Signal hervorbringt. Vielmehr muss das Signal mit theoretischen Hintergrundannahmen in Einklang gebracht werden. Galison (1987, S. 259f) beschreibt in seinem Buch "How experiments end" diesen Prozess als Stabilisierungsprozess eines experimentellen Effekts und weist darauf hin, dass zugleich ein Prozess abläuft, der die zunehmend direkte Messung eines Objekts ermöglicht, in dem sich überlagernde Phänomene und störende Einflüsse minimiert werden. Der Stabilisierungsprozess eines Experiments umfasst nach allen genannten Autoren immer theoretische, materielle, instrumentelle und praktisch-manuelle Aspekte. Eine Fallstudie zur experimentellen Tätigkeit Michael Faradays, die mit der Idee der interaktiven Stabilisierung beschrieben werden kann, wurde bereits anderenorts publiziert (Höttecke, 2000a; 2001).

Mit dem Begriff des Experimentalsystems geht Rheinberger einen Schritt weiter und dehnt die Arbeitseinheit experimenteller Naturwissenschaften weit über theoretische und materiell-praktische Aspekte hinaus aus. Sie umfassen nun Objekte, Theorien, Instrumente und Experimente einerseits, andererseits aber auch disziplinäre, soziale, institutionelle und kulturelle Dispositionen (Hagner & Rheinberger, 1998, S. 359ff). Sie bilden fluktuierende und jeweils variierende Amalgame aus Elementen, die jeweils entweder der klassischen

Wissenschaftstheorie (z.B. Beobachtung, Daten, Theorie) oder der klassischen Wissenschaftssoziologie (z.B. Vertrauen, Autorität, scientific community) zugeordnet werden könnten. Der Vorteil eines so weit gefassten Begriffs liegt darin, dass möglichst viele für Naturwissenschaften konstitutive Aspekte in ihrem Zusammenhang berücksichtigt werden. Ein Nachteil kann ein Verlust an begrifflicher Schärfe sein (Hentschel, 1998, S. 18).

Naturwissenschaftliche Forschungsprozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sie Möglichkeitsräume für Neues aufspannen. Forschungsprozesse können produktiv sein. Das muss erklärt werden. Zwar ist es das Ziel von Forschungsprozessen, stabile, interpretierbare Signale in Form von Zeichen herzustellen, die in ein kohärentes Verhältnis zu Theorie und Praxis gebracht werden können. Die Grenzen eines Experimentalsystems dürfen aber nicht zu starr werden. Experimentalsysteme müssen laut Rheinberger

"einen Raum für das Auftreten von unvorwegnehmbaren Ereignissen schaffen. Um zu neuen Dingen vorzustoßen, muss das System destabilisiert werden – doch ohne vorherige Stabilisierung produziert es nur Geräusch. Stabilisierung und Destabilisierung bedingen einander" (Rheinberger, 2006, S. 97).

Was hier in einem weiten Sinn für Experimentalsysteme reklamiert wird, gilt im engeren Sinne auch für das Experimentieren. Die Dynamik naturwissenschaftlichen Experimentierens sollte nicht mit den post-hoc getroffenen Rationalisierungen in Publikationen verwechselt werden, die ein hochsystematisiertes Vorgehen suggerieren, das ganz unabhängig von publikationsstrategischen Überlegungen oder der Absicht sei, innerhalb der eigenen scientific community anerkannt zu werden. Kutschmann (1994, S. 289) weist darauf hin, dass die Naturwissenschaften der Neuzeit einen Anschein der "Selbstoffenbarung" der Natur hervorbringen, indem sie das praktische und absichtsvolle Handeln der Wissenschaftler geradezu bagatellisieren.

Der sogenannte neue Experimentalismus in Wissenschaftstheorie, -geschichte und -soziologie hat sich etwa seit 1980 detailliert um die Berücksichtigung des Experiments in der Wissenschaftsforschung bemüht, um einer starken Theorielastigkeit der Darstellung und Analyse von Naturwissenschaft entgegenzuwirken. Seit dem ist eine Reihe von Fallstudien entstanden, die dezidiert darüber Auskunft geben, was Experimentieren in den Naturwissenschaften sein kann.⁵ Experimentieren erscheint dabei als eine schillernde Aktivität. Experimentieren, Beobachten und Theoriebildung können in einem vielfältigen Verhältnis zueinander stehen (z.B. Hacking, 1993; Heidelberger & Steinle, 1998; Pickering, 1992). In diesem Zusammenhang ist Hacking's Diktum "experimentation has a life of its own" (Hacking, 1993, S. 150) bekannt geworden. Hacking weist darauf hin, dass Experimentieren von absichtsvollem Eingreifen charakterisiert ist. Statt dessen geht auf Immanuel Kant die bis heute populäre Anschauung zurück, Experimentieren sei ein Akt der Befragung der Natur durch einen Richter, dessen Begriffe zwar als apriorische Formen des menschlichen Verstandes vorgezeichnet sind, der aber gleichwohl in der Lage sei, der Natur klare Antworten abzuverlangen:

