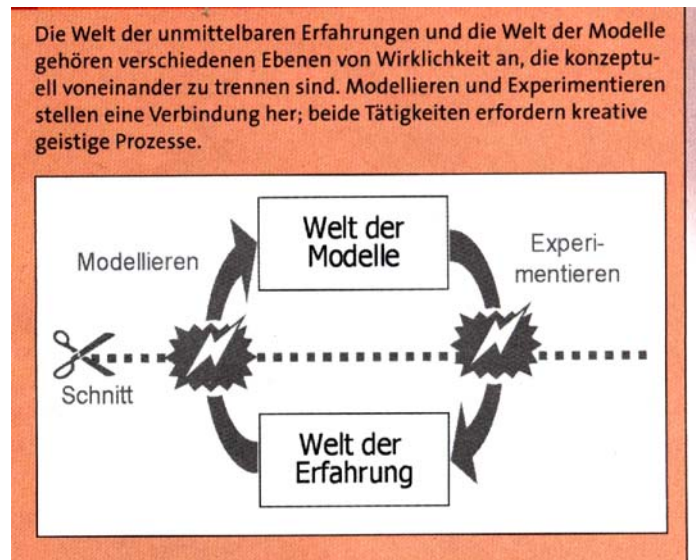


## Das produktive Wechselspiel von Experimentieren und Modellieren

In der deutschen fachdidaktischen Tradition wird zuweilen begrifflich zwischen Versuch (mit geringem Theoriebezug) und dem systematischen Experiment unterschieden, doch das macht angesichts des Kontinuums möglicher Übergangsformen kaum Sinn. Für die Gestaltung von Unterricht ist es erforderlich, sich der vielfältigen Funktionen von Experimenten in den Lehr-, Lern- und Erkenntnisprozessen bewusst zu sein und die Lernumgebung entsprechend den jeweiligen Erfahrungskontexten und Zielen zu konzipieren.

Das Experiment ist immer in enger Verknüpfung mit theoretischer Modellbildung zu sehen: Physikalisches Wissen wird im Wechselspiel von Theorie und Experiment generiert. Beide bedingen einander; eine Theorie ohne Experiment ist blind, ein Experiment ohne Theorie leer. Es gibt, wie Einstein immer wieder betont hat, keinen logischen Weg von der Erfahrungswelt zur Modellwelt<sup>8</sup>. Beide Welten sind voneinander getrennt, angedeutet durch die Trennlinie im Bild, den so genannten epistemischen Schnitt, den man sich zur klaren konzeptuellen Trennung beider Bereiche und zur Strukturierung der eigenen Lern- und Erkenntnisprozesse immer bewusst machen muss.



Produktive geistige Prozesse sind nötig, um zwischen diesen verschiedenen Ebenen hin und her zu springen und eine sinnvolle Korrespondenz herzustellen. In der einen Richtung ist es der kreative Sprung von der Ebene der Erfahrung zu Modellen der Wirklichkeit, zu Vereinfachungen, Verallgemeinerungen, Interpretationen und Abstraktionen. Um die Vielfalt und Veränderung in der Wirklichkeit verstehbar zu machen, bedarf es der Einsicht in Strukturen, Invarianten und Gesetze. In der umgekehrten Richtung sind zur Überprüfung von Modellen und zur Bewertung der Tragfähigkeit von Theorien zielgerichtete Beobachtungen und experimentelle Tests in der Erfahrungswelt nötig. Hier ist letztlich die Kunst des Experimentierens gefordert: Es werden konkrete, theoriegeleitete Fragen an die Wirklichkeit gestellt und im Experiment untersucht, und zwar unter Einbeziehung geeigneter Werkzeuge zur Herstellung reproduzierbarer Bedingungen sowie zur Beobachtung und Auswertung.

