

## EXPERIMENT<sup>1</sup>

### 1 EINFÜHRUNG

Eines der wichtigsten Anwendungsfelder der in den letzten Kapiteln entwickelten kausalen Schlussverfahren bildet das Experiment. Bei typischen Experimenten handelt es sich jedoch nicht um einfache und mühelose Setzungen der Prüffaktoren in einer von zwei homogenen Testsituationen. Ihre kausale Struktur ist von erheblich höherer Komplexität als jene der bislang betrachteten ‚simplen‘ Differenz- oder Vierertests. Das vorliegende Kapitel behandelt deshalb die Übertragung unseres Verfahrens kausalen Schliessens auf den experimentellen Kontext sowie insbesondere die kausale Struktur typischer Experimente. Entwickelt werden soll diese Thematik an drei Beispielfällen, zum Ersten dem 1995 am *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* in Boulder, Colorado, durchgeführten Experiment zur Abkühlung gasförmiger Rubidium-Atome mittels eines so genannten „Bose-Einstein-Kondensators“, zum Zweiten anhand von Lavoisiers und Laplaces Experiment zur Messung der Verbrennungswärme aus dem Jahr 1778 und zum Dritten am Beispiel der 1931/32 erfolgten Entdeckung des Harnstoffzyklus durch die beiden Biochemiker Hans Krebs und Kurt Henseleit.

### 2 BEISPIEL I: DIE BOSE-EINSTEIN-KONDENSATION

1995 gelang es einer Forschergruppe des *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* (JILA) in Boulder, Colorado, eine in den 1920er Jahren von Albert Einstein und dem indischen Physiker Satyendra N. Bose aus quantenstatistischen Überlegungen abgeleitete theoretische Prognose experimentell zu bestätigen.

Bei normalen Temperaturen haben Gasatome in einem Behälter höchst unterschiedliche Geschwindigkeiten; das heisst, manche sind energiereicher als andere. Einstein sagte nun vorher, dass bestimmte Quantenpartikel – nämlich solche mit ganzzahligem Gesamtspin, später Bose-Teilchen genannt – bei ausreichender Abkühlung fast ausnahmslos dasselbe tiefstmögliche Energieniveau besetzen würden. (Hingegen können der Quantentheorie zufolge Partikel mit halbzahligem Spin prinzipiell nicht ein und denselben Zustand einnehmen.)

Mathematisch ausgedrückt besagt dies, dass die Wellenfunktionen von Atomen, sofern deren Gesamtspin ganzzahlig ist, bei extremer Kühlung zu einer einzigen verschmelzen. Somit werden, da die Wellenfunktion sämtliche physikalischen Eigenschaften wie Ort und Geschwindigkeit beschreibt, die einzelnen Atome gänzlich ununterscheidbar.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Dieses Kapitel orientiert sich an Graßhoff, Casties und Nickelsen (2000).

<sup>2</sup> Cornell und Wieman (1998), S. 44.

Zum experimentellen Nachweis dieser so genannten *Bose-Einstein-Kondensation* bzw. zur experimentellen Herstellung eines so genannten *Bose-Einstein-Kondensates* mussten die Forscher vom JILA in einem komplexen Verfahren, das ein fein abgestimmtes Zusammenspiel von Laserkühlung, magnetischer Wärmeisolation und Verdunstungskühlung erfordert, zirka 2000 Rubidiumatome auf weniger als 100 Nanokelvin abkühlen. Versuchsaufbau und -durchführung beschreiben die an diesem Forschungsprojekt beteiligten Physiker Eric Cornell und Carl Wiemann folgendermassen:

Kernstück unserer Apparatur ist eine kleine, von einigen Drahtwicklungen umhüllte Glaszelle (...). Darin erzeugen wir ein möglichst perfektes Vakuum und lassen dann eine winzige Spur Rubidiumgas einströmen. Sechs Laserstrahlen kreuzen sich im Mittelpunkt der Zelle und treiben dort durch ihren Strahlungsdruck die Rubidiumatome zusammen. Da die Strahlung nicht intensiv zu sein braucht, verwenden wir kostengünstige Diodenlaser, wie sie für normale CD-Wiedergabe gebräuchlich sind.

Die Frequenz der Laser stellen wir so ein, dass die Rubidiumatome die auftreffende Strahlung absorbieren (die sie sofort wieder emittieren). Ein Atom vermag pro Sekunde mehrere Millionen Photonen aufzunehmen, wobei ihm die Strahlungsquanten jeweils einen schwachen Stoss in ihrer Bewegungsrichtung versetzen. Die Wirkung all dieser Kollisionen macht insgesamt den Strahlungsdruck aus.

Der Trick dabei ist nun eine sorgfältig eingestellte minimale Verringerung der Laserfrequenz gegenüber der Absorptionsfrequenz: Weil die dem Atom entgegenkommenden Photonen aufgrund des Doppler-Effekts scheinbar leicht erhöhte – und somit für das Atom gerade richtige – Frequenzen haben, absorbiert es sie bevorzugt, wird dadurch abgebremst und somit gekühlt (...).

Bei unserem Aufbau wirken die sechs in der Mitte der Zelle gekreuzten Laserstrahlen zugleich als Falle, welche die gekühlten Partikel von der in der Glaswandung herrschenden Umgebungswärme fernhält. Das Prinzip ähnelt dem der Kühlung: Ein schwaches Magnetfeld stimmt die Resonanz der Atome so ab, dass sie vorwiegend diejenigen Photonen absorbieren, die von aussen zum Zentrum unterwegs sind. Auf diese Weise drängt der Strahlungsdruck die Atome im Kreuzungspunkt der Strahlen zusammen und hält sie dort fest.

So lassen sich binnen einer Minute aus dem Rubidiumdampf zehn Millionen Atome in der Laserfalle sammeln. Sie werden zugleich auf etwa 40 Mikrokkelvin (millionstel Kelvin) abgekühlt. Doch selbst dieser extrem niedrige Wert ist für ein Bose-Einstein-Kondensat immer noch hundertfach zu hoch, denn die unvermeidlichen Zusammenstösse mit Laser-Photonen verhindern, dass die Ansammlung von Atomen noch kälter oder dichter wird. (...)

Darum schalten wir jetzt die Laser ab und gehen zur zweiten Kühlstufe über, die eigentlich für die Wasserstoff-Kondensation entwickelt worden war. In einem äusseren Magnetfeld verhält sich jedes Atom wie ein winziger

Stabmagnet und erfährt darum eine gewisse Kraft. Ein passend geformtes und relativ starkes Feld vermag deswegen Atome einzusperren; sie bewegen sich darin gleichsam nur noch wie Kugeln in einer tiefen Mulde. Gleichzeitig setzt Verdunstungskühlung ein, weil die energiereichsten Atome der Magnetmulde entkommen und dabei überdurchschnittlich viel Energie mitnehmen; dadurch kühlen die verbleibenden weiter ab (...).

Um zu überprüfen, ob tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat entstanden ist, machen wir eine sogenannte Schatten-Momentaufnahme der tiefgekühlten Gaswolke. Das winzige Gebilde ist mit blossen Auge kaum auszumachen, weil die Atome sich während der Abkühlung auf dem tiefsten Punkt der Magnetmulde zusammendrängen. Damit es sich wieder etwas ausdehnt, schalten wir die begrenzenden Felder ab und durchleuchten die Zelle nach einer Zehntelsekunde mit einem Laserblitz. Weil die in alle Richtungen strebenden Atome einen Teil der Strahlung streuen, werfen sie einen Schatten, den wir per Videokamera aufnehmen. Daraus lassen sich die Geschwindigkeitsverteilung der Atome und die Temperatur der Wolke ermitteln.<sup>3</sup>

Dass diese Verbindung aus Experimentaufbau und -durchführung nicht im blossen Instantiieren eines Prüffaktors und anschliessendem Auftreten einer einzelnen Wirkung besteht, liegt auf der Hand. Das hier beschriebene Experiment zur Herstellung und Messung eines Bose-Einstein-Kondensates besteht aus der Verkettung einer Vielzahl von Teilprozessen und Zwischenschritten. Abbildung XI.1 auf Seite 255 stellt den gesamten Versuch der Bose-Einstein-Kondensation schematisch und unterteilt in seine Teilprozesse als komplexen Kausalgraphen dar. Der nächste Abschnitt analysiert die verschiedenen Teilschritte eines typischen Experimentes genauer und fasst sie zu Gruppen und Kategorien zusammen.

### 3 KAUSALE PROZESSE IM EXPERIMENT

Um zu prüfen, ob sich die gasförmigen Rubidium Atome bei ausreichender Kühlung tatsächlich, wie von Einstein und Bose vorhergesagt, wie ein einzelnes Atom verhalten, ist eine aufwendige Apparatur erforderlich, welche die Temperatur des Rubidiums in einem aus zwei Teilschritten – ‚Laserkühlung‘ und ‚Verdunstungskühlung in der Magnetfalle‘ – bestehenden Kühlungsprozess auf unter 100 Nanokelvin senkt. Dieser gesamte Kühlungsprozess ist erforderlich, um den im vorliegenden Experiment getesteten Prüffaktor ‚Temperatur kleiner 100 Nanokelvin‘ ( $A$ ) auf seine kausale Relevanz für die untersuchte Wirkung ‚Bildung eines Bose-Einstein-Kondensates‘ ( $W$ ) überhaupt zu instantiieren. Mit dem eigentlich untersuchten Prozess – der kausalen Abhängigkeit von  $A$  und  $W$  – hat diese Kühlungsprozedur nichts zu tun. Ist die Abkühlung des Rubidiums auf die erforderliche Temperatur erfolgt und damit der Prüffaktor instantiiert, ist ein weiterer kausaler Teilprozess des Experimentes erforderlich, um zu prüfen, ob die Wirkung eingetreten ist oder nicht. Bose-Einstein-Kondensate sind nicht direkt sichtbar, sondern

<sup>3</sup>Cornell und Wieman (1998), S. 46.

müssen erst sichtbar gemacht werden.

Wir können im Bose-Einstein-Kondensationsexperiment also drei kausale Teilprozesse unterscheiden: einen *Herstellungsprozess*, einen *Untersuchungsprozess* und einen *Messprozess*.

- (i) *Herstellungsprozesse* sind Prozesse, mittels derer untersuchte Prüffaktoren instantiiert und geeignete Hintergrundbedingungen ‚hergestellt‘ werden. Herstellungsprozesse schaffen die Voraussetzungen für den Ablauf des gewünschten Untersuchungsprozesses. So besteht etwa der Herstellungsprozess im Fall des Bose-Einstein-Kondensationsexperimentes aus den beiden Kühlungsphasen in Verbindung mit der diese überhaupt erst ermöglichenden Apparatur.
- (ii) *Untersuchungsprozesse* sind die kausalen Prozesse, die im Experiment ‚untersucht‘ werden. Sie bestehen in der potentiellen kausalen Abhängigkeit von Prüffaktor(en) und untersuchter/n Wirkung(en). Im Bose-Einstein-Kondensationsexperiment ist der Untersuchungsprozess der kausale Einfluss einer Temperatur kleiner als 100 Nanokelvin auf die Bildung eines Bose-Einstein-Kondensates.
- (iii) *Messprozesse* schliesslich weisen das Ergebnis des Untersuchungsprozesses in einer dem Experimentator zugänglichen Form nach. Sie beantworten die Frage, ob die untersuchte Wirkung bei besetztem Prüffaktor eingetreten ist oder nicht, indem sie das Eintreten oder Ausbleiben der Wirkung mit einem Ausschlag einer Messapparatur verknüpfen.

