



MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Mathematik im Dienste der chemischen Stöchiometrie als chemiedidaktische Herausforderung

verfasst von | submitted by

Philipp Röck BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 199 504 520 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree programme as it appears on the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Chemie Unterrichtsfach Mathematik

Betreut von | Supervisor:

Hon.-Prof. Dr. Michael Alfred Anton

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	4
Abstract (englisch)	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	6
1.3 Forschungsfrage	7
1.4 Hypothesen	7
1.5 Aufbau der Arbeit	8
2 Begriffs- und Rahmenerklärung	10
2.1 Mathematik im Chemieunterricht	10
2.2 Mathematisierung	10
2.3 Stöchiometrie	11
2.4 Richtiger Stellenwert	11
2.5 Rahmenerklärung	11
3 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	12
3.1 Mathematik als Motivationshemmnis	12
3.2 Transferproblem	12
3.3 Differenzierung der Begriffe	13
3.4 Aufgabenstruktur	13
3.5 Exemplarische Themenfelder	14
3.5.1 Reaktionsgleichungen	14
3.5.2 pH-Wert	21
3.5.3 Massenwirkungsgesetz	26
4 Kriterienrahmen	32
4.1 Theorie des Kriterienrahmens	32
4.2 Matrix des Kriterienrahmens	33
5 Unterrichtskonzept	34
5.1 Der Balanceakt	34
5.2 Designprinzipien und didaktischer Rahmen	35
5.3 Das Konzept	37
5.4 Entscheidungshilfen und Grenzen	39

6	Methodik	40
6.1	Forschungsdesign	40
6.2	Fragebogen	40
6.2.1	Items-Formulierung	41
6.2.2	Antwortformat	41
6.2.3	Aufbau des Fragebogens	41
6.3	Stichprobe	42
6.4	Datenerhebung	42
6.5	Auswertung.....	42
6.5.1	Likert-Items.....	43
6.5.2	Offene Antworten	43
7	Ergebnisse.....	44
7.1	Rücklauf und Plausibilitätscheck.....	44
7.2	Demographie der Stichprobe.....	44
7.3	Einschätzung zum Stellenwert von Mathematik (A1–A5)	45
7.4	Konzeptbewertung (K1–K10)	46
7.5	Gesamteinschätzung (G1–G2).....	48
7.6	Qualitative Rückmeldungen	49
7.6.1	Mathematische Mindestanforderungen.....	49
7.6.2	Stärken des Konzepts.....	49
7.6.3	Risiken.....	49
7.6.4	Verbesserung der Alltagstauglichkeit.....	49
8	Diskussion.....	50
8.1	Klärung der Forschungsfrage und der Hypothesen	50
8.2	Validierung durch ExpertInnenbewertung	51
8.3	Überarbeitungsschwerpunkte	51
8.4	Limitationen.....	52
9	Fazit und Ausblick.....	54
	Literaturverzeichnis	56
	Abbildungsverzeichnis	59
	Tabellenverzeichnis	59
	Anhang.....	60

Abstract (deutsch)

Die vorliegende Arbeit untersucht, welchen Stellenwert Mathematik im Chemieunterricht einnehmen darf, damit Lernende chemische Inhalte verstehen und festigen können. Ausgehend von Transferproblemen zwischen Mathematik- und Chemieunterricht sowie typischen Verständnishürden wird ein Kriterienrahmen entwickelt, der mathematische Anforderungen im Chemieunterricht auf Zumutbarkeit sowie Sprach- und Symbolklarheit bewertet.

Darauf aufbauend wird ein Unterrichtskonzept entworfen, in dem mathematische Schritte an chemische Inhalte geknüpft werden. Das Konzept wurde mittels online-Fragebogen mit 15 aktiven Chemielehrpersonen (ExpertInnen) validiert. Die ExpertInnen bewerten den Werkzeugcharakter von Mathematik und die Transparenz einer sinnhaften Verwendung von mathematischen Operationen überwiegend positiv, weisen jedoch darauf hin, dass eine Übermathematisierung mathematikschwächere SchülerInnen benachteiligt. Aus den Rückmeldungen werden Weiterentwicklungen abgeleitet, um mathematische Inhalte gezielt einzusetzen, ohne dass Chemieunterricht zu einem verdeckten Mathematikunterricht wird.

Abstract (englisch)

This thesis examines how far mathematics may go in chemistry education so that learners can understand and consolidate chemical concepts. Building on transfer difficulties between mathematics and chemistry lessons as well as typical obstacles to understanding, a set of criteria is developed to evaluate the reasonableness of mathematical demands in chemistry instruction and the clarity of language and symbols.

On this basis, a teaching concept is designed in which mathematical steps are explicitly linked to chemical content. The concept was validated through an online questionnaire with 15 practicing chemistry teachers (experts). The experts rate the tool-like function of mathematics and the transparency of a meaningful use of mathematical operations predominantly positively. However, they point out that excessive mathematization disadvantages students with weaker mathematical skills. From their feedback, further refinements are derived to use mathematics in a targeted way without turning chemistry lessons into disguised mathematics instruction.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Albert Einstein soll in einem Brief an ein Mädchen, das Probleme im Fach Mathematik hatte und den weltberühmten Physiker im Jahr 1943 um Rat fragte, folgendes geantwortet haben: "Mach' dir keine Sorgen wegen deiner Schwierigkeiten mit der Mathematik. Ich kann dir versichern, dass meine noch größer sind.". Man möchte meinen, dass ein Genie wie Albert Einstein keine Probleme im Gebiet der Mathematik haben sollte. Doch auch in weiteren Zitaten erwähnt er, dass die Mathematik nicht zu seinen Stärken zählte. Es ist jedoch offensichtlich, dass sein mathematisches Grundverständnis überdurchschnittlich hoch gewesen sein muss, um beispielsweise die allgemeine Relativitätstheorie aufstellen zu können.

Doch nicht nur in der Physik nimmt die Mathematik einen wichtigen Stellenwert ein. Auch in allen weiteren Naturwissenschaften wäre ein Arbeiten ohne mathematisches Wissen nicht möglich. Formeln, Modelle, Rechnungen und vor allem das Aufstellen und Lesen von Funktionen zählen zu den Grundbegriffen bzw. Grundkompetenzen, die in allen Naturwissenschaften zur Anwendung kommen bzw. vorausgesetzt werden.

Speziell in der Schule sind die Lehrpläne *theoretisch* aufeinander abgestimmt, sodass die Mathematiklehrperson den Kompetenzgrundstock für die naturwissenschaftlichen Fächer - Biologie, Chemie und Physik - legen sollte. Dies ist jedoch zwei wichtigen Parametern unterworfen. Zum einen einer engagierten und kompetenten Lehrperson sowie zum anderen von der Bereitschaft der SchülerInnen zur Wissensaufnahme und dem Kompetenzerhalt der neugewonnenen Inhalte.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Aus einer Online-Umfrage im Jahr 2023 geht hervor, dass Wissensspeicherung bei SchülerInnen oftmals nur von kurzer Dauer ist. Das Nachhilfeinstitut LernQuadrat befragte 800 SchülerInnen zum Thema *Bulimie-Lernen*. Unter dem Begriff versteht man den kurzfristigen Aufbau von Wissen, der nach einer Prüfung bzw. einem Test wieder verloren geht. Mehr als drei Viertel der SchülerInnen gaben an, dass sie nach einer Prüfung oder einem Test das Gelernte wieder vergessen. Aus der Umfrage ist allerdings auch ersichtlich, dass zumindest 1 von 20 SchülerInnen sich das Gelernte so gut wie ein Leben lang merkt (LernQuadrat, 2023). Für die mathematische Kompetenzvoraussetzung in den naturwissenschaftlichen Fächern stellen somit die restlichen 19 von den 20 Personen ein gewisses Problem bzw. eine Herausforderung dar.

Im Unterrichtsfach Chemie wird sehr schnell vom mathematischen Verständnis und Wissen der SchülerInnen Gebrauch gemacht. Beispielsweise wird beim Lesen, Aufstellen und Ausgleichen von Reaktionsgleichungen die mathematische Kompetenz vom *Lösen*

einer Gleichung vorausgesetzt. Ein weiteres Beispiel findet sich schnell beim Aufstellen des Massenwirkungsgesetzes, welches im Grunde eine mathematische Formel in Form eines *Quotienten* darstellt. Kerstin Höner weist in diesem Kontext auf das Problem hin, dass Lehrpersonen oftmals auf Unverständnis der SchülerInnen stoßen, wenn im Unterrichtsfach Chemie mathematische Kompetenzen abgefragt bzw. verlangt werden (Höner, 1996). Demnach sollte eine Lehrperson nicht davon ausgehen, dass alle SchülerInnen das mathematische Know-how mitbringen, um chemische Inhalte, die sich mathematischer Begriffe oder Rechenregeln bedienen, sofort zu verstehen.

Es liegt somit der Schluss nahe, dass SchülerInnen mit mangelnden mathematischen Kompetenzen eventuell weniger Interesse am Fach Chemie besitzen. Diesen Analogieschluss bestätigt Höner in der von ihr durchgeführten Umfrage. Sie kam zu dem Schluss, dass SchülerInnen, die Probleme im Fach Mathematik haben, den Chemieunterricht als unbeliebt empfinden (Höner, 1996). Demnach stellt sich für die Lehrperson das Problem im Chemieunterricht mathematische Inhalte, die für Berechnungen, Modelle etc. notwendig sind, in einer Art und Weise zu vermitteln, dass SchülerInnen ihr Interesse nicht am Fach verlieren, wenn sie einen Mangel an mathematischen Kompetenzen aufweisen.

Laut der beiden zuvor erwähnten Umfragen und den daraus resultierenden Problemstellungen stellt sich für eine Lehrperson im Unterrichtsfach Chemie nun die Frage, welche mathematischen Kompetenzen vorausgesetzt werden dürfen und wie weit man mit mathematischen Inhalten im Chemieunterricht überhaupt gehen darf bzw. soll.

1.3 Forschungsfrage

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der folgenden Forschungsfrage:

Welchen Stellenwert darf die Mathematik in einem didaktisch und inhaltlich sinnvoll konzipierten Chemieunterricht einnehmen, sodass SchülerInnen bestmöglich chemisches Wissen generieren und festigen können?

Eine saloppe (kürzere) Formulierung ist folgende:

Wie weit darf die Mathematik im Chemieunterricht gehen?

1.4 Hypothesen

Die folgenden drei Hypothesen werden in Bezug zur Forschungsfrage aufgestellt.

Hypothese 1: Eine offene Verknüpfung von mathematischem Vorwissen für chemische Inhalte unterstützt bei der chemischen Wissensgenerierung.

Im Chemieunterricht sollte eine Verknüpfung zur Mathematik offen den SchülerInnen kommuniziert werden, sodass sie auf bereits Erlerntes - unabhängig davon, ob es bereits

wieder vergessen wurde - zurückgreifen und die Anwendung ihres Wissens (oder die Auffrischung ihres Wissens) an Beispielaufgaben umsetzen können. Dies vermittelt den SchülerInnen ein Sicherheitsgefühl, sodass sie neues Wissen schneller generieren können, wenn sie erkennen, dass ihnen bekannte mathematische Begrifflichkeiten und Rechenoperationen in anderen Fächern zur Anwendung kommen, wobei sie meist einen neuen Namen bzw. ein neues Wort zugewiesen bekommen. Die Mathematik zu den neuen Begriffen bleibt grundsätzlich dieselbe. Außerdem kann darauf aufmerksam gemacht werden, dass gleiche Wörter, wie beispielsweise die beiden Wörter *Produkt* oder *Gleichung*, in der Chemie eine andere Bedeutung besitzen als in der Mathematik.

Hypothese 2: Die Beliebtheit des Unterrichtsfaches Chemie ist unabhängig davon, ob eine Verknüpfung zur Mathematik hergestellt wird oder nicht.

Für die Steigerung der Beliebtheit haben die folgenden Parameter einen größeren Einfluss. Neben der Aufbereitung von Inhalten und der Durchführung von SchülerInnenübungen muss auch Platz für mathematisch begründbare positive Erfahrungen geschaffen werden sowie Anwendungen des chemischen Wissens auf außerschulische Bereiche (Anton, 2019). Dies ist zum Großteil von einer engagierten Lehrperson abhängig und zum Teil vom Lernwillen und der Motivation des Schülers bzw. der Schülerin selbst. Daher wird allein die deutliche Verknüpfung mathematischer Inhalte im Chemieunterricht kaum mit einem Motivationsschub und damit einer Steigerung der Beliebtheit des Unterrichtsgegenstandes einhergehen.

Hypothese 3: Die Mathematik kann eine Hürde für chemischen Erkenntnisgewinn darstellen, wenn die mathematischen Anforderungen zu hoch sind.

Bekommt die Mathematik in der Chemie einen zu hohen Stellenwert beigemessen, so werden SchülerInnen mit einem schlecht ausgeprägten mathematischen Verständnis benachteiligt. Falls SchülerInnen bereits in einem Fach Probleme haben und diese in einem anderen Unterrichtsgegenstand erneut erleben, führt dies zu Frust und dem Aufkommen von Desinteresse. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Mathematik in der Chemie den richtigen Stellenwert bekommt.

1.5 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird das zu Beginn genannte Thema aufgearbeitet, um die Forschungsfrage fachlich und didaktisch begründet beantworten zu können. Zunächst werden zentrale Begriffe sowie der schulische Rahmen (AHS Sekundarstufe I und II) geklärt. Die definierten Begriffe sollen Klarheit über die in dieser Arbeit behandelten Themen liefern, während der schulische Rahmen den Anwendungsbereich des später behandelten Unterrichtskonzepts aufzeigt. Darauf aufbauend wird der Forschungsstand entlang typischer Fehlerquellen bzw. Verständnishürden aufgearbeitet und an drei exemplarischen Themenfeldern konkretisiert.

Die bis dahin ausgearbeiteten Kapitel und Themen dienen als Basis für die in Kapitel 4 entwickelte Kriterienmatrix, mit der sich die Verwendung bzw. Anwendung von Mathematik im Chemieunterricht didaktisch bewerten lässt. Die Matrix dient als Stütze für das in Kapitel 5 ausgearbeitete Unterrichtskonzept, welches nicht als detaillierte Unterrichtsplanung konzipiert, sondern als übergeordnetes Konzept entwickelt wurde. Mathematik wird im Konzept als Werkzeug ausgelegt, um chemisches Wissen zu generieren und festigen. Das Kapitel 6 beschreibt die empirisch geplante Prüfung des in Kapitel 5 ausgearbeiteten Unterrichtskonzepts. Diese Prüfung beruht auf der Befragung aktiver Chemielehrpersonen, die mittels online-Fragebogen das Konzept beurteilen.

In den Kapiteln 7 und 8 erfolgt die Validierung der Fragebögen, eine Ergebnisanalyse sowie die Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf Konsequenzen für das Unterrichtskonzept, die Beantwortung der Forschungsfrage und der möglichen Falsifizierung bzw. Verifizierung der Hypothesen. Abschließend folgt das Fazit mit Klärung über weitere Schritte.

2 Begriffs- und Rahmenerklärung

Die Leitfrage dieser Arbeit klingt in ihrer saloppen Formulierung bewusst einfach, ist didaktisch aber nur dann sinnvoll beantwortbar, wenn die zentralen Begriffe präzisiert werden. Die folgenden Definitionen und Rahmensetzungen klären daher, was in dieser Arbeit unter Mathematik im Chemieunterricht, Mathematisierung, Stöchiometrie sowie richtiger Stellenwert verstanden wird. Gleichzeitig wird festgelegt, auf welchen schulischen Kontext (AHS Sekundarstufe I und II) sich die späteren Entscheidungshilfen und das Unterrichtskonzept beziehen.

2.1 Mathematik im Chemieunterricht

Mathematik tritt im Chemieunterricht nicht nur in Form von Rechenbeispielen auf, sondern in sehr unterschiedlichen Formaten. Größen werden verglichen, Einheiten umgerechnet, Verhältnisse interpretiert, Skalen gelesen, Terme umgeformt oder Ergebnisse gedeutet und analysiert. Dadurch kann bereits das scheinbar harmlose Arbeiten mit mathematischen Begriffen (z. B. Koeffizient, Index, Potenzen etc.) zu einer mathematischen Anforderung werden, obwohl noch gar keine klassische Rechnung durchgeführt wurde.

Genau hier liegt eine typische Problemzone, da Lernende Mathematik häufig nicht als Werkzeug zur chemischen Erkenntnis erleben, sondern als zusätzliche Hürde, wenn die mathematische Struktur nicht mit der chemischen Bedeutung verknüpft wird (Barke & Harsch, 2011; Barke et al., 2018).

2.2 Mathematisierung

Definition (Mathematisierung): *Mathematisierung* bezeichnet in dieser Arbeit den Prozess, einen chemischen Sachverhalt so zu strukturieren und darzustellen, dass mathematische Operationen sinnvoll anwendbar werden.

Es gilt zu beachten, dass Mathematisierung damit nicht automatisch lernförderlich ist. Mathematisierungen können in dem Moment motivationshemmend wirken, in dem Lernende keinen effektiven Nutzen in der Anwendung von Mathematik erkennen. Höner zeigt in ihrer Untersuchung, dass mathematische Anforderungen im Chemieunterricht insbesondere dann negativ bewertet werden, wenn sie aus SchülerInnen-sicht nicht einsichtig sind und eher als Fremdkörper erscheinen (Höner, 1996).

Demnach ist im Kontext dieser Arbeit nicht entscheidend, ob Mathematik vorkommt, sondern wie sie vorkommt. Mathematik ist didaktisch dann gerechtfertigt, wenn sie ein chemisches Thema erklärt, interpretiert oder deutet und wird problematisch, wenn sie den eigentlich chemischen Sinn nicht aufarbeitet. Es bleibt dann lediglich ein Zahlenergebnis übrig ohne Verknüpfung zum eigentlichen Thema.

2.3 Stöchiometrie

Definition (Stöchiometrie): Unter *Stöchiometrie* wird in dieser Arbeit jener Bereich verstanden, der sich mit den mengenmäßigen Beziehungen chemischer Reaktionen und Verbindungen beschäftigt. Zusätzlich wird dem Begriff eine übergeordnete Rolle zugewiesen, indem die Stöchiometrie als Verknüpfungspunkt von Mathematik und Chemie betrachtet wird.

Die Stöchiometrie eignet sich als Leitbegriff dieser Arbeit, weil sie die Schnittstelle von Chemie und Mathematik in hoher Dichte sichtbar macht. Reaktionsgleichungen, die pH-Skala oder das Massenwirkungsgesetz sind nicht nur chemische Themen, sondern verlangen gleichzeitig ein Verständnis für mathematische Grundideen. Dadurch wird Stöchiometrie zu einem geeigneten Begriff für den Titel der wissenschaftlichen Arbeit, weil sich hier sehr konkret zeigt, wann Mathematik chemisches Verständnis trägt und wann sie SchülerInnen vom Verständnis wegführt (Huddle & Pillay, 1996).

2.4 Richtiger Stellenwert

Der *Stellenwert* aus der Forschungsfrage ist gleichzusetzen mit *Zumutbarkeit*. D.h. es soll geklärt werden, ob mathematische Anforderungen schülerInnengerecht und funktional auf eine chemische Erklärung bezogen und zumutbar sind. Dabei soll auch die Schulstufe und das Alter der SchülerInnen berücksichtigt werden.

2.5 Rahmenerklärung

Der Rahmen dieser Arbeit umfasst den AHS-Bereich und schließt die Sekundarstufe I und II mit ein. Im Fokus steht dabei – unter Berücksichtigung des schulischen Rahmens – die Klärung, wie Mathematik in diesem Setting eingesetzt werden soll, sodass sie chemisches Verständnis fördert und Wissensgenerierung unterstützt. Dabei wird Mathematik stets als Werkzeug und Hilfsmittel für den Chemieunterricht aufgefasst, das fachlich und didaktisch notwendig ist und stets auf die eigentlich chemische Bedeutung des betrachteten Sachverhalts zurückführen soll.

3 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

Mathematik ist in der Chemie fachlich notwendig, aber didaktisch nicht unproblematisch. Der Forschungsstand zeigt, dass Schwierigkeiten bei mathematisch geprägten Chemiethemen selten reine Rechenfehler sind, sondern häufig aus dem Zusammenspiel von Symbolik, Größenverständnis, Transferproblemen aus dem Mathematikunterricht sowie fehlender Rückbindung an chemische Bedeutungen entstehen. Im Folgenden werden jene theoretischen Linien dargestellt, die für die Forschungsfrage dieser Arbeit besonders relevant sind.

3.1 Mathematik als Motivationshemmnis

Dieser Punkt bezieht sich auf die bereits erwähnte Aussage von Höner, die Mathematisierungen im Chemieunterricht als potenzielles Motivationshemmnis beschreibt, wenn Lernende die mathematische Anforderung nicht als sinnvoll erleben (Höner, 1996).

Damit ist nicht gemeint, dass Mathematik grundsätzlich schlecht wäre, sondern dass Mathematik im Unterricht eine klare didaktische Funktion braucht. Sie muss SchülerInnen eine Logik und einen Sinn geben. Wenn Mathematik hingegen als Extraleistung wahrgenommen wird, kann sie – insbesondere bei mathematikschwächeren Lernenden – Frustration erzeugen und das Interesse am Fach Chemie reduzieren. Dieses Spannungsfeld ist für die Forschungsfrage sehr relevant, weil es den Balanceakt zwischen einer richtigen oder falschen Dosierung mathematischer Inhalte im Chemieunterricht beschreibt (Wanjek, 2000).

3.2 Transferproblem

Ein wiederkehrendes Problem im Chemieunterricht ist, dass mathematische Inhalte formal zwar bereits im Mathematikunterricht behandelt wurden, aber im chemischen Kontext nicht genutzt werden können. SchülerInnen erleben Mathematik und Chemie häufig als getrennte Fächer. Dadurch ist eine Verknüpfung vom Anwenden mathematischer Kompetenzen auf chemische Inhalte nicht immer leicht umsetzbar.