"Die Vernunft muss mit ihren Prinzipien, nach denen allein übereinkommende Erscheinungen für Gesetze gelten können, in einer Hand, und mit dem Experiment, das sie nach jenen ausdachte, in der anderen, an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, aber nicht in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötigt, auf die Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt" (Vorrede Kants zur 2. Aufl. der "Kritik der reinen Vernunft" von 1786, B XIII).

⁵ Für eine detaillierte Literaturanalyse vgl. Heering & Höttecke (accepted).

Die Kantische Auffassung vom Experiment erscheint im Lichte der jüngeren Ergebnisse der Wissenschaftsforschung problematisch. Kutschmann (1994) verweist darauf, dass die Richter-Metapher in Aporien mündet:

"Die intervenierenden Eingriffe des Experimentators schaffen erst die entscheidenden Voraussetzungen, aufgrund derer das Naturgeschehen als 'gesetzesartig' ausgezeichnet werden kann" (ebd., S. 297).

Weder von einer Befragung noch von klaren Antworten, die die Natur geben kann, kann die Rede sein, bedenkt man z.B. den enormen apparativen Aufwand, den moderne Großforschung benötigt. Die Fiktion einer passiven, im Experiment unbeeinflussten und befragbaren Natur scheitert bereits an den Einflüssen einer unhintergehbaren Leiblichkeit von Experimentatoren (Kutschmann 1994, 1986). Im Experiment werden keine Fakten an sich erzeugt. Diese Idee verbietet sich schon deshalb, weil Instrumente keineswegs nur Erweiterungen unmittelbarer menschlicher Beobachtungen sind. So ließen sich vielleicht gerade noch ein paar Kontaktlinsen verstehen, ein Spektrometer aber keinesfalls. Instrumente wie Beobachtungsprozesse selbst sind theoretisch hochgradig aufgeladen (z.B. Ziman, 2000, S. 90ff). In physikalischen Laboratorien sind es trainierte Experten/innen, die etwas beobachten, messen und für faktisch erklären. Ein Hochenergiephysiker zeigt auf einen Fleck in einem Streudiagramm und entwickelt eine klare Vorstellung vom Gemessenen. Ganz anders ein Laie, wenn er das gleiche Diagramm betrachtet. Ein Physiker würde andererseits in einer Taucherglocke in 5000 Meter Meerestiefe vermutlich zahlreiche Lebensformen völlig übersehen. Ein Meereszoologe (ebd.) wäre dagegen in der Lage, neue Lebensformen gewahr zu werden. Beobachtungen werden daher erst durch ein Expertenwissen ermöglicht, das Theorien, Konzepte, Begriffe aber auch experimentelle Routinen, Skills und Beobachtungsgewohnheiten umfasst.

So ergibt sich letztlich das folgende schillernde Bild vom Experiment in den Naturwissenschaften:

"According to a current understanding, a scientific experiment is rather an act of intervention where questions, interests, public and private perspectives, background knowledge and skills, an experimenter's body, instruments, rooms and spaces, material and theoretical entities and procedures interact towards the development of science within a cultural and societal context" (Heering & Höttecke, 2013).

Das Problem eines so schillernden Bildes des Experiments besteht darin, dass universelle Aussagen darüber, was DAS Experimentieren sei, kaum noch möglich scheinen. Der Wissenschaftshistoriker David Gooding meint dazu:

"There is no single history or philosophy of science because scientific practices are irreducibly various." (Gooding, 1997, S. 122)

Aus diesem Grund hat sich die Wissenschaftsforschung der vergangenen Jahrzehnte sehr zurückhaltend darin gezeigt, vereinheitlichende Theorieentwürfe über naturwissenschaftliche Praxis im Allgemeinen und das Experimentieren im Besonderen zu formulieren. Die Hoffnung, in den zahlreichen historischen Fallstudien wiederkehrende Muster zu erkennen, ist deshalb aber nicht aufgegeben worden (Hentschel, 1998, 2000).