Ein weiteres Beispiel soll in der Folge zeigen, dass die kausale Struktur vieler typischer Experimente eine solche Dreiteilung gestattet.

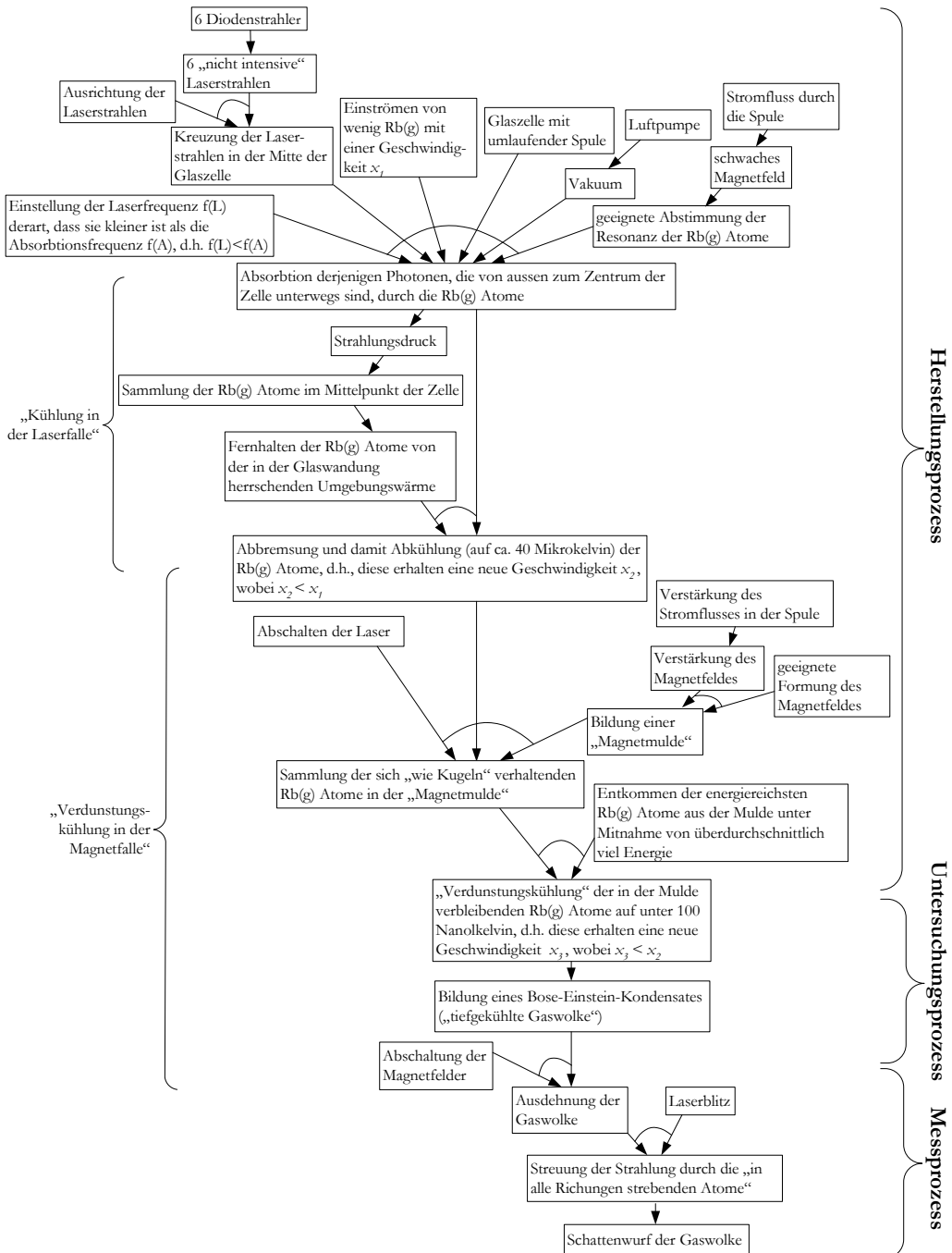


Abb. XI.1: Kausalgraph zur Bose-Einstein-Kondensation

## 4 BEISPIEL II: EISKALORIMETER

1778 führten der Chemiker Antoine Laurent Lavoisier und der Physiker Pierre Simon de Laplace eine Reihe von Experimenten zur Messung von Wärmemengen durch. So wollten sie etwa die Wärmemengen bestimmen, die in verschiedensten Körpern speicherbar sind oder bei deren Verbrennung abgegeben werden, oder sie interessierten sich auch für die Wärme, welche die Atmung von Tieren freisetzt. Diese Wärmemessungen setzten, damit Messresultate nicht durch die Umgebungswärme gestört wurden, einen wärmeisolierten Versuchsraum voraus. Eigens zu diesem Zweck konstruierten Lavoisier und Laplace eine neuartige Versuchsanordnung, den so genannten *Eiskalorimeter*.

Der Eiskalorimeter bestand aus einem von zwei Eisschichten umgebenen Hohlraum, in den die Substanzen eingebracht wurden, deren Wärme bestimmt werden sollte.<sup>4</sup> Damit der Wärmeaustausch zwischen Hohlraum und der ihn umgebenden Atmosphäre möglichst gering gehalten werden konnte, war der Eiskalorimeter – insbesondere bei Messungen der Verbrennungswärme – nur bei ausreichend tiefer Aussentemperatur, d.h. nur im Winter, zu gebrauchen. Die im Innern des Eiskalorimeters platzierten Körper schmolzen mittels der in ihnen gespeicherten oder bei ihrer Verbrennung frei werdenden Wärme das Eis der inneren Schicht. Dieses Schmelzwasser wurde gesammelt und als Mass für die zu bestimmende Wärmemenge genutzt. Im folgenden Zitat beschreiben Lavoisier und Laplace in eigenen Worten Aufbau und Durchführung eines mit Hilfe des Eiskalorimeters durchgeführten Experimentes zur Bestimmung der Wärmemenge, die bei der Verbrennung von einer Unze Kohle entsteht.<sup>5</sup>

Stelle man sich nun vor, in einer Atmosphäre, deren Temperatur über  $0^{\circ}$  ist, eine Hohlkugel von Eis von der Temperatur  $0^{\circ}$ , und im Innern derselben einen Körper, der auf irgend einen Grad erhitzt ist: aus dem, was wir gesagt haben, folgt, dass die äussere Wärme nicht eindringen wird in die Höhlung der Kugel und dass die Wärme des Körpers sich nicht nach aussen zerstreuen, sondern beschränkt bleiben wird auf die innere Oberfläche der Höhlung, von der er immer neue Lagen abschmelzen wird, bis die Temperatur dieses Körpers auf  $0^{\circ}$  heruntergegangen sein wird. Man hat nicht zu fürchten, dass die Schmelzung des innern Eises bedingt sei durch andere Ursachen als durch die vom Körper verlorene Wärme, da dies Eis vor der Einwirkung jeder andern Wärme bewahrt ist durch die Dicke des Eises, welches es von der Atmosphäre trennt, und aus demselben Grunde kann man versichert sein, dass alle Wärme des Körpers, indem sie verloren geht, festgehalten wird durch das innere Eis und einzig und allein verwendet wird, es zu schmelzen. Hieraus folgt, dass, wenn man mit Sorgfalt das Wasser sammelt, welches in der Höhlung der Kugel eingeschlossen ist, wenn die Temperatur des Körpers auf  $0^{\circ}$

<sup>4</sup>Vgl. Abbildung XI.2, S. 257 unten.

<sup>5</sup>Die Abhandlung Lavoisiers und Laplaces erschien 1780 in Französisch: Lavoisier und de Laplace (1862 (1780)). Wir zitieren hier die deutsche Übersetzung von 1892.

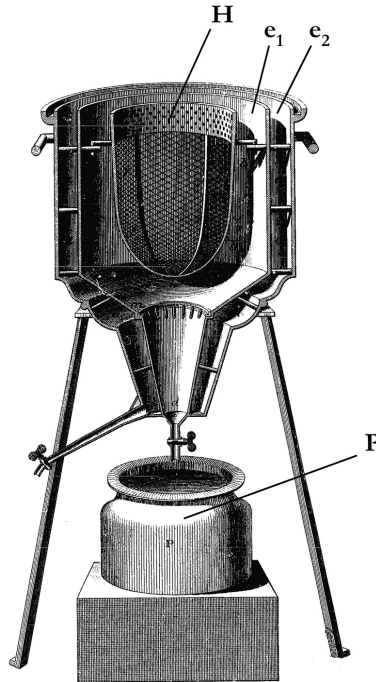


Abb. XI.2: Der von Lavoisier und Laplace konstruierte Eiskalorimeter im Querschnitt, vgl. Lavoisier und Laplace (1780), planche II (Die Bezeichnungen stammen nicht von Lavoisier und Laplace).  $e_1$  und  $e_2$  bezeichnen die Stellen, an denen Eis eingebracht wurde. Im Hohlraum H wurden die untersuchten Substanzen platziert. Die ganze Apparatur wurde bei Messungen von in jeweiligen Untersuchungsgegenständen gespeicherten Wärmemengen mit einem luftdichten, bei Verbrennungsexperimenten oder Tierversuchen mit einem luftdurchlässigen Deckel verschlossen. Der Behälter P sammelte das von  $e_1$  weggeschmolzene Wasser, dessen Gewicht als Mass zur Bestimmung der gesuchten Wärmemenge diente.

gesunken ist, sein Gewicht genau proportional sein wird der Wärme, welche dieser Körper verloren hat, indem er von seiner ursprünglichen Temperatur zu der des schmelzenden Eises abgekühlt wurde. Denn es ist klar, dass eine doppelt so grosse Wärmemenge doppelt so viel Eis schmelzen muss, derart, dass die Menge des geschmolzenen Eises ein sehr genaues Maass [sic!] der Wärme ist, welche diese Wirkung hervorgebracht hat.<sup>6</sup>(...)

Die Bestimmung der Wärme, welche die Verbrennung und die Athmung erzeugen, bietet nicht mehr Schwierigkeiten. Man verbrennt die verbrennbaren Körper im Innern der Kugel; man lässt die Thiere in ihr athmen. Da aber die Erneuerung der Luft unumgänglich nöthig ist bei diesen beiden Opera-

<sup>6</sup>Lavoisier und de Laplace (1892 (1780)), S. 12.

tionen, wird es nothwendig sein, eine Verbindung zwischen dem Innern der Kugel und der umgebenden Atmosphäre herzustellen und, damit die Einführung der neuen Luft keinen merklichen Fehler in den Resultaten erzeuge, muss man diese Versuche bei einer Temperatur machen, die nur wenig von 0 verschieden ist, oder mindestens die Luft, die man einführt, auf diese Temperatur abkühlen.<sup>7</sup>(...)

