



# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Entwicklung einer Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ zum Aufbau von Bewertungskompetenz für die Sekundarstufe II“

verfasst von / submitted by

Susanne Schmidt BEd

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

Wien, 2022 / Vienna, 2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 199 502 504 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) UF Biologie und Umweltkunde UF Chemie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens



# Zusammenfassung

Um als informierte Bürgerinnen und Bürger in einer von Naturwissenschaften und Technik geprägten Welt informierte Entscheidungen treffen zu können und verantwortungsbewusst handeln zu können, sind eine Reihe komplexer Kompetenzen nötig, darunter auch im Bereich Bewertung (Lembens & Rehm, 2010). Die Förderung von Urteils- und Handlungsfähigkeiten von Schülerinnen und Schülern, damit sie in ihrem späteren Leben an gesellschaftlich relevanten Problemen im naturwissenschaftlichen Bereich Mitsprache- und Mitgestaltungsmöglichkeiten wahrnehmen können, ist im österreichischen Lehrplan der allgemeinbildenden höheren Schulen verankert (Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021). Damit ist die Förderung von Urteils- und Handlungsfähigkeit als Auftrag von Schule festgelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ konzipiert, die es Schülerinnen und Schülern erlauben soll, die für solche Problemstellungen notwendige Bewertungskompetenz aufzubauen.

Dazu wird zunächst der theoretische Hintergrund geklärt. Dieser setzt sich zusammen aus der Begriffsdefinition von naturwissenschaftlicher Grundbildung und der Einordnung von Bewertungskompetenz inklusiver aktueller Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz. Im Anschluss wird eines dieser Kompetenzmodelle ausgewählt, anhand dessen die Teilkompetenzen operationalisiert werden, die in der Unterrichtseinheit zu „Luftschadstoffen in Innenräumen“ angestrebt werden.

Anschließend wird die Ausarbeitung der Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ für die Sekundarstufe II dargestellt.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
Inhaltsverzeichnis .....	3
1 Einleitung und Ziel der Arbeit .....	5
2 Theoretischer Rahmen.....	7
2.1 Naturwissenschaftliche Grundbildung und Lehrplanbezug .....	7
2.1.1 Definition des Begriffes Bewertungskompetenz.....	12
2.1.2 Eignung des Themas „Schadstoffe in der Innenraumluft“ als kontroverses Thema zum Aufbau von Bewertungskompetenz .....	16
2.1.3 Wahl eines Kompetenzmodelles zur Bewertungskompetenz	18
2.2 Didaktische Rekonstruktion als Rahmen für die Entwicklung der Unterrichtseinheit.....	27
2.3 Fachliche Klärung der fachchemischen Inhalte.....	28
2.3.1 Schadstoffe in der Innenraumluft.....	28
2.3.2 Verwendung von Brom .....	32
2.3.3 Bromierte Flammschutzmittel .....	33
2.3.4 Verortung der fachchemischen Inhalte im aktuellen Lehrplan	42
2.4 Bewertungsstrukturwissen .....	42
2.5 Der Bewertungskreislauf als Hilfestellung für kompensatorisches Bewerten.....	44
3 Methodisches Vorgehen .....	46
3.1 Erhebung der Assoziationen von Schülerinnen und Schülern zum Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ .....	46
3.2 Didaktische Strukturierung .....	48
3.3 Darstellung der Entwicklung der Lerngelegenheit und der Unterrichtsmaterialien .....	48

4	Conclusio .....	69
5	Literaturverzeichnis .....	74
6	Anhang.....	86
6.1	Anhang 1: Gesetzliche Beschränkungen .....	86
6.2	Anhang 2: Umweltzeichen, Gütesiegel, Labels.....	88
6.3	Anhang 3: Unterrichtsmaterialien.....	90

# 1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Menschen in Mitteleuropa verbringen den Großteil ihrer Zeit in Innenräumen, in Deutschland beispielsweise halten sich Erwachsene durchschnittlich 20 Stunden pro Tag in Innenräumen auf (Roßkamp, 2010). Die Innenraumlufte kann durch Schadstoffe belastet sein, wodurch Gesundheit und Wohlbefinden beeinträchtigt werden können (Tappler, 2018; Birmili et al., 2018; Roßkamp, 2010). Eine Gruppe dieser Schadstoffe stellen halogenierte Flammschutzmittel dar, sie werden häufig Kunststoffen, Textilien und elektronischen Geräten zugesetzt (EFSA, 2021). Bromierte Flammschutzmittel können über unterschiedliche Expositionswege in den Körper des Menschen gelangen, darunter Lebensmittel, Wasser, Hausstaub und Innenraumlufte. Einige dieser bromierten Flammschutzmittel können reproduktionstoxisch, erbgutverändernd und krebserzeugend wirken (Hartmann, 2016).

Angesichts dieser Tatsachen ist das Thema relevant für den Schulunterricht, da es unmittelbar den Alltag der Schülerinnen und Schüler betrifft. Weiters ist es ein Thema, das kontrovers diskutiert wird, denn letztendlich haben Flammschutzmittel einen offensichtlichen Nutzen. Es ist für mündige Bürgerinnen und Bürger und damit auch für Schülerinnen und Schüler notwendig, Informationen zu diesem Thema kritisch zu prüfen und ihre Handlungsoptionen abzuwägen, um zu einer reflektierten Entscheidung gelangen zu können. Um in einer von Naturwissenschaften und Technik geprägten Welt informierte Entscheidungen zu treffen und verantwortungsbewusst zu handeln, sind eine Reihe komplexer Kompetenzen nötig, darunter auch im Bereich Bewertung (Lembens & Rehm, 2010).

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe II zu konzipieren, in der es den Schülerinnen und Schülern möglich ist, die für derartige Problemstellungen notwendige Bewertungskompetenz auszubauen. Im österreichischen Lehrplan der allgemeinbildenden höheren Schulen sind die Förderung von Urteils- und Handlungsfähigkeiten von Schülerinnen und Schülern verankert, damit sie als zukünftige mündige Bürgerinnen und Bürger „in Lebens- und Gesellschaftsbereichen Mitsprache- und Mitgestaltungsmöglichkeiten wahrnehmen können“ (Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 6). Die Förderung von kompetenzorien-

tiertem Unterricht und damit die Förderung von Urteils- und Handlungsfähigkeit in naturwissenschaftlich relevanten Gesellschaftsbereichen sind damit als Auftrag von Schule festgelegt.

## 2 Theoretischer Rahmen

### 2.1 Naturwissenschaftliche Grundbildung und Lehrplanbezug

Wird von naturwissenschaftlicher Grundbildung gesprochen, so fällt meist auch der Begriff „Scientific Literacy“. Scientific Literacy umfasst nicht nur das Verständnis der grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge in den Naturwissenschaften, sondern auch das Verständnis naturwissenschaftlich-technischer Anwendungen im Alltag und deren Berücksichtigung bei eigenen Entscheidungen, wenn dabei naturwissenschaftliche Erkenntnisse eine Rolle spielen (Fischler et al., 2018). In der Literatur findet man unterschiedliche Übersetzungen des Begriffes (Lembens et al., 2009). Das liegt daran, dass eine eindeutige Übersetzung dieses Begriffes nicht so einfach möglich ist, weshalb „Scientific Literacy“ der Einfachheit halber oft mit „naturwissenschaftlicher Grundbildung“ übersetzt wird (Gebhard et al., 2017).

Das PISA-Framework der Scientific Literacy 2006 umfasst eine Vielzahl naturwissenschaftlicher Kompetenzen, darunter die Aneignung neuen Wissens, die Fähigkeit, ein Bewusstsein dafür zu entwickeln, wie Naturwissenschaften und Technik unsere materielle, intellektuelle und kulturelle Umgebung prägen und die Bereitschaft, sich als Bürgerin und Bürger reflektiert mit naturwissenschaftlichen Themen und Ideen auseinanderzusetzen (OECD, 2006, S.23, zitiert nach Lembens et al., 2009).

Ähnlich sehen auch die Ziele naturwissenschaftlicher Grundbildung aus: Sie soll unter anderem helfen, die Erkenntnisse der Naturwissenschaften zu kommunizieren, und erworbene Kompetenzen zum Vorteil für sich und andere im Leben zu verwenden (BMUKK, 2009).