Im Kontext chemischer Rechenaufgaben zeigt sich, dass Schwierigkeiten nicht nur aus mangelnder Rechenfertigkeit entstehen, sondern aus Unsicherheiten bei Größenbedeutungen und der Rollenklärung von Variablen bzw. Konstanten sowie bei der Übersetzung zwischen chemischer Situation und mathematischer Struktur (Kimpel & Sumfleth, 2017).

Demnach dürfen mathematische Kompetenzen nur bedingt vorausgesetzt werden und erfordern ein didaktisches Feingefühl, ob eine Begriffserklärung im Unterricht nötig ist oder nicht. (z. B. „Was bedeutet der *Quotient* hier?“ „Welche *Größe* bleibt konstant?“).

3.3 Differenzierung der Begriffe

Im Chemieunterricht lernen die SchülerInnen eine neue Fach- und Symbolsprache kennen, die teilweise ähnliche Begriffe und Wörter verwendet, wie im Mathematikunterricht. Diese Wörter ähneln sich zwar sprachlich, sind inhaltlich jedoch komplett verschieden. Einige Beispiele dafür sind Produkt, Gleichung, Koeffizient oder Index, die im Laufe dieser Arbeit noch genauer betrachtet werden. Dadurch kann Mathematik nicht nur rechnerisch, sondern auch sprachlich zur Hürde werden. Der Unterricht muss daher sprachsensibel gestaltet werden, indem Begriffe explizit erklärt werden bevor mit der eigentlichen Rechnung begonnen wird (Barke & Harsch, 2011).

3.4 Aufgabenstruktur

Wenn mathematische Anforderungen im Chemieunterricht auftreten, stellt sich die Frage, wie Aufgaben gestaltet werden müssen, sodass sie Verständnis generieren und nicht rezeptartig abgearbeitet werden. Einen Denkansatz dafür liefert Leisen, indem er beschreibt, dass es auf eine Kombination aus Aufgabenqualität, -vielfalt sowie die passende Unterrichtseinbettung ankommt (Leisen, 2006).

Somit ist die didaktische Konsequenz klar. Mathematik darf im Chemieunterricht durchaus anspruchsvoll sein, wenn sie strukturiert und bedeutungsorientiert eingeführt wird. Ohne diese Struktur kippt die Anforderung schnell in eine Überforderung, die den chemischen Kern verdeckt.

Zwischenfazit

Die theoretischen und empirischen Hintergründe zeigen, dass Mathematik im Chemieunterricht an jenen Stellen gerechtfertigt ist, wo sie eine chemische Aussage erschließt und an anderen Stellen zu begrenzen ist, wo sie Zusatzhürden erzeugt und chemische Bedeutungen nicht mehr zugänglich macht (Höner, 1996; Kimpel & Sumfleth, 2017; Rosenberg et al., 2016).

3.5 Exemplarische Themenfelder

Im Folgenden werden drei Themenfelder aus dem Chemieunterricht näher betrachtet und die für den Unterricht relevante Mathematik herausgearbeitet. Alle wichtigen chemischen und mathematischen Begrifflichkeiten werden genau definiert. Die Einführung der jeweiligen Themen im Chemieunterricht wird über einen Schulbuchvergleich analysiert und didaktisch aufgearbeitet.

Sie dienen als Anschauungsbeispiele, um sichtbar zu machen, welche mathematischen Anforderungen im Chemieunterricht typischerweise auftreten und wo didaktische Grenzen liegen.

3.5.1 Reaktionsgleichungen

Definition (Reaktionsgleichung): Eine *Reaktionsgleichung* ist eine Darstellungsform für Stoffumwandlungsprozesse, welche die Stöchiometrie zwischen Edukten (Ausgangsstoffe) und Produkten (Endstoffen) symbolisch veranschaulicht. Die Koeffizienten vor den Atomen/Molekülen/Ionen beschreiben die Molanzahl des jeweiligen Stoffes. Unter dem Teilwort *Gleichung* ist der *Massenerhalt* zu verstehen, der bei jeder echten Reaktionsgleichung gegeben sein muss.

Reaktionsgleichungen sind im chemischen Arbeiten unabdingbar, da sie Darstellungsformen chemischer Stoffumwandlungen und demnach ein Grundbaustein dieser Naturwissenschaft sind. Taber verweist darauf, dass Reaktionsgleichungen ein Bindeglied für die Makro-, Submikro- und Symbolebene sind, gemäß des Johnstones Dreiecks (Taber, 2013). Die Bindegliedwirkung erklärt der Autor dadurch, dass beobachtbare Phänomene auf der Makroebene (z.B. Gasentwicklung, Farbänderung) mithilfe von Reaktionsgleichungen (Symbolebene) modellhaft in der Teilchenebene erklärt werden können (Taber, 2013). Atome/Moleküle/Ionen werden in der Symbolebene angeschrieben und das Interagieren der jeweiligen Stoffe kann über die Teilchenebene begründet werden (es kommt zu Bindungsänderungen, wodurch neue Stoffe gebildet werden) (Royal Society of Chemistry, o.J.).

- **Einordnung im Chemie-Lehrplan für die AHS**

Demnach ist es verständlich, dass in der Schule bereits sehr früh auf das Thema Reaktionsgleichungen eingegangen wird. Im aktuellen AHS-Lehrplan (4.Klasse Unterstufe) wird im Kompetenzbereich „Grundmuster chemischer Reaktionen“ explizit gefordert, dass SchülerInnen Wort- und Formelgleichungen im Kontext zentraler Reaktionstypen interpretieren und erstellen (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Beobachtbare Phänomene (in Form von Experimenten) können in der Symbolebene aufgeschrieben und auf der submikroskopischen Ebene erklärt werden, wodurch SchülerInnen bereits in der Unterstufe einen Einblick in die chemische Formelsprache bekommen. Ein expliziter mathematischer Aspekt kann aus dem Lehrplan für die Unterstufe allerdings nicht entnommen werden.

Im Oberstufen Lehrplan steht die quantitative Beschreibung von Stoff- und Energieumsätzen chemischer Reaktionen im Fokus, wodurch geschlussfolgert werden kann, dass kontextbezogen zumindest teilweise eine Mathematisierung von Reaktionsgleichungen gefordert wird (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Sie werden Träger der Quantifizierung (Stoffmenge, Energie, Gleichgewicht). Reaktionsgleichungen spielen zudem eine zentrale Rolle bei den Themengebieten Säure-Base-, Redox- und Komplexbildungsreaktionen – hier vor allem in Formelschreibweise.

- **Chemiedidaktik der Schulbücher**

Die Einführung des Themas Reaktionsgleichungen ist in den Schulbüchern leicht differenziert und hält sich in der Erklärung oftmals sehr kurz. Im Folgenden werden drei Schulbücher für die Unterstufe analysiert, die im Chemieunterricht an allgemein höheren Schulen verwendet werden.

In Stoffe 4 werden Reaktionsgleichungen als eigener Unterpunkt des Kapitels „Chemische Reaktionen bestimmen unser Leben“ angegeben. Im Buch wird zunächst die allgemeine Schreibweise einer Reaktionsgleichung erläutert (links Edukte; rechts Produkte). Es wird das formale Kriterium festgelegt, dass die Art und Anzahl der Atome auf beiden Seiten übereinstimmen müssen (Magyar et al., 2014). Zudem wird darauf hingewiesen, dass nur Faktoren (oder Koeffizienten) verändert werden dürfen. Die Formeln der Stoffe dürfen nicht abgeändert werden (z.B. einen Index hinzufügen oder ähnliches). Somit findet sich im Schulbuch Stoffe eine einfache Mathematisierung wieder, die dem Abzählen und Ausgleichen der Atome (und damit dem Abändern der Faktoren) entspricht.

In Chemie verstehen 4 werden Reaktionsgleichungen anders vermittelt. Reaktionsgleichungen haben keinen eigenen Themenpunkt und finden sich im Kapitel „Chemische Reaktionen“ auf einer Doppelseite wieder. Zunächst wird die Massenerhaltung historisch und experimentell erläutert („Kupfer schluckt Iod“ in Kaufmann et al., 2020, S.20). Anschließend wird die Reaktionsgleichung des Versuchs angeführt und der Merksatz formuliert, dass die Anzahl der Atome auf beiden Seiten ident sein muss, wodurch Reaktionsgleichungen als eine formale Erhaltungsrelation eingeführt werden. Im weiteren Textverlauf wird eine schematische Form von Austauschreaktionen angeführt, die an mathematische Transformationsprozesse erinnert ($AB + CD \rightarrow AD + CB$ in Kaufmann et al., 2020, S.21). Eine direkte Verknüpfung zur Mathematik wird im Schulbuch allerdings nicht hergestellt. Es lässt sich jedoch wieder kontextuell schlussfolgern, dass es auf eine Abzähllogik der Atome ankommt, um die passenden Faktoren für eine ausgeglichene Reaktionsgleichung zu finden.

In Impuls Chemie 4 werden Reaktionsgleichungen im Kapitel „Chemische Reaktionen“ beschrieben (Gruber-Kalteis et al., 2025). In einem kurzen Absatz wird erläutert, dass chemische Reaktionen durch „chemische Gleichungen“ beschrieben werden. An einem Beispiel wird gezeigt, dass die Anzahl der Atome auf beiden Seiten gleich sein muss und die Bedeutung der Koeffizienten hervorgehoben (Gruber-Kalteis et al., 2025). Auch in

diesem Schulbuch gibt es keine tiefergehende Mathematisierung bzw. erhalten die Begriffe keine mathematische Deutung.

Vergleichend lässt sich festhalten, dass bei allen drei Themeneinführungen die Mathematik eine untergeordnete Rolle spielt. Stöchiometrische Mengenverhältnisse werden kaum behandelt und die Mathematik wird auf eine Zähl- und Verhältnislogik beschränkt. Das Ausgleichen der Reaktionsgleichungen bleibt eine intuitiv logische Erhaltungsnorm, die nur minimal einen Bezug zur Mathematik aufgreift (Begriffe wie „Faktoren“ bzw. „Koeffizienten“ werden erwähnt; es wird mit diesen jedoch im chemischen Kontext gearbeitet).

- **Die Mathematik in Reaktionsgleichungen**

Trotz dieser zuvor erwähnten untergeordneten Rolle der Mathematik werden viele mathematische Begrifflichkeiten von der Lehrperson vorausgesetzt. Im Folgenden werden alle für das Thema Reaktionsgleichungen relevanten mathematischen Begriffe näher erläutert und definiert.

Im Wort selbst steckt das Teilwort „Gleichung“. Gleichungen werden in der Schule oftmals zeitgleich mit dem Wort Term eingeführt. Terme spielen eine wichtige Rolle in der Mathematik und werden bereits in der 1. Klasse Unterstufe (neuer Lehrplan) den SchülerInnen nähergebracht. Sie sind essenziell, um Gleichungen rechnerisch lösen zu können und haben demnach auch für Reaktionsgleichungen eine Relevanz (Kompetenzvoraussetzung „Rechnen mit Termen“).

Definition (Term): Ein *Term* ist ein mathematisch sinnvoller Ausdruck, der Zahlen, Variablen und Rechenoperationen (z.B. $+$, $-$, $\cdot$, $:$) miteinander verknüpft. Auch eine einzelne Zahl bzw. eine einzelne Variable kann als Term bezeichnet werden (Vorzeichen werden meist inkludiert). Man spricht dann von einem Monom.

Demnach kann man aus mathematischer Sicht bei einer Reaktionsgleichung die vorkommenden Stoffe als Terme betrachten, da sie sinnvollen Rechenanweisungen entsprechen.

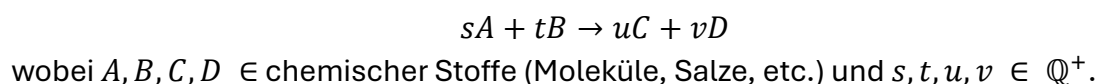
Definition (Gleichung): Eine *Gleichung* ist eine mathematische Aussage, die zwei Terme miteinander verbindet. Die linke Seite der Gleichung entspricht dann genau der rechten Seite. Das Gleichheitszeichen verbindet die beiden Terme und kann als Mitte der Gleichung gedeutet werden.

Der Reaktionspfeil kann als das Gleichheitszeichen verstanden werden, wobei natürlich aus chemischer Sicht Reaktionspfeile mehr Informationsgehalt haben als das mathematische Symbol. Trotzdem gelten dieselben Rechengänge. Wird auf der einen Seite etwas verändert, so muss dies auch auf der anderen Seite passieren. Diese Voraussetzung wird im Chemieunterricht häufig als Mathematik hervorgehoben (siehe

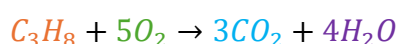
Schulbüchervergleich => Massenerhaltung). Ändert man den Faktor auf der einen Seite, so muss dies auch auf der anderen Seite berücksichtigt werden. Im Chemieunterricht reicht es meistens, dass man die Reaktionsgleichung ausgleicht. Es sind keine weiteren mathematischen Umformungsschritte notwendig. Trotzdem werden auch beim Ausgleichen selbst einige Rechenoperationen vorausgesetzt, die den SchülerInnen (zumindest laut Schulbüchervergleich) nicht kommuniziert werden.

Viele chemische Stoffe verwenden in ihrer Summenformel Indizes, die angeben, dass mehrere Atome eines Elements vorkommen. In der Mathematik ist ein Index (Mehrzahl Indizes) als die tiefergestellte Zahl zu verstehen, die meist an eine Variable geknüpft ist. Dabei hat der Index keinen rechnerischen Aspekt, sondern wird ausschließlich zum Unterscheiden ähnlicher Objekte verwendet (GDCh, Fachgruppe Chemieunterricht, 2008). Beispielsweise können so x-Koordinaten von verschiedenen Punkten unterschieden werden (x_1 von P_1 und x_2 von P_2).

In der Chemie erhält der Index nun einen rechnerischen Aspekt, der dem Ausmultiplizieren eines Terms entspricht. Dieser muss für das Finden des passenden Faktors berücksichtigt werden. Allgemein kann man sich eine Reaktionsgleichung wie folgt vorstellen



Zur besseren Veranschaulichung soll das folgende Beispiel dienen. In manchen Schulen werden Gasflaschen für die Brennerflammen verwendet, die oftmals mit Propangas gefüllt sind. Die angeführte Reaktionsgleichung zeigt, was beim Verbrennen von Propangas passiert



Mathematisch gesehen, handelt es sich nun um eine Gleichung aus mehreren Termen, die faktorisiert sind (also in Klammern angeschrieben werden können). Ein Faktor ist in der Mathematik als Teil einer Multiplikation zu verstehen (Faktor mal Faktor = Produkt) und ein Koeffizient ist jene Zahl (oder jener Zahlfaktor), die (der) vor einem Term steht und angibt, wie oft dieser Term multipliziert wird. Die Reaktionsgleichung kann mathematisch wie folgt gedeutet werden (die Farben repräsentieren den jeweiligen Stoff)

$$(3 \cdot \textcolor{brown}{C} + 8 \cdot \textcolor{brown}{H}) + 5 \cdot (2 \cdot \textcolor{green}{O}) = 3 \cdot (\textcolor{blue}{C} + 2 \cdot \textcolor{blue}{O}) + 4 \cdot (2 \cdot \textcolor{violet}{H} + \textcolor{violet}{O})$$

Die Zahlen 5, 3 und 4 vor den Klammern entsprechen den Koeffizienten der jeweiligen Terme. Auch der erste Term $(3 \cdot \textcolor{brown}{C} + 8 \cdot \textcolor{brown}{H})$ enthält grundsätzlich einen Koeffizienten, nämlich 1, welcher jedoch aus Bequemlichkeit nicht angeschrieben wird (gilt für beide Naturwissenschaften). Durch Auflösen bzw. Ausmultiplizieren der Klammern kommt man zu folgendem Ergebnis

$$3 \cdot \textcolor{brown}{C} + 8 \cdot \textcolor{brown}{H} + 10 \cdot \textcolor{green}{O} = 3 \cdot \textcolor{blue}{C} + 6 \cdot \textcolor{blue}{O} + 8 \cdot \textcolor{violet}{H} + 4 \cdot \textcolor{violet}{O}$$

Wenn man dieses so weit wie möglich zusammenfasst, kommt man auf das Endergebnis

$$3 \cdot C + 8 \cdot H + 10 \cdot O = 3 \cdot C + 8 \cdot H + 10 \cdot O$$

Es zeigt sich, dass die linke Seite mit der rechten übereinstimmt. Beide Seiten haben dieselbe Anzahl an Atomen (mathematisch = Variablen).

Das Beispiel veranschaulicht, dass für das Thema Reaktionsgleichungen mehrere mathematische Kompetenzen vorausgesetzt werden. Die SchülerInnen müssen Terme addieren und multiplizieren bzw. faktorisieren können. Das Beispiel stellt jedoch nur bedingt ein direktes Anwendungsbeispiel für den Unterricht dar. Lehrpersonen müssen selbst abwägen, ob solch eine mathematische Aufbereitung von Reaktionsgleichungen als sinnvoll erscheint.

Für die meisten Aufgabenstellungen zum Thema Reaktionsgleichungen wird zusätzlich noch die Kompetenz des *Findens eines Vielfachen* vorausgesetzt. SchülerInnen sollen Reaktionsgleichungen nicht nur aufstellen, sondern auch richtig ausgleichen können. Deshalb ist es von Vorteil, wenn sie das kleinste gemeinsame Vielfache (kurz kgV) der vorkommenden Elemente finden, sodass sie die Koeffizienten richtig angeben können.

Definition (kleinstes gemeinsames Vielfaches): Das *kleinste gemeinsame Vielfache* (kurz *kgV*) von zwei (oder mehreren) ganzen Zahlen ist jene kleinste positive ganze Zahl, die ein Vielfaches von allen diesen Zahlen ist.

Es gilt für zwei Zahlen a und b

$$kgV(a, b) = \min\{n \in \mathbb{N} \mid a|n \text{ und } b|n\}$$

Dieser Vorgang muss mehrmals wiederholt werden, da durch die Änderung eines Faktors meist die Anzahl mehrerer Elemente geändert wird (aufgrund des vorkommenden Stoffes).

Reaktionsgleichungen lassen sich auch als die Summe mehrerer linearer Gleichungen auffassen, die als Matrix angeordnet werden können. Um eine Reaktionsgleichung dann richtig ausgleichen zu können, muss die Lösung des Gleichungssystems (angeordnet als Matrix) gefunden werden (d.h. es wird ein Vektor gesucht, der Lösung der Matrix ist). Eine genaue Beschreibung schildert Lawrence R. Thorne. Dieses System ist allerdings im Schulbereich nicht sinnvoll, da das Rechnen in mehreren linearen Gleichungssystemen und damit einhergehend das Rechnen mit Matrizen kein essenzieller Bestandteil in einer AHS ist und dieses Thema zudem erst in der Oberstufe behandelt wird (Thorne, 2011).

- **Einordnung im Mathematik-Lehrplan für die AHS**

Die Begriffe Terme und Gleichungen werden bereits in der 1. Klasse (5. Schulstufe) eingeführt. Im AHS-Lehrplan findet sich unter dem Kompetenzbereich 2: Variablen und Funktionen ein Eintrag zum Kompetenzerwerb für SchülerInnen, sodass sie einfache

Terme, Gleichungen und Formeln aufstellen und interpretieren können (vgl. BGBl. Nr. 88/1985).

Das Thema setzt sich auch in der 2. Klasse (6. Schulstufe) fort, wobei es deutlich erweitert wird. Terme und Gleichungen werden nun auch mit Brüchen verknüpft und Proportionalitäten sollen im Kontext interpretiert werden.

In der 3. Klasse (7. Schulstufe) wird ein besonderes Augenmerk auf das Rechnen mit Termen und Gleichungen gelegt. SchülerInnen lernen Terme zu vereinfachen, indem sie diese addieren, subtrahieren, multiplizieren und/oder dividieren. Dies wird auch auf Äquivalenzumformungen bei Gleichungen angewendet und geübt.

In der 4. Klasse (8. Schulstufe) wird die Termrechnung und das Lösen von Gleichungen auf komplexere Sachverhalte ausgedehnt. In dieser Schulstufe sind die SchülerInnen normalerweise bereits bestens mit dem Thema vertraut.

Das kleinste gemeinsame Vielfache lernen die SchülerInnen in der 2. Klasse (6. Schulstufe) kennen. Es wird nicht explizit angeführt, lässt sich jedoch leicht aus dem Kompetenzbereich 1: Zahlen und Maße entnehmen, wo SchülerInnen mit Vielfachen und Teilern natürlicher Zahlen arbeiten können sollen (vgl. BGBl. Nr. 88/1985).

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass Terme und Gleichungen im AHS-Lehrplan systematisch vertieft werden, wobei das eigentliche Rechnen mit Termen und Umformen von Gleichungen erst ab der 3. Klasse erfolgt. Das kgV lässt sich im Lehrplan in die 2. Klasse verorten und ist demnach theoretisch als Kompetenz für die 4. Klasse (8. Schulstufe) voraussetzbar. Die mathematischen Kompetenzvoraussetzung der SchülerInnen für den Chemieunterricht erscheinen somit legitim.

- **Mathematisch bedingte Fehlerquellen und Lernhürden beim Thema Reaktionsgleichungen**

Ein Verständnis der chemischen Formelsprache ist, wie bereits erwähnt, essenziell für jeden, der sich in der Welt der Chemie zurechtfinden möchte. Reaktionsgleichungen bieten ein gewisses Potential für Fehlerquellen, die im Folgenden behandelt werden.

Vetters schreibt in seiner Dissertation, dass Lehrkräfte als häufige Fehlerquelle die Verwechslung von Koeffizienten und Indizes bei SchülerInnen angeben (Vetters, 2015, S. 67). Wenn Koeffizienten und Indizes verwechselt werden, so stellt dies ein Strukturproblem beim Lesen bzw. Deuten der chemischen Formelsprache dar und keine bloße Rechenpanne.

