

Das Exemplarische und der Naturgesetzbegriff

Andreas Hüttemann

In Adelungs Wörterbuch von 1793 wird unter dem Eintrag „Exemplar“ auf verschiedene Verwendungsweisen dieses Ausdrucks im Verlagswesen aufmerksam gemacht:

Bey den Buchdruckern bedeutet Exemplar das Original einer Schrift, dasjenige, was bey dem Setzen eines Buches oder einer Schrift dem Setzer zum Muster dienet. [...] Bey den Buchhändlern hingegen ist Exemplar ein Stück der ganzen Auflage, ein Buch oder eine Schrift als ein Individuum betrachtet. Ein Exemplar von Gellerts Moral. Sechs Exemplare der Deutschen Bibel.¹

Ein Exemplar im Sinne der Buchsetzer ist ein konkretes Einzelding, das als Muster fungiert. Exemplare im Sinne der Buchhändler sind konkrete Einzeldinge, die dieses Muster exemplifizieren.

Dieser Gegensatz zwischen dem Exemplarischen im Sinne der Buchhändler und im Sinne der Buchsetzer lässt sich auch noch im heutigen Gebrauch des Ausdrucks unterscheiden. Einerseits wird unter ‚Exemplar‘ ein Beispiel oder Exempel verstanden, ein konkretes Einzelnes, das als Fall eines bereits bestimmten Allgemeinen begriffen und zur nachträglichen Veranschaulichung des Allgemeinen verwendet werden kann. Der Rabe Helmut ist ein Exemplar der Gattung der Rabenvögel, er dient in diesem Sinne auch als Exempel, Beispiel oder Illustration dafür, dass alle Raben schwarz sind. Andererseits bezeichnet ‚Exemplar‘ ein Einzelnes, das auch in allgemeiner Bedeutung verstanden wird, weil diesem Einzelding eine Muster- oder Modellfunktion zukommt.²

Ich möchte vorschlagen, den Begriff des Exemplarischen noch etwas weiter zu differenzieren und vier Bedeutungen zu unterscheiden:

- 1) Das Exemplarische im Sinne der Buchhändler: Ein Exemplar ist ein konkretes Beispiel eines Musters oder ein konkreter Anwendungsfall eines Gesetzes (konkret bedeutet in den meisten Fällen: raumzeitlich lokalisierbar).

¹ Adelung, Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart, Eintrag „Exemplar“.

² Vgl. dazu die Einleitung der Herausgeber.

- 2) Das Exemplarische als *vorbildliches* Beispiel: Auch hier ist ein Exemplar ein konkretes Beispiel eines Musters, ein konkreter Anwendungsfall eines Gesetzes – aber eines, an dem sich die charakteristischen Merkmale des Musters besonders deutlich erkennen lassen. Die Musterschülerin ist eine exemplarisch gute Schülerin, weil sie nicht nur eine gute Schülerin ist, sondern weil sie diejenigen Merkmale, die sie zu einer guten Schülerin machen, auf besonders deutliche Weise exemplifiziert.
- 3) Das Exemplarische im Sinne des Buchsetzers: Ein Exemplar ist ein konkreter Gegenstand, der anderen Gegenständen gegenüber eine Muster-, Modell- oder Vorbildfunktion hat.
- 4) Das Exemplarische als *abstraktes* Muster oder Modell: ein abstraktes Einzelnes, das in allgemeiner Bedeutung als Muster oder Modell verwendet werden kann, z. B. ein Entwurf für eine größere Anzahl von Häusern. (Dieser Sinn von Exemplarität knüpft an die Verwendungsweise von ‚Exemplar‘ im Kontext der mittelalterlichen Universaliendebatte an.)

Im Naturgesetzbegriff, so möchte ich in diesem Aufsatz zeigen, kommen zwei dieser Bedeutungen des Exemplarischen – das Exemplarische im Sinne der Buchhändler und das Exemplarische als abstraktes Muster oder Modell – zusammen. Während die konkreten Einzelfälle, auf die das Gesetz zutrifft, Beispielfälle für das Gesetz sind (das Exemplarische im Sinne des Buchhändlers), ist das abstrakte System, das in einer Gesetzesaussage beschrieben wird, ein abstraktes Einzelnes, das in allgemeiner Bedeutung, als Muster oder Modell, verstanden wird.

Im Folgenden werde ich als erstes fragen, welchen Inhalt Naturgesetzaussagen haben (Abschnitt 1). Dies ist deshalb von Bedeutung, weil eine angemessene Rekonstruktion Unterscheidungen ermöglicht, die auf zwei verschiedene Rollen des Exemplarischen in Naturgesetzaussagen hinweisen. In Abschnitt 2 werde ich zwei verschiedene Verwendungen von Generalisierungen innerhalb von Naturgesetzaussagen unterscheiden. Diese hängen eng mit den verschiedenen Begriffen des Exemplarischen zusammen (Abschnitt 3). In Abschnitt 4 werde ich ausführen, weshalb diese Unterscheidung verschiedener Bedeutungen des Exemplarischen für das Verständnis einiger Bereiche der wissenschaftlichen Praxis relevant ist. Abschnitt 5 zieht Verbindungslinien zwischen dem Begriff des Exemplarischen, dem Modellbegriff und dem Begriff des Paradigmas, der durch Thomas Kuhn prominent wurde.

1. Naturgesetzaussagen³

In diesem Absatz wird es nicht um den metaphysischen Charakter von Naturgesetzen gehen⁴, sondern darum, welchen Inhalt Naturgesetzaussagen oder Naturgesetze (ich werde beide Begriffe synonym verwenden) ausdrücken.