Nach Gebhard et al. (2017) beinhaltet Scientific Literacy im Rahmen von PISA heute drei Teilbereiche:

1. *das Erklären naturwissenschaftlicher Phänomene (explain phenomena scientifically)*
2. *das Bewerten und Entwickeln naturwissenschaftlicher Untersuchungen (evaluate and design scientific enquiry)*

### *3. das Interpretieren naturwissenschaftlicher Evidenz (interpret data and evidence scientifically)*

Der Schwerpunkt, den PISA im Bereich Naturwissenschaften im Jahr 2006 setzte, lag daher darin, Wissen, Fähigkeiten und Einstellungen der Schülerinnen und Schüler im Hinblick auf zukünftige persönliche, gesellschaftliche, aber auch globale Herausforderungen im Bereich Naturwissenschaft und Technik zu forcieren (Lembens et al., 2009).

In vielen Bereichen ermöglichen naturwissenschaftliche Erkenntnisse laufend Fortschritte, wodurch unsere Gesellschaft zunehmend durch Naturwissenschaft und Technik geprägt wird. Schülerinnen und Schüler sollen über naturwissenschaftliche Grundbildung verfügen, um wissenschaftliche Belege interpretieren zu können und sie von nicht-wissenschaftlichen Statements unterscheiden zu können. Hier soll naturwissenschaftlicher Unterricht einen großen Beitrag zur Förderung von Kompetenzen leisten, die die Urteils- und Handlungsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler unterstützen (Hopf et al., 2017).

Urteils- und Handlungsfähigkeit meint, dass mündige Bürgerinnen und Bürger einerseits auf die von Expertinnen und Experten zur Verfügung gestellten Informationen zurückgreifen können sollen, aber andererseits auch Verständnis davon haben, wo die Aussagekraft von wissenschaftlichen Daten und Fakten endet. Es sind eine Reihe komplexer Kompetenzen notwendig, um als informierte Bürgerin oder Bürger Entscheidungen treffen und dementsprechend handeln zu können. Die Entwicklung dieser Kompetenzen soll im Rahmen von naturwissenschaftlichem Unterricht möglich sein (Lembens & Rehm, 2010).

In Deutschland war ein erster Schritt in diese Richtung die Erarbeitung der nationalen Bildungsstandards im Jahr 2004, die anlässlich der Ergebnisse internationaler Schulleistungsstudien wie PISA (Programme for International Student Assessment) aus dem Jahr 2000 und TIMSS (Third International Mathematics and Science Study) erarbeitet wurden (Hostenbach, 2011; Köller, 2004). Diese legen fest, welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler in einem bestimmten Fach im Durchschnitt erreicht haben sollen (KMK, 2020). In Österreich wird eine verbindliche Umsetzung von kompetenzorientiertem Unterricht mit der Änderung des Schulunterrichtsgesetzes 2008

und der damit verbundenen Implementierung von Bildungsstandards ermöglicht (Hopf et al., 2017).

Der Kompetenzerwerb ist im österreichischen Lehrplan der allgemeinbildenden höheren Schulen (Fassung vom 17.05.2021) an mehreren Stellen verortet. Im allgemeinen Bildungsziel für die Sekundarstufen I und II ist dargelegt, dass

*„die Wahrnehmung von demokratischen Mitsprache- und Mitgestaltungsmöglichkeiten in den unterschiedlichen Lebens- und Gesellschaftsbereichen die Befähigung zur sach- und wertbezogenen Urteilsbildung und zur Übernahme sozialer Verantwortung erfordert. Zur Entwicklung dieser Fähigkeiten ist in hohem Maße Selbstsicherheit sowie selbstbestimmtes und selbst organisiertes Lernen und Handeln zu fördern. [...] Die Schülerinnen und Schüler sind sowohl zum selbstständigen Handeln als auch zur Teilnahme am sozialen Geschehen anzuhalten.“* (Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 6).

Weiters ist unter den Aufgabenbereichen der Schule der Punkt „Wissensaneignung, Kompetenzerwerb“ angeführt, in dem es heißt:

*„Kompetenz besteht aus dem Zusammenspiel von Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Haltungen, welche in Handlungssituationen durch die Disposition der Einzelnen zur Geltung kommen. Zur fachbezogenen Kompetenzentwicklung gehört als eine zentrale Aufgabe der Schule die Vermittlung fundierten Wissens. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler im Sinne eines lebensbegleitenden Lernens zur selbstständigen, aktiven Aneignung, aber auch zu einer kritisch-prüfenden Auseinandersetzung mit dem verfügbaren Wissen befähigt und ermutigt werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich in altersadäquater Form mit Problemstellungen auseinandersetzen, Gegebenheiten kritisch hinterfragen, Probleme erkennen und definieren, Lösungswege eigenständig suchen und ihr eigenes Handeln kritisch betrachten.“* (Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 6)

Im Lehrplan Chemie für die Pflichtschulen ist unter dem Punkt „Bildungs- und Lehr-aufgabe“ außerdem angeführt:

*„Chemieunterricht dient einerseits dazu, Schülerinnen und Schüler mit dem Wissen und den Grundfertigkeiten zur Bewältigung stofflicher Alltags-, Freizeit-, Lebens- und Berufsphänomenen auszustatten und hat andererseits die Aufgabe, die gesellschaftliche Erziehung im Bereich von Natur und Materie vorzunehmen.“ (Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 56)*

Es geht aus diesen Passagen deutlich hervor, dass kompetenzorientierter Unterricht und damit die Förderung von Urteils- und Handlungsfähigkeiten zukünftiger mündiger Bürgerinnen und Bürger bedeutend sind. Naturwissenschaftliche Grundbildung spiegelt sich auf diese Weise im Lehrplan der allgemeinbildenden höheren Schulen wider.

Nach dem BGBl. II, Nr. 1/2009 sind Kompetenzen definiert als *„längerfristig verfügbare kognitive Fähigkeiten und Fertigkeiten, die von Lernenden entwickelt werden und die sie befähigen, Aufgaben in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsbewusst zu lösen und die damit verbundene motivationale und soziale Bereitschaft zu zeigen“* und Kompetenzmodelle als *„prozessorientierte Modellvorstellungen über den Erwerb von fachbezogenen oder fächerübergreifenden Kompetenzen. Sie strukturieren Bildungsstandards innerhalb eines Unterrichtsgegenstandes und stützen sich dabei auf fachdidaktische sowie fachsystematische Gesichtspunkte“*. Kompetenzbereiche sind *„fertigungsbezogene Teilbereiche des Kompetenzmodells“* (BGBl. II, 1/2009).

Die Kompetenzen werden durch Deskriptoren oder Operatoren im Detail beschrieben (Abels et al., 2012), beispielsweise **„Erkläre**, weshalb Elektroaltgeräte, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, nicht recycelt werden.“

Die von den Bildungsstandards in Form von Kompetenzbereichen geforderten Bildungsziele sollen von den Schülerinnen und Schülern im Laufe ihrer Schulzeit erworben werden (BMB, 2016). Die Kompetenzbereiche beschreiben ein komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Fähigkeiten, Fertigkeiten und Haltungen. Das bedeutet aber auch, dass Kompetenz nur insofern gemessen oder überprüft werden kann, als dass das Handeln einer Person in verschiedenen Situationen als kompetenz-

tent oder wenig kompetent eingestuft wird. Daraus geht hervor, dass die Bewertung von Kompetenz, besser gesagt von kompetentem Handeln einen Bezugsrahmen braucht, der klar darlegt, welche beobachtbaren Kriterien bei der Bewertung von klar definierten Kompetenzen herangezogen werden sollten und wie diese gewichtet werden. Dieser Bezugsrahmen wurde in Form von Kompetenzmodellen ausgearbeitet (Hopf et al., 2017). Kompetenzmodelle bilden den Zusammenhang zwischen den abstrakten Bildungszielen und den konkreten Aufgaben im Unterricht (Neumann et al., 2007).

Das naturwissenschaftliche Kompetenzmodell für die AHS-Oberstufe ist ein dreidimensionales Modell, es umfasst eine Anforderungs-, Inhalts- und Handlungsdimension (Kern et al., 2017; *Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021*, 2021). Es wurde dabei keine Wertung vorgenommen, weil jeder Bereich von gleich großer Wichtigkeit ist. Die Handlungsdimension umfasst die drei Kompetenzbereiche ‚Wissen organisieren‘ (Recherchieren, Darstellen, Kommunizieren), ‚Erkenntnisse gewinnen‘ (Fragen, Untersuchen, Interpretieren) und ‚Konsequenzen ziehen‘ (Bewerten, Entscheiden, Handeln). Der Aspekt der Kommunikation steht explizit im Bereich ‚Wissen organisieren‘, ist aber in allen drei Bereichen verortet (Kern et al., 2017). Dass die Kommunikation demnach quer zu allen anderen Kompetenzbereichen der Handlungsdimension liegt, impliziert, dass die Generierung und Anwendung von Wissen sowie dessen angemessene Kommunikation immer gemeinsam betrachtet werden sollten.