Einen Systematisierungsversuch hat Steinle (1997) unternommen. Er unterscheidet theoriegeleitetes von explorativem Experimentieren. Mit dem Begriff des explorativen Experimentierens ist die systematische Variation experimenteller Parameter gemeint. Dabei wird das Ziel verfolgt, empirische Regelmäßigkeiten zu identifizieren. Diese experimentelle Strategie hat in jungen Forschungsfeldern eine große Bedeutung, indem sie dazu beiträgt, Klassifikationsschemata und Konzepte zu entwickeln auch wenn noch kein theoretisches

Erklärungswissen gesichert ist. Die Idee des explorativen Experimentierens ist bereits in die Unterrichtsentwicklung der Fachdidaktik eingeflossen (Henke & Höttecke, 2011).

Trumpler (1997) untersucht die Rezeption der Galvanischen Froschschenkelexperimente in Deutschland Ende des 18. Jahrhunderts. Dabei identifiziert sie weitere "Kandidaten" von Experimentalstrategien, die möglicherweise typisch für die Exploration neuer Phänomene sind, sofern das Forschungsgebiet theoretisch noch weitgehend unerschlossen ist. Dies ist z.B. für die Elektrizitätslehre des späten 18. und frühen 19. Jahrhunderts der Fall.⁶ Dabei kann man die Verifikation (prinzipielle Wiederholung eines Experiments zum Zweck der Bestätigung) von verschiedenen Formen der experimentellen Variation eines neuen Phänomens unterscheiden. Das Phänomen kann simplifiziert werden, um Eigenschaften des neuen Phänomens herauszupräparieren. Es wird optimiert und verstärkt, um es von anderen bereits bekannten Phänomenen experimentell unterscheiden zu können. Es wird exploriert, um allgemeine empirische Regeln formulieren zu können. Es kann angewendet werden, indem es auf bestimmte Zwecke hin modifiziert wird. Man könnte ergänzend zu Trumpler anführen, dass ein neues Phänomen abschließend kanonisiert werden kann. Das kann der Fall sein, wenn Kenntnisse dieses Phänomens als so grundlegend für eine Disziplin angesehen werden, dass es in den etablierten Bestand von Grundphänomenen (z.B. Fadenpendel) möglicherweise verbunden mit disziplintypischen Problemlösemustern (z.B. Energiebilanzen oder Differentialgleichungen) aufgenommen wird.

Hentschel (1998, S. 21f) benennt ebenfalls eine Reihe von Experimentalstrategien. Wird ein Messobjekt unter Laborbedingungen kontrolliert beeinflusst, spricht das für seine Existenz. Hacking konstatiert in einem realistischen Sinne entsprechend über die Existenz von Elektronen: "If you can spray them, then they are real" (Hacking, 1993, S. 22). Unter der empirischen Prüfung von Voraussagen versteht Hentschel, ein Testobjekt unter veränderten Laborbedingungen so zu testen, dass ein Vergleich mit Prognosen möglich wird. Er weist darauf hin, dass eine Bestätigung von Voraussagen immer eine Bestätigung des Funktionierens eines ganzen Experimentalsystems bedeutet. Von einem experimentellen Test einer Theorie oder gar einem Experimentum crucis zu sprechen, wie es Lehrwerke immer wieder getan haben, wird daher generell schwierig sein.⁷ Im Rahmen einer instrumentellen Eichung wird mit Hilfe eines bekannten Signals ein definierter Ausschlag festgelegt. Bei solchen Eichungs- oder auch Kalibrierungsvorgängen werden Instrumente für zukünftige Messungen präpariert. Dabei stehen die Elemente eines Experimentalsystems aber nicht in Frage, sodass das Gelingen oder Misslingen eines Eichungsprozesses weder theoretische Hintergrundannahmen noch die Annahme der Existenz eines Messobjekts gefährden. Ist die Existenz eines Messobjekts aber noch fraglich, dann können verschiedene Instrumenten- und Detektortypen eingesetzt werden. Sind die Messergebnisse konsistent, spricht das für die Existenz des Objekts. Die verschiedenen Messprozeduren stabilisieren sich also wechselseitig. Eine weitere wichtige Experimentalstrategie besteht in der Eingrenzung und Minimierung systematischer Fehlerquellen. Systematische Fehlerquellen können sich ergeben, wenn weitere Phänomene unter den gegebenen Erzeugungsbedingungen im Labor mit entstehen. Sie müssen entsprechend identifiziert werden. Durch Anpassung der Instrumente und Detektoren oder auch durch Anpassung der Messperformance (z.B. möglichst schnell messen, wenn Verluste elektrischer Ladungen drohen, Höttecke, 2001a) können systematische Fehlerquellen minimiert werden.

