

Spannung – Streben nach dem Gleichgewicht

Spannung setzt die Existenz eines Gleichgewichts voraus. Der Begriff Spannung ist somit Teil des integralen Begriffs des natürlichen Gleichgewichts.

Vorgestellt werden exemplarisch mehrere Unterrichtsreihen mit einfachen Versuchen aus der Physik und Chemie, die von Klasse 5 an bis hin zur allgemeinen Hochschulreife zum Denken in „Gleichgewichten und Spannungen“ anleiten. Dazu wird das naturwissenschaftliche Basiskonzept des „Systems“ als abgetrennter Teil der Natur eingeführt. Ziel ist die Erkenntnis zu vermitteln, dass verantwortliche Nachhaltigkeit im menschlichen Handeln in der Beachtung von natürlichen Gleichgewichten besteht. Es zeigt sich, dass Energie-, Spannungs- und Symmetriebetrachtungen gewinnbringend auf den Stoffumsatz in der Chemie anwendbar sind.

1. Mechanisches Modell zum Kräfte-Gleichgewicht

Schwerefeld – magnetisches Feld – elektrisches Feld

2. Elektrostatistisches Modell vom Ladungsgleichgewicht

Elektroneutralität – Ladungstrennung – Spannung – Strom – Stromstärke

3. Mechanisches Modell zum Systembegriff und Energie-Gleichgewicht

Inneres System – Energieänderung (Druck - Volumen - Temperatur) – Äußeres System

4. Chemisches Modell von Stoffgleichgewichten

Säure - Base – Gleichgewicht, Redox – Gleichgewicht;
Prinzip des kleinsten Zwanges

5. Elektrochemisches Modell zum chemischen Potential

Freie Enthalpie

Natur ist umfassend.

Energie-Erhaltungssatz

1. Alles in der Natur befindet sich im Gleichgewicht.

Ein Gleichgewicht erkennt man daran, dass sich im betrachteten Zeitraum nichts ändert.

2. Um ein bestehendes Gleichgewicht in einem System zu verändern, muss aus der Umgebung Energie aufgewendet werden. Dabei entstehen angeregte Zustände als Antagonisten, zwischen denen eine „Spannung“ besteht.

3. Die Spannung zwischen den Antagonisten führt zum Bestreben der Natur unter Energieabgabe an die Umgebung in das ursprüngliche Gleichgewicht zurückzukehren.

System

4. Zur naturwissenschaftlichen Untersuchung von Gleichgewichten bildet man die Natur im Labor nach. Man trennt das Experiment von der Natur ab und nennt es System, den Rest nennt man Umgebung, die Trennlinie Systemgrenze.

5. Anschließend beeinflusst man das System von außen durch Zufuhr von Energie und/oder Stoffen). Das System weicht in einen neuen, angeregten Gleichgewichtszustand aus.

6. Sich selbst überlassen kehrt das angeregte System in den Ausgangszustand zurück. Es wird getrieben von der dem Bestreben der Natur Spannungen (Potentialdifferenzen) durch Energieabgabe abzubauen.

Die präsentierten Versuchsreihen sind Beispiele für das naturwissenschaftliche Arbeiten, das Denken in Systemen und das Bilden von Modellen.

1. Mechanisches Modell zum Kräfte – Gleichgewicht;

Schwerefeld – magnetisches Feld – elektrisches Feld

Basis für das mechanische Modell bilden die drei Bewegungsaxiome von Newton. Am Ende stehen Erkenntnisse über Gleichgewichte, den Impulserhaltungssatz und den Energieerhaltungssatz.

Versuch 1.1 Zur Demonstration von Kraftfeldern werden drei ausbalancierte, drehbar gelagerte Nadeln präsentiert.

Einfache Handversuche und Anweisungen geben den Schülern die Möglichkeit Magnetismus und Reibungselektrizität zu erforschen. Eine Beschreibung an dieser Stelle sprengt den zur Verfügung stehenden Platz.

Ergebnis: Schüler schließen aus den Unterschieden der Materialien (PVC-Stäbe; Magnet, zweiter Magnet und Eisenstab; Glasstäbe), der Lagerung und der Behandlung (Reibung) auf unterschiedliche Naturerscheinungen: Schwerefeld, Magnetfeld und elektrisches Feld. Man erkennt stabiles Gleichgewicht (Magnetnadel; Elektroskopnadel) an den Rückstellkräften und indifferentes Gleichgewicht an deren Fehlen. ([Video zum indifferenten und stabilen Gleichgewicht](#)).