Der Kompetenzbereich ‚Bewertung‘ ist im naturwissenschaftlichen Kompetenzmodell für die AHS-Oberstufe in der Handlungsdimension ‚Konsequenzen ziehen‘ verortet und umfasst die Bereiche Bewerten, Entscheiden und Handeln (Kern et al., 2017). Diese Handlungsdimension befasst sich im weitesten Sinn damit, dass Schülerinnen und Schüler unterschiedliche Sachverhalte bewerten sollen, ganz im Sinne des Ziels von naturwissenschaftlichem Unterricht, Schülerinnen und Schüler zu mündigen Bürgerinnen und Bürgern zu bilden (Hopf et al., 2017).

Bevor auf die Kompetenzmodelle eingegangen wird, die speziell zur Beschreibung von Bewertungskompetenz entwickelt worden sind, ist es notwendig den Begriff Bewertungskompetenz zu definieren.

### 2.1.1 Definition des Begriffes Bewertungskompetenz

Eine Definition des Begriffes Bewertungskompetenz ist aber nicht so einfach. So fallen verschiedenste Teilkompetenzen, die im Zusammenhang mit dem Verb „bewerten“ stehen, unter den Kompetenzbereich „Bewertung“ (Schmitz & Reiners, 2019), diese Definition kann aber nicht als hinreichend betrachtet werden (Hostenbach, 2011).

Knittel (2013) nimmt daher eine Abgrenzung des Begriffes *Bewertungskompetenz* von dessen benachbartem Begriff *Problemlösen* vor. Den größten Unterschied zwischen *Bewertungskompetenz* und *Problemlösen* sieht Knittel (2013) unter anderem in den didaktischen Zielen: Die Förderung von *Bewertungskompetenz* verfolgt das Ziel, Schülerinnen und Schülern die Teilhabe an öffentlichen Diskussionen zu ermöglichen, während *Problemlösen* darauf fokussiert, Schülerinnen und Schülern dabei zu helfen, in konkreten Problemsituationen Lösungen zu finden.

Knittel (2013) stellt dem Begriff *Bewertungskompetenz* zudem verwandte Begriffe wie „Urteilskompetenz“, „Reflexionskompetenz“, „Decision making“ und den SSI (Socioscientific Issue) Ansatz gegenüber. Nach Knittel (2013) könnten die Begriffe *Bewertungskompetenz* und *Urteilskompetenz* synonym verwendet werden, wenn sie in Situationen mit geringer ethischer Relevanz verwendet werden. Im Gegensatz dazu stellt *Reflexionskompetenz* kein Synonym zum Begriff *Bewertungskompetenz* dar, die Begriffe sind aber nahe verwandt. Der aus dem englischen Sprachraum stammende Begriff *decision making* ist zwar umfassender als der Begriff *Bewertungskompetenz*, kann aber als dessen englischsprachiges Pendant bezeichnet werden. Der ebenfalls aus dem Englischen stammende Begriff des *decision making in the context of SSI* kann mit *Bewerten in komplexen, sozial relevanten Situationen* ins Deutsche übersetzt werden.

Es wird deutlich, dass es keine einheitliche Definition des Begriffes „Bewertungskompetenz“ gibt. Aus diesem Grund sind in der fachdidaktischen Forschung viele Ansätze zur Definition der Bewertungskompetenz entstanden. Die meisten dieser Ansätze sind im Bereich der Biologiedidaktik für spezifische Themenbereiche entwickelt worden (Hostenbach, 2011). Im Folgenden sollen jene Definitionen dargestellt werden, die denjenigen Kompetenzmodellen zur Bewertungskompetenz zugrunde

liegen, die für die Entwicklung der Unterrichtseinheit in die engere Auswahl gezogen worden sind.

Die Definition von Eggert & Bögeholz (2006) im Göttinger Modell der Bewertungskompetenz bezieht sich auf Bewerten und Entscheiden im Kontext nachhaltiger Entwicklung. Im Rahmen von nachhaltiger Entwicklung geht es meist um Maßnahmen zur Gestaltung beziehungsweise Entwicklung einer Sache, beispielsweise eines Ökosystems oder einer Region. Weil solche Entscheidungssituationen gestalterische Elemente aufweisen, kann statt „Entscheidungssituationen“ durchaus auch der Begriff „Gestaltungssituationen“ verwendet werden. Im Kontext nachhaltiger Entwicklung kann Bewerten als die Fähigkeit definiert werden, *„sich in komplexen Problemsituationen begründet und systematisch bei unterschiedlichen Handlungsoptionen zu entscheiden, um kompetent am gesellschaftlichen Diskurs um die Gestaltung von nachhaltiger Entwicklung teilhaben zu können“* (Bögeholz, 2007, S. 209, zitiert nach Hostenbach, 2011, S. 21).

Dem Modell zur Dimensionierung der ethischen Urteilskompetenz nach Reitschert et al. (2007) kann die Definition von Bewertungskompetenz nach Mittelsten Scheid und Hößle (2008) zugrunde gelegt werden. Demnach meint Bewertungskompetenz die *„Fähigkeit, die ethische Relevanz naturwissenschaftlicher Themen wahrzunehmen, damit verbundene Werte zu erkennen und abzuwägen sowie ein reflektiertes und begründetes Urteil zu fällen“* (Mittelsten Scheid & Hößle, 2008, S. 88).

Das ESNaS-Modell (*Evaluation der Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I*) zur Beschreibung der Bewertungskompetenz wurde von Hostenbach (2011) entwickelt und geprüft. Hostenbach definiert in ihrem Modell Bewertungskompetenz als die *„Fähigkeit, fachbezogene Kriterien für die Entscheidung zwischen verschiedenen Optionen heranzuziehen, sie zu gewichten und abzuwägen, um anschließend eine begründete Entscheidung für eine Option zu treffen“* (Hostenbach, 2011, S. 24).

In der vorliegenden Arbeit wird die Definition von Bewertungskompetenz von Bögeholz (2007) übernommen, weil auch das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz herangezogen wird, um die Teilkompetenzen „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ und „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ zu operationalisie-

ren, die die Unterrichtseinheit zu Luftschadstoffen in Innenräumen anstrebt. Anhand welcher Kriterien die Auswahl des Modells erfolgte, wird im Kapitel 2.1.3 dargelegt.

Betrachtet man die Definitionen von Bewertungskompetenz vor dem Hintergrund naturwissenschaftlicher Grundbildung, so wird deutlich, dass beides auf das Befähigen von Schülerinnen und Schüler abzielt, Entscheidungssituationen naturwissenschaftlicher Natur im Alltag zu erkennen und reflektierte Entscheidungen zu treffen (Schmitz & Reiners, 2019).

Im Zusammenhang mit Bewertungskompetenz ist zudem wichtig zu klären, was genau bewertet werden soll, um Entscheidungen treffen zu können. So können einerseits Problemsituationen mithilfe von Informationen bewertet werden, andererseits können aber auch die Informationen an sich im Hinblick auf ihre Filterung bewertet werden. Unter gefilterten Informationen versteht man jene Informationen, die nicht zu fachwissenschaftlicher Originalliteratur zählen. Das können beispielsweise populärwissenschaftliche Literatur, aber auch Schul- und Lehrbücher sein. Literatur dieser Art hat bereits einen Filterungsprozess hinter sich und mit jeder Person, die die Informationen neu aufbereitet, findet ein weiterer statt (Marks et al., 2012). Das Filtern kann sich dabei darauf beziehen, dass bereits vorhandene Elemente herausgefiltert werden, oder aber dass Informationen verfremdet werden. Der Filterungsprozess ist von den Zielen und Fachkompetenzen der jeweiligen Person abhängig, die die Informationen neu aufbereitet. Das könnten im Wissenschaftsjournalismus Tätige sein oder auch Mitarbeitende von Nachrichtenagenturen, um nur zwei Beispiele zu nennen. Das Vorwissen, die Interessen und die eigene Einstellung dieser Personen beeinflussen den Filterungsprozess genauso wie deren fachliche Kompetenzen in einem Bereich (Marks et al., 2012). Für den schulischen Kontext im Allgemeinen und die Ausarbeitung der Unterrichtseinheit zu „Schadstoffen in der Innenraumluft“ im Speziellen bedeutet das, dass sich sowohl Lehrende als auch Lernende bei der Auswahl von Informationen dieser Filterungsprozesse bewusst sein sollten. Besonders in Situationen, in denen aufgrund von Informationen Entscheidungen getroffen werden, ist es wichtig zu hinterfragen, welche Ziele die zur Verfügung Stellenden von Informationen hatten oder haben.