Dasselbe Problem wird auch im Artikel von der Gesellschaft Deutscher Chemiker angeführt. Koeffizienten und Indizes werden von SchülerInnen verwechselt und Reaktionsgleichungen werden wie Mathematikgleichungen gelesen (z. B. „links = rechts“ ohne chemische Bedeutung). Demnach werden Reaktionsgleichungen von vielen SchülerInnen schematisch auswendig gelernt (GDCh, 2008, S. 18).

Auch Ben-Zvi et al. führt Verständnisprobleme von SchülerInnen an, die auf einer Fehlinterpretation des Index beruhen (Ben-Zvi et al., 1987). Zusätzlich führt er die Schüleraussage an, dass aus $N_2 + O_2$ nicht Distickstoffpentoxid (N_2O_5) gebildet werden kann, da als Edukt O_5 vorkommen müsste. Damit lässt sich ebenfalls eine Form von Fehlinterpretation der Index-Schreibweise anführen, weil in der Aussage die Stoffidentität (Summenformel) und Zähllogik (Massenerhalt) nicht getrennt werden (Anderson, 1990).

Eine weitere Fehlerquelle findet sich wieder in Vettters Dissertation. Er beschreibt, dass es kaum einen Transfer zwischen Erkenntnissen aus dem Mathematikunterricht zu stöchiometrischen Anwendungen gibt (Vettters, 2015, S. 3). Vetter verweist darauf, dass dadurch Lösungsalgorithmen und Berechnungen für stöchiometrische Aufgaben vermieden werden, wodurch den SchülerInnen ein bloßes Probieren suggeriert wird. Insbesondere Reaktionsgleichungen lassen sich durch einfaches Probieren lösen, was für das allgemeine Verständnis wohl kaum sinnstiftend ist.

Es kann auch passieren, dass SchülerInnen den Massenerhalt nicht verstehen und dadurch falsche Reaktionsgleichungen anschreiben. Eine SchülerInnenaussage aus Ben-Zvi et al lautet sinngemäß, dass Stickstoff aus irgendeinem Grund, beispielsweise durch die Reaktion, aus dem Reaktionsgefäß *verschwindet* (Ben-Zvi et al., 1987). Dies ist mit dem Gesetz der Massenerhaltung nicht konform und lässt auf ein fehlerhaftes Verständnis dieses Gesetzes schließen. Aus mathematischer Sicht wäre demnach die Gleichung ungleich.

Bärtsch und Mati machen darauf aufmerksam, dass Reaktionsgleichungen und ähnliche Aufgaben rezeptartig gelöst werden können (Bärtsch & Marti, 2023). Dies stellt zwar keine direkte Fehlerquelle für SchülerInnen dar, sollte allerdings beim didaktischen Aufbau des Unterrichts berücksichtigt werden. Reaktionsgleichungen (und auch alle anderen chemischen Themengebiete) sollten mit Verständnis verknüpft werden und nicht auf einer rein rechnerischen Basis vermittelt werden.

3.5.2 pH-Wert

Definition (pH-Wert): Der *pH-Wert* entspricht dem negativen dekadischen Logarithmus der Oxoniumionenaktivität einer Lösung. Dieser Wert gibt an, wie sauer oder basisch eine Lösung ist. Die Formel für den pH-Wert lautet

$$pH = -\log (a(H_3O^+))$$

Der pH-Wert wirkt formell betrachtet sehr komplex. Die Formel für den pH-Wert verpackt viel Information, die zum Verständnis nicht nur rechnerische Kompetenzen voraussetzt. In verschiedensten Literaturen (sowie in den meisten Schulbüchern) wird die Aktivität durch die Konzentration ersetzt, da diese näherungsweise in wässrigen Lösungen ident sind (vgl. Magyar et al., 2020). Dabei wird der pH-Wert als dimensionslose Größe (aufgrund der Dimensionslosigkeit der Aktivität) übernommen, obwohl die Konzentration *mol/L* als Einheit hat (Buck et al., 2002).

Interessanterweise ist in der wissenschaftlichen Literatur auch von H^+ - Ionen anstatt H_3O^+ - Ionen zu lesen, was dem eigentlichen *H* des *pH-Werts* logikbedingt näherkommt. Die Formulierung mit H^+ - Ionen, wie sie in mancher wissenschaftlichen Literatur verwendet wird, ist eine reine Konventionssache, da ein einzelnes H^+ - Ion in wässriger Lösung nicht stabil ist und immer in der Form H_3O^+ vorkommt (Jost & Brie, 2025). Demnach ist mit der Schreibweise H^+ eigentlich die Form H_3O^+ zu verstehen.

Das *p* im Wort pH-Wert ist historisch durch seinen Entdecker bedingt und ist ein Bestandteil des Begriffs. Der dänische Biochemiker Sørensen beschreibt selbst seine Wortwahl als Folge des numerischen Werts des pH-Werts, der die negative **P**otenz (beginnt mit einem **P**) mit Basis 10 als Kernstück betrachtet (Sørensen, S. 134). Das „p-Schema“ setzt sich bis heute in der Chemie als negativer dekadischer Logarithmus durch.

- **Einordnung im Chemie-Lehrplan für die AHS**

Im Unterstufen-Lehrplan für eine AHS wird der pH-Wert nicht explizit ausgewiesen. Trotzdem lässt sich eine inhaltliche Anschlussstelle beim Thema „Typen chemischer Reaktionen: Säure-Base-Reaktionen“ finden (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Typischerweise wird der pH-Wert in Form eines indikatorischen Systems zur Charakterisierung von sauren, basischen und neutralen Lösungen den SchülerInnen in der Unterstufe nähergebracht.

Auch im Oberstufen-Lehrplan für die AHS wird der Terminus pH-Wert nicht direkt angegeben. Es lässt sich jedoch ebenfalls am Themenbereich Säure-Base-Reaktionen festmachen, indem auch das Donator-Akzeptor-Konzept ausgewiesen wird. Zudem sollen in der Oberstufe Donator-Akzeptor-Wechselwirkungen am Beispiel von Protolysegleichgewichten erläutert werden, die inhaltlich zum Themengebiet von Säuren-Base-Reaktionen und damit mit dem Thema des pH-Werts gekoppelt sind (vgl. BGBl. Nr. 88/1985).

Der pH-Wert ist schlussfolgernd im AHS-Lehrplan nicht als eigenständiger Begriff festgeschrieben, aber sowohl in der Unter- als auch in der Oberstufe inhaltlich über das Themengebiet Säuren und Basen (Unterstufe: Reaktionstypen; Oberstufe: Donator-Akzeptor-Konzept und Protolysegleichgewicht) im Lehrplan verankert.

- **Chemiedidaktik der Schulbücher**

In der AHS-Unterstufe wird der pH-Wert in den Schulbüchern vorwiegend über die Begrifflichkeiten Indikatoren, Neutralisation und Klassifikation von sauer, basisch oder neutral eingeführt. Der pH-Wert wird demnach Lehrplan getreu auf die beobachtbare Farbänderung eines Indikators reduziert (siehe Kommentar zum Fachlehrplan von Hofer et al., 2023, S. 6) und entspricht einem Messbegriff oder einer in sauer, neutral und basisch angeordneten Skala. Der mathematische Aspekt wird nicht behandelt.

Deshalb ist die Betrachtung der Oberstufen-Schulbücher in Bezug auf die Mathematik hinter diesem Begriff von größerer Relevanz. Es werden im Folgenden für die AHS gebräuchliche Schulbücher analysiert, wobei ein Schulbuch etwas in die Jahre gekommen ist. Der Anwendungs- und Analysenutzen ist dennoch gegeben, da es einen stark differenzierten Vermittlungsansatz im Vergleich zu den anderen Schulbüchern aufweist.

Im Schulbuch EL-MO wird der pH-Wert zunächst als Maß für den Säure- bzw. Basengehalt einer Lösung definiert und anschließend die Stärke bzw. Konzentration einer Säure/Base näher erläutert (Magyar et al., 2020, S.113). Über die Angabe des Ionenprodukts von Wasser wird bereits ein erster mathematischer Gesichtspunkt betrachtet ($[H_3O^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}$, Magyar et al., 2020, S. 113). Auf Seite 116 wird explizit mit dem pH-Wert gerechnet. Es wird der pH-Wert einprotoniger Säuren, von basischen Lösungen sowie von Salzlösungen ermittelt. Der pH-Wert von Pufferlösungen wird im Plus-Teil behandelt und ist somit optional zu betrachten. Im Schulbuch EL-MO ist demnach eine Logarithmus-Kompetenz unabdingbar für SchülerInnen.

Im Schulbuch Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023) wird der pH-Wert ähnlich eingeführt wie im Schulbuch EL-MO (Magyar et al., 2020). Der pH-Wert wird über die Autoprotolyse von Wasser hergeleitet bzw. begründet und definitionskonform als negativer dekadischer Logarithmus angegeben. Bei der Herleitung wird auch explizit auf die Zehnerpotenzen hingewiesen und der pH-Wert als praktikables Mittel gedeutet, mit dessen Hilfe man das Rechnen mit Exponenten vermeiden kann. Auf der Folgeseite werden einige Aufgaben zur Berechnung des pH-Wertes formuliert und Beispiele ausgeschrieben. Im Vergleich zum Schulbuch EL-MO, in dem komplexere Rechenvorgänge gefordert werden (Äquivalenzumformungen, lösen von Gleichungen), beschränkt sich die Mathematik im Schulbuch Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023) auf das Einsetzen in die Standardformel (Magyar et al., 2020).

Das Schulbuch Chemie begreifen von Wohlmuth (2015) setzt auf einen komplett anderen Ansatz im Vergleich zu den bereits erwähnten Schulbüchern. Es gilt jedoch zu erwähnen, dass es sich auch um das älteste von den betrachteten Schulbüchern handelt.

Zunächst wird der pH-Wert aus der Autoprotolyse von Wasser hergeleitet, was noch Ähnlichkeiten zum Schulbuch EL-MO aufweist. Es werden im Anschluss allerdings keine pH-Wertberechnungen durchgeführt oder erläutert. Im Schulbuch beschränkt man sich auf die formale Ebene, d.h. es werden ausschließlich Reaktionsgleichungen betrachtet, die bei Autoprotolysen, Neutralisationsreaktionen oder beim Einsatz von Indikatoren oder Pufferlösungen vorkommen. Diese werden im Kontext mit dem pH-Wert verknüpft und diskutiert, allerdings werden keine Rechnungen durchgeführt. Es wird jedoch in manchen Themenbereichen mit der Gleichgewichtskonstante gearbeitet, die als Rechnung zu verstehen ist (Quotient), wobei nur vereinzelt Zahlen im Zähler oder Nenner benutzt werden, was die Anforderungen an ein mathematisches Verständnis entschärft (Wohlmuth, 2015, S.188). Demnach wird in diesem Schulbuch für die AHS-Oberstufe keine Logarithmuskompetenz vorausgesetzt, da effektiv keinerlei Berechnungen durchgeführt werden.

- **Die Mathematik im pH-Wert**

Die Definition des pH-Werts lässt schnell auf die mathematischen Anforderungen für dieses Themengebiet schließen. Mit dem Thema des Logarithmus ist auch jenes der Potenzen verknüpft.

Definition (Potenz): Eine *Potenz* bezeichnet das Produkt einer Zahl a , die n -mal mit sich selbst multipliziert wird. Sie wird allgemein angeschrieben als

$$\underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n\text{-mal}} = a^n, \text{ mit } a, n \in \mathbb{R}$$

a wird als *Basis* und n als *Exponenten* bezeichnet.

Potenzen spielen in jeder Naturwissenschaft eine große Rolle. Beim Rechnen mit Einheiten können sehr große oder kleine Zahlen entstehen. Diese können mithilfe von 10er-Potenzen leicht „zusammengerutscht“ werden. Mathematisch betrachtet bezeichnet man diese Schreibweise als Gleitkommadarstellung, die im Gegensatz zur Festkommadarstellung steht (z.B. $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$ oder $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Aber auch Einheiten an sich haben unterschiedliche große Exponenten, die somit ebenfalls eine in Potenzschreibweise angeschrieben werden (z.B. Kraft (Newton, N): $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ oder Energie (Joule, J): $\text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). Der rechnerische Aspekt ist ebenfalls für die Chemie relevant.

Satz (Rechenregeln für Potenzen): Seien $a \in \mathbb{R}^+$ und $s, t \in \mathbb{Q}$, dann gilt

- $a^s \cdot a^t = a^{s+t}$
- $\frac{a^s}{a^t} = a^{s-t}$
- $(a^s)^t = a^{s \cdot t}$
- $\sqrt[t]{a^s} = a^{\frac{s}{t}}$

Die Rechenregeln beziehen sich immer auf Potenzen mit derselben Basis. In Chemieschulbüchern wird beim pH-Wert das Ionenprodukt von Wasser angeführt mit $[H_3O^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}$ (siehe Magyar et al., S.113), wobei die Konzentration der Oxoniumionen und jener der Hydroxidionen jeweils 10^{-7} entspricht und somit die einfache Rechnung $10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-7+(-7)} = 10^{-14}$ ergibt. Die Zahlenmengen könnten noch auf die gesamten reellen Zahlen erweitert werden, allerdings müssten dann die Rechenregeln adaptiert werden, was für den schulspezifischen Aspekt nicht sinnvoll wäre.

Das Logarithmieren ist mit der Potenzschreibweise verknüpft, da es die Lösung für eine spezielle Problemstellung ist. Es liefert die Antwort auf die Frage, wie man einen unbekannten Exponenten ermitteln kann, wenn die Basis und das Ergebnis der Potenz bekannt sind (z.B. was ist x , wenn $2^x = 8$?). Dafür wurde der Logarithmus wie folgt definiert.

Definition (Logarithmus): Sei $a, b \in \mathbb{R}^+$ mit $a \neq 1$ und folgende Exponentialgleichung gegeben

$$a^x = b$$

Die eindeutige Lösung dieser Gleichung wird als *Logarithmus* von b zur Basis a bezeichnet und als

$$\log_a(b) = x$$

angeschrieben (gesprochen: Logarithmus zur Basis a von b ist x).

In der höheren Mathematik kann er auch als Umkehrfunktion zur Exponentialfunktion verstanden werden, was jedoch ausschließlich Relevanz für den Mathematikunterricht hat. Zum Lösen von Exponentialgleichungen (Potenzen mit unbekanntem Exponenten) darf die Basis jede beliebige positive reelle Zahl annehmen. In den Naturwissenschaften sind die Basen e (Eulersche Zahl) und 10 von Bedeutung. Für die Berechnungen des pH-Wertes spielt insbesondere die Basis 10 eine wichtige Rolle.

Definition (Logarithmus mit Basis 10 bzw. e):

Der Logarithmus mit Basis 10 ($\log_{10}(b)$) wird konventionell als $\log(b)$ angeschrieben und als dekadischer Logarithmus bezeichnet.

Der Logarithmus mit Basis e ($\log_e(b)$) wird konventionell als $\ln(b)$ angeschrieben und als natürlicher Logarithmus (lat.: *logarithmus naturalis*) bezeichnet.

Wie bereits erwähnt entspricht der pH-Wert dem *negativen* dekadischen Logarithmus. Warum gerade dem *negativen* und nicht dem *positiven*? Die Antwort ist schnell gefunden: es ist ein reiner Konventionsaspekt bzw. reine Zweckmäßigkeit. Die Oxoniumionenaktivität in wässrigen Lösungen ist meist deutlich kleiner als 1 und liefert somit negative Exponenten bei den Zehnerpotenzen, was beim Anwenden des (positiven) dekadischen Logarithmus negative Zahlenwerte als Ergebnisse liefert. Nach heutigem Verständnis hat Sørensen deshalb das Minus vorangesetzt, da das Arbeiten mit positiven Zahlenwerten einfacher ist (Universität München, S. 66 und Philipps-Universität, S. 33).

Rechenregeln zum Logarithmus müssen nicht betrachtet werden, da sie zur Berechnung des pH-Werts im schulischen Kontext kaum benötigt werden. Die zuvor erwähnten Schulbücher geben ein rezeptartiges Lösen der Aufgaben vor, wodurch SchülerInnen lediglich in Formeln richtig einsetzen müssen. Auch der eigentliche rechnerische Aspekt des Logarithmus (genaugenommen die Herleitung des Logarithmus) ist vernachlässigbar, da sie im Mathematikunterricht selten behandelt wird. Für SchülerInnen reicht somit die Begriffsverständlichkeit und der Problemlösungsaspekt des Logarithmus im Chemieunterricht.

- **Einordnung im Mathematik-Lehrplan für die AHS**

Potenzen werden bereits in der 3. Klasse Unterstufe (7. Schulstufe) im Mathematikunterricht behandelt. Im AHS-Lehrplan ist für diese Schulstufe das Potenzieren mit positiven ganzzahligen Exponenten als wiederholte Multiplikation angeschrieben, sowie das Aufstellen von Zehnerpotenzen zum Darstellen von großen (und kleinen) Zahlen (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Ebenso findet sich in der 3. Klasse Unterstufe die Anwendung (einfacher) Rechenregeln zum Thema Potenzen.

In der AHS-Oberstufe wird in der 5. Klasse (9. Schulstufe) das Thema wiederholt („Rechenregeln für Zehnerpotenzen kennen“ (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Im Jahr darauf (6. Klasse; 10. Schulstufe) wird das Themengebiet Potenzen auf reelle Exponenten erweitert und der Logarithmus wird laut AHS-Lehrplan eingeführt. SchülerInnen sollen diesen definieren und die entsprechenden Rechenregeln kennen und anwenden können. Zudem sind in dieser Schulstufe Logarithmusfunktionen im Lehrplan unter dem Überthema „Reelle Funktionen“ verortet (vgl. BGBl. Nr. 88/1985).

Die Kompetenzvoraussetzung von SchülerInnen in Bezug auf das Rechnen mit Potenzen und dem Anwenden des Logarithmus ist somit für den Chemieunterricht in einer AHS beim Thema pH-Wert legitim.

- **Mathematisch bedingte Fehlerquellen und Lernhürden beim Thema pH-Wert**

Der pH-Wert ist ein Paradebeispiel dafür, wie chemische Themen über mathematische Inhalte vermittelt werden, da sich der pH-Wert über eine mathematische Formel definiert. Wenn SchülerInnen somit bestimmte mathematische Kompetenzen nicht in den Chemieunterricht mitbringen, kann es zu Verständnisproblemen kommen.

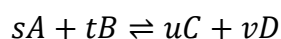
Eine Fehlerquelle besteht bei SchülerInnen darin, dass die pH-Skala nicht als logarithmische Skala, sondern als lineare betrachtet und missverstanden wird. Höner verweist darauf, dass SchülerInnen beim Erklären des pH-Werts mehrheitlich auf die Einordnung „sauer-neutral-alkalisch“ ausweichen, während der logarithmische Zusammenhang vernachlässigt wird (Höner, 1996, S. 62). Eine Erniedrigung des pH-Wertes um 1 geht im eigentlichen Sinn mit einer Exponentensteigerung um 1 zur Basis 10 einher, die den ursprünglichen Wert somit um den Faktor 10 erhöht – daraus ergibt sich ein exponentielles Wachstum. Bei linearen Prozessen muss ein Wert konstant wachsen (oder abnehmen), was einer Addition (Subtraktion) eines konstanten Wertes und somit im Widerspruch zur Verzehnfachung beim pH-Wert entspricht.

Analog lässt sich eine weitere Fehlerquelle in Bezug auf das falsche Verständnis der pH-Wert-Skala festmachen. Lernende deuten die Zunahme des pH-Wertes als Stärke der Säure, nach dem Motto: „Je größer die Zahl, desto stärker die Säure“ (Universität Duisburg, 2012). Mathematisch lässt sich diese Fehlerquelle als Konflikt zwischen alltagsmathematischer steigender Monotonie-Erwartung (größere Zahlen sind *stärker*) und der Proportionalität der Definition des pH-Werts beschreiben. Eine höhere Oxoniumionen-Konzentration liefert niedrigere pH-Werte. Wenn sich Lernende dieses Fehlkonzept aneignen, kommt es bei pH-Wert Vergleichen und bei Interpretationen von Indikatorfarben zu falschen Deutungen (Engelmann, 2020).

Die beiden Fehlerquellen zeigen somit, dass der pH-Wert an mathematisches Vorwissen gebunden ist. Es gilt jedoch zu unterscheiden, wie eine Lehrperson das Thema im Unterricht einführt. In der AHS-Unterstufe wird nur die Skala für den pH-Wert relevant sein und nicht die Definition über den negativen dekadischen Logarithmus. Für die AHS-Oberstufe muss demnach der richtige Balanceakt gefunden werden, um Fehlerquellen vorzubeugen.

3.5.3 Massenwirkungsgesetz

Definition (Massenwirkungsgesetz): Das *Massenwirkungsgesetz* (kurz *MWG*) beschreibt das Verhältnis der Aktivitäten (oder Konzentrationen) von Edukten und Produkten einer reversiblen chemischen Reaktion. Für eine reversible chemische Reaktion mit



wobei $A, B, C, D \in$ chemischer Stoffe und $s, t, u, v \in \mathbb{Q}^+$ ist das MWG definiert als

$$K = \frac{[C]^u [D]^v}{[A]^s [B]^t}$$

K heißt *Gleichgewichtskonstante* und ist dann erreicht, wenn sich bei einer chemischen Reaktion das dynamische Gleichgewicht eingestellt hat.

Die angeführte Definition orientiert sich am Eintrag aus dem IUPAC Gold Book (2025). In Schulbüchern (wie beispielsweise in Chemie begreifen von Wohlmuth (2015) wird das MWG als Rechenvorschrift mit *Konzentrationen* präsentiert, während die wissenschaftlichen Definitionen den Begriff grundsätzlich über Aktivitäten ausdrücken (IUPAC, 2025).