Wir nahmen ein kleines irdenes Gefäss und liessen es trocknen. Nachdem es auf eine Waage gestellt und sehr genau tarirt war, brachten wir glühende Kohlen hinein und bliesen darauf, um sie rothglühend zu erhalten. Wir benutzten den Augenblick, wo ihr Gewicht 1 Unze war, und schlossen sie sofort in einen unserer Apparate ein. Ihre Verbrennung im Innern des Apparates wurde mit Hilfe eines Blasbalges unterhalten. Sie waren in 32 Minuten verzehrt. Zu Beginn des Versuches zeigte das äussere Thermometer  $1\frac{1}{2}^{\circ}$ . Es stieg bis auf  $2\frac{1}{2}^{\circ}$  während des Versuches. Der gut ausgetropfte Apparat lieferte 6 Pfd., 2 Unzen geschmolzenen Eises. Das ist das Product der Verbrennung von 1 Unze Kohle.<sup>8</sup>

Lavoisier und Laplace illustrierten den von ihnen verwendeten Eiskalorimeter mit Hilfe des Querschnittes in Abbildung XI.2.

Abbildung XI.3 auf Seite 259 stellt die kausale Struktur dieses Experimentes zur Messung der bei der Verbrennung von einer Unze Kohle entstehenden Wärme dar. Wie beim Bose-Einstein-Kondensationsexperiment ist auch in diesem Fall eine deutliche Dreiteilung der gesamten kausalen Struktur des Experimentes in Herstellungs-, Untersuchungs- und Messprozesse erkennbar.

🐼 ÜBUNG: *Teilprozesse des Experiments*

## 5 KAUSALES SCHLIESSEN UND QUANTITÄTEN

### 5.1 QUANTITATIVE KAUSALFAKTOREN

Abgesehen von ihrer übereinstimmenden Gliederung in Herstellung-, Untersuchungs- und Messprozesse weisen die Experiment-Beispiele I und II noch eine weitere augenfällige Gemeinsamkeit auf. Anders als die bei der Einführung des Aufbaus von Differenz- und Vierertests in den letzten Kapiteln exemplarisch besprochenen Untersuchungsprozesse beinhalten die Experimente I und II nicht ausschliesslich qualitative, sondern auch quantitative Kausalfaktoren. Im Unterschied zu qualitativen Ereignistypen schreiben quantitative Faktoren ihren Instanzen nicht bloss Eigenschaften oder Qualitäten zu, sondern darüber hinaus auch Werte auf Messskalen. So attribuiert beispielsweise der Wirkfaktor ‚6 Pfund und 2 Unzen entstandenes Schmelzwasser‘ seinen Instanzen nicht einfach die Eigenschaft, ein Gewicht zu haben, vielmehr ordnet er diesem Gewicht auch einen bestimmten Wert zu.<sup>9</sup>

<sup>7</sup>Lavoisier und de Laplace (1892 (1780)), S. 15.

<sup>8</sup>Lavoisier und de Laplace (1892 (1780)), S. 28.



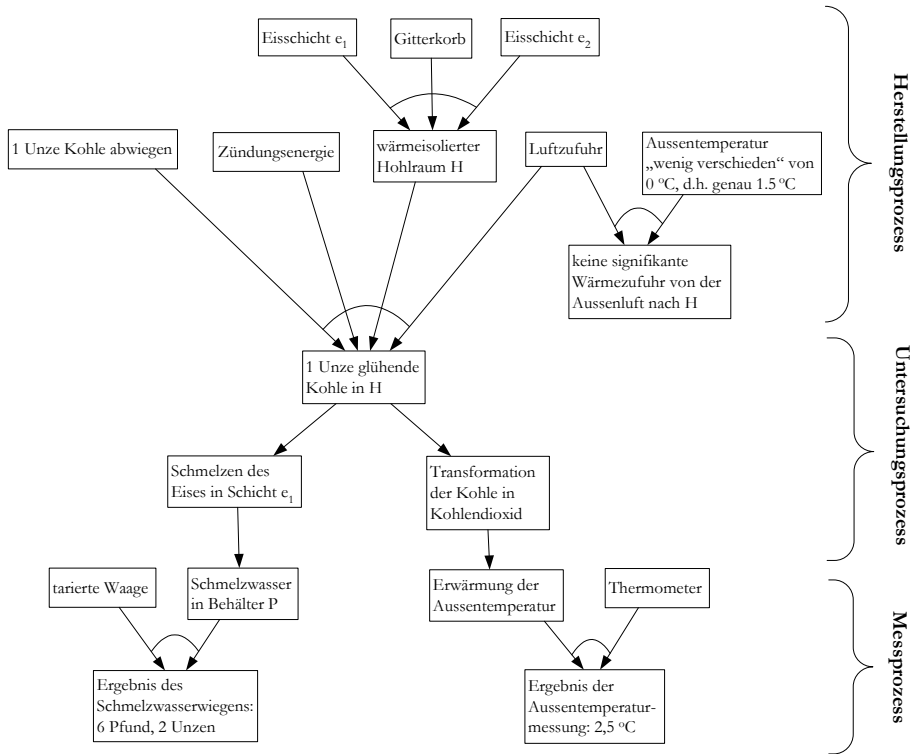


Abb. XI.3: Kausale Struktur des Wärmemessungsexperimentes von Lavoisier und Laplace.

In den Untersuchungsprozess des Bose-Einstein-Kondensationsexperimentes ist nur auf Seiten der Wirkung ein qualitativer Faktor involviert. Die Charakterisierung als Bose-Einstein-Kondensat ist eine Eigenschaft, die einer tiefgeköhlten Gaswolke zugeschrieben oder abgesprochen werden kann. Dieser Wirkfaktor kennzeichnet mithin keine Quantität bzw. keinen Messwert einer Grösse, die mehr als zwei Werte zulässt. Anders verhält es sich beim Prüffaktor. Der Faktor ‚Temperatur kleiner 100 Nanokelvin‘ kennzeichnet seine Instanzen quantitativ und schreibt ihnen Werte auf der Temperaturskala zu, die natürlich weit mehr als zwei Werte enthält. Der Prüffaktor in diesem Beispiel ist damit ein quantitativer Ereignistyp.

Im Fall der Wärmemessungsexperimente sind sogar Prüf- wie Wirkfaktor quantitativer Natur. Lavoisier und Laplace wollten mit Hilfe des Eiskalorimeters

<sup>9</sup>Zum Unterschied zwischen qualitativen und quantitativen Faktoren vgl. Kapitel II.

nicht herausfinden, *ob* bei ausreichender Wärmezufuhr in den Hohlraum H das Eis in Schicht  $e_1$  schmilzt oder nicht – dass man Eis mit Wärme zum Schmelzen bringen kann, war Ende 18. Jahrhundert natürlich hinlänglich bekannt –, sie wollten vielmehr wissen, *wie viel* Eis bei einer gegebenen Wärmemenge bzw. – in obigem Beispiel – bei einer bestimmten Quantität glühender Kohle schmilzt.

Ferner ist ausserhalb des eigentlichen Untersuchungsprozesses an beiden Experiment-Beispielen eine Reihe weiterer quantitativer Faktoren beteiligt. So werden bei der Bose-Einstein-Kondensation etwa Quantitäten für die Resonanz der Rubidium Atome oder die Laserfrequenz festgelegt oder fürs Wärmemessungsexperiment sind quantitative Faktoren betreffend der Temperatur der den Eiskalorimeter umgebenden Atmosphäre von grosser Bedeutung.

Zumal diese beiden Beispiele zeigen, dass in typischen experimentellen Anwendungsfällen der kausalen Schlussverfahren nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Faktoren eine wichtige Rolle spielen, sind an dieser Stelle einige ergänzende Ausführungen zum kausalen Schliessen mit quantitativen Faktoren angezeigt.

## 5.2 QUALITATIVE VS. QUANTITATIVE KAUSALANALYSEN

Je nach dem, ob eine untersuchte Wirkung ein qualitativer oder quantitativer Faktor ist, handelt es sich bei einer entsprechenden Kausaluntersuchung um eine *qualitative* bzw. *quantitative* Analyse kausaler Zusammenhänge. *Qualitative* Kausaluntersuchungen gehen der Frage nach, *ob* ein bestimmter Faktor mit einem bestimmten anderen Faktor in einem kausalen Zusammenhang steht oder nicht. Mit dem Bose-Einstein-Kondensationsexperiment soll beispielsweise untersucht werden, *ob* in der Apparatur unter den gegebenen Umständen ein Bose-Einstein-Kondensat auftritt oder nicht, d.h., ob der Prüffaktor ‚Temperatur kleiner 100 Nanokelvin‘ Teil einer kausal relevanten minimal hinreichenden Bedingung des Auftretens einer Bose-Einstein-Kondensation ist. Bei diesem Kondensationsexperiment handelt es sich mithin, obgleich der Prüffaktor quantitativer Natur ist, um eine qualitative Kausalanalyse.

*Quantitative* Kausalanalysen hingegen betreffen die Frage, *wie* sich verschiedene Werte einer Grösse auf die Werte einer anderen Grösse auswirken. Grössen beschreiben quantitative Eigenschaften oder Zustände von Gegenständen oder Ereignissen. Als Grösse bezeichnet man beispielsweise die Länge, das Gewicht oder die Temperatur eines Gegenstandes. Grössen können innerhalb eines definierten Bereichs verschiedene Werte annehmen. Als Ursachenfaktoren für eine bestimmte Wirkung kommen möglicherweise nur wenige Werte einer Grösse in Frage, z.B. erfordert die Bildung einer bestimmten Menge Schmelzwasser im Eiskalorimeter eine bestimmte Menge brennende Kohle. Werden diese Werte verändert, verändert sich die Wirkung in quantitativer Hinsicht oder bleibt gar gänzlich aus. Viele experimentelle Untersuchungen beschäftigen sich allein mit einer kontrollierten Variation der an einem Prozess beteiligten Grössen und der Beobachtung der je-

weiligen, möglicherweise veränderten Wirkung. Entsprechend geht es im Experiment zur Wärmemessung nicht darum, *ob* die Verbrennung von Kohle Wärme erzeugt, dies wird als gegeben vorausgesetzt; vielmehr soll bestimmt werden, *wie viel* Wärme die Verbrennung einer bestimmten Menge Kohle unter gegebenen Bedingungen erzeugt. Lavoisiers und Laplaces Wärmemessungen gehören also zu den quantitativen Kausalanalysen.

In Experimenten zur Untersuchung eines quantitativen Prozesses werden häufig verschiedene Versuche miteinander verglichen, in denen man den Wert einer beteiligten Grösse aktiv variiert. Ein fiktives Beispiel für die Ergebnisse eines solchen Experiments in Anlehnung an die Verbrennungsexperimente zeigt Tabelle XI.1. Notiert ist jeweils der gewählte Wert der vom Experimentator variierten Grösse, hier die eingesetzte Menge Kohle, und der gemessene Wert der abhängigen Grösse, hier die Menge geschmolzenen Eises. Die Verbrennung von 0.3 g Kohle erbringt als Ergebnis 1.5 g geschmolzenes Eis. Die Verbrennung von 0.5 g Kohle dagegen resultiert in 2.5 g Schmelzwasser.

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Menge Kohle [g]	0.3	0.5	0.8	1	0.3	0.9	0.3
Menge Schmelzwasser [g] (entspricht der Wärmemenge)	1.5	2.5	4	5	1.5	4.5	1.5

Tab. XI.1: Beispieltabelle für quantitative Faktoren in einem fiktiven Experiment zur Wärmemessung.