In Zusammenhang mit Unterricht, der auf die Förderung von Bewertungskompetenz abzielt, sind Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zu beachten. Dass das in der Schule vermittelte Fachwissen nicht immer in naturwissenschaftlichen Entschei-

dingssituationen im Alltag herangezogen wird, beschreibt unter anderem Menthe (2012): Sogar Fachunterricht, der sich am Konzept der Scientific Literacy orientiert, muss nicht zwingend dazu beitragen, dass Schülerinnen und Schüler das erlernte Fachwissen in Problemsituationen im Alltag anwenden.

Im Zusammenhang mit Bewertungskompetenz lassen sich nach Menthe und Düker (2017) zwei Arten von Lernendenvorstellungen unterscheiden: einerseits Vorstellungen zum Thema (in diesem Fall zu Schadstoffen in der Innenraumluft) und andererseits Vorstellungen, die den Bewertungsprozess betreffen. Um Bewertungskompetenz zu fördern, sollten daher einerseits die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Thema aufgegriffen werden und andererseits sollte den Schülerinnen und Schülern die systematische Anwendung von Bewertungsstrategien ermöglicht werden (Menthe & Düker, 2017).

Menthe (2012) stellt außerdem fest, dass Schülerinnen und Schüler an ihren Vorstellungen zu bestimmten Inhalten festhalten. Im Unterricht eignen sie sich zwar nachweislich Fachwissen an, verwenden dieses jedoch nicht unbedingt, um im Alltag Entscheidungen zu treffen. Ein Grund hierfür liegt in der sogenannten „alternativen Kontextualisierung“. Je nach Kontext aktivieren Schülerinnen und Schüler andere Konzepte – Sachverhalte werden also unterschiedlich kontextualisiert. Ein häufig auftretendes Problem dabei ist, dass erlernte Inhalte nicht immer mit bereits vorhandenen Überzeugungen in Verbindung gebracht werden (Menthe, 2012; Menthe & Düker, 2017). Ansätze der *situated cognition* (vgl. u.a. Lave, 1988) streichen hervor, dass Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern immer als kontextabhängig zu betrachten sind. Vor diesem Hintergrund lässt sich leichter verstehen, warum je nach Kontext in ähnlichen Situationen unterschiedlich entschieden wird: Weil das Fällens eines Urteils als ein Produkt aus einer bestimmten Situation und einer bestimmten biografischen Erfahrung zu sehen ist. Im Rahmen von Unterricht zur Förderung der Bewertungskompetenz bedeutet das, dass erkannt werden soll, in welchen Problemsituationen welche Fach- oder Alltagskonzepte angemessen sind und in welchem Kontext die jeweilige Entscheidung zu treffen ist (Menthe & Düker, 2017).

Gesellschaftskritisch problemorientierter Chemieunterricht möchte das Lernen von Chemie anhand von offenen gesellschaftlichen Kontroversen ermöglichen und diese zum Gegenstand des Chemieunterrichts machen. Den Schülerinnen und Schülern soll dadurch begreiflich gemacht werden, dass das Bewerten über Chemie, also die

Rolle der Chemie in gesellschaftlichen oder technischen Entwicklungen, in gesellschaftliche und manchmal auch in ethische Zusammenhänge eingebunden ist. Um Sachverhalte zu bewerten und Entscheidungen in diesen Zusammenhängen zu treffen, sind die Naturwissenschaften und ihre Erkenntnisse Voraussetzung (Marks et al., 2006).

Weil sich nicht jedes Thema gleichermaßen gut für den Einsatz in gesellschaftskritisch problemorientiertem Chemieunterricht eignet, soll im Folgenden festgestellt werden, ob das Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ dafür geeignet ist, bevor auf die Vorstellung dreier Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz und die Auswahl eines Modells eingegangen wird.

### **2.1.2 Eignung des Themas „Schadstoffe in der Innenraumluft“ als kontroverses Thema zum Aufbau von Bewertungskompetenz**

Um geeignete Themen für einen gesellschaftskritisch problemorientierten Chemieunterricht identifizieren zu können, haben Marks et al. (2006) Kriterien zur Auswahl entwickelt.

Sinnvolle Themen sollen demnach folgende Kriterien aufweisen:

- Relevanz
- Authentizität
- Ergebnisoffenheit
- Diskutierbarkeit
- Chemiebezug

Gesellschaftskritisch problemorientierter Chemieunterricht enthält Elemente, die Kommunikations- und Bewertungskompetenz fördern. Es ist Teil des Unterrichts, Informationen auszuwählen, zusammenzustellen, wiederzugeben und vor dem Hintergrund ihres Zustandekommens zu bewerten, um die Informationen am Ende für eine Argumentation zu nutzen (Marks et al., 2006).

Es sollen nun die oben genannten Kriterien nach Marks, Bertram und Eilks (2006) in Tabelle 1 genauer beschrieben werden. Außerdem wird diskutiert, inwieweit sie für das Thema „Bromierte Flammschutzmittel“ zutreffen.

Kriterium	Beschreibung	Bromierte Flammschutzmittel
<b>Relevanz</b>	Das Thema soll für die Schülerinnen und Schüler Alltagsbezug haben.	Im Alltag sind wir täglich von Materialien umgeben, denen Flammschutzmittel zugesetzt sind. Vorwiegend werden bromierte Flammschutzmittel in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzt, die Schülerinnen und Schüler jeden Tag verwenden und die in fast jedem Innenraum zu finden sind.
<b>Authentizität</b>	Aktuell soll das Thema in der Gesellschaft kontrovers diskutiert werden. Im Zuge dessen soll es in Alltagsmedien wie zum Beispiel Zeitungen, Zeitschriften oder Fernsehen präsent sein.	Bromierte Flammschutzmittel werden seit vielen Jahren kontrovers diskutiert und sind daher immer wieder Thema in verschiedenen Medien. Zum Beispiel: (Greenpeace, 2005; Grimm, 2014; Kleine Zeitung, 2018; Kronenzeitung, 2009; Wiener Zeitung, 2014).
<b>Ergebnisoffenheit</b>	In der diskutierten Kontroverse soll es verschiedene Positionen geben, von denen keine als eindeutig richtig oder falsch zu klassifizieren ist.	In einer Diskussion, in der es um die Frage geht, ob bromierte Flammschutzmittel weiter eingesetzt werden sollen, gibt es keine richtige oder falsche Position.
<b>Diskutierbarkeit</b>	Das Thema soll nicht gesellschaftlich einseitig konnotiert sein und damit offen diskutierbar sein. Es soll möglich sein, seine Meinungen mit unterschiedlichen Standpunkten zu äußern, ohne sich dabei aus ethischen oder gesellschaftlichen Zwängen auszugrenzen.	Sowohl die Position für den Einsatz bromierter Flammschutzmittel als auch die Position gegen den Einsatz bromierter Flammschutzmittel ist gut begründbar und daher zu akzeptieren.
<b>Chemiebezug</b>	Beim Thema sollte es sich um eine naturwissenschaftlich-technische Sachfrage handeln. Zum Treffen der Entscheidung sollen dementsprechend ein Verständnis der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge und das Wissen von Fakten notwendig sein.	Um sich aktiv mit der Entscheidungsfrage um den Einsatz bromierter Flammschutzmittel beschäftigen zu können, ist chemisches Fachwissen notwendig.