Galileis Fallgesetz soll hier als Ausgangspunkt für eine Betrachtung von Naturgesetzaussagen dienen. Mit dieser Entscheidung kommt schon eine Schwierigkeit ins Spiel, denn strenggenommen ist das Fallgesetz nicht wahr, sondern nur näherungsweise wahr, also falsch. Der Gesetzesbegriff setzt allerdings nach allgemeinem Verständnis Wahrheit voraus. Weder Galileis Fallgesetz noch die Newtonschen Gesetze sind also in diesem strengen Sinne Naturgesetze, bestenfalls sind die Einsteinschen Feldgleichungen geeignete Kandidaten. Für das Folgende hängt von einer strengen Betrachtung aber nichts ab und wir werden deshalb ohne Nachteil das Galileische Fallgesetz exemplarisch, d. h. als vorbildliches Muster für Naturgesetze schlechthin, betrachten.

Was ist nun das Galileische Fallgesetz? Man könnte zunächst denken, es sei die Gleichung

$$s = \frac{1}{2} gt^2 \quad (1)$$

wobei s für den zurückgelegten Weg, t für die Zeit und g für eine Konstante steht. Die Gleichsetzung von Gesetz und Gleichung führt aber zu Problemen. Üblicherweise fasst man Gesetze oder Gesetzesaussagen als diejenigen (vielleicht komplexen) Verallgemeinerungen auf, die bei Vorhersagen, Bestätigungen, Erklärungen und anderen Aspekten der wissenschaftlichen Praxis eine Rolle spielen. Mit dieser Charakterisierung einer Gesetzesaussage als Ausgangspunkt lässt sich aber als Konsequenz ableiten: Wenn eine Gesetzesaussage das ist, was in Versuchen bestätigt oder widerlegt wird (oder in den Kontexten der Erklärung, Vorhersage oder Manipulation verwendet wird), kann eine Gleichung für sich genommen kein Beispiel für ein Gesetz (oder eine Gesetzesaussage ~~– im Folgenden werde ich diese beiden Begriffe synonym verwenden~~) sein. Tatsächlich nimmt z. B. niemand an, dass Galileis Gesetz durch Kugeln, die gleichmäßig auf einer horizontalen Ebene rollen, oder durch

3 Ich greife hier und im Folgenden auf Überlegungen aus Hüttemann, *Minimal Metaphysics*, Kapitel 1, zurück.

4 Siehe dazu Jaag, Schrenk, *Naturgesetze*.

Steine, die auf dem Boden liegen, widerlegt wird, obwohl beide die Gleichung (1) nicht erfüllen. Was fehlt, ist eine Aussage über die Arten von Systemen, die durch die Gleichung repräsentiert werden sollen. Das Galileische Fallgesetz ist nicht einfach nur eine mathematische Gleichung. Es reicht auch nicht aus, hinzuzufügen, dass t die Zeit darstellt und s den Weg, den ein beliebiges Objekt zurücklegt. Das Galileische Fallgesetz ist die Behauptung, dass das Verhalten einer bestimmten Klasse von Systemen durch die obige Gleichung dargestellt werden kann. Das Galileische Fallgesetz könnte also etwa wie folgt formuliert werden:

Frei fallende Körper verhalten sich gemäß der Gleichung $s = \frac{1}{2}gt^2$.

Ganz entsprechend ist $F = ma$ lediglich eine mathematische Gleichung. Sie wird zu einer Gesetzesaussage, wenn behauptet wird, dass sie das Verhalten von physikalischen Systemen – in diesem Falle aller physikalischer Systeme überhaupt – darstellen soll. Auch die Schrödinger-Gleichung mit dem Coulomb-Potential ist für sich genommen keine Gesetzesaussage, d. h. sie ist nicht das, was wir bestätigen oder widerlegen. Im Gegensatz dazu ist die Behauptung „Wasserstoffatome verhalten sich gemäß der Schrödinger-Gleichung mit dem Coulomb-Potential“ eine Gesetzesaussage.

Die Tatsache, dass Gleichungen wie $s = \frac{1}{2}gt^2$ mit einer Klasse von Systemen einhergehen, für die sie relevant sein sollen, wurde auch von anderen schon festgestellt, z. B. im Rahmen der semantischen Auffassung von Theorien.⁵

Eine allgemeine Charakterisierung von Gesetzesaussagen könnte also folgendermaßen aussehen:

(A) Alle Systeme einer bestimmten Art K verhalten sich gemäß Σ .

Hier steht ‚ Σ ‘ – das Gesetzesprädikat – typischerweise für eine Gleichung oder eine Menge von Gleichungen. Der Ausdruck „von einer bestimmten Art K “ kann sich auf alle physikalischen Systeme beziehen, wie im Fall von Newtons zweitem Gesetz oder im Fall der bloßen Schrödinger-Gleichung. Oder es kann sich auf eine enger umschriebene Klasse von Systemen beziehen, wie z. B. frei fallende Körper oder Wasserstoffatome, wodurch sich sogenannte Systemgesetze ergeben. Es ist wichtig zu beachten, dass das Verhalten, das den fraglichen Systemen zugeschrieben wird, im Allgemeinen komplex und relational ist. Im Falle von frei fallenden Körpern stehen die Länge des Weges

5 Siehe z. B. Van Fraassen, *Laws and Symmetry*, 222. Van Fraassen spricht allerdings von Theorien und nicht von Gesetzen.

und die benötigte Zeit in Beziehung zueinander, und zwar nicht nur für die tatsächlichen Werte der Variablen, sondern für alle möglichen (oder einen begrenzten Bereich von möglichen, jedenfalls nicht nur für die tatsächlich angenommenen) Werte. Wenn man – wie in der älteren Literatur zum Naturgesetzbegriff üblich – Aussagen der Form „Alle Raben sind schwarz“ als paradigmatisch für Gesetzesaussagen nimmt, ignoriert man die komplexe Struktur, die Systemen mittels solcher Aussagen zugeschrieben werden kann.