Die Gleichgewichtskonstante K beschreibt die Lage des chemischen Gleichgewichts einer reversiblen chemischen Reaktion. Sie kann ausschließlich Werte zwischen 0 und ∞ annehmen. Wenn $K \ll 1$, dann liegt das Gleichgewicht überwiegend auf der Seite der Edukte. Wenn $K \approx 1$, dann besteht ein Gleichgewicht zwischen Edukten und Produkten und wenn $K \gg 1$, dann liegt das Gleichgewicht überwiegend auf der Seite der Produkte. Es gilt zu beachten, dass K eine dimensionslose Größe ist.

Beeinflusst wird die Gleichgewichtskonstante K durch eine Temperatur-, Druck- und/oder Konzentrationsänderung. Es gilt das bekannte „Prinzip des kleinsten Zwangs“ (oder auch „Flucht vor dem Zwang“) entdeckt und entwickelt von dem französischen Chemiker und Physiker Henri Le Chatelier 1884.

Satz (Le Chatelier Prinzip): Ein sich im Gleichgewicht befindliches chemisches System reagiert auf einen äußeren Zwang, indem sich die Lage des Gleichgewichts auf jene Seite verschiebt, sodass der von außen kommende Zwang kleiner wird.

Nur die Konzentrationsänderung lässt sich logisch über das MWG begründen. Bei einer Temperatur- oder Druckänderung muss über thermodynamische Formeln argumentiert werden (IUPAC, 2025).

- **Einordnung im Chemie-Lehrplan für die AHS**

Das MWG lässt sich aus dem AHS-Lehrplan nur in der Oberstufe verorten. Im Themengebiet „Gleichgewicht“ wird angeführt, dass SchülerInnen das MWG auf Lösungs- und Komplexbildungsgleichgewichte anwenden können (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Zusätzlich ist für Realgymnasien mit vertiefendem Unterricht als SchülerInnenkompetenz das quantitative Beschreiben von Gleichgewichtsreaktionen angeführt. Diese Formulierung unterstreicht eine stärkere Verschiebung in mathematikorientierte Aufgabenstellungen. Damit ist das MWG explizit im AHS-Lehrplan für die Oberstufe festgeschrieben.

Obwohl im Lehrplan explizit das Anwenden des MWG verlangt wird, so erscheint eine mathematische Herleitung (beispielsweise über die Kinetik) des MWG optional zu sein.

- **Chemiedidaktik der Schulbücher**

Die Einführung des MWGs ist in den verschiedenen Schulbüchern differenziert. In einigen Schulbüchern wird es über die Kinetik hergeleitet, während es in anderen direkt mit der Definition eingeführt wird. Als Gemeinsamkeit stellt sich die Betrachtung der Gleichgewichtskonstante K und die Beeinflussung der Gleichgewichtslage durch die jeweiligen Parameter heraus. Der mathematische Tiefgang und die Anwendung von mathematischen Kompetenzen unterscheidet sich teils enorm. Im Folgenden werden drei für die AHS-Oberstufe relevante Schulbücher näher analysiert.

In Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023) ist das MWG unter dem Überthema „Das chemische Gleichgewicht“ zu finden (S. 95). Das MWG wird im Kontext des chemischen Gleichgewichts über die Reaktionskinetik hergeleitet bzw. begründet und definitionsgetreu als Formel angeschrieben. Im Anschluss folgt die Deutung der Konstante K und es werden Konzentrationsverhältnisse mithilfe des MWG berechnet. Die Mathematik bleibt dabei nicht nur auf das Einsetzen in eine Formel beschränkt, sondern es wird die Kompetenz des Lösen einer quadratischen Gleichung vorausgesetzt und an einem Beispiel angewendet (siehe Neufingerl, Palka, 2023, S.96).

Im Schulbuch Chemie begreifen von Wohlmuth (2015) wird für die Themeneinführung des MWGs ein historischer Ansatz über Guldberg und Waage gewählt. Anschließend wird das MWG zum einen über die Kinetik und zum anderen über die Thermodynamik begründet (Wohlmuth, 2015, S.112). Die Lage des chemischen Gleichgewichts wird auf der Folgeseite abgehandelt und über die Deutung der Gleichgewichtskonstante erklärt. Im Gegensatz zum Schulbuch Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023) werden keine Berechnungen angeschrieben bzw. behandelt. Der Schwerpunkt liegt somit auf der Begründungslogik des MWGs und weniger im rechentechnischen Aspekt.

Beim Schulbuch EL-MO wird das Thema MWG explizit beim Kapitel „Das chemische Gleichgewicht“ (genau wie bei Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023)) behandelt (Magyar et al., 2020). Die Darstellung des MWGs erfolgt definitionsgetreu über die allgemeine Formel. Danach folgt die Betrachtung der Gleichgewichtskonstante K und die Deutung des Wertes von K anhand von drei Beispielen. Die Berechnung von Gleichgewichtskonzentrationen und damit die mathematische Anwendung des MWGs fällt in den Themenbereich „Plus“, was einen optionalen Charakter impliziert. Demnach schlägt das Schulbuch EL-MO im Vergleich zu den beiden anderen Schulbüchern einen Mittelweg aus beiden zuvor betrachteten Büchern ein. Das MWG wird zunächst formal erklärt und über die Kinetik bzw. Thermodynamik begründet (ähnlich zu Chemie begreifen von Wohlmuth, 2015) und liefert denselben rechnerischen Aspekt wie in Chemie 1 von Neufingerl und Palka (2023), jedoch als optionalen Bereich.

- **Die Mathematik des Massenwirkungsgesetzes**

Im Vergleich zu den bisher betrachteten chemischen Begriffen, erscheint die Mathematik hinter dem Begriff simpel. Doch gerade hier soll auf den innermathematischen Aspekt hingewiesen werden – genaugenommen auf das mathematische Verständnis über die Auswirkung bei der Beeinflussung von Parametern auf ein Ergebnis.

Beim MWG handelt es sich aus mathematischer Sicht in der grundlegenden Rechenoperation um einen Quotienten.

Definition (Quotient): Der Quotient ist das Ergebnis einer Division und lässt sich allgemein anschreiben als

$$\text{Quotient} = \frac{\text{Zähler}}{\text{Nenner}}$$

wobei für den Zähler jede reelle Zahl und für den Nenner jede reelle Zahl außer 0 eingesetzt werden darf (in Bezug auf das MWG werden Zähler und Nenner auf positive reelle Zahlen ohne 0 beschränkt).

Hier ist besonders interessant, was mit dem Quotienten passiert, wenn sich der Zähler oder der Nenner ändern. Angenommen der Zähler bleibt konstant und der Nenner vergrößert (verkleinert) sich. Dann würde sich der Quotient verkleinern (vergrößern).

Umgekehrt gilt: ist der Nenner konstant und der Zähler vergrößert (verkleinert) sich, so wird der Quotient größer (kleiner).

Wenn der Zähler und der Nenner positiv sind, so können nur Zahlenwerte zwischen 0 und ∞ erreicht werden. Die 0 wird selbst nie erreicht, da sie stöchiometrisch keinen Sinn ergeben würde. Die Seite der Produkte müsste bei einer reversiblen chemischen Reaktionsgleichung leer gelassen werden, was jedoch dem Masseerhalt widerspricht. Das Fehlen der Edukte würde noch weniger Sinn ergeben und eine mathematische Katastrophe hervorrufen, da eine Division durch 0 bevorstehen würde.

Zudem ist für die Berechnung des Massenwirkungsgesetzes wiederum die Kompetenz „Rechnen mit Potenzen“ schlagend, da die Koeffizienten der jeweiligen Stoffe als Exponenten der jeweiligen *Stoffkonzentrationen* (Schulanwendung) angeschrieben werden (siehe Ausarbeitung pH-Wert). Innermathematisch kann man auch den Sonderfall für $a^0 = 1$ (mit $a \in \mathbb{R}^*$) anführen, der jedoch im chemischen Kontext vernachlässigbar ist.

Das Erkennen der Ergebnisbeeinflussung durch das Abändern von Parametern kann somit als innermathematisches Verständnis aufgefasst werden, das zum richtigen Einordnen und Deuten von Zahlenwerten beiträgt. Es entspricht einem Zahlengefühl, dass eine übergeordnete Kompetenz darstellt, die ein jeder Lernender in allen mathematischen Anwendungsgebieten (wie z.B. in Chemie oder Physik) entwickeln sollte.

Die Schulbuchanalyse zeigt, dass sogar das Lösen einer quadratischen Gleichung als Kompetenz vorausgesetzt wird.

Definition (quadratische Gleichung): Eine quadratische Gleichung entspricht der allgemeinen Form

$$ax^2 + bx + c = 0$$

mit $a, b, c \in \mathbb{R}$ und $a \neq 0$.

Zum Lösen derartiger Gleichungen werden wiederum zwei weitere Kompetenzen benötigt. Zum einen müssen SchülerInnen in der Lage sein zu erkennen, dass es sich um eine quadratische Gleichung handelt und zum anderen müssen sie ein geeignetes Lösungsverfahren kennen und anwenden können.

Satz (Produkt-Null-Satz): Ein Produkt ist genau dann 0, wenn zumindest einer von beiden Faktoren gleich 0 ist.

Dieser Satz kommt dann zum Tragen, wenn $c = 0$. Die Variable x kann dann herausgehoben werden und man erhält ein Produkt aus zwei Faktoren, aus denen die Lösungen für x herausgelesen werden können. Dieser Satz hat besonders eine innermathematische Bedeutung und zielt auf ein allgemeines Lösungsverständnis ab.

Im Schulbuch EL-MO von Magyar et al. (2020) wird jedoch im angegebenen Beispiel eine Lösungsformel benötigt.

Formel (große Lösungsformel): Zum Berechnen der Lösung einer allgemeinen quadratischen Gleichung gilt

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Diese Formel eignet sich hervorragend, um auf die im Schulbuch angegebene Lösung zu kommen. Im mathematischen Kontext enthält diese Formel sehr viel Information, die jedoch im Hinblick auf den chemischen Anwendungsbereich irrelevant ist (Stichwort *Diskriminante* und *Lösungsanzahl quadratischer Funktionen*). Für das Thema MWG und insbesondere beim Berechnen von Gleichgewichtskonzentrationen ist der Anwendungs- und Deutungsaspekt tragend. Durch die Anwendung der Formel kommt es zu zwei Lösungen der quadratischen Gleichung. Mathematisch betrachtet, wird eine quadratische Gleichung auch als Funktion verstanden, deren Funktionsgraph einer Parabel entspricht. Die Lösungen der quadratischen Gleichung können als Nullstellen der zugehörigen Funktion interpretiert werden, wobei der Kontext der Aufgabenstellung berücksichtigt werden muss. Nicht immer sind beide Lösungen sichere Ergebnisse der Aufgabe. Auch in diesem Fall ist somit ein Zahlengefühl und -verständnis als übergeordnete Kompetenz des Lernenden erforderlich.

- **Einordnung im Mathematik-Lehrplan für die AHS**

Bereits in der 1. Klasse Unterstufe (5. Schulstufe) wird das Wissen zu einem Quotienten vermittelt. Im AHS-Lehrplan werden im Bereich „Zahlen und Maße“ das Arbeiten mit Bruchzahlen und alle Rechenoperationen mit natürlichen Zahlen sowie mit nichtnegativen Dezimalzahlen als zu erlernende Kompetenz für die SchülerInnen ausgeschrieben (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Dies beinhaltet die Division als Grundrechenoperation (neben Addition, Subtraktion und Multiplikation) und ihrer allgemeinen Struktur, die beim Thema Brüche genauer besprochen wird (Stichwort *Zähler* und *Nenner*).

Quadratische Gleichungen werden im AHS-Lehrplan für die Oberstufe unter dem Themenbereich „Gleichungen und Gleichungssysteme“ in der 5. Klasse (9. Schulstufe) explizit ausgewiesen. Die SchülerInnen sollen quadratische Gleichungen in einer Variable lösen und die Lösungsfälle untersuchen können (vgl. BGBl. Nr. 88/1985). Das Thema wird auf quadratische Funktionen ausgeweitet und vertieft, was dem Verknüpfen des rechnerischen Aspekts mit einem grafischen Aspekt entspricht. Die große Lösungsformel wird nicht direkt im Lehrplan erwähnt, fällt jedoch kontextbezogen unter das Lösen von quadratischen Gleichungen in einer Variable. Ebenso lässt sich der Produkt-Null-Satz in diesen Bereich verorten.

Die übergeordnete Kompetenz des Zahlenverständnisses und der Deutung von Ergebnissen findet sich im Bereich „Mathematische Kompetenzen“ wieder, die für alle Schulstufen Relevanz hat. Sie lässt sich zwar nicht explizit als Text aus dem Lehrplan auslesen, kann jedoch aus dem Kontext der Komplexitätsdimension untergeordnet werden. In dieser Dimension wird das Einsetzen von Grundwissen und Grundfähigkeiten, sowie das Herstellen von Verbindungen und Reflektieren hervorgehoben. Mathematische Kompetenzen werden im Lehrplan als längerfristige kognitiven Fähigkeiten gedeutet, die SchülerInnen im Mathematikunterricht vermittelt bekommen sollten (vgl. BGBl. Nr. 88/1985).

Somit lässt sich festhalten, dass die Kompetenzen des Lösen von quadratischen Gleichungen sowie dem allgemeinen Zahlenverständnis (in Bezug auf das Thema Quotient) als Voraussetzung für den Chemieunterricht legitim sind.

- **Mathematisch bedingte Fehlerquellen und Lernhürden beim Thema MWG**

In Garnett et al. (1995) wird auf folgende häufige Fehlerquelle hingewiesen: SchülerInnen interpretieren das chemische Gleichgewicht als (mathematische) Gleichheit (Universität Bayreuth, S.8). Sie leiten daraus eine Proportionalitätsbeziehung ab und betrachten Produkt- und Eduktkonzentrationen als ident bzw. meinen, dass die stöchiometrischen Verhältnisse in einem Verhältnis zueinanderstehen. Das hat zur Folge, dass Gleichgewichtszustände nicht über den Quotienten des MWGs, sondern über lineare Rechenregeln (über die Reaktionsgleichung direkt) gedeutet werden. In diesem Fall kann das mathematische Vorwissen als Hürde gedeutet werden.

Eine weitere Fehlerquelle liegt im algebraischen Umformen und der Unterscheidung zwischen *Variable* und *Konstante*. Wie bereits erwähnt werden für das Thema MWG mathematische Kompetenzen vorausgesetzt bzw. verlangt. Beim MWG müssen die SchülerInnen verstehen, was *konstant* ist (z.B. K bei fester Temperatur) und was *variabel* ist (momentane Konzentrationen bzw. der Reaktionsquotient) – eine mathematisch übergeordnete Verständniskompetenz. Nach Kimpel und Sumfleth (2017) fällt Lernenden die Identifikation von Variablen und Konstanten in chemischen Gleichungen schwer, was für das Themenverständnis eine Hemmschwelle darstellt (Kimpel, 2017). Zudem verweist Höner (1996, S. 51f) darauf hin, dass das Voraussetzen von mathematischen Fertigkeiten (selbst wenn es gerechtfertigt ist) von den Lernenden auf Unverständnis stößt und ein Dämpfen der Lernfreude nach sich ziehen kann.

Insbesondere Höners Hinweis lässt sich auf alle Themenbereiche in der Chemie mit mathematischen Hintergründen oder Nutzenanwendungen ausweiten. Alle bereits erwähnten Themen (Reaktionsgleichungen, pH-Wert und Massenwirkungsgesetz) setzen ein gewisses Maß an mathematischer Kompetenz voraus. Deshalb erscheint es umso wichtiger, dass Lehrpersonen ein vernetztes Denken bei den SchülerInnen anregen, da die Mathematik in jeder Naturwissenschaft präsent ist und ein wichtiges Mittel zum Zweck ist.

4 Kriterienrahmen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Kriterienrahmen entwickelt, der klärt, unter welchen Bedingungen Mathematik im Chemieunterricht lernförderlich ist und ab wann sie das fachliche Verständnis eher überdeckt. Der Rahmen bündelt die in den vorangehenden Kapiteln diskutierten Anforderungen (fachliche Modellierung, Verständlichkeit/Fehleranfälligkeit, Anschluss an Lernziele und Kompetenzen) in überprüfbaren Kriterien.

Mithilfe des Kriterienrahmens soll festgestellt werden können, ob der mathematische Aspekt einer Aufgabe, Unterrichtssequenz oder Formel für die chemische Deutung förderlich ist oder nicht. Zusätzlich soll er als Hilfsmittel dienen, um den mathematischen Anteil im Chemieunterricht richtig dosieren zu können. Im Fokus des Rahmens steht dabei, dass die Mathematik für den Chemieunterricht eine untergeordnete Funktion (Hilfsmittel bzw. Mittel zum Zweck) einnimmt und als ein Werkzeug für chemische Erkenntnis dient. Dieser Fokus soll mithilfe des Rahmens explizit begründet werden.

4.1 Theorie des Kriterienrahmens

Für den Kriterienrahmen werden drei fachdidaktische Perspektiven berücksichtigt. Die erste Perspektive beschäftigt sich damit, dass chemisches Lernen als Arbeiten mit Modellen und Repräsentationsebenen verstanden wird, in dem Mathematik eine Sprache zur Beschreibung dieser Modelle und Ebenen sein kann. Eine andere Perspektive weist auf die Sprachsensibilität hin (Fachsprache vs. Alltagssprache und die Gleichheit von Wörtern bzw. Begriffen), während die letzte Perspektive auf die SchülerInnen-Motivation eingeht, die durch das ungezielte Einbringen von mathematischen Inhalten im Chemieunterricht reduziert werden kann.

1. Repräsentationsebene

Barke et al. (2018) betont, dass chemisches Verstehen wesentlich über das Wechselspiel verschiedener Darstellungsebenen (Phänomenebene, Teilchen-/Modellebene, Symbol- und Formelsprache) aufgebaut wird. Mathematik kann in diesem Zusammenhang eine Form der Symbolsprache sein – aber nur dann, wenn die verwendeten Größen und Operationen an ein chemisches Modell und an beobachtbare Phänomene geknüpft werden. Für den Kriterienrahmen folgt daraus, dass die Mathematik nie allein, also ohne chemischen Kontext, verwendet werden soll, sondern in Modellvorstellungen eingebettet und sprachlich oder visuell chemische Deutungen stützt bzw. ermöglicht (Barke et al., 2018).

2. Fachsprache und Begriffsgleichheiten

Lernende müssen von der Alltagssprache zur Fach- bzw. Symbolsprache hingeführt werden, damit chemische Inhalte auch verstanden werden können. Mathematische Darstellungen sind daher didaktisch so einzubetten, dass Bedeutungen nicht verloren gehen und unterschieden werden (z.B. „Produkt“ im mathematischen bzw.

chemischen Aspekt differenzieren) (Barke & Harsch, 2011; Barke et al, 2018). Würden diese scheinbaren Gleichheiten nicht eindeutig differenziert werden, können die SchülerInnen ein fehlerhaftes Begriffsverständnis entwickeln.

3. Motivation

Wie bereits erwähnt, können mathematische Anforderungen motivationshemmend wirken, wenn sie aus der Sicht von Lernenden als nicht einsichtig oder funktional erlebt werden (Höner, 1996). Demnach muss die vorkommende Mathematik als sinnvoll von den Lernenden erachtet werden.

4.2 Matrix des Kriterienrahmens

Kriterium	Leitfrage	Indikatoren im Konzept
K1 Fachliche Notwendigkeit	Ist Mathematik notwendig, um den chemischen Kern zu verstehen?	Mathematik hilft beim Verständnis einer chemischen Aussage (Barke et al., 2018)
K2 Didaktische Funktion	Dient Mathematik als Werkzeug (Erklären/Vorhersagen/Interpretieren)?	Rechenwege sind ausdrücklich auf chemische Deutung ausgerichtet (Barke & Harsch, 2011)
K3 Ebenen-Balance	Wird der Sprung Makro- → Symbolebene vermieden?	Sequenz: Phänomen → Modell/Bedeutung → Symbolik/Mathe (Barke et al., 2018)
K4 Sprach-/Symbolklarheit	Sind Symbole, Größen, Einheiten verständlich eingeführt?	Konsistente Notation, Einheitenarbeit, Begriffsklärungen (Barke et al., 2018)
K5 Kognitive Zumutbarkeit	Ist die Mathematik stufengerecht (Sek I/II) progressiv aufgebaut?	Entlastung, keine Überfrachtung (Barke & Harsch, 2011)
K6 Fehleranfälligkeit	Werden typische Fehlstrategien antizipiert?	Plausibilitätschecks, typische Stolpersteine (Barke & Harsch, 2011)
K7 Mathematischer Sinn	Wird Mathematik als sinnvoll erlebt?	Sinnstiftung, Transparenz des „Wozu“ (Höner, 1996)
K8 Lehrplanpassung	Passt das Konzept zur AHS Sek I/II?	Orientierung an Lehrplanintentionen/Kompetenzlogiken (Hofer et al., 2023)
K9 Praktikabilität	Ist der Aufwand im Alltag realistisch?	Zeitökonomie, Umsetzbarkeit
K10 Validierbarkeit	Können Lehrpersonen die Kriterien klar beurteilen?	Kriterien lassen sich als Kompetenzen formulieren

Tabelle 1: Kriterienmatrix

Die Tabelle orientiert sich am Schema von Leisens Kompetenzmatrix (2006), sowie an Kulgemeyers Kriterienmatrix für die Erklärqualität von Erklärvideos (2019). Die Kriterienwahl orientiert sich teilweise an Meyers Publikation „Was ist guter Unterricht?“ (2011).

5 Unterrichtskonzept

Das in diesem Kapitel ausgearbeitete Unterrichtskonzept stützt sich auf den zuvor formulierten Kriterienrahmen und entspricht einem Unterrichtskonzept in übergeordneter Form. D.h. das Konzept entspricht keiner Unterrichtsfineplanung, sondern stellt eine Konzeptionierung auf Makroebene dar. Das Unterrichtskonzept beschreibt, wie die Mathematik als Werkzeug richtig eingesetzt werden kann, um chemisches Verständnis und Wissen bei Lernenden zu generieren bzw. zu festigen. Dafür wird ein 4-Phasen-Prozess in Form eines Unterrichtszyklus vorgestellt, der im Grunde ein Phänomen (ein chemierelevantes Unterrichtsthema) mithilfe mathematischer Operationen (vorausgesetzt sie dienen als Erkenntnisgewinn) und Deutungen erklärt. Die Mathematik erhält dabei wiederum eine Werkzeugfunktion.