**Tabelle 1: Kriterien für Themen eines gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts nach Marks, Bertram und Eilks (2006)**

### **2.1.3 Wahl eines Kompetenzmodelles zur Bewertungskompetenz**

Um eine Unterrichtseinheit konzipieren zu können, die den Aufbau von Kompetenzen fördert, ist Wissen um den Aufbau und die Entwicklung der unterschiedlichen Kompetenzen notwendig. Eine derartige Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz haben Schecker und Parchmann (2006) vorgenommen: Sie teilen Kompetenzmodelle ein in Kompetenzstrukturmodelle und Kompetenzentwicklungsmodelle einerseits und normative und deskriptive Modelle andererseits. Kompetenzstrukturmodelle stellen die Struktur einer Kompetenz dar, indem sie beschreiben, welche Teilkompetenzen eine Kompetenz umfasst. Kompetenzentwicklungsmodelle geben an, wie sich die Kompetenzstrukturen herausbilden, indem sie die Entwicklung von Teilkompetenzen und damit insgesamt die Entwicklung einer Kompetenz beschreiben. Kompetenzstrukturmodelle schaffen die Grundlage für die Erarbeitung kompetenzorientierter Aufgaben, indem sie Kompetenzkonstrukte (beispielsweise jenes für Bewertungskompetenz) mithilfe von Kompetenzausprägungen operationalisieren. Werden die durch Kompetenzstrukturmodelle erfassten Strukturen einer Kompetenz auf Niveaus hin analysiert, so kann man Informationen darüber erhalten, wie sich eine Kompetenz innerhalb eines Bereichs (z.B. Schulstufe oder Alter) ausprägt. Die Entwicklung einer Kompetenz kann dann in Kompetenzentwicklungsmodellen aufgezeigt werden (Mittelsten Scheid & Hößle, 2008; Schecker & Parchmann, 2006).

Während normative Kompetenzstrukturmodelle die kognitiven Voraussetzungen beschreiben, über die verfügt werden soll, um bestimmte Aufgaben lösen zu können, beschreiben deskriptive Kompetenzstrukturmodelle ein „typisches“ Muster von kognitiven Voraussetzungen, mit dem das Verhalten von Schülerinnen und Schülern beim Lösen von Aufgaben in einem bestimmten Anforderungsbereich beschrieben werden kann (Schecker & Parchmann, 2006).

Um eine wirksame Lernumgebung zur Bewertungskompetenz zu entwickeln, ist es sinnvoll, sich an einem Kompetenzmodell zu orientieren. Weil für die Entwicklung der Unterrichtseinheit ein Kompetenzmodell notwendig ist, mit dessen Hilfe Bewertungskompetenz operationalisiert werden kann, wird zur Orientierung ein normatives Kompetenzstrukturmodell herangezogen.

Die im Folgenden vorgestellten Kompetenzmodelle zur Beschreibung von Bewertungskompetenz, welche für die Unterrichtseinheit infrage kommen, zählen zu den normativen Kompetenzstrukturmodellen.

An dieser Stelle soll geklärt werden, welches Modell zur Bewertungskompetenz jene Teilkompetenzen operationalisiert, die im Rahmen einer Unterrichtseinheit zu Luftschadstoffen in Innenräumen angestrebt werden können.

Hierfür stehen das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz (Eggert & Bögeholz, 2006), das Modell zur ethischen Urteilskompetenz (Reitschert et al., 2007) und das dreidimensionale ESNaS (*Evaluation der Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I*) Kompetenzmodell zur Beschreibung von Bewertungskompetenz (Kauertz et al., 2010) zur Wahl.

Allen drei Modellen liegt das Rahmenmodell von Entscheidungsprozessen nach Betsch et al. (2011) zugrunde (Sander, 2012), das wichtige Teilprozesse des Entscheidens benennt. Weil sich diese Teilprozesse in jedem der drei zur Wahl stehenden Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz widerspiegeln, sollen diese kurz vorgestellt werden:

### **1. Präselektionale Phase**

Diese Phase umfasst jene Prozesse, die vor der tatsächlichen Entscheidung liegen. Das sind die Identifikation der Entscheidungssituation, die Suche nach Informationen, welche für die konkrete Entscheidungssituation relevant sind und das Generieren von möglichen Handlungsoptionen.

### **2. Selektionale Phase**

In diesem Schritt werden die zuvor generierten Handlungsoptionen bewertet und eine Entscheidung getroffen, dabei kommen Entscheidungsstrategien zum Einsatz. Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die kompensatorischen und die non-kompensatorischen Entscheidungsstrategien interessant. Bei kompensatorischen Regeln besteht die Möglichkeit, dass Optionen, die in einem Kriterium oder mehreren Kriterien schlecht abschneiden, dieses Defizit aufwiegen, wenn sie in anderen Kriterien besser abschneiden. Kurz gesagt, können Nachteile durch Vorteile aufgewogen werden. Würde man beispielsweise zwischen drei verschiedenen Stoffen wählen müssen, die als Flamm-

schutzmittel verwendet werden sollen, dann könnte man diese in Bezug auf folgende Kriterien analysieren (Tabelle 2): Kosten, Effizienz als Flamm-schutzmittel und Umweltverhalten. Diese Kriterien werden nun gewichtet, zum Beispiel: Kosten mit dem Faktor 0,3, Effizienz als Flamm-schutzmittel mit dem Faktor 0,5 und Umweltverhalten mit dem Faktor 0,2. Anschließend wird jede Option (jedes Flamm-schutzmittel) bezüglich jedes Kriteriums auf einer Skala von 1 bis 10 beurteilt (Partialnutzenwert). Der Gesamtnutzen kann dann berechnet werden, indem die Faktoren der Gewichtung mit den Partialnutzen-werten multipliziert werden und daraus die Summe gebildet wird:

Kriterium und Gewichtung	Option Flammschutzmittel A		Option Flammschutzmittel B		Option Flammschutzmittel C	
	Partialnutzen- wert		Partialnutzen- wert		Partialnutzen- wert	
<b>Kosten (0,3)</b>	3	0,9	3	0,9	7	2,1
<b>Effizienz als Flamm- schutzmittel (0,5)</b>	3	1,5	7	3,5	4	2
<b>Umweltverhalten (0,2)</b>	6	1,2	4	0,8	2	0,4
<b>Gesamtnutzen</b>		<b>3,6</b>		<b>5,2</b>		<b>4,5</b>

**Tabelle 2: Kompensatorische Entscheidungsstrategie am Beispiel dreier Flammschutzmittel**

Das Flammschutzmittel mit dem höchsten Gesamtnutzen würde ausgewählt werden, im obigen Beispiel wäre das das Flammschutzmittel B. Ein Aufwiegen von Nachteilen mit Vorteilen ist bei non-kompensatorischen Entscheidungsstrategien nicht möglich. Wenn man annimmt, dass die Flammschutzmittel A, B und C nicht gleichzeitig zur Verfügung stehen (beispielsweise aufgrund von Lieferengpässen) oder dass es weit mehr als drei Optionen gibt, dann wird eine non-kompensatorische Entscheidungsstrategie angewandt werden. Dabei wird die Option ausgewählt, die als erste als hinreichend zufriedenstellend eingestuft wird. Bei Anwendung von kompensatorischen Entscheidungsstrategien spricht man auch von „*trade-offs*“, weil hier Kriterien abgewogen werden.

Werden non-kompensatorische Entscheidungsstrategien angewandt, spricht man von „*cut-offs*“, weil hier bestimmte Schwellenwerte in einem Kriterium nicht überschritten werden (Pfister et al., 2017). Dementsprechend können auch die Entscheiderinnen und Entscheider in zwei Gruppen geteilt werden: „*Satisficer*“ wenden vor allem non-kompensatorische Strategien an (sie wählen eine *zufriedenstellende* Lösung), während „*Optimizer*“ eher kompensatorische Strategien anwenden (sie wählen eine *optimale* Lösung) (Eggert & Bögeholz, 2006).

Bei komplexeren Entscheidungssituationen kann es sinnvoll sein, non-kompensatorische und kompensatorische Regeln zu kombinieren, um zu einer sinnvollen Entscheidung zu gelangen. Gibt es beispielsweise viele Optionen, kann es sinnvoll sein, zunächst mit Hilfe von non-kompensatorischen Strategien eine übersichtliche Anzahl von Optionen zu ermitteln, bevor diese dann mit kompensatorischen Strategien gegeneinander abgewogen werden. Beispiele hierfür wären ein Wohnungs- oder Autokauf.

In einigen Entscheidungssituationen können auch intuitive Entscheidungen gerechtfertigt sein, weil eine explizite Entscheidung zeitlich nicht immer möglich ist. Ein Beispiel wäre die Auswahl der Garderobe am Morgen oder in welcher Farbe eine Überschrift ins Heft geschrieben wird.