Ein weiteres Beispiel, das die Struktur von Gesetzesaussagen illustriert, ist die euklidische Geometrie. Die euklidische Geometrie ist für sich genommen eine mathematische Theorie ohne jede empirische Bedeutung. Wir erhalten eine empirisch prüfbare Behauptung (ein Gesetz), wenn wir behaupten, eine bestimmte Klasse von Systemen (in diesem Falle also: Raum-Zeiten) lasse sich hinreichend durch die euklidische Geometrie charakterisieren.

Gesetzesaussagen, wie sie gerade charakterisiert wurden, spielen nicht nur in der Physik, sondern auch in anderen Disziplinen eine zentrale Rolle. So beschreiben die Lotka-Volterra-Gleichungen die zeitliche Entwicklung eines biologischen Systems, das aus zwei Populationen unterschiedlicher Arten besteht, wobei die eine eine Räuberpopulation, die andere eine Beutepopulation ist. Die relevanten Gleichungen für Beute- und Räuberpopulationen sind (1) $dx/dt = x(a - by)$ und (2) $dy/dt = -y(c - gx)$, wobei x die Anzahl der Beutetiere und y die Anzahl der Räuber darstellt und a , b , c und g Konstanten sind. Auch hier können wir zwischen dem System, für das die Gleichungen gelten, einerseits und den Gleichungen bzw. der Beschreibung des Verhaltens andererseits unterscheiden.

2. Interne und externe Generalisierungen

Die Charakterisierung von Gesetzesaussagen im Sinne von (A) erlaubt es mir, eine wichtige Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Verallgemeinerungen zu machen, die auf zwei verschiedene Bedeutungen des Exemplarischen im Kontext von Naturgesetzaussagen hinweist (vgl. dazu den nächsten Abschnitt). Betrachten wir wieder das Beispiel des Galileischen Fallgesetzes:

Frei fallende Körper verhalten sich gemäß der Gleichung $s = \frac{1}{2}gt^2$.

Auch wenn es oft keine expliziten Quantoren gibt, beinhalten Gesetzesaussagen in der Regel mindestens zwei verschiedene Arten von Verallgemeinerungen. Im Galileischen Fallgesetz können wir eine Form der Verallgemeinerung

unterscheiden, die über Systeme quantifiziert (für alle x , die fallende Körper sind). Diese Quantifizierung spezifiziert die Objekte (oder Systeme), denen mittels des Gesetzesprädikats eine bestimmte Art von Verhalten zugeschrieben wird. Neben Generalisierungen, die sich auf Objekte oder Systeme beziehen, gibt es systeminterne Generalisierungen. Diese Verallgemeinerungen beziehen sich auf die Werte der Variablen, die in der Gleichung vorkommen. Wenn wir behaupten, dass sich ein System gemäß der Gleichung $s = \frac{1}{2}gt^2$ verhält, so ist damit impliziert, dass für jeden Wert von t (oder einer großen Anzahl von Werten von t) der Weg s , den der Körper zurückgelegt hat, durch $s = \frac{1}{2}gt^2$ bestimmt ist.

Wir können also zwei Arten von Verallgemeinerungen unterscheiden⁶:

- 1) Systeminterne Verallgemeinerungen: Verallgemeinerungen, die sich auf die Werte von Variablen beziehen. Im Fall des Galileischen Fallgesetzes lautet die systeminterne Verallgemeinerung z. B., dass die Gleichung für alle Werte der Variablen t (oder zumindest für alle Werte innerhalb eines bestimmten Bereichs) gilt.
- 2) Systemexterne Verallgemeinerungen: Verallgemeinerungen, die verschiedene Systeme betreffen, so dass die Gleichung für alle Systeme einer bestimmten Art gilt (z. B. frei fallende Körper).

Im Falle der Lotka-Volterra-Gleichungen betreffen die internen Verallgemeinerungen die Variablen x (Anzahl der Beutetiere) und y (Anzahl der Räuber), während die externen Verallgemeinerungen ökologische Systeme, bestehend aus Beute- und Räuberpopulationen, betreffen.

In unserer Gesetzescharakterisierung (A) wird die systemexterne Verallgemeinerung („Alle Systeme einer bestimmten Art“) explizit erwähnt, während die systeminternen Verallgemeinerungen in Σ implizit enthalten sind. Ein Grund dafür, dass die internen Verallgemeinerungen nicht explizit gemacht werden, könnte die Tatsache sein, dass die Gesetzesgleichung in der Regel mehr als eine interne Verallgemeinerung zulässt und es der Kontext ist, der bestimmt, welche davon für die Charakterisierung eines bestimmten Phänomens relevant sind. Eine Gesetzesgleichung wie $pV = \nu RT$ lässt nicht nur den Schluss zu, dass, sobald die Werte für p und V gegeben sind, die von T bestimmt sind, sondern auch, dass die Werte für p und T die für V bestimmen, usw. Die Gesetzesgleichung impliziert also mindestens drei verschiedene interne Verallgemeinerungen. Welche davon für eine bestimmte Situation relevant ist, kann von den Größen abhängen, auf die wir Einfluss nehmen

⁶ Siehe Scheibe, Predication and Physical Law.

wollen, oder von anderen Merkmalen, die durch den Kontext bestimmt werden. In ähnlicher Weise ist, wenn wir behaupten, dass sich ein System gemäß der Gleichung $s = \frac{1}{2}gt^2$ verhält, nicht nur impliziert, dass für jeden Wert von t der Weg s durch $s = \frac{1}{2}gt^2$ bestimmt ist, sondern auch, dass für jeden Weg s die Zeit t , die der Körper zum Fallen gebraucht hat, durch $t = (2s/g)$ bestimmt ist. Die Gesetzesaussage erlaubt uns, beide Verallgemeinerungen aufzustellen.