⁶ Die Elektrizitätslehre gilt in dieser Zeit noch als vorparadigmatisch wie anderenorts bereits gezeigt (Höttecke, 2001a, S. 279ff).

⁷ Eine grundlegende Kritik des experimentum crucis hat bereits Duhem (1978 [1908], S. 249ff) vorgelegt.

Ein geringer Grad an Theorie-Geleitetheit lässt sich auch experimentellen Strategien des "data-mining" unterstellen, wie sie erst durch computergestützte Datenerfassung möglich geworden sind. Wong und Hodson (2008) stellen im Rahmen einer Erhebung der Vorstellungen von Naturwissenschaftlern über Forschung und Wissen in den Naturwissenschaften fest, dass Technologien zur Generierung von Daten in der modernen Genetik auch ohne klaren Bezug zu wissenschaftlichen Hypothesen eingesetzt werden. Computergestützte Technologien ermöglichen es, Daten in einer Geschwindigkeit und in einem Umfang zu erfassen, dass die Technologien auch ohne klaren theoretischen Bezug eingesetzt werden. Die Datenerfassung hat seine Ursache gleichsam in der Verfügbarkeit der Technologien selbst, während theoretische Bezugspunkte untergeordnet sind.

Dass Experimentieren auch bedeuten kann, ein neues und für grundlegend erachtetes Phänomen zu etablieren und zu kommunizieren, zeigt eine Fallstudie um einen kleinen sogenannten Rotationsapparat⁸, den Michael Faraday 1821 konstruiert hat (Höttecke, 2000b). Ein kleiner Kupferdraht wird senkrecht so aufgehängt, dass er frei um einen stehenden Magneten rotieren kann. Wenn der Draht von einem elektrischen Strom durchströmt wird, kann er um den Magneten rotieren. Im Rahmen der Replikation des Instruments konnte gezeigt werden, dass das von Faraday angegebene Instrument mit einem sehr kleinen galvanischen Element betrieben werden kann. Das Phänomen basiert auf dem Oerstedt-Effekt. Während Ampère etwa zeitgleich Phänomene realisierte, die das tangentielle Wirken von Kräften demonstrieren sollten, bestand das neue grundlegende Phänomen für Faraday in der andauernden Rotation. Sein Demonstrations-Instrument versendete er zusammen mit einer Publikation an zahlreiche Naturphilosophen in England, Frankreich und Deutschland. Das Experiment diente ihm einerseits der Stabilisierung des Rotationsphänomens. Jenseits des unmittelbaren Labor-Kontexts nahm es kommunikative Funktionen an, um das Phänomen und sicher auch Faraday selbst als noch unbekannten Nachwuchswissenschaftler in der scientific community zu etablieren. Hier wird die kommunikative Funktion von Experimenten deutlich.

Freerks (2000) untersucht Fizeaus terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit im Jahr 1849 ebenfalls mit Mitteln der Replikation. Er zeigt, dass es Fizeau wesentlich um die Etablierung seines neuen Messprinzips, der heute auch in Lehrbüchern noch dokumentierten Zahnrad-Methode bestellt war. Das neue Messverfahren muss die c-Werte astronomischer Messmethoden als Referenzpunkte verwenden. Die Güte der neuen Methode musste sich gleichsam am Forschungsstand und damit an den Literaturwerten der Lichtgeschwindigkeit orientieren. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit diente der Etablierung eines neuen Messprinzips. Auch das kann eine mögliche Funktion eines Experiments sein.

Fazit

Die Wissenschaftsforschung hat auf die Frage, was wir unter einem Experiment in den Naturwissenschaften verstehen können, keine eindeutige Antwort, sondern viele. Dieser Befund steht im Kontrast zu Versuchen, in den Fachdidaktiken der Naturwissenschaften eine Art Konsens-Liste über zentrale Aspekte der Natur der Naturwissenschaften zu etablieren (z.B. Abd-El-Khalick, 2012; Lederman, 2007). Die Idee einer Konsens-Liste über Lehr-Lern-Inhalte zum Thema NoS wird daher m.E. recht kontrovers diskutiert (z.B. Allechin, 2011; Irzik & Nola, 2011; Duschl, 2012).

⁸ Ein Video des Rotationsapparates finden Sie neben weiteren Videos historischer Nachbauten unter <http://hidistet.wetpaint.com/page/Lernmaterialien> [25.09.2012].