Intuitive Entscheidungsprozesse begleiten meist die rationalen Entscheidungsprozesse. Beispielsweise lässt sich die Entscheidung zur Anschaffung eines Haustieres zwar anhand kompensatorischer und non-kompensatorischer Strategien rational abwägen, begleitend wird aber der intuitive Prozess ablaufen und am Ende die Entscheidung beeinflussen.

### **3. Postselektionale Phase**

Diese Phase umfasst jene Prozesse, die nach der eigentlichen Entscheidung durchlaufen werden, wie die tatsächliche Umsetzung der ausgewählten Option. Für die Planung der Unterrichtseinheit ist diese Phase daher nicht relevant.

### 2.1.3.1 Wesentliche Merkmale der drei zur Wahl stehenden Modelle zur Bewertungskompetenz

	<b>Göttinger Modell der Bewertungskompetenz nach Eggert &amp; Bögeholz (2006)</b>	<b>ESNaS (Evaluation der Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I)-Kompetenzmodell nach Hostenbach (2011)</b>	<b>Modell zur ethischen Urteilskompetenz nach Reitschert et al. (2007)</b>
<b>Für welchen Kontext und mit welchem Ziel wurden die Modelle entwickelt?</b>	Das Modell wurde in der Fachdidaktik Biologie speziell für den Kontext nachhaltiger Entwicklung zur Operationalisierung von Bewertungskompetenz entwickelt.	Das Modell wurde fächerübergreifend für Biologie, Chemie und Physik entwickelt um Bewertungskompetenz zu operationalisieren. Die Kompetenzen werden dabei in einem Large-Scale-Assessment erfasst.	Das Modell wurde in der Fachdidaktik Biologie zur Operationalisierung von Bewertungskompetenz entwickelt. Es eignet sich für ethisch geladene Themen.
<b>Verortung der Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“</b>	Die Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ wird dem Bereich Bewertung zugeschrieben.	Die Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ ist im Bereich Erkenntnisgewinnung verortet.	Die Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ ist nicht explizit als Teilkompetenz im Bewertungsprozess angeführt.
<b>Verortung der Teilkompetenz „Argumentieren“</b>	Die Teilkompetenz „Argumentieren“ wird dem Bereich Bewertung zugeschrieben.	Die Teilkompetenz „Argumentieren“ ist im Bereich Kommunikation verortet.	Die Teilkompetenz „Argumentieren“ wird dem Bereich Bewertung zugeschrieben.
<b>Reflexion im Bewertungsprozess</b>	Die Reflexion der eigenen Einstellung ist Teil des Bewertungsprozesses und kann diesen beeinflussen.	Die Reflexion wird dem Entscheidungsprozess nachgelagert und hat somit keinen Einfluss auf diesen.	Die Reflexion der eigenen Einstellung ist Teil des Bewertungsprozesses und kann diesen beeinflussen.

Tabelle 3: Wesentliche Merkmale der drei zur Wahl stehenden Modelle zur Bewertungskompetenz

Besonders in der biologiedidaktischen Forschung wurden bereits Kompetenzmodelle entwickelt, mit deren Hilfe Bewertungskompetenz operationalisiert werden kann. Die unterschiedlichen Kompetenzmodelle decken jeweils unterschiedliche Bereiche von Bewertungskompetenz ab (Hostenbach, 2011).

### **2.1.3.2 Das Modell zur ethischen Urteilskompetenz**

Dieses Modell wurde in der Arbeitsgruppe Reitschert et al. (2007) in der Fachdidaktik Biologie entwickelt. In dieses Modell sind eine Analyse der in der Biologiedidaktik bereits bestehenden Modelle zur moralischen Urteilsbildung mit eingeflossen, genauso wie eine Überprüfung philosophischer Grundfertigkeiten zum Aufbau von Bewertungskompetenz und ein Vergleich mit Anforderungen an ethische Kompetenzen aus der Ethikdidaktik. Es eignet sich deshalb gut für ethisch geladene Themen, wie beispielsweise Themen aus den Bereichen Biomedizin oder Gentechnik.

### **2.1.3.3 Das ESNaS-Kompetenzmodell**

Im Rahmen der Evaluation der *Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I (ESNaS)* wurde das ESNaS-Kompetenzstrukturmodell der Bewertungskompetenz entwickelt. Ziel der Operationalisierung von Kompetenzbereichen von ESNaS ist es, die Kompetenzen in einem Large-Scale-Assessment zu erfassen, wodurch das Gesamtbild ausgewählter Fähigkeiten einer großen Gruppe von Teilnehmenden gewonnen werden kann. Mit dem ESNaS-Modell wurde ein Kompetenzmodell erarbeitet, das es ermöglicht, Bewertungskompetenz unabhängig von den anderen drei in Deutschland für die naturwissenschaftlichen Fächer festgelegten Kompetenzbereichen Fachwissen, Erkenntnisgewinnung und Kommunikation zu testen. Gleichzeitig soll es fachübergreifend anwendbar sein, sodass Bewertungskompetenz in den Fächern Biologie, Chemie und Physik erfassbar wird (Hostenbach, 2011).

Das ESNaS-Kompetenzmodell setzt sich für alle Kompetenzbereiche aus den Dimensionen *kognitive Prozesse*, *Komplexität* und *Kompetenzteilbereiche* zusammen. Für den Kompetenzbereich *Bewertung* werden die Kompetenzteilbereiche noch weiter ausdifferenziert in *Bewertungskriterien*, *Handlungsoptionen* und *Reflexion*. Auf diese Weise entsteht durch die Kombination der drei Dimensionen ein dreidimensionales Kompetenzstrukturmodell.

### 2.1.3.4 Das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz

Das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz wurde von Eggert und Bögeholz (2006) in der Biologiedidaktik speziell für den Kontext nachhaltiger Entwicklung erarbeitet. Es beschreibt vier zentrale Teilkompetenzen der Bewertungskompetenz (Abbildung 1) (Eggert & Bögeholz, 2006).

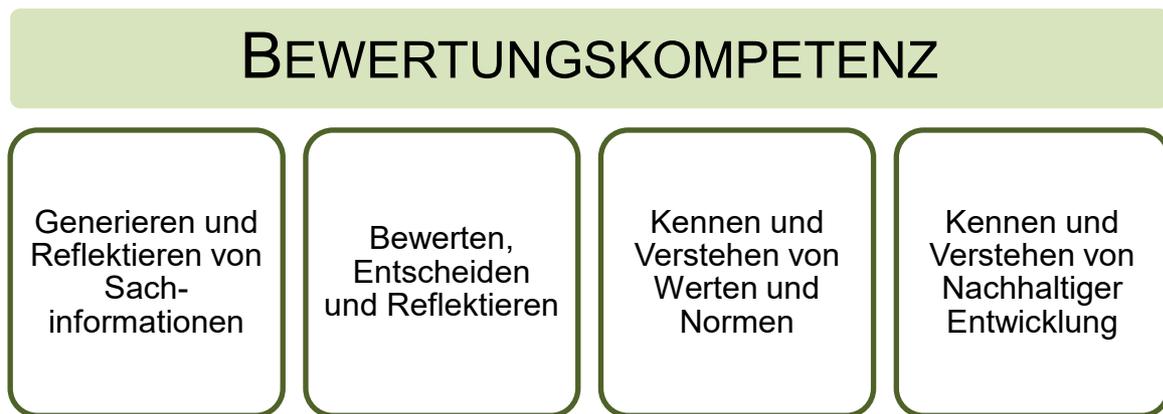


Abbildung 1: Göttinger Modell der Bewertungskompetenz nach Eggert und Bögeholz (2006)

Ordnet man die Teilkompetenzen den einzelnen Phasen im Rahmenmodell von Entscheidungsprozessen nach Betsch et al. (2011) zu, so findet sich die Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ in der präselektionalen Phase wieder. Das ist zunächst die Fähigkeit, eine Entscheidungssituation als solche zu identifizieren. Weiters soll sich die Entscheidungsträgerin oder der Entscheidungsträger geeignete Informationen beschaffen können, um mögliche Handlungsoptionen nennen zu können (Eggert & Bögeholz, 2006).

Die Aspekte, die die Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ behandelt, sind der selektionalen Phase des Rahmenmodells zuzuordnen. Die gefundenen Optionen sollen miteinander verglichen und gegeneinander abgewogen werden, um schließlich zu einer Entscheidung für eine Option zu gelangen. Dabei sollten Entscheidungsstrategien (zum Beispiel kompensatorische oder non-kompensatorische Entscheidungsstrategien) zur Anwendung kommen und erkannt werden, dass intuitives oder rechtfertigendes Entscheidungsverhalten alleine nicht ausreicht (Eggert & Bögeholz, 2006).