Die Unterscheidung zwischen internen und externen Verallgemeinerungen geht mit einer Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von kontrafaktischen Konditionalaussagen einher, die Woodward und Hitchcock beschrieben haben.⁷ Erstens gibt es kontrafaktische Konditionalaussagen, die sich auf andere Objekte beziehen (*other object counterfactuals*). Beispiele für solche Aussagen sind: „Wenn b ein Rabe gewesen wäre, wäre es schwarz gewesen“ oder „Wenn b ein ideales Gas gewesen wäre, hätte es sich gemäß der Gleichung $pV = \nu RT$ verhalten“. Diese Art von kontrafaktischen Konditionalaussagen stützt sich auf externe Verallgemeinerungen, d. h. Generalisierungen, die über eine Klasse von Systemen, z. B. Raben, quantifizieren.

Woodward und Hitchcock kontrastieren kontrafaktische Konditionalaussagen, die sich auf andere Objekte beziehen, mit solchen, die sich auf dasselbe Objekt beziehen (*same object counterfactuals*). Diese beziehen sich auf ganz bestimmte Systeme, wie z. B. in der Aussage „Wenn das betrachtete ideale Gas ein Volumen $V=V_0$ und einen Druck $p=p_0$ gehabt hätte, wäre seine Temperatur $T=T_0$ gewesen“. Kontrafaktische Konditionalaussagen, die sich auf dasselbe Objekt beziehen, stützen sich auf interne Verallgemeinerungen, d. h. auf Generalisierungen, die über die Werte von Variablen quantifizieren.

Die Tatsache, dass Gesetzesaussagen mit internen Verallgemeinerungen einhergehen, ist ein Hinweis auf die Komplexität dessen, was Gesetzesaussagen behaupten. Nehmen wir das ideale Gasgesetz als Beispiel. Die Gesetzesaussage ist hochkomplex, weil sie ein funktionales Gesetz ist. Es impliziert eine unendliche Anzahl von Aussagen der Form „Wenn der Wert von p und der Wert von V eines bestimmten Gases so und so gewesen wären, dann wäre die Temperatur T so und so gewesen.“

Die Schrödinger-Gleichung liefert eine weitere Illustration der Komplexität von Gesetzesaussagen. Wenn wir behaupten, dass Wasserstoffatome durch die Schrödinger-Gleichung mit dem Coulomb-Potential charakterisiert werden können, umfasst das Σ in unserer kanonischen Aussage „Alle Systeme einer bestimmten Art K verhalten sich gemäß Σ “ den begrifflichen Apparat der Quantenmechanik. Wenn wir also sagen, dass sich Wasserstoffatome gemäß der Schrödinger-Gleichung mit dem Coulomb-Potential verhalten, sagen wir,

⁷ Woodward, Hitchcock, *Explanatory Generalizations*, S. 20.

dass sie sich gemäß der Quantenmechanik verhalten, in der die Schrödinger-Gleichung über das Coulomb-Potential konkretisiert wird. Der wesentliche Punkt ist, dass Gesetzaussagen Systemen, die bereits als von einer bestimmten Art identifiziert wurden, ein Verhalten zuschreiben, indem sie sich auf Gesetzesprädikate berufen, die typischerweise einen hochkomplexen mathematischen Apparat beinhalten. Diese Komplexität wird unsichtbar, wenn wir mit Beispielen der Art „Alle Raben sind schwarz“ arbeiten. Beispiele der letzteren Art sind irreführend, weil sie suggerieren, dass Gesetzaussagen allein auf der Basis von externen Verallgemeinerungen analysiert werden können. Diese Annahme prägte einen Großteil der Debatte über Naturgesetze im zwanzigsten Jahrhundert.

3. Generalisierungen und Begriffe des Exemplarischen

Die Unterscheidung interner und externer Generalisierungen und die der dazugehörigen kontrafaktischen Konditionale hängt eng mit zwei Bedeutungen des Exemplarischen zusammen. In externen Generalisierungen wird behauptet, dass eine Klasse von konkreten Einzeldingen Beispielfälle eines Musters, welches durch das Gesetzesprädikat Σ spezifiziert wird, sind – also Exemplare im Sinne der Buchhändler. In der Gesetzaussage „Alle Wasserstoffatome verhalten sich gemäß der (fallen unter die) Schrödinger-Gleichung mit einem Coulomb-Potential“ wird von Wasserstoffatomen behauptet, dass sie ein bestimmtes Verhalten exemplifizieren, dass sie konkrete Anwendungsfälle eines Musters bzw. Prädikats sind.

Ein großer Teil der Literatur zum Gesetzesbegriff des 20. Jahrhunderts hat Naturgesetze mit externen Generalisierungen der Form „Alle Raben sind schwarz“ identifiziert. Carnap schreibt beispielsweise:

Unsere alltäglichen Beobachtungen wie auch die systematischeren Beobachtungen der Wissenschaftler führen uns zu gewissen Wiederholungen und Regelmäßigkeiten in der Welt. Dem Tag folgt stets die Nacht; die Jahreszeiten wiederholen sich in der gleichen Ordnung; Feuer fühlt sich immer heiß an; Gegenstände, die wir los lassen, fallen abwärts; usw. Die Naturgesetze sind nichts anderes als Aussagen, welche diese Regelmäßigkeiten so genau wie möglich ausdrücken.⁸

Naturgesetzaussagen sind hier als Generalisierungen über Beispielfälle konzipiert und erschöpfen sich darin, konkrete Einzelfälle zusammenzufassen.

⁸ Carnap, Philosophie der Naturwissenschaft, S. 11.

Dies ist auch bei den heute noch vorherrschenden Naturgesetzkonzeptionen der Fall, die an David Lewis anschließen. Naturgesetzaussagen werden hier als Generalisierungen aufgefasst, die die konkreten Einzelfälle, die unter sie fallen, auf besonders geschickte Weise zusammenfassen.⁹

Für ein Verständnis einiger Bereiche der wissenschaftlichen Praxis mag eine solche Analyse von Naturgesetzaussagen ausreichend sein. Ich werde hier aber für die These argumentieren, dass manche Arten von Erklärungen und der Umstand, dass Naturgesetze eine Rolle bei der Manipulation von Systemen spielen, sich auf der Grundlage der Auffassung, Naturgesetzaussagen seien wesentlich externe Generalisierungen, nicht verstehen lassen. Vielmehr ist es notwendig, die Rolle interner Generalisierungen und damit – wie gleich gezeigt wird – die Rolle des Exemplarischen im Sinne eines abstrakten Musters oder Modells genauer zu untersuchen.