Eine Spalte in der Tabelle entspricht einem durchgeführten Einzelversuch, in dem eine bestimmte Menge Kohle verbrannt und eine bestimmte Menge Eis geschmolzen wird. In den Versuchen treten keine abstrakten Grössen wie ‚Menge Kohle‘ oder ‚Menge Schmelzwasser‘ auf, sondern immer nur konkrete *Werte* – 0.5 g Kohle bzw. 2.5 g Schmelzwasser – der Grössen. Der jeweilige *Wert* der variierten Grösse ist kausal relevant für das Auftreten eines bestimmten anderen *Werts* der abhängigen Grösse. Kausalfaktoren sind also nicht die Grössen selbst, sondern die Werte der Grössen.

Die gewählte Menge Kohle ist der quantitative Kausalfaktor, dessen Realisierung das Entstehen einer bestimmten Menge Wärme bewirkt. Die Realisierung einer anderen Menge Kohle führt als neuer Ursachenfaktor zur Entstehung einer anderen Menge Wärme als ebenfalls neuem Wirkfaktor. Jedem einzelnen dieser Versuche liegt ein qualitativer Kausalprozess zugrunde und zu jedem der aufgetretenen Werte gehört ein eigener *qualitativer Kausalgraph* vom Typ, wie wir ihn in Kapitel III kennen gelernt haben. Einige Beispiele für solche Graphen zeigt Abbildung XI.4.

Die Anzahl dieser Graphen steigt mit der Anzahl durchgeführter Versuche; diese Art der graphischen Notation wird daher schnell unübersichtlich. Ausser-

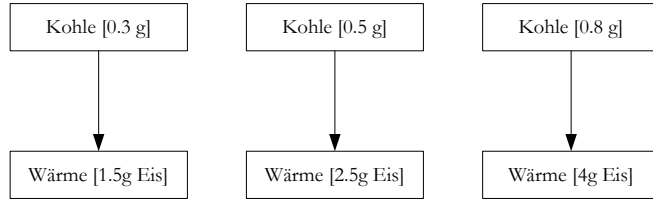


Abb. XI.4: Qualitative Kausalgraphen einzelner quantitativer Faktoren.

dem hat eine solche Sammlung qualitativer Graphen oder einzelner Messwerte in einer Tabelle nur einen beschränkten prognostischen Nutzen: Es ist nur möglich Vorhersagen für Versuche zu treffen, die bereits in der Tabelle auftauchen.

Das Ziel einer quantitativen Untersuchung ist es, die Handhabung dieser potentiell unendlichen Menge an Kausalfaktoren und -graphen zu vereinfachen und die Vorhersage weiterer Ergebnisse zu ermöglichen. Dafür bedient man sich *quantitativer Kausalgraphen* zusammen mit *mathematischen (funktionalen) Beschreibungen* der Beziehungen zwischen Grössen. Ein Beispiel für einen solchen Graphen zeigt Abbildung XI.5. Hier sind die quantitativen Faktoren aus Abbildung XI.4, die einzelne Werte von Grössen darstellen, durch die Grössen und ihre funktionale Abhängigkeit ersetzt.

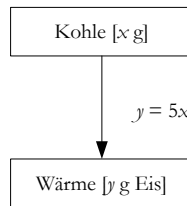


Abb. XI.5: Quantitativer Kausalgraph mit Grössen und mathematischer Beschreibung der Kausalrelation als funktionale Abhängigkeit.

Ein solcher quantitativer Kausalgraph ist analog zu Kapitel III so zu interpretieren, dass er durch konkrete Ereignisse realisiert wird, die einerseits unter den betreffenden Ereignistyp fallen und deren kausale Abhängigkeit andererseits durch die entsprechende funktionale Abhängigkeit beschreibbar ist. Der Kausalgraph in Abbildung XI.5 wird also durch alle Ereignisse realisiert, die auch einen Graphen in Abbildung XI.4 realisieren.

Für die Interpretation eines quantitativen Kausalgraphen und die Überprüfung seiner Gültigkeit ist es notwendig, dass die mathematische Beschreibung bekannt

ist und die Werte der Grössen exakt bestimmbar sind. Diese Voraussetzungen sind natürlich nicht immer gegeben. Gerade kausale Zusammenhänge, die ins Untersuchungsfeld der Sozialwissenschaften gehören und für die eine quantitative Erhöhung/Verminderung der Ursache eine quantitative Erhöhung/Verminderung der Wirkung bedeutet, bestehen oft aus nicht exakt quantifizierbaren Ereignistypen oder entziehen sich aus anderen Gründen einer funktionalen Beschreibung. Ein Mehr an Frustration bewirkt eine Intensivierung der Schlafstörungen, ein Mehr an investierten Werbegeldern führt zu einem gesteigerten Absatz des beworbenen Produktes oder ein Mehr an monatlichem Verdienst erhöht tendenziell das Bedürfnis nach Luxusgütern, ohne dass diese kausalen Abhängigkeiten quantifizierbar oder mathematisch ausdrückbar wären.

### 5.3 MESSGRÖSSEN UND WERTE

Quantitative Faktoren ordnen ihren Instanzen Eigenschaften zu, die Ereignissen in unterschiedlichem Mass zukommen können, und beziffern die Ausprägung dieser Eigenschaften. Solche Eigenschaften heissen *quantifizierbare Eigenschaften*. Dieselben quantifizierbaren Eigenschaften treten in einer Vielzahl unterschiedlicher quantitativer Faktoren auf. Quantitative Faktoren, die ihren Instanzen dieselbe quantifizierbare Eigenschaft zuschreiben, können zu einer *Grösse* zusammengefasst werden. Im Rahmen der Wärmemessungsexperimente ist beispielsweise ein Kohlestückchen, das 1 g wiegt, als konkreter Wert der Grösse ‚Menge Kohle‘ eine Instanz des quantitativen Faktors ‚1 g Kohle‘. Jedes Stück Kohle hat die quantifizierbare Eigenschaft, ein bestimmtes Gewicht zu besitzen; verschiedene Stücke unterscheiden sich aber darin, *welches* Gewicht sie besitzen.

Die quantifizierbare Eigenschaft einzelner Faktoren wird durch die Wahl einer *Messvorschrift* auf eine bestimmte Menge von Zahlen, den *Wertebereich* des Messwerts, abgebildet. Die Messvorschrift muss durch einen geeigneten *Messprozess* realisiert werden.

Ein möglicher Messprozess für das Gewicht eines Kohleklümpchens wäre, das Klümpchen auf das Ende eines drehbar gelagerten Hebels zu legen, durch den gleichzeitig eine Feder gespannt wird. Der Ausschlag des Hebels ist die Observable und kann auf einer Skala abgelesen werden. Der abgelesene Wert ist der Messwert für das Gewicht des Klümpchens. Da im Prinzip unterschiedliche Messvorschriften für den gleichen Zustand einer Grösse unterschiedliche numerische Werte liefern, müssen die Messvorschriften durch die Wahl von *Einheiten* als Referenzwerte vereinheitlicht werden. Dieser Schritt heisst *Kalibrierung*. Werte in standardisierten Einheiten können unabhängig von einer konkreten Apparatur und Messvorschrift reproduziert und verglichen werden.

In der Beispieltabelle XI.1 wird die Menge Kohle als Gewicht in der Einheit Gramm angegeben. Die Wahl dieser Masseinheit setzt eine bestimmte *Messvorschrift* voraus, wie etwa die beschriebene Wägekonstruktion, wobei die Skala mit Grammgewichten kalibriert sein muss. Am Ende des Messprozesses steht als Messwert die

Zahl mit der Einheit, die in der Tabelle auftaucht.

*Erläuterung XI.1*

Quantitative Kausalfaktoren werden durch eine Messvorschrift auf Zahlen abgebildet. Die Zahlen, die durch eine Messvorschrift abgedeckt werden, bilden den Wertebereich einer Messgrösse. Messvorschriften werden durch die Wahl von Einheiten auf standardisierte Werte kalibriert.

#### 5.4 MATHEMATISCHE BESCHREIBUNGEN

Der in der Tabelle XI.1 beschriebene Zusammenhang zwischen der eingesetzten Menge Kohle und der Menge geschmolzenen Eises lässt sich durch die einfache lineare Funktion

$$y = ax + u \quad (\text{I})$$

beschreiben. Die Variable  $x$  steht hier für die jeweils gewählte Menge Kohle, die Variable  $y$  für das Gewicht der entstandenen Menge Wasser;  $a$  ist eine Konstante bzw. ein so genannter Regressionskoeffizient und  $u$  ist der Wert des für Eiskalorimeter charakteristischen Messfehlers.<sup>10</sup> Diese mathematische Beschreibung ist ein notwendiger Teil der quantitativen Kausalbeschreibung<sup>11</sup>, sie kann die zusätzliche Information des Kausalgraphen jedoch keinesfalls ersetzen. Eine mathematische Funktion unterscheidet sich von einer vollständigen Beschreibung eines Kausalprozesses in zweifacher Hinsicht:

- (i) Unendlich viele mathematisch verschiedene Funktionen können dieselben numerischen Zusammenhänge zwischen den quantitativen Faktoren eines Kausalprozesses beschreiben.
- (ii) Mathematische Funktionen für sich allein beschreiben nicht die Richtung der Verursachung.

Eine gegebene Menge von Werten ist immer durch eine unendliche Anzahl Funktionen mathematisch beschreibbar. Die Werte der Beispieltabelle XI.1 lassen sich nicht nur durch die lineare Funktion (I) wiedergeben, sondern unter anderem auch durch ein Polynom siebten Grades oder eine Vielzahl noch komplexerer Funktionen. Diese Beschreibungen unterscheiden sich in ihrer Vorhersage weiterer, nicht bereits in Tabelle XI.1 erfasster Messergebnisse, ihre Gültigkeit könnte daher durch zusätzliche Experimentdurchläufe überprüft werden. Die in Tabelle

<sup>10</sup> Antworten auf die Frage, wie man auf der Basis von Tabellen nach dem Muster von XI.1 solche Funktionen und insbesondere die Grösse von Regressionskoeffizienten ermittelt, halten beliebige statistische Standardwerke bereit (vgl. z.B. Bortz (1999), S. 173ff.).

<sup>11</sup> Zu funktionalen Beschreibungen kausaler Zusammenhänge nach dem Muster von (I) vgl. z.B. Simon (1952).

XI.1 enthaltenen Werte und ihre Beziehungen zueinander werden jedoch von allen genannten Funktionen gleich gut beschrieben. Das heisst, die Zuordnung von Funktionsgleichungen zu kausalen Zusammenhängen ist nicht eineindeutig.

Ein noch grösseres Defizit mathematischer Beschreibungen liegt jedoch darin, dass sie Ursachen von Wirkungen nicht unterscheiden. Eine Funktion kann die numerischen Zusammenhänge repräsentieren, aber niemals die Richtung der Verursachung darstellen. (I) mag zwar auf den ersten Blick nahe legen, die produzierte Wärme  $y$  sei eine Wirkung der Verbrennung der Kohle  $x$ , weil  $y$  auf der linken Seite der Gleichung steht und sich aus einer Berechnung der rechten Seite ergibt. Mathematisch gesehen sind andere Formen dieser Gleichung, wie etwa  $x = \frac{y-u}{a}$ , äquivalent mit der erstgenannten Form und beschreiben entsprechend die Datenpunkte in gleicher Weise. Im Gegensatz zu (I) suggeriert diese zweite Form indessen, die Verbrennung der Kohle  $x$  sei nicht die Ursache, sondern die Wirkung der produzierten Wärme! Zu einer Darstellung quantitativer Kausalprozesse benötigt man daher neben dem Wissen um die mathematischen Zusammenhänge der Kausalfaktoren zusätzliche Informationen über die Richtung der Verursachung.