Um das 'Interface' zwischen Modell- und Erfahrungswelt beim naturwissenschaftlichen Arbeiten zu durchdringen, sind in beiden Richtungen kreative Prozesse erforderlich, die sich nicht in starre algorithmische Schemata pressen lassen: das Anknüpfen an Alltagserfahrungen ('Sehen, was jeder sieht'), die theoriegeleitete Verallgemeinerung ('Erkennen, was unsichtbar, aber allgemein gültig ist') und schließlich die Überprüfung der Vorhersagen. In der Technik kommt die konstruktive Umsetzung in Produkte hinzu sowie deren Weiterentwicklung und Optimierung nach den unterschiedlichsten Kriterien. Man kann davon ausgehen, dass naturwissenschaftliche Kreativität aus ähnlichen mentalen Ressourcen und Antrieben gespeist wird wie künstlerische Kreativität. Wissenschaft und Technik leben vom produktiven Wechselspiel von Intuition und Imagination mit Rationalität, Logik und Erfahrung. Wie in der Kunst geht es um kreative Interpretationen und Transformationen von Wirklichkeit. Darüber hinaus ist in Wissenschaft und Technik die Tragfähigkeit der Imagination entscheidend, die Passung an die Wirklichkeit und die empirische Bewährung der Modelle und Produkte.

Greift man die Vorstellungen, Vermutungen und Fragen der Lernenden auf, entwickelt sie interaktiv entsprechend dem Theorie-Experiment Zyklus produktiv weiter und fokussiert diese so, dass sie einer experimentellen Überprüfung unterzogen werden können, dann besteht kein

grundsätzlicher, sondern nur ein gradueller Unterschied zwischen der Funktion von Experimenten im fachlichen Erkenntnisprozess und ihrer Rolle in Lehr-Lern-Prozessen. Allerdings ist das subtile, schillernde, kreative Zusammenwirken von konkreten Erfahrungen und abstrakter Modellbildung nicht rezeptartig und schematisch vermittelbar. Es muss in interaktiver Auseinandersetzung selbstständig erfahren und erarbeitet werden. Forschend zu lernen ist ein ebenso natürlicher wie authentischer Zugang zu Naturwissenschaften, der ein vielfältiges, offenes, aber ebenso systematisch strukturiertes Lernumfeld erfordert.

## Eine (unvollständige) Checkliste für Schülerübungen:

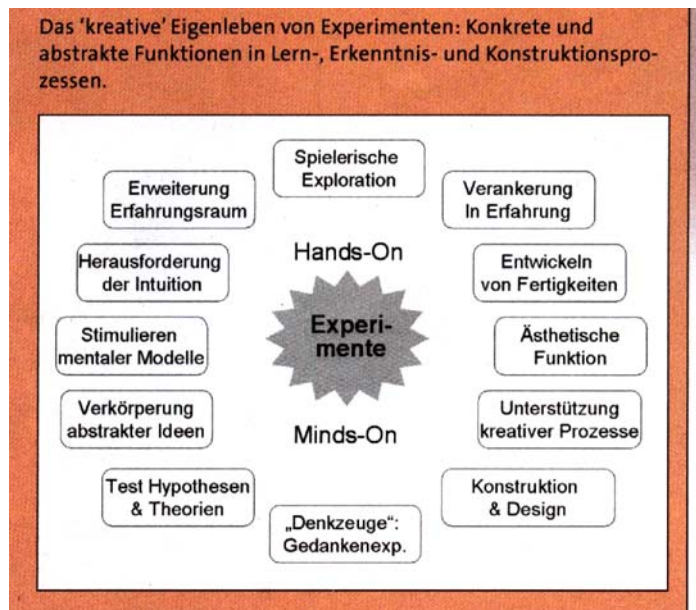
- Die Experimente sollen die Lernenden aktivieren, herausfordern und ihre Selbstständigkeit sowie Kooperation- und Kommunikationsprozesse fördern. Ziel und Zweck der Experimente müssen einsichtig sein und an dem Vorwissen und den Erfahrungen der Lernenden ansetzen.
- In den Aktivitäten sollen keine kochbuchartigen Rezepte umgesetzt werden; vielmehr sollen bei der Planung von Experimenten die Vorstellungen und Vermutung der Lernenden aufgegriffen und produktiv weiterentwickelt werden.
- Hinreichende Kontrolle über die Planung der Arbeit sowie Selbstständigkeit bei der Durchführung müssen gegeben sein ohne die Schülerinnen und Schüler zu überfordern. Es sollten Möglichkeiten bestehen, eigene Ideen zu realisieren und reflektieren, Hypothesen zu testen, Anwendungen zu erproben.
- Experimente müssen insofern 'funktionieren' als sie den Schülerinnen und Schülern Kompetenzerlebnisse vermitteln.
- Die Experimente sollten die Nutzung von geeigneten Werkzeugen einbeziehen, und zwar sowohl Werkzeuge, die sich auf das engere naturwissenschaftliche Arbeiten beziehen (Beobachten, Messen, Datenaufnahme und -analyse, Visualisieren, Modellieren) sowie Werkzeuge zur Förderung von Schlüsselqualifikationen (Kooperation, Kommunikation, Präsentation der Ideen, Ergebnisse und Produkte).