Das Gesetzesprädikat Σ umfasst typischerweise erstens eine Reihe physikalischer Größen, von denen manche variabel und andere konstant sind. Diese stehen zweitens zueinander in bestimmten Beziehungen, die durch mathematische Gleichungen repräsentiert werden. Drittens können die Variablen bestimmte Werte annehmen, und die internen Generalisierungen zeigen an, dass die Gleichungen für alle Werte oder für einen eingeschränkten Bereich von Variablenwerten gelten. Auf diese Weise wird ein abstraktes System festgelegt oder konstituiert, das als Modell für konkrete physikalische Systeme dienen kann. Im Fall des Galileischen Fallgesetzes haben wir die sich ändernden Größen Strecke s und Zeit t sowie eine Konstante g . Diese Größen stehen untereinander in einer Beziehung, die durch die Gleichung $s = \frac{1}{2}gt^2$ zum Ausdruck gebracht wird. Schließlich drücken die internen Generalisierungen über die Werte, z. B. für die Variable s , aus, dass diese Gleichung für alle Werte von s oder nur in „Erdnähe“, also einem eingeschränkten Bereich von Variablenwerten gelten soll. Damit haben wir das abstrakte Modell eines fallenden Körpers beschrieben. Die externe Generalisierung der Naturgesetzaussage hat nun zum Inhalt, dass das Verhalten einer bestimmten Klasse realer Systeme (Steine, Bleistifte oder was auch immer sonst zu Boden fällt) sich durch das Modell charakterisieren lässt.

Wir haben hier also ein Verhältnis vorliegen, das demjenigen zwischen den Exemplarbegriffen der Buchsetzer und der Buchhändler entspricht. Auf der einen Seite die konkreten Systeme, die einem Muster genügen (der Begriff des Exemplarischen im Sinne der Buchhändler), auf der anderen Seite das Muster selbst. Allerdings ist das Exemplar, Muster oder Modell hier, anders als im Falle

9 Verschiedene Konzeptionen unterscheiden sich darin, was unter „geschickt“ zu verstehen ist. Eine genauere Darstellung findet sich bei Jaag, Schrenk, Naturgesetze, Kapitel 2.2.

der Buchsetzer, kein konkreter Gegenstand, sondern in zweierlei Hinsicht abstrakt: Erstens handelt es sich nicht um einen raumzeitlich lokalisierbaren Gegenstand, und zweitens ist das Modell nicht vollständig bestimmt. Es lässt z. B. offen, welche Farbe und Form der fallende Gegenstand besitzt. Das Modell ist also im Blick auf die realen Gegenstände, die darunter subsumiert werden, idealisierend, indem einige Merkmale gar nicht berücksichtigt und andere vereinfacht werden (der fallende Körper als Punktteilchen).¹⁰

Fassen wir zusammen: Zwei Begriffe des Exemplarischen sind bedeutsam für ein Verständnis dessen, was mit Naturgesetzen ausgesagt wird. Das Gesetzesprädikat beschreibt ein Exemplar im Sinne eines abstrakten Modells oder Musters, unter das konkrete physikalische Systeme als Exemplare im Sinne von Anwendungsfällen subsumiert werden.

4. Modalität und die Praxis der Wissenschaften

In den Diskussionen über Naturgesetze im 20. Jahrhundert wurden Naturgesetze oft lediglich im Blick darauf betrachtet, dass in ihnen auf geschickte Weise Anwendungsfälle zusammengefasst werden. Damit gerät ein zentraler Aspekt dessen, was Naturgesetze aussagen, aus den Blick. Erst ein genauer Blick auf das Gesetzesprädikat, und damit auf das Exemplar oder Modell, das durch das Prädikat festgelegt wird, zeigt nämlich die *modale* Dimension des Inhalts von Naturgesetzaussagen (die ihrerseits zentral für ein Verständnis mancher Bereiche der Praxis der Wissenschaften ist), wie ich im Folgenden ausführen möchte.

In diesem Abschnitt werde ich zeigen, dass die Untersuchung des Exemplarischen im Sinne eines abstrakten Musters oder Modells eine reiche modale Struktur entdecken lässt, die die Charakterisierung des Verhaltens von Systemen bestimmt. Insbesondere werde ich die folgenden Behauptungen aufstellen:

- 1) Gesetzaussagen schreiben Systemen einen Raum von möglichen Zuständen zu.
- 2) Gesetze schränken die zeitliche Entwicklung von Systemen aufgrund von Gesetzesgleichungen ein.
- 3) Diese modalen Dimensionen sind für das Verständnis der Praxis der Wissenschaften, insbesondere dafür, dass Naturgesetze eine wichtige Rolle bei Manipulationen und Erklärungen spielen, zentral.

¹⁰ Zur Rolle von Idealisierungen siehe Hüttemann, *Idealisierungen und das Ziel der Physik*.

Möglichkeitsraum

Um die Rolle von internen Verallgemeinerungen in der wissenschaftlichen Praxis zu verstehen, müssen wir zwei Merkmale unterscheiden. Erstens quantifizieren interne Verallgemeinerungen über einen Bereich von Werten für Variablen, die als mögliche Anfangs- oder Randbedingungen dienen. Zweitens enthalten interne Verallgemeinerungen typischerweise eine Gesetzesgleichung. Die Gesetzesgleichung schränkt die Werte für die Variablen des Systems oder die Werte für Variablen, die die zeitliche Entwicklung der Zustände des Systems charakterisieren, ein oder bestimmt sie. Auf die Gesetzesgleichung werde ich weiter unten eingehen.