#### *Erläuterung XI.2*

Funktionsgleichungen repräsentieren nur die numerischen Beziehungen der an einem quantitativen Kausalzusammenhang beteiligten Faktoren.

## 6 MESSPROZESSE

In der Regel sind die Werte der Grössen, die in Experimenten untersucht werden, nicht direkt wahrnehmbar. Selbst Eigenschaften, die in qualitativer Hinsicht der Wahrnehmung zugänglich sind, können quantitativ nicht in gleicher Weise erfasst werden: Ob ein Gegenstand heiss ist oder kalt, lässt sich ohne weitere Hilfsmittel feststellen, nicht allerdings, ob seine Temperatur 100°C oder 110°C beträgt. Für die Bestimmung des Wertes einer Grösse braucht man daher eine Messung und ein Messinstrument. Das Messinstrument dient dazu, den Zustand der betreffenden Grösse in eine direkt wahrnehmbare Observable zu übersetzen, die abgelesen oder aufgezeichnet werden kann.

In einem Quecksilberthermometer führt beispielsweise eine bestimmte Temperatur zu einem bestimmten Pegelstand der Quecksilbersäule, da der Wert der Temperatur die Ausdehnung des Quecksilbers kausal beeinflusst. Die Interpretation des Pegelstandes als Ausdruck eines bestimmten Wertes der Messgrösse erfordert einen diagnostischen Schluss von der Wirkung zurück auf ihre Ursache, hier von der Höhe der Quecksilbersäule auf den Wert der Temperatur.<sup>12</sup> Für einen

<sup>12</sup>Zu diagnostischen Schlüssen vgl. Kapitel VIII.

solchen Schluss von der Observablen auf die Messgrösse muss die mathematische Beschreibung des Messprozesses bekannt und zu einem Rückschluss nutzbar sein. Beim Beispiel des Thermometers lässt sich der Messprozess durch die Funktion  $y = ax + u$  beschreiben, wobei  $y$  für die Höhe der Quecksilbersäule steht,  $x$  für die Temperatur,  $a$  für eine die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Höhe der Quecksilbersäule quantifizierende Konstante und  $u$  für die für Quecksilberthermometer charakteristische Messungenauigkeit. Für den diagnostischen Schluss wird diese Formel zu  $x = \frac{y-u}{a}$  umgestellt; der auf der Skala abgelesene Wert für  $y$  wird in diese Gleichung eingesetzt und ergibt als Resultat  $x$  den Wert der Temperatur.

Der diagnostische Schluss setzt voraus, dass alle alternativen Einflussfaktoren auf den Zustand der Observablen ausgeschlossen sind, so dass der Messwert allein vom Zustand der Messgrösse abhängt. Ferner ist ein solcher diagnostischer Schluss zur Interpretation einer Messgrösse nur dann möglich, wenn die Werte des verwendeten Messinstrumentes und die damit bestimmten Grössen einander eineindeutig zugeordnet sind, d.h., wenn die mathematische Funktion, die den Zusammenhang zwischen Messgrössen und Messwerten beschreibt, umkehrbar ist. Würde beispielsweise Wasser anstelle von Quecksilber im Thermometer verwendet, wäre diese Voraussetzung verletzt, zumal die Ausdehnung der Wassersäule im Bereich von  $4^{\circ}\text{C}$  kein eindeutiges Mass für die Temperatur darstellt. Die Ausdehnung der Wassersäule erreicht bei einer Temperatur von  $4^{\circ}\text{C}$  ihren Minimalwert; bei weiterer Abkühlung unterhalb von  $4^{\circ}\text{C}$  nimmt sie wieder zu. Der Pegelstand einer Wassersäule ist also bei einer Temperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  genauso hoch wie bei einer Temperatur von  $3^{\circ}\text{C}$ . Die mathematische Funktion, welche die Ausdehnung beschreibt, hat einen Wendepunkt bei  $4^{\circ}\text{C}$ ; sie ist in diesem Bereich nicht umkehrbar. Das heisst, von einem Messwert in diesem Bereich lässt sich nicht zurück auf eine bestimmte Temperatur schliessen, da der Wasserstand bei einer Temperatur von  $3^{\circ}\text{C}$  mit demjenigen bei einer Temperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  identisch ist und daher von beiden Temperaturen herrühren kann. Ein Wassersäulenthermometer ist mithin kein geeignetes Messinstrument für Temperaturen um  $4^{\circ}\text{C}$ .

Oft, wie etwa im Fall von Lavoisiers und Laplaces Wärmeexperimenten, unterscheiden sich Mess- und eigentliche Untersuchungsgrösse. Lavoisier und Laplace interessierten sich unter anderem für die bei der Verbrennung von einer Unze Kohle freigesetzte Wärme. Zur Bestimmung dieser Untersuchungsgrösse bedienten sie sich der im Verlauf der Verbrennung entstandenen Wassermenge, und diese Messgrösse wiederum bestimmten sie mit Hilfe einer Waage. Nicht nur die Interpretation dieser Observablen, sondern auch die Interpretation der Messgrösse ‚Wassermenge‘ als Indikator für die Untersuchungsgrösse ‚Wärmemenge‘ rechtfertigten Lavoisier und Laplace über einen diagnostischen Schluss. Die Menge geschmolzenen Wassers ist Wirkung der freigesetzten Wärme und das Design der Eiskalorimeterexperimente stellte sicher, dass sämtliche Alternativursachen für das Entstehen von Schmelzwasser unterdrückt waren.



Zum Messprozess zählt man gemeinhin den gesamten Kausalprozess von der Untersuchungsgrösse bis zur Observablen.

### *Erläuterung XI.3*

Messprozesse verknüpfen die Untersuchungsgrösse mit einer Messgrösse und einer Observablen. Die Interpretation des Zustands der Observablen als Mass für den Zustand der Untersuchungsgrösse erfolgt in Form eines diagnostischen Schlusses.

## 6.1 DIREKTE UND INDIREKTE MESSUNGEN

Als *indirekte Messungen* bezeichnen wir solche Messprozesse, die mehrere, miteinander verkettete Kausalprozesse umfassen; einer *direkten Messung* liegt im Gegensatz dazu nur ein einfacher Kausalprozess zugrunde. Die Temperaturmessung mit einem Quecksilberthermometer ist ein Beispiel für eine direkte Messung der Temperatur, während Lavoisiers Verfahren zur Bestimmung der Verbrennungswärme durch das Schmelzen von Eis eine indirekte Messung darstellt. Der Messprozess umfasst in diesem Fall sowohl das Schmelzen des Eises durch die entstehende Wärme als auch das nachfolgende Wiegen des Schmelzwassers.

Die Grenzen zwischen direkter und indirekter Messung lassen sich nicht scharf abstecken. Je nach Kenntnisstand können bei der Betrachtung von Kausalprozessen mehrere zusammenhängende Prozesse zu einem Prozess zusammengefasst werden, ebenso gut lässt sich ein Gesamtprozess in mehrere Teilprozesse untergliedern.

## 6.2 MESSFEHLER

Der *ideale Messwert* eines Experiments ist der Wert der Observablen, der dem wirklichen Zustand der Mess- bzw. Untersuchungsgrösse zum Zeitpunkt der Messung entsprochen hätte. Durch Ungenauigkeiten der Messapparatur und des Ablesens kommt es aber bei jeder Messung zu Abweichungen von diesem Wert, zu so genannten *Messfehlern*.<sup>13</sup> Jede Messapparatur oder zumindest jeder Ablesevorgang hat eine beschränkte Auflösung, d.h., nicht jede Zustandsänderung der Untersuchungsgrösse bewirkt eine wahrnehmbare Zustandsänderung der Observablen. Dieser Umstand verhindert einen eindeutigen diagnostischen Schluss vom Zustand der Observablen auf den Zustand der Mess- bzw. Untersuchungsgrösse. Genau genommen kann daher keine Messung überprüfen, ob die Realisierung eines bestimmten quantitativen Ursachenfaktors tatsächlich die Realisierung eines bestimmten anderen quantitativen Wirkungsfaktors hervorruft, da die Zuordnung

<sup>13</sup>Im Rahmen der Quantenmechanik gibt es ausserdem prinzipielle Messungenauigkeiten, die selbst bei Verwendung idealer Messinstrumente auftreten würden.

der Faktoren durch die Messung verfälscht wird. Dies ist nicht nur ein theoretisches Problem der Überprüfung quantitativer Hypothesen, sondern je nach Grösse der auftretenden Fehler ein Problem der praktischen Durchführung und Auswertung von Experimenten. Um die Verlässlichkeit des Versuchsergebnisses beurteilen zu können, gehört daher zu jedem Experiment eine Abschätzung der Messfehler, die als Werte einer *Fehlergrösse* oder *Störgrösse* behandelt werden können.

Im Idealfall ist jeder Teilschritt des Messprozesses einzeln zu betrachten, um das Ausmass der darin auftretenden Messfehler zu bestimmen oder wenigstens abzuschätzen. Diese Abschätzung kann mehr oder weniger kompliziert sein und reicht von der Feststellung eines konstanten Fehlerwerts bis zu komplexen Abhängigkeiten des Fehlers von der Höhe des Messwerts und dem Zustand anderer Grössen. Die Fehlerwerte einzelner Teilprozesse können nach dem mathematischen Gesetz der Fehlerfortpflanzung<sup>14</sup> auf die Beschreibung des gesamten Messprozesses übertragen werden. Wenn zu wenig über den Messprozess bekannt ist, um die auftretenden Fehler direkt abschätzen zu können, kann die statistische Bewertung der Messergebnisse diese Abschätzung ersetzen. Zur Anwendung dieses Verfahrens ist es günstig, wenn eine ‚gute Statistik‘ vorliegt, d.h. viele Messwerte aus zahlreichen Wiederholungen von Messungen gleicher Art.

### 6.3 STOCHASTISCHE UND SYSTEMATISCHE STÖRGRÖSSEN

Zwei verschiedene Typen von Fehler- oder Störgrössen können das experimentelle Ergebnis beeinflussen. Als *stochastisch* bezeichnen wir Störgrössen, deren Wert sich unabhängig vom Zustand der Mess- und Untersuchungsgrösse des Experiments verändert. Sie lassen sich oft vergleichsweise leicht behandeln, indem der Mittelwert der Ergebnisse als idealer Messwert und die Standardabweichung als Mass für den Wert der Störgrösse betrachtet werden. *Systematische* Störgrössen sind hingegen häufig konstant, ihre Behandlung bereitet grössere Probleme. Um systematische Fehler festzustellen, sind eine eingehende Kenntnis des Messprozesses sowie Annahmen über Werte erforderlich, die sich bei einem definierten Zustand der Messgrösse ergeben sollten. Anhand dieser Erwartungswerte lässt sich die Messung *abgleichen*, wodurch systematische Fehler identifiziert werden können.