Versuch 1.2 Die Hebelwaage ist ebenfalls ein gut geeignetes und viel untersuchtes Beispiel zur Kompetenzbildung bei Kindern. Daher wird an dieser Stelle nur auf eine im Internet einsehbare Studie verwiesen: http://psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/204/pdf/Krist_ZPID.pdf.

Versuch 1.3 Mit geschlossenen Augen soll der Punkt an einer homogenen Stange gesucht werden, den man mit einem Finger unterstützen muss, damit die Stange ausbalanciert ist. Dazu wird die Stange mit zwei Fingern am Ende der Stange unterstützt. Danach werden die Finger langsam aufeinander zu bewegt.

Beobachtung: In der Regel bewegt sich immer nur ein Finger abwechselnd, bis sich beide Finger in der Mitte treffen.

Erklärung: Rutscht ein Finger zur Mitte, dann entstehen hinter dem Finger Gegengewichte, die die Last auf dem anderen Finger vermindert. Die Reibungskraft verringert sich an dieser Kontaktstelle und die Stange beginnt hier zu gleiten. Das funktioniert auch mit einer inhomogenen Stange, wobei dann natürlich nicht die Mitte gefunden wird.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Einstellung des Gleichgewichts durch die Naturgesetze **automatisch** erfolgt.

Versuch 1.4 Auf einer frei schwebenden, nur im Schwerpunkt unterstützten Rollbahn werden zwei Rollwagen ausbalanciert („nahezu“ labiles Gleichgewicht). Zwischen ihnen befindet sich eine gespannte Feder (Energieeintrag von außen). Anschließend wird die Federspannung ausgelöst. Die Masse der Rollwagen wird variiert.

Beobachtung: Die Wagen fahren auseinander, wobei die Geschwindigkeit von der Masse der Rollwagen abhängt. (Videos). Reibungskräfte führen zu einer verzögerten Bewegung. In der Betrachtung der Standbilder zeigt sich, dass das Produkt aus zurückgelegter Wegstrecke und Masse des Wagens auf beiden Seiten gleich ist, so dass die Rollbahn während der Laufzeit nicht kippt!

Bei genügend großer Reibungskraft bleibt auch die Rollbahn in der Balance.

Erklärung: Es gilt der Impulserhaltungssatz.

Die Bewegungsenergie wird durch die Reibungsenergie aufgezehrt. Es zeigt sich eine symmetrische Energieverteilung.

2. Elektrostatisches Modell vom Ladungsgleichgewicht

Elektroneutralität – Ladungstrennung – Spannung – Strom – Stromstärke

Versuch 2.1 Durch Reiben eines PVC-Kunststoffstabes mit einem Pullover aus einem anderen Material werden unterschiedliche Ladungen erzeugt. Die Ladung des Kunststoffstabes wird durch Abstreifen (Isolator!) auf ein elektrisch neutrales Elektroskop übertragen.

Beobachtung: Das Elektroskop zeigt einen starken Ausschlag.

Erklärung: Durch Reiben erzeugt man elektrische Aufladung. Auf dem PVC-Stab befindet sich die gleiche Ladung, die entgegengesetzte befindet sich auf dem Stoff, mit dem gerieben wurde. Gleiche Ladungen stoßen sich ab. Befinden sich gleiche Ladungen auf einem Stoff, auf dem sie sich bewegen können (Metalle), so nehmen sie Plätze ein, bei denen die Abstoßung am geringsten ist. Daher wird der bewegliche Zeiger des Elektroskops von der gleich geladenen Aufhängung abgestoßen.

Versuch 2.2 Nun wird das neutral geladene Elektroskop über ein Metallkabel mit einem Plattenkondensator verbunden. Der Plattenkondensator besteht aus einem Metallgestell, an dem zwei Metallplatten exakt parallel gegenüber aufgestellt sind. Eine Platte ist isoliert fest mit dem Gestell verbunden, die andere ist senkrecht zur ersten Platte beweglich und leitend mit dem Gestell verbunden.