Der Entscheidungsprozess ist mit der Auswahl einer Handlungsoption aber noch nicht zu Ende. Der gesamte Prozess muss kritisch reflektiert werden (Eggert & Bögeholz, 2006).

Die beiden Teilkompetenzen „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ und „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ beschreiben relevante Aspekte im Bewertungsprozess. Die beiden zusätzlichen Teilkompetenzen „Kennen und Verstehen von Werten und Normen“ und „Kennen und Verstehen von Nachhaltiger Entwicklung“ beziehen sich eher auf spezifisches Wissen in angewandter Biologie. In anderen Kontexten als Nachhaltiger Entwicklung ist die Teilkompetenz „Kennen und Verstehen von Nachhaltiger Entwicklung“ dementsprechend durch das in dem jeweiligen Kontext geforderte Wissen auszutauschen. Das Göttinger Modell beschreibt keine Teilkompetenz, die der postselektionalen Phase zugeordnet werden könnte, weil eine Umsetzung der Handlungsoptionen im Kontext Schule meist nicht möglich ist. Weil sich die Fähigkeiten von Schülerinnen und Schülern in Entscheidungssituationen oft nur bis zur Formulierung einer Handlungsintention nachvollziehen lassen, ist dennoch gewährleistet, dass das Kompetenzmodell einen Rahmen für die Diagnose und Förderung von Bewertungskompetenz bietet (Eggert & Bögeholz, 2006).

#### **2.1.3.5 Vergleich der Kompetenzmodelle und Wahl eines Kompetenzmodells**

Die drei zur Wahl stehenden Modelle zur Bewertungskompetenz bauen auf dem Rahmenmodell für Entscheidungsprozesse nach Betsch et al. (2011) auf und scheinen auf den ersten Blick alle geeignet, um sie zur Operationalisierung des Kompetenzbereichs Bewertung im Rahmen der Unterrichtseinheit heranzuziehen. Welches der drei nun tatsächlich am besten konkret für die Unterrichtseinheit zu „Luftschadstoffen in Innenräumen“ geeignet ist, wird von mir danach entschieden, mit welcher Zielsetzung und für welche Kontexte sie entwickelt wurden.

Keines der infrage kommenden Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz wurde speziell in der Chemiedidaktik entwickelt. Das Modell zur ethischen Urteilskompetenz von Reitschert et al. (2007) und das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz von Eggert und Bögeholz (2006) wurden in der Fachdidaktik Biologie entwickelt, während das ESNaS-Modell von Hostenbach (2011) fächerübergreifend für alle drei naturwissenschaftlichen Fächer entwickelt wurde. Alle Modelle haben Besonderhei-

ten, und eignen sich damit nicht alle gleichermaßen gut, um sie zur Entwicklung einer Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ heranzuziehen.

Das ESNaS-Modell ist so konzipiert, dass sich die Bewertungskompetenz ganz klar von anderen Teilkompetenzen abgrenzen lässt. Die Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ ist daher im Bereich Erkenntnisgewinnung verortet. Das Identifizieren einer Entscheidungssituation und das Vergegenwärtigen des Wissensstandes sollen im Rahmen der Unterrichtseinheit gefördert werden und deshalb sollten diese Teilkompetenzen im Bereich Bewertung verortet werden können.

Auch die Teilkompetenz „Argumentieren“ wird nicht dem Bereich Bewertung zugeschrieben, sondern dem Bereich „Kommunikation“. Das ist im Hinblick auf die Entwicklung des ESNaS-Modells zwar sehr gut begründet, aber im Rahmen der Unterrichtseinheit sollte auch diese Teilkompetenz dem Bereich Bewertung zugeschrieben werden.

Die Übernahme von Perspektiven anderer und die Reflexion der eigenen Einstellung werden im Göttinger Modell und im Modell zur ethischen Urteilskompetenz als notwendig betrachtet. Im ESNaS-Modell wird Reflexion dem Entscheidungsprozess nachgelagert und als post-hoc-Reflexion des Prozesses betrachtet. Somit kann eine Reflexion im ESNaS-Modell keinen Einfluss auf den Bewertungsprozess haben (Sander, 2012).

In die nähere Auswahl kommen daher das Göttinger Modell und das Modell zur ethischen Urteilskompetenz.

Im Göttinger Modell steht zu Beginn des Bewertungsprozesses das „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“. Es eignet sich deshalb gut für naturwissenschaftlichen Unterricht im Allgemeinen und auch für die Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ im Speziellen. In diesem Modell wird die Informationsbeschaffung, die einen Teil der präselektionalen Phase im Rahmenmodell darstellt, explizit als Teilkompetenz formuliert. Auch dem Modell zur ethischen Urteilskompetenz liegt das Rahmenmodell von Entscheidungsprozessen zugrunde, die Beschaffung von Informationen stellt aber keine eigene Teilkompetenz dar.

Betrachtet man den Teilbereich „Generieren von Sachinformation“ nicht im Sinne von Erkenntnisse gewinnen durch die Durchführung geeigneter Untersuchungen, sondern als Genese von Sachinformationen, die aus der Literatur stammt, so kann man

davon ausgehen, dass es sich hierbei bereits um gefilterte Informationen handelt. Lediglich fachwissenschaftliche Originalliteratur kann als ungefilterte Information bezeichnet werden. Der Teilbereich „Reflektieren von Sachinformationen“ im Göttinger Modell setzt hier an. Jene Informationen, die zur Entscheidung im eigentlichen Bewertungsprozess herangezogen werden sollen, sollen im Teilbereich „Reflektieren von Sachinformationen“ vor dem Hintergrund ihres Zustandekommens kritisch hinterfragt werden. In diesem Schritt soll deutlich werden, dass sich Informationen einerseits aus dem Informationsgehalt und andererseits aus den Werten und Normen des Verfassers zusammensetzen.

Werte und Normen werden auch im Modell zur ethischen Urteilskompetenz berücksichtigt, allerdings liegt der Fokus hierbei auf dem Bewusstmachen der eigenen Einstellung, nicht auf dem Bewusstmachen der Einstellung des Verfassers der Informationen.

Das Thema der Unterrichtseinheit „Luftschadstoffe in Innenräumen“ ist ethisch weniger stark geladen. In dieser Hinsicht ist das Göttinger Modell besser geeignet, um Teilkompetenzen zu operationalisieren.

Für die Entwicklung der Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ soll daher das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz herangezogen werden.

Im Folgenden soll nun die didaktische Rekonstruktion als Rahmen für die Entwicklung der Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ vorgestellt werden.

## **2.2 Didaktische Rekonstruktion als Rahmen für die Entwicklung der Unterrichtseinheit**

Die Schülerinnen und Schüler sollen in der Unterrichtseinheit die Bewertung einer Problemsituation zu einem Thema erlernen, bei dem umfangreiches und fundiertes Fachwissen erforderlich ist, um den Inhalt so gut zu verstehen, dass am Ende eine reflektierte Entscheidung getroffen werden kann. Es muss daher zunächst die Komplexität und Abstraktheit der Sachverhalte auf das Wesentliche reduziert werden. Dieser Vorgang kann als didaktische Rekonstruktion beschrieben werden (Kattmann

et al., 1997; Streller et al., 2019). Sie umfasst die fachliche Klärung eines Themas, die Erfassung von Schülerinnen- und Schülerperspektiven zu einem Thema und die Konstruktion des Unterrichts (Kattmann et al., 1997).

## **2.3 Fachliche Klärung der fachchemischen Inhalte**

Als Schadstoffe werden chemische Elemente oder chemische Verbindungen bezeichnet, die „bei ihrer Einwirkung auf Organismen oder Ökosysteme deren Vitalität mindern oder sie zum Absterben bringen“ (Sauermost, 1999). Luftschadstoffe sind „Substanzen, die die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern“ (Brechner, 2001).

Durch die Verwendung von immer neuen Materialien nimmt die Anzahl der in Innenräumen nachgewiesenen Schadstoffe laufend zu. Gleichzeitig verbringen Menschen in Mitteleuropa den Großteil ihrer Zeit in Innenräumen, in Deutschland beispielsweise halten sich Erwachsene durchschnittlich 20 Stunden pro Tag in Innenräumen auf (Roßkamp, 2010). Diese Faktoren tragen dazu bei, dass der Großteil an Luftschadstoffen in Innenräumen aufgenommen wird (Tappler & Twardik, 2004).