Bei Lavoisiers Eiskalorimeter bildet der nicht vollends auszuschaltende Wärmetransfer von der Umgebung des Eiskalorimeters in dessen Innenraum eine solche systematische Fehlerquelle. Die gemessene Wärme wird wegen des Beitrags der Umgebungswärme immer zu gross sein. Eine Möglichkeit zur Abschätzung des Werts dieser Störgrösse ist ein so genannter *Nullversuch*, in dem ohne Verbrennung nur die Menge Eis gemessen wird, die während der Dauer eines Verbrennungsexperiments bereits allein durch den Einfluss der Umgebungswärme schmilzt. Mit Hilfe dieses Werts können die anderen experimentellen Ergebnisse

<sup>14</sup>Das Gesetz beschreibt, wie sich Schwankungen einzelner Variablen auf das Ergebnis einer gegebenen Funktion auswirken.

abgeglichen werden, d.h., alle Werte werden korrigiert, indem der Wert des Nullversuchs von jedem Messergebnis abgezogen wird.

Dieser Abgleich ist indessen immer noch ungenau, da er voraussetzt, dass der Wärmeeintrag der Umgebung vom Ablauf des Experiments unabhängig ist. Eine genauere Abschätzung des Wärmeeintrags müsste berücksichtigen, dass dieser von der im Experiment entstehenden Wärme abhängig ist. Wärme fließt immer in Richtung des kälteren Mediums. Wenn während des Experiments im Kalorimeter die Temperaturen höher sind als in seiner Umgebung, kommt es daher nicht zum Eintrag von Umgebungswärme, sondern zur Abgabe von Wärme aus dem Kalorimeter an die Umgebung. Herrschen im Kalorimeter dagegen geringere Temperaturen als in der Umgebung – etwa vor oder zu Beginn des Verbrennungsprozesses – fließt Wärme aus der Umgebung in das Kalorimeter. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, müsste während des Versuchs ständig die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur aufgezeichnet werden. Die aufgezeichneten Temperaturdifferenzen müssten dann mit einer Korrekturfunktion über die Dauer des Experiments summiert werden. Bereits an diesem einfachen Beispiel wird deutlich, dass die Korrektur systematischer Fehler je nach gewünschtem Grad an Genauigkeit beliebig kompliziert werden kann.

#### *Erläuterung XI.4*

Man unterscheidet zwischen (a) stochastisch schwankenden und (b) systematischen Störgrößen. Stochastische Störgrößen können mit statistischen Mitteln abgeschätzt und korrigiert werden, systematische Störgrößen durch den Abgleich des Messinstruments auf bekannte Werte (Nullversuch).

## 7 BEISPIEL III: HARNSTOFFSYNTHESE

### 7.1 FORSCHUNGSRÉSULTATE VS. FORSCHUNGSPROZESSE

Die Experiment-Beispiele I und II haben wir auf der Grundlage von Texten besprochen, die zwar durchaus Experimente beschreiben, nicht aber den eigentlichen Prozess des *Experimentierens*. Die Artikel von Cornell und Wiemann einer- bzw. Lavoisier und Laplace andererseits präsentieren das Resultat oder den Befund eines Forschungsprozesses. Eine solche Präsentation verzichtet im Normalfall auf die Darstellung des meist verwickelten und umständlichen experimentellen Weges, den die Forscher zurücklegten, um an ihre Ziele zu gelangen. Zur Herstellung eines Bose-Einstein-Kondensates wie auch zur Messung der Verbrennungswärme sind jeweils komplexe Apparaturen und ein ganz spezifisches Set an Hintergrundbedingungen erforderlich. Beide Forschergruppen mussten zweifelsohne vermittels unzähliger gescheiterter Versuche ihren Experimentaufbau sukzessive verbessern.

Von diesen Tests, die erfolglos verliefen und keine brauchbaren Resultate zutage förderten, liest man in Publikationen, die neue wissenschaftliche Erkenntnisse präsentieren, nichts. Weiterhin geben diese Veröffentlichungen keinen Aufschluss über die von den Forschern angewandten Methodologien und insbesondere die von ihnen benutzten Verfahren kausalen Schliessens.

In der Fachwelt gelten Fehler, Sackgassen und das Vorexerzieren kausaler Schlussverfahren – vielleicht zu Unrecht – als belanglos und uninteressant; was zählt, ist allein das erfolgreiche Resultat. Die Forscherkollegen von Cornell oder Lavoisier erwarteten keine detaillierte Beschreibung der verwickelten Odyssee zur Herstellung eines Bose-Einstein-Kondensates bzw. zur Messung der Verbrennungswärme, sondern im Gegenteil eine konzise und prägnante Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Um die Anwendung kausaler Schlussverfahren im oder deren Übertragung auf den experimentellen Kontext beurteilen zu können, sind solche Publikationen mithin wenig hilfreich.

Eine Rekonstruktion konkreter, im Labor gezogener Kausalschlüsse kann nur gelingen, wenn auch *ungedruckte* Quellen berücksichtigt werden. Solche sind natürlich für viele Entdeckungsprozesse nicht verfügbar. Eine in dieser Hinsicht bestens dokumentierte Fallgeschichte, an der man kausale Schlussverfahren im Experiment optimal studieren kann, ist die in den Jahren 1931/32 den beiden Biochemikern Hans Krebs und Kurt Henseleit gelungene Entdeckung des *Harnstoffzyklus*. Die Laborbücher aus der Zeit dieses Projektes sind vollständig erhalten: Für jedes Experiment, das Krebs und Henseleit zu diesem Thema durchführten, findet sich in diesen Büchern ein Protokoll – eine so lückenlose Dokumentation des Forschungsverlaufs einer Entdeckung ist nur selten erhalten.<sup>15</sup>

Wir werden deshalb zum Abschluss dieses Kapitels anhand von Auszügen aus diesen Laborbüchern untersuchen, in welcher Weise die in den letzten Kapiteln entwickelten kausalen Schlussverfahren auf den experimentellen Kontext zu übertragen sind. Hierzu ist zunächst eine kurze und sich auf die essentiellen Grundlagen beschränkende Einführung in den Untersuchungsgegenstand von Krebs und Henseleit erforderlich.<sup>16</sup>

## 7.2 DER HARNSTOFFZYKLUS

Harnstoff ist das Endprodukt des Stickstoff-Stoffwechsels von Landwirbeltieren. Alle Aminosäuren – die Bausteine der Proteine – enthalten Stickstoff. Werden Proteine im Körper abgebaut, etwa bei der Nahrungsverdauung, entsteht über verschiedene Zwischenschritte zunächst Ammoniak. Da Ammoniak aber in höheren Konzentrationen für lebende Zellen giftig ist, wird er in einem weiteren Schritt zu einer unschädlichen Verbindung ab- bzw. umgebaut. Bei den Landwirbeltieren ist das der Harnstoff, der im Urin gesammelt ausgeschieden wird (Vögel dagegen bilden zu diesem Zweck statt *Harnstoff* eine andere Substanz, die so genannte

<sup>15</sup>Diese Laborbücher sind vollständig zugänglich in Graßhoff und Nickelsen (2001).

<sup>16</sup>Ergänzende Details finden sich in Graßhoff, Casties und Nickelsen (2000).

Harnsäure).

Die Harnstoffsynthese findet in der Leber statt. Es handelt sich dabei um einen zyklischen Reaktionsweg, der folgende Schritte umfasst:

- (i) Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) werden an Ornithin gebunden. Durch diese Verbindung entsteht Citrullin.  

$$\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{Ornithin} \rightarrow \text{Citrullin} + \text{H}_2\text{O}^{17}$$
- (ii) Citrullin nimmt ein weiteres  $\text{NH}_3$ -Molekül auf. Aus Citrullin und  $\text{NH}_3$  entstehen Arginin und Wasser.  

$$\text{Citrullin} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{Arginin} + \text{H}_2\text{O}$$
- (iii) Arginin spaltet (unter Aufnahme von Wasser) *Harnstoff* ab. Dabei bildet sich wieder Ornithin.  

$$\text{Arginin} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ornithin} + \text{Harnstoff} (\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$$
- (iv) Das so gebildete Ornithin steht zur erneuten  $\text{NH}_3$ -Aufnahme bereit. Damit schliesst sich der Zyklus.

Dies ist das Resultat von Krebs' und Henseleits Anstrengungen. Auf welchen experimentellen Wegen sind die beiden Biochemiker zu diesem Ergebnis gelangt?

### 7.3 DIE KAUSALE RELEVANZ VON ORNITHIN

#### 7.3.1 EINTRÄGE IM LABORBUCH

Aufgrund früherer Forschungen gingen Krebs und Henseleit davon aus, dass Harnstoff vor allem in Lebergewebe gebildet wird, und zwar nur in lebenden, intakten Zellen. Ein erster Herstellungsprozess der Experimente zur Harnstoffsynthese bestand folglich in der Anfertigung sorgsam ausgeführter, dünner Gewebeschnitte, die dann unter Sauerstoffzufuhr in physiologischer Nährlösung am Leben gehalten wurden.

In diese Lösung gaben Krebs und Henseleit verschiedene stickstoffhaltige Substanzen, beispielsweise Ammoniak, diverse Aminosäuren oder Zucker etc., welche die Leberzellen zu Harnstoff umsetzen sollten. Die Reaktionsgefäße mit Schnitten, Lösung und Zusatzstoffen wurden ein bis zwei Stunden bei Körpertemperatur in einem Wasserbad bewegt, um eine etwaige Synthese-Reaktion möglichst vollständig ablaufen zu lassen. Anschliessend wurde mittels der so genannten Urease-Methode und Manometrie gemessen, wie viel Harnstoff aus den beigefügten Stoffen entstanden war.<sup>18</sup> Auf diesem Weg ermittelten die beiden Forscher, aus welchen Vorstufen Harnstoff in der Leber gebildet wird und entdeckten den in Abschnitt 7.2 vorgestellten Reaktionspfad.

<sup>17</sup>Die Pfeile „→“ stehen in diesem Zusammenhang weder für die Kausalrelation noch den Implikationsjunktork, sondern für den biochemischen Reaktionsprozess.

<sup>18</sup>Urease ist ein Enzym, das nur mit Harnstoff reagiert. Bei dieser Reaktion entsteht pro abgebautem Molekül Harnstoff ein Molekül gasförmiges Kohlendioxid. Dieses wiederum lässt sich mittels Manometrie messen, woraus schliesslich ein Rückschluss auf die Menge gebildeten Harnstoffes gezogen werden kann. Für Details vgl. Graßhoff, Casties und Nickelsen (2000), Kapitel 8.

## 110

11.11. Einfluss von Zucker & Säuren auf die Kermstoffbildung am Rote St.

Einfluss von Bromthion.

Herstellungs-  
prozess

Mit Kohlehydrat ernährte Ralte. Schütte, angeweicht.

Vorversuch: Temp. 37,5° 4,60 Vol.-%  $\text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2$  Versuchsdauer 120 Min.

Untersuchungs-  
prozess

3 mm Fingerrohr

4,12 Vol.-%

90% Fraktion 10%  
- 200 mg %

neg. Fehler 12,40 11,67 13,92 22,47 16,31 10,88

Messprozess

Kermstoffbestimmung: Anordnung wie S. 98.