Beobachtung: Das Elektroskop zeigt einen ziemlich schwachen Ausschlag, der erst nach etwa 4-5mal Reiben gleich groß ist wie beim ersten Versuch.

Erklärung: Die beim Reiben erzeugte Ladung verteilt sich auf dem Elektroskop und auf der isolierten Platte des Plattenkondensators. Dadurch sind die abstoßenden Kräfte zwischen dem Zeiger und der S-förmigen Aufhängung nicht mehr so groß wie beim ersten Versuch. Erst weitere (mehr) Aufladung erreicht gleiche Abstoßungskräfte.

Versuch 2.3 Aufbau wie bei Versuch 2.2, nun wird aber zusätzlich die nichtisolierte Platte mit der Erde verbunden.

Beobachtung: Das Elektroskop zeigt nun erst nach dem 10-15. Mal etwa den gleichen Ausschlag wie bei Versuch 2.1.

Erklärung: Die Ladung auf der isolierten Platte zieht entgegengesetzte Ladung über die Erdleitung auf die Platte. Dadurch wird die Ladungsansammlung auf den Platten größer, die Ladung wird auf den Platten „kondensiert“ → „Plattenkondensator“. Sie fehlt daher am Elektroskop. Erst nach weiterer Ladungserzeugung durch Reiben und Abstreifen lädt sich das Elektroskop auf den Wert von Versuch 1 auf.

Versuch 2.4 Wie Versuch 3, jedoch wird durch nur viermaliges Reiben und Abstreifen wenig Ladung auf den Plattenkondensator gebracht, so dass das Elektroskop gerade merklich ausschlägt. Anschließend wird die geerdete Platte von der isolierten Platte wegbewegt.

Beobachtung: Zieht man die Platten des Kondensators auseinander, so schlägt das Elektroskop sofort stark aus. Der Versuch ist umkehrbar und oft wiederholbar.

Erklärung: Um die bereits getrennten unterschiedlichen elektrischen Ladungen gegen die zwischen ihnen bestehende Anziehungskraft weiter zu trennen, ist die Zufuhr von Energie nötig. Das Elektroskop zeigt demnach nun die Spannung zwischen getrennten Ladungen auf dem Plattenkondensator an. Man kann das symbolisch durch Einzeichnen eines Bogens mit Sehne verdeutlichen.

Unter Spannung versteht man anschaulich und allgemein das Bestreben der Natur, Zustände unterschiedlicher Energie auszugleichen.

Versuch 2.5 Ein Plattenkondensator mit eng stehenden Platten ist mit einem Elektroskop verbunden. Der Plattenkondensator wird aufgeladen. Anschließend werden die Platten des Kondensators auseinander gezogen, wodurch die Spannung zwischen den Platten weiter vergrößert wird. Zwischen die Platten wird mit einem Faden ein mit Metalllack überzogener Tischtennisball gehängt.

Beobachtung: Der Tischtennisball wird sofort zu einer Platte hingezogen, prallt dort ab und pendelt zur anderen Platte und von dort wieder zurück. Der Vorgang wiederholt sich mehrfach mit allmählich abnehmender Geschwindigkeit.

Erklärung: Zwischen den Platten besteht ein elektrisches Feld. Durch Influenz wird die Ladung auf dem Tischtennisball getrennt. Die Anziehungskräfte zwischen ungleichen Ladungen zur näheren Platte überwiegen die Anziehungskräfte der entfernten Platte. Dadurch wird der Tischtennisball zur näherliegenden Platte hingezogen. (Entsprechendes gilt umgekehrt für die Abstoßungskräfte der gleichartigen Ladungen.)

Beim Berühren lädt sich der Ball vollständig mit der gleichen Ladung der Platte auf, wird danach von dieser abgestoßen und von der anderen Platte angezogen. Der Vorgang wiederholt sich an der anderen Platte mit der umgekehrten Ladung. Dabei wird elektrische Ladung von einer Seite zur anderen transportiert.

Die Bewegung des Tennisballs ist ein Modell für den elektrischen Strom, der zu einem Ladungsausgleich und Spannungsabbau führt. Die Geschwindigkeit der Ball-Bewegung ist ein Modell für die Stromstärke (Ladungstransport pro Zeit).