## Werk- und 'Denkzeuge': Das kreative Eigenleben von Experimenten

Die Rolle von Experimenten zur Erkenntnisgewinnung erschöpft sich aber nicht allein in ihrer idealtypischen Einbindung in den Theorie-Experiment-Zyklus. Jenseits dieses methodischen Standardmodells entwickeln Experimente ein 'kreatives' Eigenleben ohne einen immer klar erkennbaren, expliziten Theoriebezug (Bild).

Das gilt im Kontext wissenschaftlicher Entdeckung ebenso wie in der Vermittlung. Spielerische Experimente, Versuche mit überraschendem Ausgang, kontraintuitive Phänomene, scheinbare Zaubereien mit naturwissenschaftlichem Kern ziehen die Beobachter in den Bann, fesseln ihre Aufmerksamkeit und regen zum Nachdenken an. Die Geschichte der Naturwissenschaft ist reich an explorativen Experimenten, die mit einem diffusen vorthoretischen Rahmen einen Bereich allmählich erschlossen haben.

Wie diese Beispiele zeigen sind Experimente nicht nur rationale Werkzeuge der Erschließung und der Gestaltung von Wirklichkeit. Als 'Denkzeuge' entwickeln sie darüber hinaus unerwartete produktive und ästhetische Momente. Schöne Experimente haben einen festen Stellenwert in der Kulturgeschichte der Wissenschaft. Obwohl Schönheit im Auge des Beobachters liegt, so gibt es doch bemerkenswerte Übereinstimmungen darüber, welche Experimente ästhetische Kriterien erfüllen. Es handelt sich zumeist um besonders klare konzeptuelle Schlüsseexperimente, die in relativ herausragender Weise das Denken herausfordern und verändern, die für veränderte Sichtweisen stehen oder neue Ideen verdeutlichen und abstrakte oder komplexe Konzepte auf möglichst einfache Weise in der Erfahrung verankern. Beispiele sind das Eratosthenes-Experiment der Antike, Newtons Zerlegung des Sonnenlichts mit dem Prisma, die Drehwaage von Cavendish oder das Foucault-Pendel.



Experimente sind immer theoriegeleitet, doch die theoretische Tiefe kann in Abhängigkeit von den jeweiligen Umständen und Zielen variieren. Entsprechend vermitteln schöne Experimente auf minimalistische Weise zwischen Erfahrung und Theorie. Sie können dazu führen, dass man Erfahrungsbereiche in einem völlig neuen Licht sieht. Das zeigt ein Experiment besonders klar, das zu den Top-Ten der schönsten physikalischen Versuche gehört. Das Doppelspaltexperiment, sei es mit Licht, mit Elektronen oder mit anderen Quantenobjekten, demonstriert die Unvereinbarkeit der Quantenwelt mit klassisch-dualistischen Welle-Teilchen-Modellen. Bereits bei rudimentärer theoretischer Einbettung vermittelt dieser Prototyp eines Zwei-Wege-Experiments, das zwei klassisch ausgeschlossene Möglichkeiten kombiniert, eine Intuition von der Seltsamkeit und Ganzheit der Quantenphänomene.