	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>18</u>	<u>19</u>	<u>22</u>	<u>20a</u>
$\text{K}_2\text{O}_2$	0,855	0,886	0,927	0,948	1,649	1,405
%	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
$\frac{1}{2}$	7,83	9,31	8,64	8,79	16,90	14,09
$\frac{1}{4}$	+8	0	+84	+106	+62	+84,5
$\text{K}_2\text{O}_2$	684	0	68,6	99,6	102,1	118,8
$\frac{W}{\text{mg} \times 10^3 \text{ mm}^3}$	<u>0,24</u>	<u>0</u>	<u>3,06</u>	<u>2,76</u>	<u>3,98</u>	<u>4,46</u>
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

## 111

Untersuchungs-  
prozess

→	→	→	→	→	→
→	→	→	→	→	→
90% Fraktion 10% - 200 mg %	→	90% Fraktion (3,5-Fraktion) - 200 mg %	→	90% Fraktion 10% - 200 mg %	→
11,52	21,15	22,61	11,54	19,67	17,14

Messprozess

<u>25</u>	<u>26</u>	<u>27</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>31</u>
1,438	1,468	0,981	1,438	1,391	1,691
3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
14,47	14,72	9,26	14,47	13,92	17,24
+49	+65	+86	+42,5	+61	+75,5
70,8	94,9	84,3	61,1	85	60,2
<u>3,88</u>	<u>2,86</u>	<u>2,37</u>	<u>3,36</u>	<u>2,74</u>	<u>2,22</u>
(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)

Untersuchungs- prozess	3ccm Ringer-Lsg. →	→	→	→	→
	0,12 5% H <sub>2</sub> O →			→	→
	0,1 Ornithin (Hoffm. & Roche) <del>25</del> = 200 mg %			→	→
	15,17	19,18	13,75	20,84	16,17
Messprozess	<u>32</u>	<u>28</u>	<u>26</u>	<u>28</u>	<u>30</u>
	1,207	1,538	1,468	1,578	1,391
	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
	12,94	15,59	14,72	15,59	12,92
	+46,5	+49	+6,5	+10	12,1,5
	60,8	75,4	9,5	15,28	169,1
	<u>1,49</u>	<u>1,45</u>	<u>0,43</u>	<u>0,46</u>	<u>6,24</u>
	(m)	(n)	(o)	(p)	(q)
					(r)

Abb. XI.6: Die Seiten 110 bis 112 aus dem Laborbuch von Kurt Henseleit ergänzt um in Drucksatz gesetzte Beschriftungen. An diesen Laborbucheintragungen lässt sich die Dreiteilung experimenteller Kausalstrukturen deutlich erkennen.

Eine Rekonstruktion des gesamten Forschungsprozesses würde aus Platzgründen an dieser Stelle zu weit führen. Deshalb werden wir uns in der Folge auf jene Experimenterserie beschränken, vermittels derer Krebs und Henseleit die kausale Relevanz der Aminosäure Ornithin für die Synthese von Harnstoff nachwiesen. Kurt Henseleit hat diese am 15.11.1931 durchgeführte Versuchsserie minutiös aufgezeichnet.

Abbildung XI.6 zeigt diejenigen drei Laborbuchseiten, welche dieses für das gesamte Forschungsprojekt entscheidende Experiment dokumentieren.<sup>19</sup>

Die Eintragungen stehen unter dem Titel „Einfluß von Zucker u. Säuren auf die Harnstoffbildung aus NH<sub>4</sub>Cl. Einfluß von Ornithin.“ Zunächst macht Henseleit auf Seite 110 zwei knappe Bemerkungen zum Herstellungsprozess des Experimentes: Da die beiden Forscher wussten, dass der Ernährungszustand des Versuchstieres die Harnstoffbildung beeinflusst, ernährten sie die Ratte, deren Leber im Versuch verwendet wurde, ausschliesslich mit Kohlehydrat. Das heisst, sie hungerten ihr Versuchstier aus, um potentielle Störfaktoren möglichst zu eliminieren. Demselben Zwecke diente ein sorgfältiges Auswaschen der benutzten Leberschnitte. Das verwendete Lebergewebe sollte vor der Versuchsdurchführung nicht

<sup>19</sup>Vgl. Graßhoff und Nickelsen (2001), Band II, S. 110-112. Die in der Folge verwendete chemische Notation orientiert sich an den historischen Vorbildern.

bereits Harnstoff enthalten. Die nächste Zeile auf Seite 110 enthält Angaben zu den konstanten Hintergrundbedingungen sämtlicher 18 in dieser Reihe durchgeführten Einzelversuche: Als Versuchslösung, in welcher die Leberschnitte überlebend gehalten und unter den Einfluss der untersuchten Stoffe gestellt wurden, verwendeten Krebs und Henseleit eine physiologische Ringerlösung ( $40\text{ cm}^3$  Ringer +  $8\text{ cm}^3$  Natriumbicarbonat 1.3%), die aufgrund ihres Bikarbonat-Gehalts leicht alkalisch reagiert;<sup>20</sup> das Gasgemisch in den Versuchsbehältern enthielt 4.6%  $\text{CO}_2$  in  $\text{O}_2$ ; die Versuchsbehälter und ihr Inhalt wurden alle in einem Wasserbad auf Körpertemperatur ( $37.5\text{ }^\circ\text{C}$ ) gehalten; und sämtliche Versuche dauerten 120 Minuten. Diese Hintergrundfaktoren gehören bereits zum eigentlichen Untersuchungsprozess. Sie sind Teile minimal hinreichender Bedingungen der Harnstoffbildung, vor deren konstantem Hintergrund Krebs und Henseleit anschliessend der Reihe nach die Stoffe Ammoniak ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), Glukose, Fruktose, Sorbose, Lactat, Pyruvinat und Ornithin auf ihre kausale Relevanz für die Harnstoffbildung prüften.

Ab der zweiten Zeile des mit „Untersuchungsprozess“ beschrifteten Blockes von Einträgen sind die drei Laborbuchseiten in Spalten – (a), (b), ..., (r) – und zweigeteilt in Untersuchungs- und Messprozess zu lesen. Jede Spalte steht für einen Versuchsdurchlauf. Im Block, der den Untersuchungsprozess beschreibt, werden die Substanzen genannt, die in einem jeweiligen Durchlauf einzeln oder in Verbindung mit anderen Substanzen auf ihre kausale Relevanz hin untersucht werden. Die Quantitäten sind in „mg%“ bemessen. Das ist ein heute nicht mehr gebräuchliches Mass, das die Anzahl Milligramm einer jeweiligen Substanz pro 100ccm Gesamtlösung bezeichnet. Die Pfeile bedeuten, dass in der entsprechenden Spalte die Angaben aus der entsprechenden Zeile der vorigen Spalte übernommen werden. Die letzte Zeile des Blockes zum Untersuchungsprozess benennt das Gewicht des verwendeten Leberschnittes. Dieses Gewicht variiert, weil es äusserst schwierig war, gleich schwere Schnitte herzustellen, die das Gewebe schonten und es damit für den Versuch verwendbar machten.

Die Spalten (a) und (b) zeigen mithin je einen Nullversuch. Um den Effekt potentieller konstanter Störfaktoren quantitativ abzuschätzen, prüften Krebs und Henseleit die Menge gebildeten Harnstoffes durch zwei bloss in Nährlösung befindliche Leberschnitte ohne Zugabe irgendwelcher Synthesubstanzen. Sämtliche Versuche wurden jeweils wiederholt, d.h. als *Doppelversuche* ausgeführt. Dieses Vorgehen diente der Prüfung der Homogenität der einzelnen Testsituationen. Wir werden unten in Abschnitt 7.4 ausführlicher auf diesen Punkt zurückkommen. Die Spalten (c) und (d) beschreiben zwei Versuche, in denen Ammoniak zur Leber in Nährlösung zugegeben wurde. Bis auf die Spalten (o) und (p) befanden sich die Leberschnitte in allen weiteren Durchläufen in einer Lösung, die Ringer und Ammoniak enthielt.

Dass die Leber aus Ammoniak Harnstoff synthetisiert, war aus Ergebnissen früherer Forschung bekannt und auch Krebs und Henseleit hatten diesen Befund

<sup>20</sup>Für Details zur Ringerlösung vgl. Graßhoff, Casties und Nickelsen (2000), S. 246 ff.



in mehreren Experimenten bestätigt. Die gängige Hypothese besagte, dass Harnstoff sich als Endprodukt des Abbaus von Aminosäuren (oder anderen stickstoffhaltigen Substanzen) bildet, und zwar über Ammoniak als Zwischenstufe. Demnach sollte das den Leberschnitten zugefügte Ammoniak unter geeigneten Bedingungen vollständig zu Harnstoff abgebaut werden. Das war in früheren Experimenten von Krebs und Henseleit indessen nicht der Fall gewesen. Vielmehr war die Menge gemessenen Harnstoffes jeweils weit geringer ausgefallen, als nach dieser Theorie zu erwarten gewesen wäre. Anscheinend waren in diesen (Vorgänger-)Experimenten nicht alle Bedingungen für eine signifikante Harnstoffproduktion gegeben. Diese fehlenden Faktoren galt es nicht zuletzt auch mit der vorliegenden Versuchsreihe zu ermitteln.

Umwandlungsprozesse im Stoffwechsel erfordern Energie. Die im Rahmen der Experimenterserie vom 15. 11. 1931 in Verbindung mit Ammoniak auf ihre kausale Relevanz getesteten Zucker und Säuren Glukose, Fruktose, Sorbose, Lactat und Pyruvat sind alle zentrale Zwischenprodukte des Energiestoffwechsels einer Zelle. Krebs und Henseleit testeten also in den Spalten (e) bis (n), ob und, wenn ja, inwiefern die genannten Substanzen den Abbauprozess von Ammoniak fördern. Dass diese Zucker und Säuren mit Sicherheit nicht alleine hinreichend sind für die Harnstoffbildung, stand ausser Zweifel. Die Harnstoffsynthese kann nur erfolgen, wenn als Ausgangsstoff eine stickstoffhaltige Substanz – wie beispielsweise Ammoniak – vorliegt, und die hier getesteten Zucker und Säuren sind sämtlich stickstofffrei. Deshalb erübrigten sich Versuchsdurchläufe mit einem der Zucker oder einer der Säuren ohne Zugabe von Ammoniak.

Ornithin dagegen ist eine Aminosäure und enthält selbst Stickstoff. Aus diesem Grund prüften Krebs und Henseleit in den Tests, denen die Spalten (o) und (p) entsprechen, Ornithin auch *einzel*n, ohne Ammoniak, auf ihre kausale Relevanz für die Harnstoffbildung. Um ferner ein mögliches kausales Zusammenwirken von Ammoniak und Ornithin zu testen, d.h., um zu ermitteln, ob Ornithin – sofern dieses denn überhaupt kausal relevant ist – und Ammoniak derselben oder verschiedenen minimal hinreichenden Bedingungen zuzuordnen sind, setzten die beiden Biochemiker auch zwei Versuche (vgl. die Spalten (q) und (r)) an, in denen Leberschnitte sowohl Ammoniak wie Ornithin ausgesetzt wurden.