Gesetze weisen Systemen durch interne Verallgemeinerungen einen Raum von möglichen Zuständen zu. Bei dynamischen Gesetzen geht man davon aus, dass die Systeme eine Menge von möglichen Anfangszuständen haben. In Bezug auf diese Zustände können wir zwei Fälle unterscheiden. Entweder umfasst der Bereich der Quantifizierung alle möglichen Zustände der betrachteten Systeme (z. B. im Fall von Newtons zweitem Gesetz oder der Schrödinger-Gleichung) oder, wie es bei eingeschränkteren Gesetzen der Fall ist, umfasst der Bereich der Quantifizierung nur einen eingeschränkten Bereich von Zuständen. Das Hooke'sche Gesetz gilt z. B. nur für einen begrenzten Bereich von Dehnungen von Federn.

Wesentlich für unsere Untersuchung ist die Tatsache, dass wir es in beiden Fällen mit einer *modalen* Zuschreibung zu tun haben, denn es sind nicht nur aktuelle Zustände oder das aktuelle Verhalten, mit denen sich die internen Verallgemeinerungen beschäftigen. Tatsächlich sagt uns die interne Verallgemeinerung für sich genommen nicht einmal, welcher Zustand des Systems der tatsächliche (aktuelle) Zustand ist. Die interne Verallgemeinerung befasst sich nur mit dem möglichen Verhalten (ob tatsächlich oder nicht tatsächlich). Die Tatsache, dass interne Verallgemeinerungen mit einem Wertebereich für Variablen einhergehen, erfordert also die Annahme, dass Gesetzaussagen Systemen einen Raum von möglichen (und sich gegenseitig ausschließenden) Zuständen zuschreiben.

Viele Naturgesetze – insbesondere die dynamischen Gesetze fundamentaler physikalischer Theorien – lassen eine große Bandbreite von Anfangsbedingungen zu. Die Tatsache, dass Gesetze mit einer Reihe von möglichen Zuständen einhergehen, ist wesentlich für die Rolle, die Naturgesetze in der wissenschaftlichen Praxis spielen, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Ein Fall ist die Anwendung von Gesetzaussagen in technischen Kontexten. Nehmen wir an, eine Ingenieurin erwägt verschiedene Möglichkeiten, eine Brücke zu bauen. Konkret wird sie verschiedene Modelle für die Brücke in Betracht ziehen: Sie wird ein Szenario S₁ in Betracht ziehen, bei dem

die Brücke mit Materialien M_1 gebaut wird, und ein Szenario S_2 , bei dem die Brücke mit Materialien M_2 gebaut wird. Zunächst wird die Ingenieurin feststellen, was gemäß z. B. der Newtonschen Mechanik der Fall wäre, wenn die Brücken gebaut würden. Außerdem wird sie feststellen, was in diesen Modellen passieren würde, wenn bestimmte Parameter variiert würden: Ob die hypothetische Brücke stabil bliebe, wenn der Verkehr von einer bestimmten Art wäre, wenn sich die Wetterbedingungen ändern würden und so weiter. Ein Wissenschaftler oder eine Ingenieurin interessiert sich also nicht nur für das, was tatsächlich der Fall ist, sondern auch für das, was nicht der Fall, aber (nomologisch) möglich ist.

Allgemeiner kann man sagen, es ist für Entscheidungsfindungen konstitutiv, dass verschiedene Szenarien oder Abläufe miteinander verglichen werden. Wir stützen uns auf Naturgesetze, um zu erforschen, wie sich verschiedene Situationen entwickeln würden. Gesetze können diese Rolle nur deshalb spielen, weil sie mit einer Reihe von (möglichen) Ausgangsbedingungen einhergehen.

Beschränkungen

Im Vorangehenden habe ich dafür argumentiert, dass Gesetzesaussagen Systemen einen Raum von Möglichkeiten zuschreiben, und zwar aufgrund der Tatsache, dass interne Verallgemeinerungen über einen Bereich von Werten für Variablen quantifizieren, die sich gegenseitig ausschließende mögliche Zustände eines Systems darstellen. Ich möchte mich nun einem zweiten Aspekt des Exemplarischen im Sinne eines abstrakten Musters oder Modells zuwenden, der für die Untersuchung der modalen Struktur relevant ist, nämlich der Gesetzesgleichung.

Gesetzesgleichungen schränken den Raum des möglichen Verhaltens von Systemen ein, indem sie Beziehungen zwischen Variablen aufstellen. Diese Einschränkungen können entweder die synchrone Ko-Possibilität von Werten von Variablen betreffen, die den Zustand eines Systems charakterisieren – wie im Fall des idealen Gasgesetzes – oder die zeitliche Entwicklung der Zustände eines Systems – wie im Fall der Schrödinger-Gleichung.

Im Falle eines synchronen Gesetzes (Koexistenzgesetz), wie z. B. dem idealen Gasgesetz, ist die Menge der möglichen Werte für die Variablen p , V und T auf diejenigen beschränkt, die die Gleichung $pV = \nu RT$ erfüllen. Somit sind die möglichen Zustände des Gases auf eine zweidimensionale Hyperfläche des dreidimensionalen Raums beschränkt, die durch die Variablen p , V und T erzeugt wird. Die Gesetzesgleichung gibt nicht nur Auskunft darüber, wie der tatsächliche Zustand eines Systems (falls bekannt) beschränkt ist.

Sie sagt uns auch, wie alle möglichen Zustände des Systems eingeschränkt sind, unabhängig davon, ob diese tatsächlich realisiert sind oder nicht. Dass die Systeme eingeschränkt sind, bedeutet, dass die Zustände, die nicht auf der Hyperfläche liegen, für das System nicht zugänglich sind. Sie werden als Zustände eingestuft, die das System angesichts der Gesetzesgleichung unmöglich einnehmen kann, d. h. als nomologisch unmögliche Zustände. Der Bereich möglicher Zustände wird durch die Gesetzesgleichung also wieder eingeschränkt.