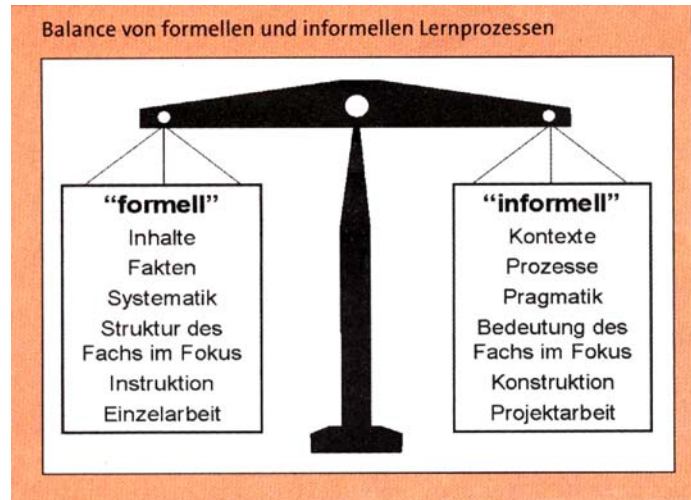
Man erkennt an diesem Beispiel, dass vieles, was die moderne Physik an kontraintuitiven Einsichten zu bieten hat, nur unzulänglich beschrieben werden kann, wenn man sich alleine auf den sprachlichen Vermittlungsmodus beschränkt, gleichgültig ob es sich dabei um die Alltagssprache oder die formale Sprache der Mathematik handelt. Experimente und Bilder sind komplementäre Ergänzungen. Sie repräsentieren Kontexte und Prozesse, die notwendig sind, um der formalen Beschreibung eine Bedeutung in der Erfahrungswelt zu geben. Ein Verständnis des Trägheitsprinzips setzt beispielsweise voraus, dass man Erfahrungen von Trägheit im Blick hat und ihre physikalische Bedeutung in unterschiedlichen experimentellen Situationen und Randbedingungen entfalten kann (Ruhe, gleichförmige Bewegung, Bewegungsänderung). Die abstrakten Prinzipien der Physik lassen sich nur dann sinnvoll denken, wenn man zugleich potentielle Realisationsmöglichkeiten in der Erfahrungswelt assoziiert. Real- und Gedankenexperimente verbinden Objekte der Theorie mit Prozessen der Erfahrungswelt. Im Kontext von bestimmten zentralen Basisexperimenten lässt sich der jeweilige Theorierahmen entfalten. Der konkrete experimentell realisierbare Vorgang wird auf abstrakter Ebene zu einem Werkzeug der Imagination und erschließt neue Bereiche für das Vorstellungsvermögen.

## Mentale Modelle: Verschränkung von Denken und Handeln

In diesem Zusammenhang werden die engen Verbindungen zwischen fachlichen und kognitiven Funktionen des Experimentierens deutlich sowie mögliche Brückenfunktionen zu kreativen Prozessen. Experimentelle Erfahrungen stellen eine konkrete Verkörperlichung physikalischer Erkenntniszusammenhänge dar. Sie verbinden mehr oder weniger abstrakte Begriffe der Modellwelt mit konkreten Vorgängen der Erfahrungswelt. In dieser Verschränkung von Objekten

und Prozessen ergeben sich enge Parallelen zu neueren Modellen biologischer Informationsverarbeitung, vor allem in Bezug auf die interne Repräsentation von Bedeutung. Unser Gehirn arbeitet anders als ein Computer: Objekte der Außenwelt werden nicht symbolisch quasi als statische Muster repräsentiert. Man weiß vielmehr aus kognitionspsychologischen und neurobiologischen Studien, dass mit der Aktivierung mentaler Objekte zugleich die Aktivierung potentieller Handlungsschemata verbunden ist<sup>11</sup>. In mentalen Repräsentationen sind Objekte und Prozesse auf weitgehend unbewusste Weise miteinander verwoben.