Der mit „Messprozess“ beschriftete Block von Eintragungen listet zum einen die Manometer-Messwerte auf – die in der mit „h“ eingeleiteten Zeile vermerkten Zahlen entsprechen z.B. dem Ausschlag der Manometersäule – und benennt zum anderen die für die Berechnung der entstandenen Harnstoffmenge notwendigen Grössen. Da insbesondere die Leberschnitte nie gleich schwer gerieten, waren die in den einzelnen Versuchsdurchläufen erhaltenen absoluten Harnstoffwerte nicht miteinander vergleichbar. Deshalb drückten Krebs und Henseleit die entstandenen Harnstoffmengen als relative Werte in Abhängigkeit von der gebildeten Menge  $\text{CO}_2$ , dem Gewicht des verwendeten Leberschnittes und der Versuchsdauer als so

genannten *Harnstoffquotienten* ( $Q_H$ ) aus.<sup>21</sup> Den Wert dieses Quotienten gibt Henseleit auf diesen Laborbuchseiten als eigentliches Messresultat in der untersten Zeile doppelt unterstrichen aus.

Der Übersichtlichkeit halber fassen wir die entscheidenden Informationen, die auf diesen drei Laborbuchseiten enthalten sind, tabellarisch zusammen:

*Konstante Bedingungen*

Lösung	Gewebe	Gas	$T$
3 ccm Ringer + Bikarbonat	Rattenleber mit Kohle- hydrat ernährt	4,6% CO <sub>2</sub> in O <sub>2</sub>	37,5°C

*Varierte Bedingungen und Messergebnisse (Doppelversuche)*

Substanz	$Q_H$	$Q_H$
ohne Zusatz	0.24 (a)	0 (b)
NH <sub>4</sub> Cl	3.06 (c)	2.76 (d)
NH <sub>4</sub> Cl+ Glukose	3.98 (e)	4.46 (f)
NH <sub>4</sub> Cl+ Fruktose	3.88 (g)	2.86 (h)
NH <sub>4</sub> Cl+ Sorbose	2.37 (i)	3.36 (j)
NH <sub>4</sub> Cl+ Lactat	2.74 (k)	2.22 (l)
NH <sub>4</sub> Cl+ Pyruvinat	2.49 (m)	2.45 (n)
Ornithin	0.43 (o)	0.46 (p)
NH <sub>4</sub> Cl+ Ornithin	6.74 (q)	8.04 (r)

Tab. XI.2: Transkript der wichtigsten Stellen der Seiten 110 bis 112 von Kurt Henseleits Labortagebuch. (Die Buchstaben in Klammern verweisen auf unsere Spaltennummerierung.)

### 7.3.2 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

Beim Betrachten dieser Versuchsreihe stechen drei Punkte ins Auge:

- (i) Beim Fehlen von Ammoniak findet keine signifikante Harnstoffbildung statt (vgl. Spalten (a), (b), (o) und (p)).
- (ii) Ammoniak alleine und in Verbindung mit einem bzw. einer beliebigen der getesteten Zucker bzw. Säuren liefert einen Harnstoffquotienten zwischen 2.22 und 4.46.

<sup>21</sup> $Q_H$  berechnet sich nach der Formel:

$$Q_H = \frac{\text{CO}_2 \text{ in mm}^3}{\text{Gewicht der Leber in mg} \times \text{Anzahl Stunden}}.$$

Vgl. hierzu Krebs und Henseleit (1932), S. 757.

- (iii) Ammoniak in Verbindung mit Ornithin führt zu einer signifikant gesteigerten Harnstoffbildung,  $Q_H$  liegt in diesem Fall zwischen 6.74 und 8.04 (vgl. Spalten (q) und (r)).

Die Spalten (o) und (p) bzw. (q) und (r) beschreiben die entscheidenden Versuchsdurchläufe dieser Experimentserie. Das erstaunliche Resultat dieser vier Durchläufe ist, dass lediglich die *Kombination* von Ornithin und Ammoniak eine enorme Steigerung der Harnstoffbildung bewirkt, und zwar erreicht der Harnstoffquotient in diesem Fall einen Wert, der die Summe der beiden Einzeleffekte weit übertrifft. Obwohl Ornithin in sehr viel höherer Konzentration eingesetzt wird als Ammoniak – 100 mg% gegenüber 40 mg% für Ammoniak – bewirkt es *alleine* kaum einen Ausschlag.

Diesen Ornithin-Effekt konnten Krebs und Henseleit nur finden, indem sie neben den Einzelversuchen zusätzlich die Kombination der Stoffe testeten; hätten sie bloss die Wirkung von Ornithin allein untersucht, wäre dessen kausale Relevanz wohl ebenso schnell wieder verworfen worden wie in früheren Versuchen diejenige von Alanin, Phenylalanin und anderen Substanzen.

Dass Ornithin neben Ammoniak im Rahmen der Harnstoffsynthese eine kausal relevante Rolle spielt, war damit nachgewiesen. Ebenfalls klar war, dass Ornithin und Ammoniak Teil derselben minimal hinreichenden Bedingung waren. Wie genau jedoch der kausale Zusammenhang von Ornithin, Ammoniak und Harnstoff bzw. der zugehörige Reaktionspfad aussah, wussten Krebs und Henseleit zu diesem Zeitpunkt des Forschungsprojektes noch nicht. Zur Beantwortung dieser Frage waren im Anschluss an diese Versuchsserie zahlreiche Nachfolgeexperimente erforderlich.

#### 7.4 KAUSALTHEORETISCHE INTERPRETATION DES ORNITHIN-EXPERIMENTES


Auf diesen drei Laborbuchseiten finden wir eine direkte Umsetzung einer Vielzahl der in den letzten Kapiteln erarbeiteten Grundsätze und Verfahren kausalen Schliessens in die experimentelle Praxis.

- (i) Krebs und Henseleit trafen alle erdenklichen Massnahmen, um potentielle Störfaktoren zu eliminieren oder zumindest zu kontrollieren und damit die Einhaltung der Homogenitätsbedingung, so weit als möglich, abzusichern.
- (ii) Sie führten jeden einzelnen Versuch doppelt durch, um die Einhaltung der Homogenitätsbedingung einer Prüfung zu unterziehen.
- (iii) Mittels Differenztest (vgl. Spalten (a) und (c)) prüften und bestätigten sie die kausale Relevanz von Ammoniak für die Harnstoffsynthese. Aufgrund der doppelten Durchführung jedes Versuchsdurchlaufs erfuhr dieser Differenztest eine erfolgreiche Reproduktion (vgl. Spalten (b) und (d)) und damit die Einhaltung der Homogenitätsbedingung und der korrespondierende Schluss auf die kausale Relevanz von Ammoniak eine Bestätigung.

- (iv) Mittels einer Art verkürzter Vierertests prüften Krebs und Henseleit, ob Glukose, Fruktose, Sorbose, Lactat oder Pyruvinat Teil derselben minimal hinreichenden Bedingung ist, deren Teil auch Ammoniak ist. Diese Vierertests konnten um das Prüffeld, in dem die Anwesenheit von Ammoniak unterdrückt und eine der genannten Substanzen alleine gesetzt wird, verkürzt werden, da von vornherein klar war, dass keine dieser Substanzen ohne den im Ammoniak enthaltenen Stickstoff Harnstoff synthetisieren kann. Einen solch verkürzten Vierertest, der die kausale Relevanz von Glukose prüfte, repräsentieren beispielsweise die Spalten (a), (c) und (e).

Da alle diese Tests negativ verliefen, nahmen Krebs und Henseleit keine dieser Substanzen in die zur Harnstoffbildung hinführende Kausalstruktur auf.

- (v) Mittels eines vollständigen Vierertests untersuchten Krebs und Henseleit einen potentiellen Kausalzusammenhang zwischen Ammoniak, Ornithin und der Harnstoffbildung (vgl. Spalten (a), (c), (o) und (r)). Der hohe in den Spalten (q) und (r) nachgewiesene Harnstoffgehalt liess den Schluss zu, dass Ammoniak und Ornithin Teil derselben minimal hinreichenden Bedingung der Harnstoffsynthese sind.

 ÜBUNG: *Harnstoffsynthese*

## 8 KAUSALES SCHLIESSEN IM EXPERIMENT

Die Untersuchung von Krebs' und Henseleits Experimenten zur Harnstoffsynthese legen den Schluss nahe, dass die kausalen Schlussverfahren und -prinzipien, die wir in den vorigen Kapiteln entwickelt haben, ohne weiteres auf die experimentelle Praxis übertragbar sind.

### *Homogenität*

Ohne Einhaltung der Homogenitätsbedingung sind kausale Schlüsse unmöglich. Interessant an Beispiel III ist dabei insbesondere der Umstand, dass Krebs und Henseleit nicht nur alles daran setzten, die Kausaltests zur Ermittlung des Untersuchungsprozesses homogen zu gestalten, sondern darüber hinaus auch den Messprozess homogenisierten. Sie wählten für jeden Testdurchlauf identische Versuchsgefässe, füllten in jedes dieser Gefässe dieselbe Menge Versuchsflüssigkeit<sup>22</sup> und glichen Unterschiede im Gewicht der verwendeten Leberschnitte rechnerisch durch Normierung bzw. Relativierung der Messergebnisse aus. Homogenität ist mithin für den gesamten Aufbau, die Durchführung und die Auswertung von Experimenten erforderlich. Ist die Homogenitätsbedingung in irgendeinem Teilprozess eines Experimentes verletzt, ist dieses für eine kausale Auswertung wertlos.

<sup>22</sup>Vgl. die mit „V<sub>F</sub>“ eingeleitete Zeile bzw. die zweitoberste Zeile im Block zum Messprozess in Henseleits Protokoll.

Die Einhaltung der Homogenitätsbedingung ist über die Reproduktion von Kausaltests zu prüfen. Krebs und Henseleit reproduzierten jeden Kausaltest zweifach. Wären einzelne dieser zusammengehörenden Doppelversuche signifikant verschieden ausgefallen, hätten sie deren Resultate für eine kausale Auswertung nicht verwenden können.

#### *Differenztest*

Der Nachweis der kausalen Relevanz eines einzelnen Prüffaktors für eine untersuchte Wirkung erfolgt über den Differenztest. Henseleit dokumentiert auf den Seiten 110 bis 112 seines Laborbuches die Durchführung zweier je einmal reproduzierter Differenztests. Der eine dieser Differenztests ergibt sich aus den Spalten (a) und (c) bzw. (b) und (d), der andere aus den Spalten (a) und (o) bzw. (b) und (p). Im ersten Fall wird Ammoniak auf seine kausale Relevanz hin überprüft, im zweiten Fall Ornithin. Der erste Test samt erfolgreicher Reproduktion legitimiert den Schluss auf die kausale Relevanz von Ammoniak für die Synthese von Harnstoff, der zweite bildet demgegenüber keine Grundlage für einen analogen Schluss auf die kausale Relevanz von Ornithin.

#### *Vierertest*

Ist einmal die kausale Relevanz eines Prüffaktors etabliert, können zusätzliche Faktoren nur über den Vierertest in der entsprechenden Kausalstruktur verortet werden. Hätten Krebs und Henseleit den Zusammenhang von Ammoniak, Ornithin und Harnstoff in den Versuchen, die von den Spalten (a), (c), (o) und (q) bzw. (b), (d), (p) und (r) dokumentiert werden, nicht je mittels eines Vierertests untersucht, hätten sie unmöglich ermitteln können, dass Ammoniak und Ornithin Teil desselben Ursachenbündels der Synthese von Harnstoff sind.