5.1 Der Balanceakt

Wenn ein Artist in einer Manege auf einem dünnen Drahtseil in etwa 20 Metern Höhe balanciert, dann wägt er normalerweise jeden einzelnen Schritt sorgfältig ab. Auch wenn ihn bei einem Fehltritt ein Auffangnetz als Sicherung dient, so möchte er einen Sturz sicherlich vermeiden. Ähnlich kann man den Balanceakt eines Chemielehrers/einer Chemielehrer betrachten, der/die versucht der Mathematik im Chemieunterricht den richtigen Stellenwert zuzuordnen. Das richtige Abwägen vom sinnhaften Einsatz, dem Voraussetzen von mathematischen Kompetenzen und dem Bilden einer Brücke zur chemischen Deutung ist kein einfaches Unterfangen. Passiert der Lehrperson ein sinnbildlicher Fehltritt, so entspricht dies einer Bildung von Fehlkonzepten bei Lernenden, die möglicherweise die Mathematik im chemischen Kontext als überfordernd oder sinnlos erachten bzw. im schlimmsten Fall ein falsches Verständnis des jeweiligen chemischen Themas entwickeln. Es kommt somit auf den richtigen Balanceakt an, um Fehlritte zu vermeiden, auch wenn diese manchmal passieren können.

Das Ziel des ausgearbeiteten Unterrichtskonzept ist es, Lehrpersonen eine praktikable Entscheidungshilfe zu geben, um differenzieren zu können, wann Mathematik den Chemieunterricht stützt und wann sie zum bloßen Rechentraining ohne didaktischen und chemisch inhaltlichen Mehrwert wird. Dafür werden für das Unterrichtskonzept einige Entscheidungspunkte angeführt und mit Handlungsoptionen verknüpft.

Eine ausgewogene Balance ist dann erreicht, wenn mathematische Operationen für SchülerInnen transparent begründet, fachlich notwendig und didaktisch entlastet sind und wenn jedes mathematische Ergebnis wieder in eine chemische Deutung zurückgeführt wird. Diese Ausrichtung ist anschlussfähig an den kompetenzorientierten Anspruch des österreichischen Fachlehrplans, der ausdrücklich die Verbindung von fachlichen Inhalten mit praxisnahen Umsetzungsanregungen und die Kompetenzentwicklung betont (Hofer et al., 2023).

Gleichzeitig berücksichtigt der Balanceakt den empirischen Befund Höners (1996), dass zu hohe mathematische Anforderungen Lernende überfordern – insbesondere dann, wenn die vorausgesetzten Grundkompetenzen von SchülerInnen nicht sicher beherrscht

werden. Die Mathematik könnte dadurch zu Frustration und Demotivation beitragen, was mit Verständnisschwierigkeiten verknüpft ist (Höner, 1996). Daraus folgt als didaktische Konsequenz, dass mathematische Anforderungen und Operationen schülerInnengerecht angepasst und sprachlich geklärt werden müssen.

5.2 Designprinzipien und didaktischer Rahmen

Das Unterrichtskonzept strebt einen 5-Punkte-Plan an, der bei einer gewissenhaften Berücksichtigung einen gelungenen Balanceakt, wie zuvor beschrieben, im Chemieunterricht schaffen soll.

Punkt 1 – Vom Phänomen zur Mathematik

Das Unterrichtskonzept folgt dem Prinzip, dass Mathematik im Chemieunterricht stets an Repräsentationsebenen gebunden eingeführt wird und nicht isoliert als Symbolmanipulation beginnt. Damit wird der Übergang von beobachtbaren Phänomenen über modellhafte Vorstellungen hin zur symbolisch-mathematischen Darstellung systematisch gestaltet. Das Unterrichtskonzept chem:LEVEL beschreibt hierfür eine schülergerechte Visualisierung des Johnstone-Dreiecks und begründet, dass insbesondere Vermischungen der Ebenen zu Verständnisschwierigkeiten führen können, während eine explizite Ebenentrennung die Fachsprache und das Verständnis unterstützt (Haas & Marohn, 2022).

Punkt 2 – Begriffsklärung Mathematik vs. Chemie

Die Anwendung des Konzepts wird sprach- und symbolsensibel umgesetzt, indem zentrale Begriffe nicht nur verwendet, sondern im Unterricht jeweils in ihrer chemischen Bedeutung geklärt werden.

Punkt 3 – Anknüpfung an mathematische Vorkenntnisse

Das Konzept arbeitet mit einer konsequenten Entlastungslogik, die Mathematik für heterogene Lerngruppen zugänglich macht, indem sie in kleinschrittigen, begründeten Operationen angeboten wird und durch kurze „Mathe-Brücken“ an bereits bekannte Vorkenntnisse (z. B. Verhältnisdanken, Potenzen, Taschenrechnergebrauch) anschließt. Diese Entlastung ist didaktisch notwendig, da SchülerInnen häufig gerade das Mathematisieren chemischer Sachverhalte als problematisch erleben, wenn der Weg zur Deutung nicht sichtbar gemacht wird (Höner, 1996).

Punkt 4 – Mathematik als Werkzeug

Mathematik wird nur dann eingesetzt, wenn sie für eine chemische Aussage funktional ist, also einen Erkenntnisgewinn ermöglicht, der rein qualitativ nicht in derselben Klarheit erreichbar wäre. Die mathematische Bearbeitung wird damit als Werkzeug der Erkenntnisgewinnung verstanden (z. B. zur Quantifizierung, zum Vergleich von Größen

oder zur Überprüfung von Plausibilität), während rein formale Herleitungen, die keinen zusätzlichen chemischen Sinn erzeugen, konsequent vermieden oder in einen Vertiefungspfad ausgelagert werden. Dieses Vorgehen passt zur Intention des Lehrplankommentars von Hofer et al (2023), der kompetenzorientierte Zielsetzungen mit praxisnahen Umsetzungsanregungen verbindet und Lernende inhaltlich „wohin“ führen soll.

Punkt 5 – Von der Zahl zur Chemie

Das Unterrichtskonzept enthält als Qualitätsmerkmal immer eine explizite Deutungs- und Transferphase, in der Ergebnisse nicht bei Zahlen oder umgestellten Formeln stehen bleiben, sondern in chemische Aussagen übersetzt werden. Dadurch wird verhindert, dass Mathematik die inhaltliche Auseinandersetzung ersetzt, und es wird zugleich abgesichert, dass mathematische Schritte ihre Werkzeugfunktion behalten.

5.3 Das Konzept

Das Unterrichtskonzept wird in dieser Arbeit als wiederholbarer Unterrichtszyklus beschrieben, der auf alle Themengebiete im Chemieunterricht anwendbar ist. Die vier präsentierten Phasen inkludieren die Ideen des 5-Punkte-Plans und sollen die Anwendung auf den Chemieunterricht vereinfachen.

Erste Phase – Phänomen

In der Phänomenphase wird ein Problem so gesetzt, dass es für SchülerInnen nachvollziehbar und fachlich motiviert ist. Diese Phase schafft den inhaltlichen Sinnhorizont, der später die Mathematik legitimiert, weil die Mathematisierung nicht von außen kommt, sondern aus einer fachlichen Frage entsteht. Werden Experimente als Phänomen verwendet, so dienen diese nicht einfach als Show, sondern als Ausgangspunkt für Modellierung und Deutung chemischer Inhalte (Lippusch, 2016). Wenn das Phänomen (im besten Fall) einen Alltagsbezug herstellt, so können die SchülerInnen einen Bezug zu ihrer eigenen Lebenswelt herstellen, was oft eine Motivationssteigerung und Lernbereitschaft mit sich bringt.

Zweite Phase – Modellierung

In der zweiten Phase wird der chemische Kern erarbeitet. Bei Reaktionsgleichungen ist das der Massenerhalt auf Teilchenebene, beim pH-Wert das Deuten von sauer/basisch/neutral als Aktivitätsfrage (oder schulspezifisch als Konzentrationsfrage) und beim MWG das Verständnis vom chemischen Gleichgewicht als dynamischer Zustand mit stabiler Quotientenstruktur. In dieser Phase wird somit ein chemischer Input zum Thema gegeben und aufgezeigt, was man unter dem jeweiligen Thema versteht. Zum Schluss dieser Phase soll geklärt werden, was genau herausgefunden werden soll. Bei Reaktionsgleichungen könnte die Fragestellung lauten: „Warum muss links und rechts die Atomanzahl ident sein?“, beim pH-Wert: „Was genau bedeutet eine Änderung des pH-Werts um 1?“ und beim MWG könnte man „Was sagt K über die Lage des chemischen Gleichgewichts aus?“ als Frage formulieren.

Dritte Phase – Mathematisierung

In dieser Phase wird Mathematik gezielt als Werkzeug eingesetzt. Sie beginnt im Konzept nie mit dem Rechnen selbst, sondern startet mit der Überlegung der voraussetzbaren mathematischen Kompetenzen der SchülerInnen. Falls es als notwendig erachtet wird, kann eine kurze Wiederholung von den als notwendig erachteten Kompetenzen durchgeführt werden – was jedoch von der Lehrperson auf ein äußerstes Minimum beschränkt sein sollte, da die Mathematik im Chemieunterricht einen Werkzeugaspekt haben sollte. Die Anschauungsbeispiele zeigen, welche Kompetenzen bei den Themen Reaktionsgleichungen, pH-Wert und MWG schlagend werden (z.B. kgV /Verhältnisse beim Thema Reaktionsgleichungen; Potenzen/Logarithmus beim Thema pH-Wert; Quotient/Lösen quadratischer Gleichungen beim Thema MWG). Zusätzlich findet in dieser Phase die Erklärung mathematischer Begriffe statt (z.B. Präzisierung von Koeffizient und Index oder Bedeutung von K als Konstante). Zusätzlich sollen Rechenentscheidungen erklärt und präzisiert werden.

Vierte Phase – Transfer

Die vierte Phase entspricht einer Transfer- und Deutungsphase, in der Ergebnisse in die Fachsprache zurückübersetzt und auf neue Situationen angewendet werden. Hier werden Plausibilitätsprüfungen verpflichtend eingebaut. Die SchülerInnen sollen ein tieferes Verständnis und Gefühl dafür bekommen, ob ein Zahlenergebnis richtig oder falsch sein kann. Somit endet die Mathematik nicht beim Ergebnis (der Zahl), sondern beim begründeten Urteil bzw. bei der plausiblen Interpretation (z.B. „Kann die Gleichung so stimmen?“; „Ist die Lösung chemisch sinnvoll?“). SchülerInnen lernen dadurch nicht nur eine Aufgabe zu lösen, sondern auch zu erklären bzw. zu begründen. Diese Phase transferiert somit das Ergebnis (meist ein Zahlenwert) zurück zum chemischen Phänomen.

Der Unterrichtszyklus lässt sich als ein Kreisprozess graphisch darstellen. Die Idee des Zyklus ist an Goldhausens und Di Fuccias Prozess des mathematischen Modellierens im Chemieunterricht (2015) und an das 5E-Modell von Puddu, Lembens und Abels (2016) angelehnt.

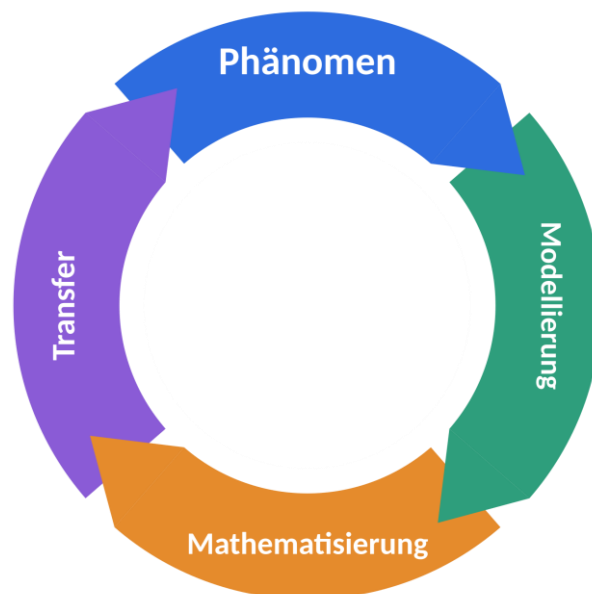


Abbildung 1: Die 4 Phasen des Unterrichtszyklus

5.4 Entscheidungshilfen und Grenzen

Damit Lehrpersonen den in dieser Arbeit entwickelten Balanceakt im Unterricht umsetzen können, wird der Kriterienrahmen in Entscheidungshilfen übersetzt. Diese Entscheidungshilfen sind als kurze Prüffragen formuliert, die vor, während und nach einer mathematischen Passage eingesetzt werden können (Kulgemeyer, 2019). Sie dienen als Stütze für die Lehrperson, um einfach feststellen zu können, ob der mathematische Inhalt überhaupt notwendig ist und ob die im Unterrichtskonzept formulierten Phasen erfüllt werden können.

Als Anwendungsstütze können vier Leitfragen dienen, die vor jeder größeren Mathematisierung (insbesondere bei Rechenaufgaben) systematisch durchlaufen werden:

1. Trägt die Mathematik sichtbar zur chemischen Klärung bei?
2. Werden die vorkommenden Größen, Einheiten und/oder Terme erklärt?
3. Sind mathematische Kompetenzen für das chemische Thema voraussetzbar bzw. werden welche benötigt?
4. Ist die Aufgabe so konstruiert, dass Fachsprache, Symbolsprache und Repräsentationswechsel unterstützt werden?

Diese Leitfragen helfen beim Aufzeigen von Grenzen. Wenn Frage 1 und 2 nicht eindeutig mit einem „Ja“ beantwortbar sind, sollten die mathematischen Anforderungen reduziert, Lösungshilfen berücksichtigt oder durch Alternativen ergänzt werden. Damit wird Mathematisierung nicht vermieden, aber konsequent an Mindestanforderungen gebunden, die chemisches Verstehen absichern.

6 Methodik

Im empirischen Teil der Arbeit erfolgt die Validierung des zuvor entwickelten Unterrichtskonzept anhand einer Bewertung durch ExpertInnen. Es soll beurteilt werden, ob die Kriterien, das Gesamtkonzept sowie die möglichen Entscheidungshilfen verständlich, fachlich und didaktisch plausibel und in der Schulpraxis umsetzbar sind.

6.1 Forschungsdesign

Das Forschungsdesign entspricht einer expertenInnenbasierten Konzeptvalidierung. Dabei werden aktive Chemielehrpersonen, die an einer niederösterreichischen AHS unterrichten (Sek I/Sek II oder beide), online mittels Fragebogen befragt, die das Unterrichtskonzept beurteilen sollen. Erhoben werden sowohl skalierte Einschätzungen als auch offene Kommentare, um neben Zustimmung oder Ablehnung auch Verbesserungsvorschläge/Stärken/Schwächen bezüglich des Konzepts zu erhalten. Eine Unterrichtserprobung im Klassenraum ist erst nach der ExpertInnenvalidierung und der daraus resultierenden Überarbeitung des Konzepts eine weitere mögliche Vorgehensweise (Bortz & Döring, 2016; Bogner et al., 2014). Die Zielgröße der zu befragenden ExpertInnen beträgt 15 Personen.

Als Fragebogen dient hierfür eine standardisierte Version, die skalierte Einschätzungen zur Vergleichbarkeit und offene Rückmeldungen zur inhaltlichen Tiefe verbindet. Damit wird ein Mixed-Methods-Charakter verfolgt, bei dem quantitative Daten eine strukturierte Übersicht über Zustimmung bzw. Ablehnung liefern, während offene Antworten qualitative Informationen einbringen (Kuckartz, 2014). Aus diesen können Verbesserungsvorschläge sowie Für- oder Gegen-Argumente entnommen werden. Der Fragebogen ist mit dem Kriterienrahmen verknüpft, wobei die vorkommenden Kriterien (K1-K10) als bewertbare Aussagen formuliert werden, die von den ExpertInnen bewertet werden.

Bevor die ExpertInnen mit der Beantwortung des Fragebogens beginnen können, müssen sie sich eine Kompakt-Variante des Unterrichtskonzepts ansehen, welches zusätzlich ein kurz formuliertes Anwendungsbeispiel beinhaltet. Der Fragebogen kann nur dann ausgefüllt werden, wenn dieser Schritt erledigt wurde, was ein gewissenhaftes Ausfüllen des Fragebogens (vermutlich) begünstigt.

6.2 Fragebogen

Der Fragebogen dient dazu, das Unterrichtskonzept anhand formulierter Aussagen zu prüfen, die im Kriterienrahmen als entscheidend für einen passenden Balanceakt der Mathematik im Chemieunterricht ausgewiesen wurden. Inhaltlich werden demnach insbesondere folgende Aspekte erhoben:

1. fachliche Notwendigkeit und didaktische Funktion der Mathematik (K1, K2),

2. Ebenen- und Sprachsensibilität (K3, K4),
3. kognitive Zumutbarkeit und Fehleranfälligkeit (K5, K6),
4. mathematischer Sinn (K7),
5. Lehrplanpassung und Praxistauglichkeit (K8, K9),
6. sowie die Beurteilbarkeit bzw. Transparenz des Konzepts (K10).

6.2.1 Items-Formulierung

Bei der Item-Formulierung sollen zwei Bereiche der Arbeit von ExpertInnen beurteilt werden. Der erste Bereich hat die Beantwortung der Forschungsfrage zum Ziel, während der andere (größere) Bereich auf die Bewertung des Unterrichtskonzept abzielt und somit ebenfalls auf eine mögliche Beantwortung der Forschungsfrage hinführen soll. Als Basis für den zweiten Bereich dient die Kriterienmatrix. In diesem Bereich entspricht jedes Item genau einem Kriterium aus der Matrix.

Es wird darauf geachtet, dass die Items sprachlich eindeutig formuliert werden, sodass es zu keinen Fehlinterpretationen der Aussagen kommt. Deshalb wird darauf geachtet, dass alle vorkommenden wichtigen Begriffe verständlich und – falls nötig – vorher definiert werden (Porst, 2014).

6.2.2 Antwortformat

Zur Auswertung der Items wird eine 5-stufige Likert-Skala verwendet, wobei die Auswahlmöglichkeiten 1 bis 5 den Antworten „Stimme ich vollkommen zu“, „Stimme ich eher zu“, „Weder noch“, „Stimme ich eher nicht zu“ und „Stimme ich überhaupt nicht zu“ entsprechen. Manche Items erhalten ein Freitextfeld, damit Stärken/Schwächen oder Verbesserungsvorschläge bezüglich des Unterrichtskonzepts erfasst werden können. Die Ergebnisse werden anschließend primär deskriptiv berichtet und durch qualitativ ausgewertete offene Rückmeldungen ergänzt. Die Kombination der beiden Varianten soll eine präzise Validierung ermöglichen.

6.2.3 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen kann in vier Abschnitte gegliedert werden:

1. **Unterrichtskonzept kompakt:** gibt einen genauen Einblick zum Konzept inklusive eines Anwendungsbeispiels
2. **Kurzinfo zur Person (Demografie):** Geschlecht, Berufserfahrung, Schultyp (Sek I/Sek II oder beides)
3. **Beurteilung des Konzepts auf Makroebene:** Kriterienbezogene Skalenitems zu Balance, Transparenz, Praktikabilität

4. **Offene Rückmeldungen:** Stärken, Risiken, Verbesserungsvorschläge, Hinweise zur Implementierung

6.3 Stichprobe

Die Stichprobe besteht aus aktiven Chemielehrpersonen im AHS-Bereich (Sekundarstufe I und/oder II). Ein Stichprobenumfang von $n = 15$ ExpertInnen ist für die Zielsetzung dieser Arbeit ausreichend, weil keine repräsentative Generalisierung angestrebt wird, sondern eine ExpertInnenvalidierung eines theoriegeleiteten Unterrichtskonzepts auf Makroebene. Um Perspektiven aus beiden Sekundarstufen abzubilden, wird eine möglichst heterogene Zusammensetzung hinsichtlich Unterrichtserfahrung und Einsatz in Sekundarstufe I bzw. II angestrebt.

6.4 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgt in standardisierter Form mittels online-Fragebogen. Den ExpertInnen werden vor dem Ausfüllen eine kurze Studieninformation (Ziel, Dauer, Freiwilligkeit), ein Dokument mit dem präsentierten Unterrichtskonzept in kompakter Form (inkl. Kriterienrahmen-Logik, Designprinzipien, Konzeptarchitektur und Entscheidungshilfen) sowie ein Anwendungsbeispiel bereitgestellt. Erst auf dieser Grundlage erfolgt die Bewertung.

Datenschutz und Ethik werden durch folgende Maßnahmen abgesichert:

1. Die Teilnahme ist freiwillig und ein Abbruch ist jederzeit möglich.
2. Es werden keine identifizierenden Daten (Name, Adresse, Geburtsdatum) erhoben bzw. werden ausschließlich allgemeine demographische Daten auf freiwilliger Basis erhoben (Geschlecht, Berufserfahrung, Schultyp).
3. Die Ergebnisse werden ausschließlich aggregiert berichtet. Zitate aus offenen Antworten werden anonymisiert.

Dieses Vorgehen entspricht grundlegenden Standards empirischer Sozialforschung und dient insbesondere der Offenheit der Rückmeldungen (Diekmann, 2020; Häder, 2019).