Die Tatsache, dass das Gas die Gleichung des Gasgesetzes erfüllt, erlaubt es einer Wissenschaftlerin, die in der Lage ist, Druck und Volumen zu manipulieren, sicherzustellen, dass das Gas eine bestimmte Temperatur hat. In ähnlicher Weise könnte ein Ingenieur bestimmte Situationen verhindern wollen, z. B., dass ein Gas eine bestimmte Temperatur erreicht. In solchen Fällen wird er sich auf die Tatsache verlassen, dass das Gesetz besagt, dass bestimmte Kombinationen von Druck, Volumen und Temperatur nicht auftreten können; indem wir Druck und Volumen entsprechend einstellen, können wir sicherstellen, dass ein bestimmter Temperaturwert nicht eintreten wird.

Das Gleiche gilt für Gesetzesgleichungen, die die zeitliche Entwicklung eines Zustands eines Systems beschreiben. Sofern wir das betrachtete System in einem bestimmten Zustand vorbereiten und sofern die betreffende Gleichung deterministisch ist, können wir sicherstellen, dass sich das System zu einem späteren Zeitpunkt in einem bestimmten Zustand befindet, und wir können auch verhindern, dass sich das System in bestimmten anderen Zuständen befindet.

Informationen darüber, was möglich ist und was nicht, werden benötigt, um zu wissen, wie man ein System so manipulieren kann, dass es einen bestimmten Zustand einnimmt oder nicht einnimmt, z. B. um sicherzustellen, dass eine Brücke bei dem erwarteten Verkehrsaufkommen nicht zusammenbricht.

Im Falle der Verhinderung geht es nicht nur darum, dass bei bestimmten Kombinationen von, sagen wir, Druck und Volumen, bestimmte Werte für T einfach nicht auftreten. Es gibt einen Sinn, in dem diese Werte nicht auftreten können. Der Gebrauch, den Wissenschaftler und Ingenieure von internen Verallgemeinerungen in der wissenschaftlichen Praxis machen, ist am besten zu verstehen, wenn man davon ausgeht, dass interne Verallgemeinerungen modale, d. h. nomologisch notwendige Beziehungen formulieren. (Wie sich diese Beziehungen metaphysisch ausbuchstabieren lassen, ob sie beispielsweise auf nicht-modale Sachverhalte reduzierbar sind, ist eine Frage, die im Rahmen dieses Textes nicht behandelt wird.)

Erklärungen

In den vorangegangenen Abschnitten habe ich erläutert, wie die modalen Dimensionen, die mit dem Exemplarischen als abstraktem Muster oder Modell verknüpft sind, es erlauben zu verstehen, welche Rolle Naturgesetze bei Manipulationen spielen, zu denen man sich durch den Vergleich verschiedener Szenarien oder Abläufe entschließt. Ich möchte nun noch auf einen weiteren Aspekt der Wissenschaftspraxis eingehen – die Praxis des Erklärens.

Erklärungen haben sicherlich manchmal die Form, die das deduktiv-nomologische Erklärungsmodell ihnen zuschreibt: Warum verhält sich ein System (näherungsweise) so-und-so? Weil es (näherungsweise) ein ideales Gas ist. Die Erklärung geschieht hier durch Subsumption unter das allgemeine Gesetz, dass sich alle idealen Gase so-und-so verhalten. Gemäß dem deduktiv-nomologischen Erklärungsmodell besteht eine Erklärung darin, dass ein System und sein Verhalten als Anwendungsfall und in diesem Sinne als Exemplar oder Anwendungsfall des Gesetzes ausgewiesen werden. Aber nicht alle Erklärungen lassen sich auf diese Weise verständlich machen.

Woodward und Hitchcock haben darauf aufmerksam gemacht, dass manche Erklärungen nicht allein deshalb erklärend sind, weil sie auf etwas hinweisen, was tatsächlich der Fall ist (dass ein Systemverhalten ein Anwendungsfall eines Gesetzes ist), sondern weil sie darüber hinaus modale Informationen liefern. Nach ihrer Darstellung können wir erklären, warum ein Gas G eine bestimmte Temperatur T_0 hat, indem wir zeigen, wie die Temperatur T von dem Druck p des Gases und seinem Volumen V *abhängt*, d. h. wie sich die Temperatur T ändern würde, wenn sich die Anfangs- und Randbedingungen auf verschiedene Weise ändern würden.¹¹

Nach Woodward und Hitchcock setzen Erklärungen nicht nur Informationen über das, was tatsächlich der Fall ist (dass etwas als Anwendungsfall unter ein Gesetz fällt), sondern auch über das nomologisch mögliche, aber nicht-aktuale Verhalten von Systemen voraus. Dieses mögliche, aber nicht-aktuale Verhalten wird durch die Gesetzesgleichung und den Bereich der Quantifizierung der internen Verallgemeinerung charakterisiert. Erklärungen, die Abhängigkeitsverhältnisse beschreiben, stützen sich auf nicht-aktuale, aber nomologisch mögliche Zustände des Gases und damit auf die modale Struktur, die die Gesetzesaussagen den Systemen mittels der abstrakten Muster oder Modelle zuschreiben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Exemplarische im Sinne eines abstrakten Musters oder Modells manches unbestimmt lässt. Dies gilt nicht nur, weil das Exemplarische in diesem Sinne von manchen Zügen

¹¹ Hitchcock, Woodward, *Explanatory Generalizations*, S. 4.

der Wirklichkeit ganz absieht (z. B. der Farbe des Fadenpendels), sondern auch, weil es mit Variablen operiert, deren Werte nicht festgelegt sind. Das Exemplarische charakterisiert so eine Vielzahl möglicher Systeme, die sich in unterschiedlichen Zuständen befinden können. Auf diese Weise eröffnet das Exemplarische einen Raum von Möglichkeiten, der aber durch die Gesetzesgleichungen eingeschränkt wird. Die Untersuchung des Exemplarischen im Sinne eines abstrakten Musters oder Modells erlaubt einem diese modale Dimension dessen, was Naturgesetze aussagen, zu entdecken, und auf dieser Grundlage manche Bereiche der Wissenschaftspraxis zu verstehen.