Beispielsweise löst die Präsentation einer Tasse unbewusste potentielle Handlungsmuster aus (zum Beispiel Greifen, Trinken, Füllen, Leeren). Diese Muster werden auch aktiviert, wenn man an das Objekt denkt oder wenn man andere mit diesem Objekt in Interaktion sieht. Die tatsächliche Ausführung dieser potentiellen Handlungen unterbleibt jedoch im Imaginationsmodus. In inneren Repräsentationen der Außenwelt verbindet unser Gehirn offensichtlich sensorische und motorische Aspekte. Man kann daher vermuten, dass die Bedeutung von Begriffen in mentalen Prozessen ganz wesentlich auch motorisch repräsentiert ist. In diesem Sinne haben geistige Prozesse, auch scheinbar völlig abstrakte, eine konkrete, in der Erfahrung verankerte Wurzel. Man sagt, die kognitiven Prozesse sind 'verkörperlicht'.



Die mit tatsächlichen oder vorgestellten Objekten der Außenwelt verbundenen Aktionsmuster sind für die Modellierung unserer physischen und sozialen Umgebung wichtig, um künftige Ereignisse antizipieren und Handlungen planen zu können. Ein zentrales damit zusammenhängendes Merkmal ist 'Empathie', das Hineinversetzen in Personen ebenso wie in Situationen und komplexe Handlungsabläufe". Es liegt nahe, diese Prozesse der mentalen Modellierung in engem Zusammenhang mit der physikalischen Modellbildung zu sehen. Die Fähigkeit, in Gedanken in 'die Zukunft zu blicken' und Szenarien für mögliches und sinnvolles Verhalten zu entwerfen ist für unser biologisches Überleben zentral. Sich in ein physikalisches System hineinzusetzen und Gedankenexperimente durchzuführen, die das Verhalten des Systems zutreffend modellieren, ist eines der Merkmale physikalischer Kreativität. In der mentalen Modellbildung sind innere Bilder und potentielle Handlungen eng miteinander verschränkt. Sprachliche Prozesse sind offenbar von eher untergeordneter Bedeutung. Es spricht einiges dafür, dass in dieser reflexiven Verschränkung von Imagination mit (potenzieller) Aktion eine der Wurzeln wissenschaftlicher und technischer Kreativität liegt.

Die neurobiologischen Evidenzen unterstreichen darüber hinaus die Bedeutung konkreter Handlungen. Man kann annehmen, dass die Aktivierung physikalischer Konzepte (zum Beispiel Masse, Trägheit) umso besser gelingt, je breiter ihre Bedeutung in der Erfahrung verankert ist. Aus konkreten Handlungsschemata entwickeln sich in reflexiver Ausschärfung schließlich zunehmend komplexere und abstraktere mentale Modelle. Abstraktions- und Problemlöseprozesse gelingen umso besser, je reichhaltiger und strukturierter der Erfahrungshintergrund ist, auf dem sie aufbauen.

Experimente haben also insofern eine eigenständige Funktion, indem sie den Beobachter interaktiv einbinden und 'Hands-On' sowie mit allen Sinnen auf einer intuitiven Ebene wichtige Primärerfahrungen ermöglichen. Insoweit ist der Anspruch berechtigt, dass Experimente für sich sprechen. Experimente weisen jedoch über die unmittelbare Erfahrung hinaus. Jenseits dieses intuitiven Zugangs können Experimente aber nur dann weiter gehende Wirkung entfalten, wenn sie auf einen 'vorbereiteten' Geist treffen. Sie wirken nur vor einem hinreichend strukturierten theoretischen Hintergrund. Die enge Verbindung von Hands-On und Minds-On im Lernen von Naturwissenschaften weiterzuentwickeln bleibt eine zentrale Herausforderung für die praxisnahe didaktische Forschung der Zukunft.