6.5 Auswertung

Durch die Analyse und Auswertung der erhobenen Daten soll das entwickelte Unterrichtskonzept auf Plausibilität und Umsetzbarkeit geprüft werden, wodurch Überarbeitungsschritte ermittelt werden können. Zudem soll durch die Auswertung eine mögliche Antwort auf die Forschungsfrage gegeben werden. Der Fragebogen liefert dabei quantitative (in Form der Liker-Items) sowie qualitative (in Form der offenen Fragen) Informationen. Die 5-stufige Likert-Skala hilft somit beim Erkennen, ob die ExpertInnen

mit dem Konzept sowie den allgemeinen Aussagen in Bezug auf Mathematik im Chemieunterricht Zustimmung oder eher eine kritische Einstellung entgegenbringen. Die offenen Antworten liefern präzise Verbesserungsvorschläge bzw. zeigen Stärken oder Schwächen des Unterrichtskonzeptes oder sogar Missverständnisse auf.

6.5.1 Likert-Items

Für die Likert-Items werden Prozentstreifen-Diagramme erstellt, in denen die Häufigkeiten von Zustimmung bzw. Ablehnung zu den einzelnen Items präsentiert und graphisch veranschaulicht werden. Die Auswertung erfolgt anschließend über Anteile (absolute oder prozentuelle), die aus den Diagrammen bzw. Tabellen entnommen werden können. In den Tabellen wird zudem der Median angeführt, der einen allgemeinen Überblick zur Verteilung der Daten liefert. Die Berechnung der statistischen Kennzahlen hat immer $N = 15$ als Basis bzw. Grundwert.

6.5.2 Offene Antworten

Die offenen Antworten beziehen sich auf die Beurteilung des Kriterienrahmens sowie auf die Praxistauglichkeit und Weiterentwicklung des Unterrichtskonzepts. Sie ergänzen die Likert-Items, indem sie konkrete Begründungen, wahrgenommene Risiken und Verbesserungsvorschläge liefern. Dadurch können auch Missverständnisse identifiziert werden, die in Auswahlbewertungen verborgen bleiben würden.

Die Auswertung dieser Antworten erfolgt dabei einer Inhaltsanalyse, in der die einzelnen Rückmeldungen auf Schlagwörter aus dem Kriterienrahmen untersucht werden, um anschließend Rückschlüsse zum Unterrichtskonzept ziehen zu können. Wiederkehrende Argumente und Antworten, die zwar einen Bezug zum Kriterienrahmen haben, diesen allerdings erweitern, erfordern eine zusätzliche Ergänzung bzw. Unterteilung des Kriterienrahmens (Mayring, 2015; Kuckartz & Rädiker, 2022).

7 Ergebnisse

7.1 Rücklauf und Plausibilitätscheck

Die Auswertung basiert auf $N = 15$ ausgefüllter ExpertInnen-Fragebögen. Sämtliche TeilnehmerInnen bestätigten, das Unterrichtskonzept gelesen zu haben, aktuell als Chemielehrperson (AHS Sek I und/oder Sek II) tätig zu sein sowie der freiwilligen Teilnahme und den Datenschutzbedingungen zuzustimmen. Für die Validierung der Fragebögen liegen somit vollständig auswertbare Daten vor.

Die Likert-Items wurden auf einer fünfstufigen Zustimmungsskala beantwortet, wobei 1 = „Ich stimme vollkommen zu“ bis 5= „Ich stimme überhaupt nicht zu“ entspricht. Die Ergebnisse werden über Häufigkeitsverteilungen angegeben und berichtet. Der Median dient dabei als Lagemaß in Bezug zu den Antwortmöglichkeiten. Für eine bessere Lesbarkeit werden die Ergebnisse in einer Tabelle bzw. in einem Prozentstreifen-Diagramm angeführt. Die Häufigkeiten der angegebenen Zustimmungsskala sind direkt in den farblich unterscheidbaren Balkenabschnitten der jeweiligen Prozentstreifen-Diagramme angeschrieben.

7.2 Demographie der Stichprobe

Eine Verteilung über unterschiedliche Erfahrungsstufen in Form der bereits absolvierten Unterrichtszeit in Jahren sowie der Einsatzbereich in Bezug zur AHS (Sek I/Sek II oder beides) ist für eine aussagekräftige Validierung essenziell, da sie sich nicht auf einen einzigen Schultyp oder eine bestimmte Berufsgruppenerfahrung beschränkt. Es gilt jedoch zu beachten, dass nur ein kleiner Teil der Befragten (genau 3 von 15) Mathematik als Zweitfach hat. Die Fragebögenenergebnisse repräsentieren damit überwiegend die Perspektive von Chemielehrpersonen, die mathematische Komponenten zwar regelmäßig verwenden, diese aber nicht als Unterrichtsschwerpunkt ihres Faches verstehen.

Die angeführte Tabelle fasst die zentralen Merkmale der TeilnehmerInnen zusammen und liefert einen genauen Überblick zur demographischen Verteilung. Die Prozentwerte beziehen sich auf $N = 15$.

Merkmal	Kategorie	n	%
Geschlecht	weiblich	10	66,7 %
	männlich	5	33,3 %
Berufserfahrung (Jahre)	1 - 5	5	33,3 %
	6 - 10	5	33,3 %
	>10	5	33,3 %
Unterrichtsbereich	Sek I	3	20,0 %
	Sek II	4	26,7 %
	beides	8	53,3 %
Unterrichten Sie auch Mathematik?	Ja	3	20,0 %
	Nein	12	80,0 %

Tabelle 1: Demographische Daten der Fragebögen

7.3 Einschätzung zum Stellenwert von Mathematik (A1–A5)

Die allgemeinen Aussagen zum Stellenwert von Mathematik (A1–A5) wurden von den ExpertInnen teilweise stark differenziert bewertet. Die meiste Zustimmung gab es bei den Aussagen A3 und A4. Im Folgenden werden die einzelnen Aussagen kurz zusammengefasst und die Bewertungsergebnisse analysiert und angeführt. Das Diagramm stellt die Häufigkeiten der ausgewählten Zustimmungsskala dar, welche von den ExpertInnen bei den jeweiligen Aussagen ausgewählt wurden. Die in diesem Kapitel am Ende angeführte Tabelle stellt alle relevanten statistischen Kennzahlen für diesen Fragebogenabschnitt dar.

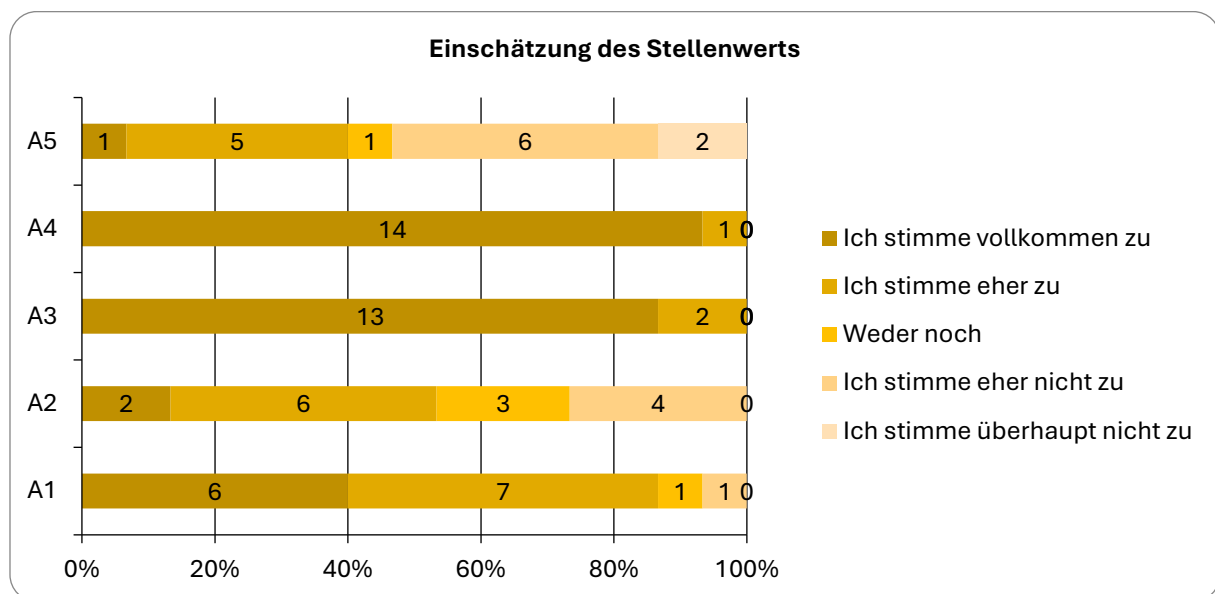


Abbildung 2: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Mathematik im Chemieunterricht"

Zu A1 („Mathematische Anforderungen können Hemmnisse erzeugen, wenn der chemische Sinn nicht erkennbar ist.“) zeigt sich eine breite Zustimmung von gerundet 86,7 % aller TeilnehmerInnen (wobei nach der Likert-Skala die Positionen 1 und 2 zusammengefasst als allgemeine Zustimmung gedeutet werden). Nur ein Teilnehmer/eine Teilnehmerin stimmte der Aussage nicht zu.

Bei A2 („Eine explizite Verknüpfung zwischen Chemie und Mathematik unterstützt Lernende beim chemischen Verständnis.“) zeigt sich ein deutlich differenziertes Bild. Etwas weniger als die Hälfte der ExpertInnen erkennen in dieser Verknüpfung weder einen Vor- oder Nachteil (20,0 %) bzw. empfinden diese sogar eher als Nachteil (gerundet 26,7 %). Dennoch stimmten rund 53,3 % der Aussage zu, was zu einem stark unterscheidbaren Meinungsbild führt.

A3 („Zu viel Mathematik benachteiligt Lernende mit schwächerem mathematischem Verständnis.“) wird eindeutig bejaht, ebenso wie A4 („Beliebtheit und Unterrichtserfolg hängen stark von Unterrichtsqualität, Übungsgelegenheiten und sinnstiftenden Anwendungen ab.“), die beide eine Zustimmungssrate von 100,0 % aufweisen.

Das niedrigste Zustimmungsergebnis erzielte A5 („Im Unterricht sollte klar kommuniziert werden, welche Mathematik vorausgesetzt wird und welche kurz reaktiviert wird.“). Insgesamt 8 von 15 ExpertInnen (rund 53,3 %) stimmten gegen diese Aussage, während nur 6 (40,0 %) dafür stimmten. A5 stellt die größte Verteilung der Antwortkategorien aller betrachteten Aussagen dar.

Item	Kurzform	Zust. (1–2)	Neutral (3)	Ablehn. (4–5)	Median
A1	Mathe ohne Sinn = Hemmnis	86,7 %	6,7 %	6,7 %	2
A2	Verknüpfung Chemie–Mathe hilft	53,3 %	20,0 %	26,7 %	2
A3	Zu viel Mathe benachteiligt	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
A4	Qualität/Üben/Sinn entscheidend	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
A5	Voraussetzungen vs. Reaktivierung	40,0 %	6,7 %	53,3 %	4

Tabelle 2: statistische Kennzahlen zu A1-A5

Anmerkung: 1 = „stimme vollkommen zu“, 2 = „stimme eher zu“, 3 = „weder noch“, 4 = „stimme eher nicht zu“, 5 = „stimme überhaupt nicht zu“.

7.4 Konzeptbewertung (K1–K10)

Die Bewertung des Unterrichtskonzepts wird durch die Items K1-K10 abgedeckt, die sich auf den in Kapitel 4 ausgearbeiteten Kriterienrahmen stützen. Die Kriterien K1 und K2 decken dabei fachliche und didaktische Notwendigkeit ab, während K3 und K4 die Ebenen- und Sprachsensibilität des Kriterienrahmens berücksichtigen. K5 und K6 befassen sich mit der Zumutbarkeit und der Fehleranfälligkeit, K7 mit der Sinnstiftung und K8 bis K10 mit dem Lehrplanbezug, der Alltagstauglichkeit sowie mit der Anpassungsfähigkeit und Überprüfbarkeit durch Lehrpersonen. Die am Ende dieses Kapitels angeführte Tabelle listet die statistischen Kennzahlen zu K1-K10 auf, während das folgende Diagramm die Konzeptbewertung durch die ExpertInnen veranschaulicht.

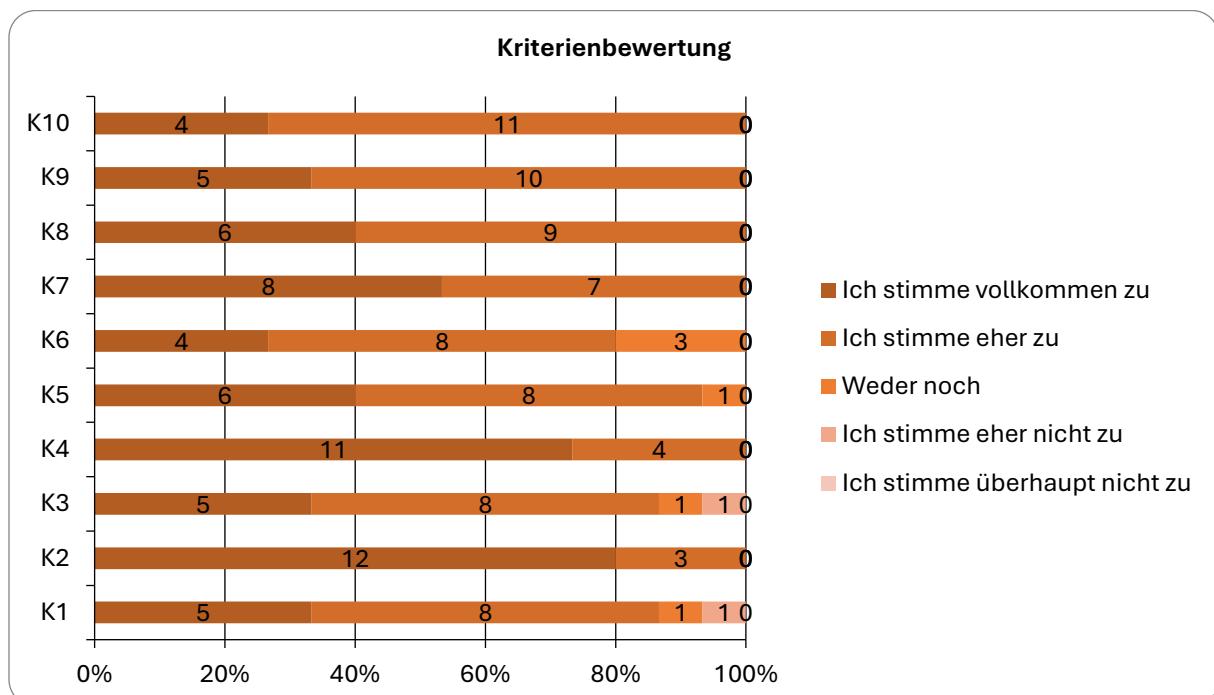


Abbildung 3: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Konzeptbewertung"

Insgesamt zeigt sich eine hohe Zustimmung über alle Kriterien hinweg. Die Zustimmung liegt dabei zwischen 80,0 % bis 100,0 % - insbesondere die Aussagen von K2, K4, K7 bis K10.

Die Aussage K1 („Im Konzept kommt Mathematik erst dann zum Einsatz, wenn sie eine Verständnishilfe für chemische Themen darstellt.“) sowie K3 („Das Konzept verhindert einen zu schnellen Sprung zwischen Makro- und Symbolebene.“) wurden als einzige von ExpertInnen einmal abgelehnt sowie als neutral bewertet. Trotzdem stimmten mehr als die Hälfte der ExpertInnen für die beiden Aussagen, was rund 86,7 % entspricht.

Für K5 („Die mathematischen Anforderungen sind im Konzept altersgerecht und nicht überfrachtend abgesichert.“) wurde eine neutrale Stimme und für K6 („Das Konzept baut Sicherungen gegen typische Fehlerquellen ein.“) sogar drei neutrale Stimmen abgegeben. Dennoch überwiegen die Zustimmungen mit rund 93,3 % für K5 und genau 80,0 % für K6.

Item	Kurzform	Zust. (1–2)	Neutral (3)	Ablehn. (4–5)	Median
K1	Mathematik nur als Verständnishilfe	86,7 %	6,7 %	6,7 %	2
K2	Mathematik als Werkzeug	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
K3	Makro–Symbol–Sprünge vermeiden	86,7 %	6,7 %	6,7 %	2
K4	Sprachsensibilität/Begriffe	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
K5	altersgerecht, nicht überfrachtend	93,3 %	6,7 %	0,0 %	2
K6	Sicherungen gegen Fehlerquellen	80,0 %	20,0 %	0,0 %	2
K7	Nutzen der Mathematik ist transparent	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1
K8	Lehrplan vereinbar	100,0 %	0,0 %	0,0 %	2
K9	Schulalltag geeignet	100,0 %	0,0 %	0,0 %	2
K10	beurteilbar/adaptierbar	100,0 %	0,0 %	0,0 %	2

Tabelle 3: statistische Kennzahlen zu K1-K10

Anmerkung: Antwortskala wie in Tabelle 2.

7.5 Gesamteinschätzung (G1–G2)

Die Gesamteinschätzung zeigt, ob der in der Arbeit beschriebene Balanceakt zwischen chemischem Sinn und mathematischer Formalisierung aus Sicht der ExpertInnen gelingt (G1) und ob eine (teilweise) Umsetzung im eigenen Unterricht grundsätzlich vorstellbar ist (G2). Das angegebene Diagramm veranschaulicht die Ergebnisse aus dem Fragebogenabschnitt.

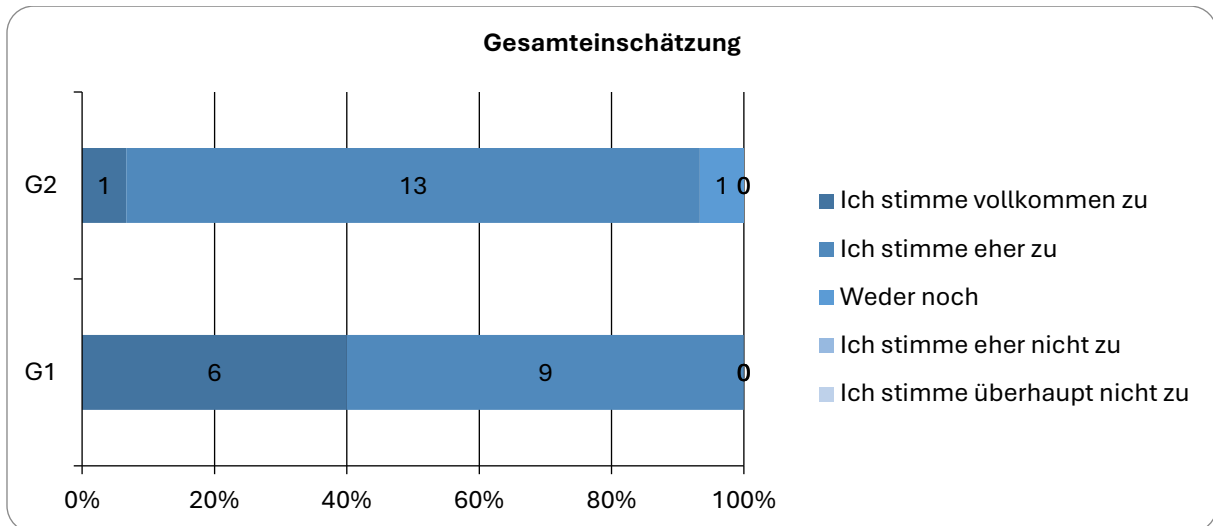


Abbildung 4: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Gesamteinschätzung"

Die Aussage G1 wird von allen ExpertInnen bejaht, womit das Gelingen des Balanceaktes zwischen chemischen Sinn und mathematischer Formalisierung von den TeilnehmerInnen als gelungen zu bewerten ist. Die zweite Aussage G2 erfährt grundsätzlich ebenfalls einen hohen Zustimmungsanteil von insgesamt 14 ExpertInnen, wobei die Mehrheit (insgesamt 13 der 14) nur teilweise zustimmt und 1 Person „Weder noch“ auswählte.

Item	Kurzform	Zust. (1–2)	Neutral (3)	Ablehn. (4–5)	Median
G1	Balanceakt gelingt	100,0 %	0,0 %	0,0 %	2
G2	Einsatz im Unterricht	93,3 %	6,7 %	0,0 %	2

Tabelle 4: statistische Kennzahlen zu G1-G2

7.6 Qualitative Rückmeldungen

7.6.1 Mathematische Mindestanforderungen

In den offenen Antworten wird als zumutbare mathematische Mindestanforderung vorwiegend ein Grundstock an mathematischen Rechenoperationen angeführt. Mehrere ExpertInnen führen in ihrer Antwort das Vorhandensein der vier Grundrechnungsarten an, während eine spezifischere Antwort gängige Rechenoperationen gemäß der Jahrgangsstufe als Anforderung voraussetzt.

7.6.2 Stärken des Konzepts

Als Stärken werden unter anderem die Struktur und der logische Aufbau des Konzepts erwähnt („Die Reihenfolge des Konzepts und die Grobstruktur passen.“). Ein Experte/eine Expertin hebt die Verständlichkeit und Umsetzbarkeit des 4-Phasen-Zyklus hervor („Die 4 Phasen machen Sinn und erscheinen umsetzbar.“). Wiederum andere sehen in dem Konzept eine gelungene Verknüpfung der Mathematik mit chemischen Inhalten, wobei die mathematische Werkzeugfunktion explizit genannt wird („Mathematik wird als Werkzeug betrachtet, mit dem man chemisches Wissen vertieft.“; „Verknüpft mathematisches Wissen mit chemischem Wissen (wirkt fächerübergreifend)“).

7.6.3 Risiken

Einige ExpertInnen sehen in der Anwendung des Konzepts einen verdeckten Mathematikunterricht, wodurch die Mathematik in den Vordergrund rutschen und den Chemieunterricht in den Hintergrund rücken würde („verdeckter Matheunterricht“; „zu viel Mathematik“). Andere sehen ein Risiko im Zeitaufwand für die Unterrichtsplanung, speziell dann, wenn man Mathematik nicht als Zweitfach hat („Es könnte als Nichtmathematiker zu viel Zeit brauchen, einen Unterricht nach dem Konzept zu planen.“). Vereinzelt wird zudem auf die Unschärfe in der Begrifflichkeit der einzelnen Phasen hingewiesen, wobei der Unterschied zwischen Modellierung und Mathematisierung als Unverständnis angeführt wird („Teilweise ist das Konzept schwammig formuliert, z.B. was genau ist der Unterschied zwischen Modellierung und Mathematisierung? Könnte man nicht beides zusammenfassen?“).