Die Analyse hat bisher deutlich gemacht, dass die epistemische Strategie des Experimentierens nicht von Hintergrundbedingungen losgelöst werden kann, die von den verwendeten Instrumenten, den von ihnen verkörperten Theorien, weiteren theoretischen Hintergrundannahmen und sozialen Prozessen in der scientific community aufgespannt werden. Experimente können Beobachtungen und Daten generieren, die selbst der Interpretation bedürftig sind. Sie sind in keinem Fall "Antwortenmaschinen" auf von der Theorie aufgeworfene empirische Fragen, sondern führen ein vielfältiges Eigenleben. Das Ziel des Experimentierens lässt sich eher als Bemühen um Kongruenz experimenteller Praktiken mit theoretischen Annahmen deuten. Hypothesen zu testen kann dagegen nur als eine von mehreren experimentellen Strategien verstanden werden. Der Prozess des naturwissenschaftlichen Experimentierens wird in der Darstellung der Naturwissenschaftler/innen selbst mit Notwendigkeit verzerrt, wenn sie z.B. ihre Ergebnisse in Publikationen dokumentieren. Experimente sollten systemisch und prozessual verstanden werden, wie es der Begriff des Experimentalsystems nahe legt. Experimentieren als Prozess verstanden gleicht einem Schwebezustand, in dem Kongruenz gerade noch nicht erfolgreich hergestellt werden konnte. Dieser Zustand ist von Fragehaltungen und Unsicherheit geprägt, die ausgehalten werden müssen: Verstehe ich das Instrument, das ich einsetze, richtig? Messe oder beobachte ich nur ein Phänomen oder mehrere? In welchem Verhältnis steht meine Messung zu meinen theoretischen Ideen? Was muss ich mit dem Instrument anstellen, damit ich messe, was glaube ich, messen zu können? Wie erkenne ich systematische und zufällige Messunsicherheiten? Wie gehe ich mit Daten und Beobachtungen um, die ich nicht widerspruchsfrei interpretieren kann? Und so fort....

Die fachdidaktische Analyse hat dagegen gezeigt, dass der Umgang mit unsicherer Evidenz und das Problem der Stabilisierung experimenteller Systeme im Physikunterricht weitgehend vermieden werden. Davon zeugt der kritisierte Umstand, dass Experimentieren stark vorstrukturiert wird. Dieser Befund lässt starke Zweifel aufkommen, ob Physikunterricht authentisch im Sinne der Forschungsdisziplin Physik heißen darf. Die fachdidaktische Forschungs- und Entwicklungsarbeit der vergangenen Jahrzehnte hat sich mit Recht und erfolgreich an den Referenzpunkten Schüler/Kind und Kontext abgearbeitet. Die Natur der Naturwissenschaften und damit verbunden die Prozesshaftigkeit von Forschungsprozessen sind als Referenzpunkte authentischen Unterrichts noch kaum systematisch berücksichtigt worden. Die Entwicklung von forschend-entdeckendem Unterricht wird dem Prozesscharakter naturwissenschaftlicher Forschungsprozesse große Aufmerksamkeit schenken müssen, sofern der Referenzpunkt Naturwissenschaften für die Herstellung von Authentizität gegenüber seinen Alternativen präferiert wird. Lerngelegenheiten sollten, um in diesem Sinne authentisch zu sein, so beschaffen sein, dass theoretische Idee, experimentelle Handlungen, Instrumente und ihre Konstruktion, Daten und ihre Analyse ständig aufeinander bezogen werden können. Wir kommen nicht umhin, Experimentieren als einen unsicheren Schwebezustand anzuerkennen.

Literatur

- Allchin, D. (2011). Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science. *Science Education*, 95(3), 518-542.
- Baumeister, A. (1898). *Handbuch der Erziehungs- und Unterrichtslehre für höhere Schulen*, Bd. 4. München: Beck'sche Verlagsbuchhandlung, S. 10, zitiert nach Beck, V. v. (2009). "Man lasse doch die Dinge selber sprechen" - Experimentierkästen, Experimentalanleitungen und Erzählungen zwischen 1870 und 1930. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaft, Technik und Medizin*, 17(4), 387-414.
- Bell, T. (2007). Entdeckendes und forschendes Lernen. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physikmethodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.
- Bencze, J.L., & Giuseppe, M.d. (2006). Explorations of a Paradox in Curriculum Control: Resistance to Open-ended Science Inquiry in a School for Self-directed Learning. *Interchange*, 37(4), 333-361.