3. Mechanisches Modell zum Systembegriff und Energiegleichgewicht

Inneres System – Energieänderung (Druck - Volumen - Temperatur) – Äußeres System
Durch Einfluss von äußerer Energie (Volumenänderung, Temperaturänderung) soll das bestehende Gleichgewicht in einer Apparatur (offenes System), bestehend aus Glühröhr, Wasserfalle, Gaswaschflasche gestört werden. Durch Störung des Gleichgewichts entstehen Spannungen in Form von Potentialdifferenzen der Wasserstände in der Gaswaschflasche. Die durch Masseverschiebung erzeugte Potentialdifferenz führt nach Beendigung des äußeren Einflusses zum Potentialausgleich und damit zur Rückkehr ins statische Gleichgewicht.

Versuch 3.1 Durch Eindrücken oder Herausziehen des Glühröhres wird das Volumen der Apparatur verkleinert.

Beobachtung: Die anfangs in der Gaswaschflasche gleich hoch stehenden Flüssigkeitsoberflächen verschieben sich und bleiben so stehen.

Erklärung: Durch Volumenänderung in einer durch eine Flüssigkeit abgeschlossene Apparatur entstehen ungleich hohe Flüssigkeitsstände. Es entsteht ein „Potentialunterschied“ (Höhenunterschied, Druck, Spannung). Nach Rücknahme der Volumenänderung entsteht das ursprüngliche Füllstandsgleichgewicht.

Versuch 3.2 Durch Erhitzen mit einem Gasbrenner wird die Luft im Glühröhr erhitzt und anschließend abgekühlt.

Beobachtung: Die anfangs in der Gaswaschflasche gleich hoch stehenden Flüssigkeitsoberflächen verschieben sich und bleiben so stehen.

Erklärung: Durch Temperaturänderung in einer durch eine Flüssigkeit abgeschlossenen Apparatur bilden sich ungleich hohe Flüssigkeitsstände. Es entsteht ein „Potentialunterschied“ (Höhenunterschied, Druck, Spannung). Nach Rücknahme der Temperaturveränderung entsteht das ursprüngliche Füllstandsgleichgewicht.

4. Chemische Modelle zu Stoffgleichgewichten:

Säure - Base – Gleichgewicht, Redox – Gleichgewicht;
Prinzip des kleinsten Zwanges

Grundlage der chemischen Reaktion sind die Hauptsätze der Thermodynamik. Sie beschreiben Gleichgewichtszustände. Durch die Anwendung der Thermodynamik, verbunden mit Symmetriebetrachtungen, wird das natürliche Gleichgewicht von Marmor beeinflusst. Man kommt so von der Vorstellung eines Stoffes, der sich im natürlichen Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindet, zur Definition der Chemikalie, einem energetisch angeregter Stoff. Chemikalien haben die Energie in Form chemischer Energie gespeichert. Am Beispiel des technischen Kalkkreislaufes werden chemische Gleichgewichte als Basis für verantwortliches Handeln in der Chemie abgeleitet.

Versuch 4.1 Marmor (A, 1) wird geblüht. Die Reaktionsprodukte werden in Wasser gelöst und mit dem Säure-Basen-Indikator Bromthymolblau (D, 3) untersucht.

Beobachtung: Bei der Thermolyse bilden sich gebrannter Kalk (A, 1/2) und Kohlendioxid (B), die in Wasser gelöst Lauge und Säure bilden. Diese sollten sich neutralisieren und wieder Marmor bilden.

Erklärung: Bei der chemischen Zersetzung entstehen Antagonisten. In einem geschlossenen System bildet sich das ursprüngliche Gleichgewicht unter Energieabgabe wieder zurück. Hier entweicht ein Säure-bildendes Gas in die Umwelt, was verhindert werden sollte, weil es das bestehende Gleichgewicht der Umwelt verändert!

Der chemische Vorgang ist Teil des technischen Kalkkreislaufes ([Flash-Animation](#)) und wird beim Bauen und der Abgasentsorgung genutzt.

Versuch 4.2 Das in V. 4.1 gewonnene Kalkwasser wird zur Untersuchung von Kohlendioxid in einem Atemzug benutzt. Dazu wird zunächst ein ganzer Atemzug durch das Kalkwasser geleitet. – Anschließend wird der gleiche Atemzug durch das Kalkwasser ausgeatmet.