7.6.4 Verbesserung der Alltagstauglichkeit

In dieser Antwortkategorie ist die Beteiligungsrate am geringsten. Nur 3 von 15 ExpertInnen haben Verbesserungsvorschläge abgegeben. Ein Experte/eine Expertin meinte, dass im Konzept auf mehr Parallelitäten und Analogien geachtet werden soll („Parallelitäten und Analogien herstellen (z.B. Kochrezepte)“). Während ein anderer Vorschlag auf eine Ausarbeitung von mehr Details zum Konzept verweist, sodass eine für die Lehrperson schnellere und tiefergehende Unterrichtsplanung erfolgen kann („Das Konzept mit mehr Details versehen, damit Unterrichtsplanungen schneller erstellt werden können.“).

8 Diskussion

8.1 Klärung der Forschungsfrage und der Hypothesen

Die in dieser Arbeit formulierte Forschungsfrage lautet:

Welchen Stellenwert darf die Mathematik in einem didaktisch und inhaltlich sinnvoll konzipierten Chemieunterricht einnehmen, sodass SchülerInnen bestmöglich chemisches Wissen generieren und festigen können?

Die Ergebnisse der ExpertInnenvalidierung liefern einen klaren didaktischen Rahmen zur Beantwortung dieser Frage:

Mathematik nimmt dann den richtigen Stellenwert ein, wenn sie als lernförderlich und nützlich erlebt wird, eine für Lernende sichtbare Werkzeugfunktion einnimmt, indem sie chemische Zusammenhänge oder Sachverhalte erklärbar macht und wenn das Ergebnis wieder zum chemischen Phänomen zurückgeführt wird bzw. an diesem wieder anknüpft.

Genau dieser Gedanke – Mathematik als Mittel zum chemischen Erkenntnisgewinn – wird durch die sehr hohe Zustimmung der beiden Kriterien K2 („Die Mathematik wird im Konzept als Werkzeug zum Erklären/Interpretieren und Deuten chemischer Inhalte benutzt.“) und K7 („Das Konzept macht den Nutzen der Mathematik transparent, sodass sie eher als sinnvoll und nicht als Hürde verstanden wird.“) gestützt.

Für die in Kapitel 1 formulierten Hypothesen ergibt sich ein etwas differenzierteres Bild. Hypothese 3 („Die Mathematik kann eine Hürde für chemischen Erkenntnisgewinn darstellen, wenn die mathematischen Anforderungen zu hoch sind.“) wird durch die vollständige Zustimmung zu A3 („Zu viel Mathematik benachteiligt Lernende mit schwächerem mathematischem Verständnis.“) und durch die in den offenen Antworten angeführten Risiken deutlich bestätigt.

Die zweite Hypothese („Die Beliebtheit des Unterrichtsfaches Chemie ist unabhängig davon, ob eine Verknüpfung zur Mathematik hergestellt wird oder nicht.“) wird indirekt durch A4 („Beliebtheit und Unterrichtserfolg hängen stark von Unterrichtsqualität, Übungsgelegenheiten und sinnstiftenden Anwendungen ab.“) gestützt, da alle ExpertInnen die Beliebtheit des Faches von den Faktoren Unterrichtsqualität, Übungsgelegenheiten und sinnstiftenden Anwendungen abhängig machen. Die Unabhängigkeit zur Mathematik wird in A4 zwar nicht explizit erwähnt, es kann dennoch eine indirekte Stütze für Hypothese 2 abgeleitet werden.

Hypothese 1 („Eine offene Verknüpfung von mathematischem Vorwissen für chemische Inhalte unterstützt bei der chemischen Wissensgenerierung.“) kann durch die Auswertung der Fragebögen nur teilweise empirisch bestätigt werden. Die Aussage von A2 („Eine explizite Verknüpfung zwischen Chemie und Mathematik unterstützt Lernende beim chemischen Verständnis.“) wird zwar vom Großteil der ExpertInnen befürwortet, allerdings ist zeitgleich eine große Skepsis aus den Antworten ableitbar. Unter Berücksichtigung der offenen Antworten kann davon ausgegangen werden, dass nicht die

Mathematik-Chemie-Verknüpfung in Frage gestellt wird, sondern ihre didaktische Ausführung. Demnach lässt sich die Hypothese 1 nicht vollständig bestätigen.

8.2 Validierung durch ExpertInnenbewertung

Die hohe Zustimmung über nahezu alle Kriterien hinweg stützt den Kerngedanken des Konzepts – die Schaffung eines Konzepts, um den Balanceakt zwischen mathematischen Anforderungen und chemischen Inhalten zu meistern. Erstens wird Mathematik als Werkzeug verstanden, das dort eingesetzt wird, wo mathematische Operationen chemisches Wissen und Verständnis stützen und vertiefen (K2). Zweitens wird die sprach- und symbolsensible Ausarbeitung als besonders wichtig wahrgenommen (K4). Das lässt sich auch leicht erklären, da viele typische Fehler nicht aus der Rechenoperation selbst entstehen, sondern aus der Verwechslung von Größen, Einheitne oder Symbolbedeutungen. Drittens wird die Transparenz des mathematischen Sinns (A1 und K7) als sehr wichtig erachtet. Dort wo der chemische Sinn und Nutzen für die Anwendung von Mathematik gerechtfertigt wird, sinkt das Risiko, dass Mathematik als Hürde erlebt wird.

Zudem deutet die Auswertung der Ergebnisse an, dass die Gesamteinschätzung den Balanceakt als gelungen bewertet (G1) und eine (teilweise) Implementierung im eigenen Unterricht grundsätzlich für die ExpertInnen vorstellbar ist. Damit ist ersichtlich, dass der Kriterienrahmen nicht nur theoretisch als schlüssig erscheint, sondern als praxistaugliche Orientierungshilfe aufgefasst werden kann, da er dabei unterstützt mathematische Anwendungen zu rechtfertigen und den Fokus auf den chemischen Inhalt und dessen Deutung legt.

8.3 Überarbeitungsschwerpunkte

Trotz der insgesamt sehr positiven Auswertung deutet die Ergebnisanalyse auf Bereiche hin, bei denen eine Überarbeitung des Konzepts sinnvoll erscheint. Zum einen wird des Öfteren der Planungsaufwand hervorgehoben, obwohl die Praxistauglichkeit durch die Likert-Items im Grunde als sehr gut empfunden wird (entspricht K9). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Konzept auf Makroebene überzeugt, aber der Transfer auf eine konkrete Stundenplanung eine genauere Formulierung und Erklärung erfordert. In dieser Hinsicht bieten sich Ausarbeitungen zu Beispielsequenzen, Checklisten oder ähnliches an, die einen guten Anwendungsaspekt für die Unterrichtsplanung bieten.

Zum anderen kann aus der Auswertung geschlussfolgert werden, dass die Anwendung des Konzepts möglicherweise den Fokus zu sehr auf die Mathematik lenkt. Dies würde dann zu einem bereits erwähnten „verdeckten Mathematikunterricht“ führen bzw. könnte es zu einer Überforderung von SchülerInnen kommen, die bereits mathematische Verständnisprobleme haben (entspricht A3).

Für die Weiterentwicklung sollte daher stärker herausgearbeitet werden, welche mathematischen Schritte chemisch begründbar sind und an welchen Stellen didaktisch

sinnvoll auf Mathematisierung verzichtet werden kann. Deshalb würde sich die Ausarbeitung der im Konzept formulierten Entscheidungshilfen anbieten. Sie könnten zu einem möglichen Entscheidungsrahmen umformuliert und erweitert werden, wobei jede Mathematisierung an eine Interpretationsfrage geknüpft wird, z.B. „Was bedeutet das Ergebnis chemisch?“ oder „Welche Schlussfolgerung über das chemische Thema folgt daraus?“.

Die Aussage A5 („Im Unterricht sollte klar kommuniziert werden, welche Mathematik vorausgesetzt wird und welche kurz reaktiviert wird.“) fällt als deutlich kontroversestes Item auf. Während die Trennung zwischen vorausgesetzter und reaktiver Mathematik einen didaktischen Entlastungsaspekt für die SchülerInnen darstellen sollte, steht mehr als die Hälfte der ExpertInnen dieser Aussage skeptisch bzw. ablehnend gegenüber. In Verbindung mit den offenen Fragen kann geschlussfolgert werden, dass A5 dann akzeptiert wird, wenn der zeitliche Aspekt berücksichtigt wird und die Umsetzung auf chemische Inhalte erfolgt. Bei der Betrachtung der einzelnen Ergebnisbögen lässt sich zudem ableiten, dass Lehrpersonen, die zusätzlich Mathematik unterrichten, dieser Aussage eher zustimmen als reine Chemielehrpersonen.

Für das Unterrichtskonzept ergibt sich daraus die folgende Überarbeitungsmöglichkeit: Die Lehrperson muss zu Beginn selbst abwägen, ob eine Reaktivierung von mathematischem Wissen zeitökonomisch und vor allem didaktisch sinnvoll ist. Sollte eine Reaktivierung in Erwägung gezogen werden, so sollte diese als kurze, an das chemische Problem gekoppelte Kurzsequenz angelegt werden. Auf diese Weise bleibt die Werkzeugfunktion erhalten, während man nicht Gefahr läuft einen verdeckten Mathematikunterricht durchzuführen.

8.4 Limitationen

Wie bereits begründet, ist der Stichprobenumfang von $N = 15$ für die in dieser Arbeit verwendete Auswertungsmethodik angebracht und reicht für eine konkrete und exakte Beurteilung bezüglich Plausibilität, Verständlichkeit und Umsetzbarkeit des Konzepts. Es dürfen jedoch nicht fälschlicherweise Aussagen über andere Schulformen oder Bundesländer hinweg bzw. keine generalisierten Schlussfolgerungen auf die Gesamtheit aller Chemielehrpersonen getroffen werden.

Zudem betreffen alle Ergebnisse ein theoretisch entworfenes Unterrichtskonzept, was keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Einsatz in der Praxis zulässt. Demnach können auch keine Aussagen über die Praxis getroffen werden. Die Ergebnisse der Likert-Items dürfen in diesem Sinne jedoch als robuste Hinweise von Tendenzen auf die Praxistauglichkeit verstanden werden, die von ExpertInnen (aktiven Chemielehrpersonen) getätigt wurden.

Für die Hypothesenprüfung in Bezug auf Hypothese 2 muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen dieser Arbeit keine direkten Daten zur Beliebtheit des Unterrichtsfaches Chemie erhoben wurden. Die zweite Hypothese wird somit ausschließlich durch die von ExpertInnen bewertete Aussage A4 und den offenen Rückmeldungen gestützt. Ebenso

wären für die Bestätigung oder Ablehnung von Hypothese 1 SchülerInnendaten erforderlich, die die wahrgenommene Belastung oder Motivationsänderung der SchülerInnen durch das Anwenden mathematischer Operationen im Chemieunterricht widerspiegeln.

9 Fazit und Ausblick

Die Forschungsfrage dieser Arbeit zielte darauf ab zu klären, welchen Stellenwert Mathematik in einem sinnvoll konzipierten Chemieunterricht einnehmen darf. Auf der Grundlage des theoretischen Teils wurde ein Kriterienrahmen entwickelt, der den Einsatz von Mathematik auf chemische Inhalte und Deutungen auslegt. Das darauf aufbauende Unterrichtskonzept beruht auf Basis des Kriterienrahmens und bildet diesen in einem 4-Phasen-Zyklus ab.

Die Auswertung der ExpertInnen-Fragebögen zeigt, dass die Grundidee des Konzepts in der Praxis anwendbar ist. Der Balanceakt zwischen chemischem Sinn und mathematischer Formalisierung wird von den ExpertInnen als gelungen eingeschätzt (G1) und eine (teilweise) Umsetzung im eigenen Unterricht wird mehrheitlich als vorstellbar bewertet (G2).

Die Ergebnisse der Fragebogenvalidierung zu den allgemeinen Aussagen zeigen, dass Mathematik als Lernhürde erlebt wird, wenn ihr chemischer Sinn nicht erkennbar ist (A1), mathematikschwächere SchülerInnen benachteiligt werden, wenn der Mathematik ein zu hoher Stellenwert gegeben wird (A3) und die Beliebtheit und der Erfolg des Unterrichtsfaches Chemie abhängig von der Qualität des Unterrichts, Schaffung von Übungsgelegenheiten sowie sinnstiftenden Anwendung ist (A4).

Die Hypothese 3 wird dadurch klar bestätigt, während Hypothese 2 nur indirekt durch A4 gestützt werden kann, da sie ohne konkrete Beliebtheitsdaten nur eingeschränkt geprüft werden kann. Hypothese 1 wird nur teilweise gestützt, da die ExpertInnen eine klare Verknüpfung zwar mehrheitlich befürworten (A2), aber eine Kommunikation von Voraussetzungen bzw. Reaktivierung von mathematischem Wissen als didaktisch sensibel und zeitökonomisch herausfordernd erachtet wird (A5 inklusive offene Antworten).

Aus der Validierung ergeben sich damit drei naheliegende nächste Schritte. Erstens sollte das Konzept um konkrete Unterrichtsmaterialien erweitert werden (z.B. Unterrichtssequenzen, Aufgabenbausteine, Checklisten), um den von manchen ExpertInnen genannten Aufwand zu reduzieren und die Alltagstauglichkeit weiter zu erhöhen. Zweitens sollte eine Präzisierung der Phasenbegriffe des Unterrichtszyklus vorgenommen werden – insbesondere die Erklärung und genaue Trennung der beiden Begriffe Modellierung und Mathematisierung – damit der Zyklus an Klarheit gewinnt und somit die Umsetzung auf den Unterricht leichter fällt.

Als dritten Schritt sollte eine Erprobung im Unterricht angestrebt werden. Mithilfe eines geeigneten Forschungsdesigns könnten Lernzuwächse, Fehlvorstellungen, wahrgenommene Belastungen oder Motivationshemmnisse bei SchülerInnen ermittelt und damit Rückschlüsse auf die Tauglichkeit des Unterrichtskonzepts getroffen werden.

Darüber hinaus ist zu prüfen, inwieweit der Kriterienrahmen und das Konzept auf weitere mathematische Themengebiete des Chemieunterrichts anwendbar sind. Zusätzlich

könnte auch die fächerübergreifende Abstimmung mit dem Mathematikunterricht stärker in den Blick genommen werden, um Transferprobleme zu verringern.

Es gilt abschließend festzuhalten, dass das Unterrichten (ganz gleich in welchem Fach) einem Balanceakt auf einem dünnen Drahtseil gleicht, wobei die Lehrperson sorgfältig darauf achtet, welchen Schritt sie als nächstes setzt, um einen Absturz zu vermeiden. In dieser Arbeit wird dieser Balanceakt nicht nur als individuelle Aufgabe der Chemielehrperson verstanden, sondern als curricular geleiteter Zusammenhang, der SchülerInnen beim Aufbau von Wissen und Verständnis unterstützt.

Literaturverzeichnis

- Anderson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations. *Studies in Science Education*, 18, 53–85. <https://doi.org/10.1080/03057269008559981>
- Anton, M. A. (2019). *Chemieunterricht verstehen: Zur Didaktik und Mathematik der Chemie* (1. Aufl.). Lehrbuchverlag.
- Barke, H.-D. (2006). *Chemiedidaktik: Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. Springer.
- Barke, H.-D., & Harsch, G. (2011). *Chemiedidaktik kompakt: Praktikum für Lehramtsstudierende und Referendar*innen*. Springer Spektrum.
- Barke, H.-D., Harsch, G., Kröger, S., & Marohn, A. (2018). *Chemiedidaktik kompakt: Praktikum für Lehramtsstudierende und Referendar*innen*. Springer Spektrum.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S., & Silberstein, J. (1987). Students' visualization of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, 24(4), 117–120.
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung* (2., aktual. Aufl.). Springer VS.
- Bortz, J., & Döring, N. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler* (5., überarb. Aufl.). Springer.
- BouJaoude, S. (2003). Students' problem solving strategies in stoichiometry and the influence of strategy mastery on conceptual understanding. *Research in Science & Technological Education*, 21(2), 193–204. <https://doi.org/10.1080/0263514032000127228>
- Buck, R. P., Rondinini, S., Covington, A. K., Baucke, F. G. K., Brett, C. M. A., Camões, M. F., Milton, M. J. T., Mussini, T., Naumann, R., Pratt, K. W., Spitzer, P., & Wilson, G. S. (2002). *Measurement of pH. Definition, standards, and procedures (IUPAC Recommendations 2002)*. *Pure and Applied Chemistry*, 74(11), 2169–2200. <https://doi.org/10.1351/pac200274112169>
- Bundeskanzleramt. (2025). *Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Anlage 1* (tagesaktuelle Fassung) [Rechtsinformationssystem des Bundes (RIS)]. Abgerufen am 31. Dezember 2025, von <https://www.ris.bka.gv.at/>
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. (2025). *Chemie (2-stündig) (Sekundarstufe I): Bildungs- und Lehraufgabe, didaktische Grundsätze, zentrale fachliche Konzepte und Anwendungsbereiche (4. Klasse) [Lehrplan]*. Abgerufen am 31. Dezember 2025, von <https://www.bmbwf.gv.at/>
- Bärtsch, C., & Marti, B. (2023). *Reaktionsgleichungen rezeptartig gelöst*. [Artikel].
- Diekmann, A. (2020). *Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen* (13., überarb. Aufl.). Rowohlt.
- Engelmann, C. (2020). *Wie verändern sich die Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden zum Thema „Säuren und Basen“ im Verlauf der Lehrveranstaltung „Einführung in die Didaktik der Chemie“? (Diplomarbeit, Universität Wien)*.
- Garnett, P. J., Garnett, P. J., & Hackling, M. W. (1995). Students' alternative conceptions in chemistry: A review of research and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, 25(1), 69–95. <https://doi.org/10.1080/03057269508560050>
- Gesellschaft Deutscher Chemiker, Fachgruppe Chemieunterricht. (2008). *Diagnostizieren und Fördern im Chemieunterricht [PDF]*. Gesellschaft Deutscher Chemiker.
- Gruber-Kalteis, G., Obermüller, M., Straub, G., & Reiting, J. (2025). *Impuls Chemie 4: Schülerbuch. öbv*.
- Haas, J.-B., & Marohn, A. (2022). *Das Unterrichtskonzept chem:LEVEL – Fachsprache fördern auf Basis des Johnstone-Dreiecks*. Chemie konkret.

- Hofer, E., Lembens, A., & Müller, A. (2023). Kommentar zum Fachlehrplan Chemie (Mittelschule/AHS-Unterstufe). Austrian Educational Competence Centre Chemie (AECC Chemie), Universität Wien.
- Huddle, P. A., & Pillay, A. E. (1996). An in-depth study of misconceptions in stoichiometry and chemical equilibrium at a South African university. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(1), 65–77.
- Häder, M. (2019). *Empirische Sozialforschung: Eine Einführung* (3., überarb. Aufl.). Springer VS.
- Höner, K. (1996). Mathematisierungen im Chemieunterricht – ein Motivationshemmnis? (Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg).
- Gabriel, C. I.-O., & Onwuka, G. I. (2015). Balancing of chemical equations using matrix algebra. *Journal of Natural Sciences Research*, 5(5).
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025). *Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book)* (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook>
- Jost, C., & Brie, D. (2025, September 23). *Grundlagen der Chemie: Skript zum Chemieunterricht am Studienkolleg der TU Darmstadt* (Version 23. September 2025) [Skript]. Studienkolleg, Technische Universität Darmstadt. <https://www.stk.tu-darmstadt.de/media/stk/skripte/Chemieskript.pdf>
- Kaufmann, E., Zöchling, A., Mašin, C., & Grois, G. (2020). Chemie verstehen 4. öbv. [Schulbuch].
- Kimpel, K., & Sumfleth, E. (2017). Probleme bei der Bearbeitung chemischer Rechenaufgaben: Größenbedeutungen, Variablen und Konstanten. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualität? – Herausforderungen für die Lehrerbildung: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung 2017* (S. 183–186). Universität Regensburg.
- Kuckartz, U. (2014). *Mixed Methods: Methodologie, Forschungsdesigns und Analyseverfahren*. Springer VS.
- Kuckartz, U. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (5., überarb. Aufl.). Beltz Juventa.
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2022). *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA: Text, Audio, Video*. Springer VS.
- Kulgemeyer, C. (2019). Qualitätskriterien zur Gestaltung naturwissenschaftlicher Erklärvideos. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018* (S. 285–288). Universität Regensburg.
- Leisen, J. (2006). Aufgabenkultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 59(5), 260–266.
- LernQuadrat. (2023, Mai 24). *Zum Pressegespräch „Die Meinung der Schülerinnen zum Thema Schule und Noten“: Präsentation der Ergebnisse einer aktuellen LernQuadrat-Umfrage** [PowerPoint Folien]. Abgerufen am 16. August 2025, von https://www.lernquadrat.at/fileadmin/LernQuadrat/Presse/Pressegespraech/24-05-23-meinung-der-schueler/Charts_SchuelerInnenenumfrage.pdf
- Lippusch, M. (2016). *Experimentieren im Chemieunterricht unter Berücksichtigung der kognitiven Entwicklungsstufen* (Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz). Universität Graz.
- Magyar, R., Liebhart, W., & Kollegium. (2020). *EL-MO – Elemente und Moleküle 2: Schülerbuch*. öbv.
- Magyar, R., Liebhart, W., Jelinek, G., & Faber, W. (2014). *Stoffe 4: Schülerbuch*. öbv.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12., überarb. Aufl.). Beltz.
- Meyer, H. (2011). *Was ist guter Unterricht?* Cornelsen Verlag Berlin
- Neufingerl, F., & Palka, A. (2018). *Chemie 1. Jugend & Volk* (Westermann Gruppe).