5. Exemplar, Modell, Paradigma

Abschließend noch einige kurze Bemerkungen über den Zusammenhang der Begriffe ‚Exemplar‘, ‚Modell‘ und ‚Paradigma‘: Anfangs mag es etwas überraschen, dass im Falle des Verlagswesens sowohl das Muster als auch das, was dem Muster genügt, ‚Exemplar‘ genannt wird. Man hat allerdings im Falle des Modellbegriffs eine ganz ähnliche Konstellation. Auf der einen Seite gibt es den Begriff des (idealisierenden) Modells, den ich in den vorangegangenen Abschnitten verwendet habe. Tatsächliche Systeme können als Anwendungsfälle unter ein bestimmtes idealisierendes Modell, das gewissermaßen eine vereinfachende Theorie liefert, fallen. Solche Anwendungsfälle können aber selbst wiederum als Modell verstanden werden – im Sinne des Modellbegriffs, wie er in der Semantik üblich ist. Um zu klären, mit welcher Art von Modellbegriff wir es zu tun haben, ist es hilfreich zu fragen, *wofür* oder in welcher Hinsicht etwas ein Modell ist. Ein idealisierendes Modell ist ein Modell für eine Reihe realer physikalischer Systeme, während die Beschreibung eines solchen Anwendungsfalls als Interpretation einer Theorie (eines idealisierenden Modells) aufgefasst werden kann, so dass die (vereinfachende) Theorie in Bezug auf die Interpretation wahr ist. Der Anwendungsfall gibt uns deshalb ein semantisches Modell.

Auch das Exemplarische ist immer exemplarisch in bestimmter Hinsicht. Das Exemplar im Sinne der Buchhändler ist ein Beispiel oder Anwendungsfall eines Musters. Das Exemplarische im Sinne des Musters wiederum ist exemplarisch in Bezug auf die tatsächlichen und möglichen Anwendungsfälle.

Nun gibt es neben dem semantischen und dem idealisierenden Modellbegriff noch mindestens einen weiteren, den *analogischen* Modellbegriff. Analogische Modelle sind Modelle für andere Phänomenbereiche. Die Hydrodynamik war z. B. im 19. Jahrhundert ein Modell für die Elektrodynamik: Das Fließen des Stromes wurde analog zum Fließen des Wassers konzipiert. Bei einem solchen

Modell sind zwei unterschiedliche Forschungsbereiche gegeben. Einer von beiden ist gut verstanden und wohl etabliert (z. B. die Hydrodynamik), in dem anderen hat man zwar einige Gleichungen aufgestellt, sucht aber noch nach Erklärungen. Der erste Bereich ist für den zweiten ein Modell, wenn die Beziehungen des zweiten auf die des ersten abgebildet werden können. Die Beschreibungen, die in beiden Gebieten oder bezüglich der jeweiligen physikalischen Systeme verwandt werden, sind analog.

An diesen analogen Modellbegriff knüpft Kuhn mit seinen Überlegungen zu einer Bedeutungsfacette des Paradigmabegriffs an: Paradigmata werden als Musterbeispiele (im Englischen: „*exemplar*“) verstanden. Ein Musterbeispiel erlaubt einem, Situationen oder Probleme als analog oder ähnlich zu klassifizieren.¹² Musterbeispiele (Exemplare) im Sinne Kuhns sind in den meisten Fällen das, was auch wir als exemplarisch beschrieben haben: abstrakte Muster oder Modelle. Allerdings ging es im vorliegenden Text darum, dass ein abstraktes Muster oder Modell, das durch die Gleichung im Fallgesetz oder im idealen Gasgesetz spezifiziert wird, ein Muster oder Modell für reale physikalische Systeme ist, während es bei den Musterbeispielen (Exemplaren) im Sinne Kuhns darum geht, dass die Beschreibung von Systemen in einem Phänomenbereich (z. B. der Hydrodynamik) ein Muster oder Modell und in diesem Sinne exemplarisch für die Beschreibung von Systemen in einem anderen Phänomenbereich (z. B. der Elektrodynamik) sein kann. Während im vorliegenden Text (wenn es nicht um das Exemplarische im Sinne eines Anwendungsfalls ging) das Exemplarische als ein abstraktes Modell oder Muster für reale (oder mögliche) physikalische Systeme und ihr Verhalten gedacht war, betrifft Kuhns Musterbeispiel das Verhältnis zweier (oder mehrerer) abstrakter Modelle oder Muster. Ein Modell ist demnach ein Musterbeispiel (Exemplar im Sinne Kuhns) für ein anderes Modell.

Literatur

- Adelung, J. C.: *Grammatisch-kritisches Wörterbuch der Hochdeutschen Mundart*, <http://www.zeno.org/Adelung-1793/A/Exempl%C4%81r,+das> (abgerufen am 26.05.2021), 1793–1801.
- Carnap, R.: *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaft*. Frankfurt a. M., Berlin 1986.
- Hüttemann, A.: *Idealisierungen und das Ziel der Physik*, Berlin 1997.

12 Vgl. dazu den Beitrag von Michael Esfeld in diesem Band, sowie Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, S. 199–203.

- Hüttemann, A.: *A Minimal Metaphysics for Scientific Practice*, Cambridge 2021.
- Jaag, S., Schrenk, M.: *Naturgesetze*, Berlin 2020.
- Kuhn, T.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M. 1976.
- Scheibe, E.: Predication and Physical Law. In: *Topoi* 10, 1991, S. 3–12.
- Van Fraassen, B.: *Laws and Symmetry*, Oxford 1989.
- Woodward, J., Hitchcock, J.: Explanatory Generalizations, Part I, A Counterfactual Account. In: *Nous* 37, 2003, S. 1–24.