Beobachtung: Raumluft enthält in der Regel mit Kalkwasser nicht nachweisbare Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, ausgeatmete Luft bildet dagegen sofort einen weißen Niederschlag, der sich bei zu langem Ausatmen teilweise wieder löst.

Erklärung: Leben benötigt ein Fließgleichgewicht. Einerseits muss er laufend Energie zuführen und Wärme abgeben, andererseits Nahrung und Sauerstoff einnehmen und Kohlenstoffdioxid sowie Wasserdampf ausatmen.

Durch Assimilation, der Umwandlung von Kohlenstoffdioxid und Wasser mit Sonnenenergie, wird der biologische Kreislauf geschlossen.

Versuch 4.3 Versuchsaapparaturen 4.1 und 4.2 werden zu einem geschlossenen System verbunden. Darin wird die Thermolyse von Barimnitrat, „das Prinzip des kleinsten Zwanges“ an den entstehenden Stickoxiden und die vollständig Entsorgung in ein natürliches, ungiftiges, chemisches Gleichgewicht gezeigt. (Versuchdetails siehe [Anlage Bilder](#))

5. Elektrochemisches Modell zur chemischen Bindung und freien Enthalpie

Hofmann-Elektrolyse

Eine Reihe von Energieformen spielen eine Rolle bei chemischen Umsetzungen. Im Folgenden werden neben anderen die Verteilungsenergie $T \cdot \Delta S$ und die Folgen des elektrochemischen Potentials betrachtet.

Versuch 5.1 In einer H-förmigen Elektrolyse-Apparatur (Hofmannscher Elektrolyseapparat) wird gesättigte Kaliumsulfatlösung mit elektrischer Energie behandelt. Der Gleichgewichtszustand wird chemisch durch den Säure-Basen-Indikator Bromthymolblau (BTB) nachgewiesen. Die neutrale wässrige Lösung ist grün, Säuren färben BTB-Lösung gelb, Laugen dagegen blau. Die elektrischen Bedingungen werden durch Spannungsmessgerät und Strommessgerät überwacht.

Beobachtung: Nach der Elektrolyse erhält man in einem Schenkel der Apparatur Wasserstoff und Kalilauge, im anderen Schenkel Sauerstoff und Schwefelsäurelösung.

Erklärung: Durch Zufuhr elektrischer Energie oberhalb der Zersetzungsspannung von 1,5 Volt werden elektrisch neutrale Wassermoleküle H_2O in Hydroxid OH^- und Hydronium H^+ zerlegt und getrennt. Es entsteht Kalilauge und Schwefelsäure. Durch Elektronenübergang werden die Hydroniumionen zu Wasserstoff H_2 reduziert und die Hydroxidionen zu Sauerstoff O_2 oxidiert. Außerdem entsteht durch die Konzentrationsunterschiede eine Potentialdifferenz (Spannung). Die chemische Energie ist sowohl im Wasserstoff (2 Raumteile) und Sauerstoff (1 Raumteil) als auch in Säure und Lauge gespeichert.

Versuch 5.2 Nun wird die Lösung durch Drehen und Wenden gemischt.

Beobachtung: Die gelbe Lösung (Schwefelsäure) mischt sich mit der blauen Lösung (Kalilauge) so, dass sich wieder die Ausgangsfarbe (grün) der neutralen Kaliumsulfat/BTB-Lösung einstellt.

Erklärung: In einer Neutralisationsreaktion reagieren Säure und Lauge zu Salz und Wasser, die Neutralisierungsenergie wird frei.

Versuch 5.3 Die Elektrolyse-Apparatur wird umgekehrt montiert und von der Spannungsquelle getrennt. Die aufgefangenen Gase werden so weit in die Lösung zurückgedrückt, dass die Platin-Elektroden je zur Hälfte in die Lösung und den Gasraum eintauchen.

Beobachtung: Am Spannungsmessgerät findet man die Spannung von 1,5 Volt. Es fließt ein deutlicher Strom.

Erklärung: Wasserstoff und Sauerstoff reagieren in einer Brennstoffzelle zu Wasser. Die Bindungsenergie wird frei.

Der neutrale Ausgangszustand ist wieder hergestellt.

Anmerkung: Läuft der Versuch über einen längeren Zeitraum, so bilden sich erneut Säure und Lauge, die sich ebenfalls zu jedem Zeitpunkt in der geschlossenen Apparatur neutralisieren lassen.