- Porst, R. (2014). Fragebogen: Ein Arbeitsbuch (4., überarb. Aufl.). Springer VS.
- Rosenberg, D., Jansen, W., & Busker, M. (2016). Strukturierte Lösungshilfen für Aufgaben zur Stöchiometrie. *PdN Chemie in der Schule*, 65(4), 20–24.
- Royal Society of Chemistry. (o. J.). Improve students' understanding with Johnstone's triangle. RSC Education. Abgerufen am 25. Dezember, 2025, von <https://edu.rsc.org/feature/improve-students-understanding-with-johnstones-triangle/4019740.article>
- Sørensen, S. P. L. (1909). Über die Messung und Bedeutung der Wasserstoffionenkonzentration bei enzymatischen Prozessen. *Biochemische Zeitschrift*, 21, 131–304.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156–168. <https://doi.org/10.1039/C3RP00012E>
- Thorne, L. R. (2011). An innovative approach to balancing chemical-reaction equations (arXiv Preprint). arXiv.
- Universität Bayreuth. (o. J.). Das Massenwirkungsgesetz und das Prinzip von Le Chatelier [PDF]. Didaktik der Chemie, Universität Bayreuth. Abgerufen am 12. Dezember, 2025, von https://www.didaktik.chemie.uni-bayreuth.de/lehmaterial/umsetzungsbeispiele/mwg_und_prinzip_lechatelier.pdf
- Universität Bayreuth. (o. J.). Grundbegriffe: Sammlung von Schüler(wohl)vorstellungen [PDF]. Didaktik der Chemie, Universität Bayreuth. Abgerufen am 28. Dezember, von https://www.didaktik.chemie.uni-bayreuth.de/lehmaterial/grundbegriffe/sammlung_schuelervorstellungen.pdf
- Universität Münster. (o. J.). Chemie im Nebenfach: Das chemische Gleichgewicht – Massenwirkungsgesetz (NF-Seminar 4, WS 2009/10) [Skript, PDF]. Abgerufen am 20. Dezember, von https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/anorganische_und_analytische_chemie/lehre/nebenfach/nf-seminar_4.pdf
- Vetters, M. (2015). Entwicklung und Evaluation eines Kompetenzmodells zur Analyse und zur Förderung der Fähigkeit zum selbstständigen Aufstellen von Reaktionsgleichungen in der Sekundarstufe I (Dissertation, Universität Duisburg-Essen).
- Wanjek, J. (2000). Einflüsse von Alltagsorientierung und Schülerexperimenten auf den Erfolg von Chemieunterricht: Empirische Untersuchungen ... (Inaugural-Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster).
- Wohlmuth, G. (2015). Chemie begreifen (3., überarb. Aufl.). öbv & hpt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die 4 Phasen des Unterrichtszyklus	38
Abbildung 2: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Mathematik im Chemieunterricht"	45
Abbildung 3: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Konzeptbewertung"	46
Abbildung 4: Prozentstreifendiagramm zu den Fragebogenergebnissen des Abschnitts "Gesamteinschätzung"	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Demographische Daten der Fragebögen.....	44
Tabelle 2: statistische Kennzahlen zu A1-A5.	46
Tabelle 3: statistische Kennzahlen zu K1-K10.....	47
Tabelle 4: statistische Kennzahlen zu G1-G2.....	48

Anhang

Einsatz von KI-Tools

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurden KI-gestützte Tools als Hilfsmittel für folgende Bereiche eingesetzt:

Tool	Zweck	Betroffene Teile	Was wurde dokumentiert?
ChatGPT (OpenAI)	APA-Formalia-Check	Literaturverzeichnis, In-Text-Zitationen	Checkliste der Befunde; Liste der vorgenommenen Korrekturen (Datum/Version optional)
ChatGPT (OpenAI)	Literaturrecherche-Support	Rechercheprozess	Suchbegriffe/Suchstrings; Trefferlisten; Auswahlkriterien; Verifikationsnotizen (Prüfung gegen Originalquellen)

Es wird festgehalten, dass die vorliegende Arbeit vom Autor eigenständig verfasst wurde. Der Einsatz von ChatGPT (OpenAI) erfolgte ausschließlich in den in der Tabelle dokumentierten Bereichen. Darüber hinaus fand keine Nutzung KI-gestützter Tools statt.

Mathematik im Dienste der chemischen Stöchiometrie als chemiedidaktische Herausforderung

Wie weit darf die Mathematik im Chemieunterricht gehen?

* Erforderlich

Vorstellung des Konzepts

Unter folgendem Link finden Sie eine kompakte Zusammenfassung inkl. eines Anwendungsbeispiels des Unterrichtskonzepts. Bitte lesen Sie dieses vor der Bearbeitung des Fragebogens unbedingt durch. Der Link muss kopiert und in die Suchleiste Ihres Browsers kopiert werden.

https://1drv.ms/b/c/2f4a2757298dab6f/IQAY0So3dg0JTK9i_sfBQJUUAQD5VB6KnTHBEA4N1WM4keA?e=cLxt47

Online-Fragebogen, Seite 2

Studieninformation

Alle in diesem Fragebogen erhobenen Daten werden vertraulich behandelt. Personenbezogene Daten decken ausschließlich den für die Validierung relevanten demographischen Bereich ab. **Es werden keine identifizierenden Daten erhoben.**

1. Ich habe das Unterrichtskonzept gelesen. *

- ☐ Ja
- ☐ Nein

2. Ich bin aktuell als Chemielehrperson tätig (AHS Sek I und/oder Sek II). *

- ☐ Ja
- ☐ Nein

3. Ich nehme freiwillig teil und kann jederzeit abbrechen. *

- ☐ Ja
- ☐ Nein

4. Mir ist bekannt, dass keine identifizierenden Daten erhoben werden und Ergebnisse aggregiert berichtet werden. *

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Online-Fragebogen, Seite 3

Kurzinfo zur Lehrperson

5. Geschlecht

- ☐ weiblich
- ☐ männlich
- ☐ keine Angabe

6. Berufserfahrung in Jahren *

- ☐ 1 - 5
- ☐ 6 - 10
- ☐ >10

7. Unterrichtsbereich *

- ☐ Sek I
- ☐ Sek II
- ☐ beides

8. Unterrichten Sie auch Mathematik?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Online-Fragebogen, Seite 4

Mathematik im Chemieunterricht - allgemeine Einschätzung

9. Bitte beurteilen Sie die folgenden Aussagen. *

	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme überhaupt nicht zu
A1: Mathematische Anforderungen können im Chemieunterricht motivationale Hemmnisse erzeugen, wenn der chemische Sinn nicht erkennbar ist.	☐	☐	☐	☐	☐
A2: Eine explizite Verknüpfung zur Mathematik unterstützt Lernende beim chemischen Verständnis.	☐	☐	☐	☐	☐
A3: Zu viel Mathematik benachteiligt Lernende mit schwächerem mathematischem Verständnis.	☐	☐	☐	☐	☐
A4: Für die Beliebtheit von Chemie ist die Mathe- Verknüpfung weniger entscheidend als Unterrichtsqualität, Übungsgelegenheiten und sinnstiftende Anwendungen.	☐	☐	☐	☐	☐

A5: Im Unterricht sollte klar kommuniziert werden, welche Mathematik vorausgesetzt wird und welche kurz reaktiviert wird.

☐☐☐☐☐

10. Welche mathematische Mindestanforderung für den Chemieunterricht halten Sie in der AHS für zumutbar?

Online-Fragebogen, Seite 5

Konzeptbewertung

Hinweis: Die folgenden Aussagen beziehen sich auf das Unterrichtskonzept.

11. Bitte bewerten Sie, ob diese Anforderungen im Konzept grundsätzlich erfüllt sind. *

	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme überhaupt nicht zu
K1: Im Konzept kommt Mathematik erst dann zum Einsatz, wenn sie eine Verständnishilfe für chemische Themen darstellt.	☐	☐	☐	☐	☐
K2: Die Mathematik wird im Konzept als Werkzeug zum Erklären/Interpretieren und Deuten chemischer Inhalte benutzt.	☐	☐	☐	☐	☐
K3: Das Konzept verhindert einen zu schnellen Sprung zwischen Makro- und Symbolebene.	☐	☐	☐	☐	☐
K4: Im Konzept hat die Sprachsensibilität und Begriffsdeutung einen hohen Stellenwert.	☐	☐	☐	☐	☐
K5: Die mathematischen Anforderungen sind im Konzept altersgerecht und nicht überfrachtend abgesichert.	☐	☐	☐	☐	☐
K6: Das Konzept baut Sicherungen gegen typische Fehlerquellen ein.	☐	☐	☐	☐	☐

K7: Das Konzept macht den Nutzen der Mathematik transparent, sodass sie eher als sinnvoll und nicht als Hürde verstanden wird.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

K8: Das Konzept ist mit dem Lehrplan vereinbar.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

K9: Das Konzept ist für den Schulalltag geeignet.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

K10: Das Konzept ist so beschrieben, dass Lehrpersonen es klar beurteilen und adaptieren können.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

12. Gesamteinschätzung *

Ich stimme vollkommen zu

Ich stimme eher zu

Weder noch

Ich stimme eher nicht zu

Ich stimme überhaupt nicht zu

G1: Insgesamt gelingt dem Konzept der Balanceakt zwischen chemischem Sinn und mathematischer Formalisierung.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

G2: Ich würde das Konzept (teilweise) im eigenen Unterricht einsetzen.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Online-Fragebogen, Seite 6

Rückmeldungen zum Konzept

13. Was sind die Stärken des Konzepts? *

14. Wo sehen Sie Risiken (z.B. Überforderung, Zeit, Missverständnisse)? *

15. Welche Anpassung würde die Umsetzbarkeit im Alltag am stärksten erhöhen? *

16. Sonstige Hinweise:

Autor: Philipp Röck BEd

Unterrichtskonzept kompakt

Das Unterrichtskonzept verortet Mathematik im Chemieunterricht konsequent als untergeordnetes, aber funktionales Werkzeug. Mathematische Schritte sind nur dann legitim, wenn sie sichtbar zur chemischen Klärung beitragen, sprachlich transparent gemacht werden und jedes Ergebnis wieder auf den chemischen Sinn zurückführt. Ziel ist ein Balanceakt, bei dem mathematische Anforderungen motivierend, erklärend und entlastet wirken - nicht als verdeckter Mathematikunterricht.

Unterrichtszyklus (4 Phasen)

Phase 1 - Phänomen: Ein fachlich motiviertes Problem (ggf. experimentell) eröffnet den Sinnhorizont. Mathematik erscheint nicht als Startpunkt, sondern als Folge einer chemischen Fragestellung.

Phase 2 - Modellierung: Der chemische Kern wird herausgearbeitet und präzisiert: Welche Größen und Beziehungen sind relevant und was soll erklärt oder bestimmt werden? Dadurch wird Mathematisierung inhaltlich begründet.

Phase 3 - Mathematisierung: Mathematische Operationen werden gezielt eingesetzt und didaktisch gestützt (z. B. kurze Mathe-Brücke zur Reaktivierung notwendiger Kompetenzen). Begriffe und Symbole werden im chemischen Kontext geklärt; Rechenschritte werden begründet, nicht nur ausgeführt.

Phase 4 - Transfer: Ergebnisse werden in Fachsprache zurückübersetzt, auf neue Situationen übertragen und durch Plausibilitätsprüfungen abgesichert. Aus dem Transfer entstehen neue Fragen oder Variationen, die wieder in Phase 1 überleiten.



Abbildung: Die 4 Phasen des Unterrichtszyklus

Grenzen und Entscheidungshilfen (4 Leitfragen)

- Trägt die Mathematik sichtbar zur chemischen Klärung bei?
- Werden die vorkommenden Größen, Einheiten und/oder Terme erklärt?
- Sind mathematische Kompetenzen für das chemische Thema voraussetzbar bzw. werden welche benötigt und reaktiviert?
- Ist die Aufgabe so konstruiert, dass Fachsprache, Symbolsprache und Repräsentationswechsel unterstützt werden?

Wenn zentrale Leitfragen nicht klar bejaht werden können, sind mathematische Anforderungen zu reduzieren, stärker zu stützen oder durch alternative Zugänge zu ergänzen, damit chemisches Verständnis gesichert wird.

Unterrichtskonzept kompakt, Seite 2

Autor: Philipp Röck BEd

Unterrichtszyklus am Beispiel Reaktionsgleichungen

Das Anwendungsbeispiel veranschaulicht, wie Mathematik beim Ausgleichen von Reaktionsgleichungen als Mittel zur chemischen Sinnbildung eingesetzt wird. Es entspricht dabei keiner Detailausarbeitung einer Unterrichtssequenz und bezieht sich auf die Sekundarstufe I.

Phase 1 – Phänomen: Eine beobachtbare Reaktion (z. B. Verbrennung; irgendein Alltagsbezug) liefert den Anlass. Es entstehen neue Stoffe, und die Beschreibung in Formelsprache soll fachlich stimmen.

Phase 2 – Modellierung: Die chemische Bedeutung wird geklärt: Reaktionen sind Umordnungen von Atomen. Daher muss jede Atomsorte auf Edukt- und Produktseite gleich oft vorkommen; Indizes bleiben unverändert, Koeffizienten sind veränderbar (Hinweis auf Masseerhalt).

Phase 3 – Mathematisierung: Die mathematische Kompetenz des Ausgleichens wird als Werkzeug genutzt: Atome zählen, passende Koeffizienten setzen und (falls nötig) auf das kleinste gemeinsame Vielfache verweisen bzw. beim Ermitteln der richtigen Atomanzahl auf Termrechnung hinweisen (Koeffizient und Index unterscheiden).

Phase 4 – Transfer: Die fertige Gleichung wird chemisch gelesen (Mengenverhältnisse) und auf Varianten übertragen (ähnliche Reaktionen, neue Kontexte). Der mathematische Aspekt wird wieder auf den chemischen Sachverhalt zurückgeführt und schließt an Phase 1 ein.

Quellen:

- Carpineti, M., Childs, P., Dittmar, J., Eilks, I., Fortus, D., Giliberti, M., Hofstein, A., Jordan, J., Katchevich, D., Mamlok-Naaman, R., Peleg, R., Sherborne, T., & Yaron, M. (2015). *Unterrichten nach TEMI: Wie die Verwendung von Mysteries das Lernen in den Naturwissenschaften unterstützen kann* (Deutsche Ausgabe; übersetzt und adaptiert aus dem Englischen). Universität Bremen & Universität Wien.
- Goldhausen, I., & Di Fuccia, D.-S. (2015). Der Prozess des mathematischen Modellierens im Chemieunterricht. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht* (S. 205-207). IPN.
- Haas, J.-B., & Marohn, A. (2022). Das Unterrichtskonzept chem:LEVEL - Fachsprache fördern auf Basis des Johnstone-Dreiecks. *Chemie konkret*, 29(S1), S. 213-217. Wiley-VCH GmbH.
- Hofer, E., Lembens, A., & Müller, A. (2023). *Kommentar zum Fachlehrplan Chemie (Mittelschule/AHS-Unterstufe)*. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF).
- Höner, K. (1996). Mathematisierungen im Chemieunterricht - ein Motivationshemmnis? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 2(2), S. 51-70. URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-314768 - DOI: 10.25656/01:31476
- Puddu, S., Lembens, A., & Abels, S. (2016). TEMI - ein Fortbildungsprogramm für NaturwissenschaftslehrerInnen. In C. Maurer (Hrsg.), *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015* (S. 47-49). Universität Regensburg.
- Stöger, B., & Nerdel, C. (2023). Mathematisches Modellieren in der Chemie - empirische Validierung eines Modellierungskreislaufes mithilfe eines Kompetenztests. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Aachen 2022* (S. 576-579). Universität Duisburg-Essen.

Zusammenfassung der Fragebogenantworten, Seite 1

A) Teilnehmenden-Merkmale und Einverständnis

ID	Konzept gelesen	Chemielehrperson	Freiwillig	Datenschutz bekannt	Geschlecht	Erfahrung (Jahre)	Unterrichtsbereich	Mathe unterrichtet
4	Ja	Ja	Ja	Ja	männlich	1 - 5	beides	Ja
5	Ja	Ja	Ja	Ja	männlich	6 - 10	beides	Nein
6	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	6 - 10	beides	Nein
7	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	1 - 5	Sek I	Ja
8	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	>10	Sek II	Nein
11	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	>10	beides	Nein
12	Ja	Ja	Ja	Ja	männlich	6 - 10	beides	Nein
13	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	6 - 10	Sek II	Nein
14	Ja	Ja	Ja	Ja	männlich	>10	Sek II	Nein
15	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	1 - 5	Sek I	Ja
16	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	>10	beides	Nein
17	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	1 - 5	beides	Nein
18	Ja	Ja	Ja	Ja	männlich	>10	beides	Nein
20	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	6 - 10	Sek II	Nein
21	Ja	Ja	Ja	Ja	weiblich	1 - 5	Sek I	Nein

B) Aussagen zur Rolle der Mathematik (A1–A5)

ID	A1	A2	A3	A4	A5
4	Ich stimme vollkommen zu	Weder noch	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
5	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu
6	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
7	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
8	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher nicht zu
11	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu
12	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu
13	Weder noch	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme überhaupt nicht zu
14	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme überhaupt nicht zu
15	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
16	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu
17	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu
18	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher nicht zu
20	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Weder noch
21	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu

Zusammenfassung der Fragebogenantworten, Seite 2

C) Bewertung der Anforderungen an das Konzept (K1–K10)

ID	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
4	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu
5	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
6	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Weder noch	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
7	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
8	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher nicht zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
11	Weder noch	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Weder noch	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
12	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
13	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
14	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Weder noch	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
15	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
16	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
17	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu
18	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Weder noch	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu
20	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
21	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu

Zusammenfassung der Fragebogenantworten, Seite 3

D) Gesamteinschätzung (G1–G2)

ID	G1	G2
4	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
5	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
6	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
7	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
8	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
11	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
12	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
13	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
14	Ich stimme eher zu	Weder noch
15	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu
16	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
17	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme vollkommen zu
18	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
20	Ich stimme eher zu	Ich stimme eher zu
21	Ich stimme vollkommen zu	Ich stimme eher zu

Zusammenfassung der Fragebogenantworten, Seite 4

E) Offene Antworten

ID	Stärken	Risiken	Anpassung	Sonstige Hinweise
4				
5	Die Reihenfolge des Konzepts und die Grobstruktur passen.	Es könnte als Nichtmathematiker zu viel Zeit brauchen, einen Unterricht nach dem Konzept zu planen.		
6	Leicht anwendbar, da sehr kurz aber dennoch informativ.	Schwerpunkt liegt zu sehr im Erkennen von mathematischen Inhalten in der Chemie. Könnte chemischem Verständnis der SchülerInnen schaden.		
7				
8	Logischer Aufbau, vom Leichten zum Schweren	Keine	Parallelitäten und Analogien herstellen (zb Kochrezepte)	
11	Die 4 Phasen machen Sinn und erscheinen umsetzbar.	Verdeckter Matheunterricht		
12				
13				
14				
15	Verknüpft mathematisches Wissen mit chemischen Wissen (wirkt fächerübergreifend)	Eine Unterrichtsplanung würde viel Zeit in Anspruch nehmen, was es für den Alltag etwas unpraktisch macht.		
16			Mehr Alltagsbezug.	
17	Mathematik wird als Werkzeug betrachtet, mit dem man chemisches Wissen vertieft.	Teilweise ist das Konzept schwammig formuliert, z.B. was genau ist der Unterschied zwischen Modellierung und Mathematisierung? Könnte man nicht beides zusammenfassen?	Das Konzept mit mehr Details versehen, damit Unterrichtsplanungen schneller erstellt werden können.	
18	Das Prinzip ist verständlich.	Es könnte die Mathematik zu sehr in der Vordergrund rutschen.	-	
20				
21	Verständlicher Zyklus	zu viel Mathematik im Chemieunterricht		

Zusammenfassung der Fragebogenantworten, Seite 5

Item-Legende (verkürzte Bezeichnungen):

- A1: Mathematische Anforderungen können im Chemieunterricht motivationale Hemmnisse erzeugen, wenn der chemische Sinn nicht erkennbar ist.
- A2: Eine explizite Verknüpfung zur Mathematik unterstützt Lernende beim chemischen Verständnis.
- A3: Zu viel Mathematik benachteiligt Lernende mit schwächerem mathematischem Verständnis.
- A4: Für die Beliebtheit von Chemie ist die Mathe-Verknüpfung weniger entscheidend als Unterrichtsqualität, Übungsgelegenheiten und sinnstiftende Anwendungen
- A5: Im Unterricht sollte klar kommuniziert werden, welche Mathematik vorausgesetzt wird und welche kurz reaktiviert wird.
- K1: Im Konzept kommt Mathematik erst dann zum Einsatz, wenn sie eine Verständnishilfe für chemische Themen darstellt.
- K2: Die Mathematik wird im Konzept als Werkzeug zum Erklären/Interpretieren und Deuten chemischer Inhalte benutzt.
- K3: Das Konzept verhindert einen zu schnellen Sprung zwischen Makro- und Symbolebene.
- K4: Im Konzept hat die Sprachsensibilität und Begriffsdeutung einen hohen Stellenwert.
- K5: Die mathematischen Anforderungen sind im Konzept altersgerecht und nicht überfrachtend abgesichert.
- K6: Das Konzept baut Sicherungen gegen typische Fehlerquellen ein.
- K7: Das Konzept macht den Nutzen der Mathematik transparent, sodass sie eher als sinnvoll und nicht als Hürde verstanden ...
- K8: Das Konzept ist mit dem Lehrplan vereinbar.
- K9: Das Konzept ist für den Schulalltag geeignet.
- K10: Das Konzept ist so beschrieben, dass Lehrpersonen es klar beurteilen und adaptieren können.
- G1: Insgesamt gelingt dem Konzept der Balanceakt zwischen chemischem Sinn und mathematischer Formalisierung.
- G2: Ich würde das Konzept (teilweise) im eigenen Unterricht einsetzen.