Viele der Stoffe können sich nachteilig auf die Gesundheit auswirken. Das kann sich einerseits in Befindlichkeitsstörungen wie Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche oder Müdigkeit äußern, andererseits können einige Stoffe wie beispielsweise Pentachlorphenol, Radon oder polybromierte Diphenylether bei andauernder Exposition zu ernsthaften Erkrankungen führen (Tappler, 2018).

### **2.3.1 Schadstoffe in der Innenraumluft**

Mit zunehmender Erkenntnis der Auswirkungen von Innenraumluftqualität auf die Gesundheit des Menschen wurden seit Mitte der 1970er-Jahre von nationalen und internationalen Gesundheitsorganisationen Maßnahmen vorgeschlagen, wie eine Verbesserung der Raumluft erreicht werden kann (Birmili et al., 2018). Diese Maßnahmen lassen sich nach Birmili et al.(2018) in drei Kategorien einteilen:

- Empfehlungen zum Lüftungsverhalten
- Begrenzung der Emission schädlicher Stoffe aus Produkten
- Ableitung von Vergleichswerten für den Innenraum (Grenz-, Richt-, Leit- und Referenzwerte)

Die in Punkt 3 erwähnten Grenz-, Richt-, Leit- und Referenzwerte unterscheiden sich in ihrer rechtlichen Verbindlichkeit sowie in ihrer Bedeutung für die Gesundheit (Breuer et al., 2014). Grenzwerte sind im Gegensatz zu den Richt-, Leit- und Referenzwerten rechtlich verbindlich. Bezüglich ihrer gesundheitlichen Bedeutung weisen Grenz-, Richt- und Leitwerte eine toxikologische oder gesundheitlich-hygienische Begründung auf, wohingegen Referenzwerte nicht gesundheitlich begründet sind. Referenzwerte stellen lediglich eine statistische Zustandsbeschreibung dar (Breuer et al., 2014).

### 2.3.1.1 Grenz-, Richt- und Leitwerte

Zu den Grenzwerten zählen folgende Werte:

- **MAK-Wert (maximale Arbeitsplatz-Konzentration):**

Der MAK-Wert ist definiert als „die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes [...] am Arbeitsplatz [...], die im Allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt [...]“ (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015). MAK-Werte sollen die Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer vor einer Gesundheitsgefährdung durch gefährliche Stoffe schützen und geben daher den maximalen Durchschnittswert einer Stoffkonzentration über einen Arbeitstag hinweg an (Pflaumbaum, 2021). Der MAK-Wert ist ein toxikologisch begründeter Grenzwert (Schiele, 2006).

- **BAT-Wert (Biologischer Arbeitsstoff-Toleranz Wert):**

Dieser Wert wird festgelegt, um das individuelle Risiko bewerten zu können, das aus der Exposition gegenüber einem Arbeitsstoff hervorgeht. Er gibt jene arbeitsmedizinisch-toxikologisch abgeleitete Stoffkonzentration im biologischen Material an, bei der die Gesundheit eines Beschäftigten auch bei langfristiger Exposition nicht beeinträchtigt wird. Dabei werden auch die Metaboliten eines Stoffes im biologischen Material berücksichtigt (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015).

Der MAK- und BAT-Wert können nicht ohne Weiteres ineinander überführt werden bzw. können nicht von einem Wert Rückschlüsse auf den anderen gezogen werden, weil es am Arbeitsplatz neben der Aufnahme über die Atem-

wege noch andere Aufnahmemöglichkeiten gibt (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015).

- **TRK-Wert (Technische Richtkonzentrationen)**

TRK-Werte werden für Stoffe ermittelt, für die keine toxikologischen-arbeitsmedizinischen MAK-Werte festgelegt werden können, beispielsweise für krebserregende oder erbgutverändernde Stoffe. Der Grund dafür ist, dass Krebs und Mutationen erst nach Jahren oder Jahrzehnten bemerkbar werden, möglicherweise auch erst in zukünftigen Generationen. Die langfristige Einwirkung geringer Dosen solcher Stoffe kann zu Veränderungen führen, die in Tierversuchen nicht ermittelt werden können (Heinz, 2019). Unbedenkliche Toleranzwerte sind nicht ableitbar, die Stoffe sind in jeder Konzentration als gesundheitsschädlich anzusehen (Bundesarbeitskammer, 2021). Für diese Stoffe gilt ein Minimierungsgebot, es wird ein Wert festgelegt, der technisch basiert ist: Der TRK-Wert ist der Mittelwert eines Stoffes in der Luft, der nach aktuellem Stand der Technik erreicht werden kann. Er ist nicht toxikologisch begründet (Bundesarbeitskammer, 2021).

Seit 2005 die novellierte Gefahrstoffverordnung in Kraft getreten ist, werden die bisherigen MAK-, BAT- und TRK-Werte unter dem Begriff Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) geführt (Schiele, 2006).

Der Richtwert ist toxikologisch abgeleitet. Er kommt zustande, indem für nicht kanzerogene Stoffe und nicht initiierend wirkende kanzerogene Stoffe auf der Grundlage von Tierstudien zunächst zwei relevante Konzentrationen ermittelt werden: Jene Konzentration, bei der keine der Gesundheit abträgliche Wirkung beobachtet wird, der NOAEL-Wert (No Observed Adverse Effect Level) und die Konzentration, ab der erste gesundheitsschädigende Wirkungen festgestellt werden können, der LOAEL-Wert (Lowest Observed Adverse Effekt Level). Der LOAEL-Wert wird dann noch um Unsicherheitsfaktoren erhöht, um einerseits Unsicherheiten in der Datenlage und andererseits Risikogruppen (Kinder u. a.) miteinzubeziehen (Umweltbundesamt, 2007).

Der Leitwert wird gesundheitlich-hygienisch begründet, wobei der jeweilige aktuelle Kenntnisstand noch nicht ausreicht, um einen toxikologisch begründeten Richtwert festzulegen (VDI 6022 Blatt 3, 2011, zitiert nach Breuer et al., 2014, S. 358). Leitwer-

te werden zur Begrenzung der Konzentration von Stoffen festgelegt, von denen man aus praktischer Erfahrung weiß, dass sie mit zunehmender Konzentration negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben (Breuer et al., 2014).

Der Referenzwert ist nicht gesundheitlich begründet. Er leitet sich aus Messwerten einer Stichprobe nach einem vorgegebenen Verfahren ab. Der Wert ist ein rein statistisch definierter Wert, er beschreibt die Verteilung eines Stoffes in einem bestimmten Medium zum Zeitpunkt der Durchführung. Ein Referenzwert stellt die allgemein vorhandene Exposition gegenüber einem Stoff dar („Hintergrundbelastung“) (VDI 6022 Blatt 3, 2011, zitiert nach Breuer et al., 2014, S. 358).

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über mögliche Schadstoffe und deren Quellen im Innenraum gegeben werden, dabei wird zwischen Stoffen unterschieden, die vorwiegend in der Luft nachweisbar sind und jenen, die im Hausstaub nachweisbar sind.

### **2.3.1.2 Schadstoffe in der Raumluft**

In der Raumluft befinden sich anorganische Gase wie Kohlenstoffdioxid<sup>1</sup> (CO<sub>2</sub>), das als Endprodukt der Atmung Rückschlüsse auf die Nutzungsintensität zulässt. Es entsteht auch durch offene Flammen oder gelangt durch das Lüften in den Innenraum. Kohlenstoffmonoxid<sup>2</sup> (CO) wird bei unvollständigen Verbrennungen freigesetzt, beispielsweise durch Rauchen im Innenraum oder durch Feuerstellen. Kohlenstoffmonoxid kann auch durch das Lüften in verkehrsreichen Gebieten von außen in den Innenraum gelangen. Stickoxide<sup>3</sup> (NO<sub>x</sub>) können von außen in die Raumluft gelangen, genauso durch die Verwendung von Gasherden oder offenen Feuerstellen. Ozon<sup>4</sup> (O<sub>3</sub>) gelangt in erster Linie über Kopierer oder Laserdrucker in die Innenraumluft und im Sommer aus der Außenluft beim Lüften (Roßkamp, 2010).

Organische Verbindungen, die sich in der Raumluft befinden, nennt man flüchtige organische Verbindungen, kurz VOC (volatile organic compounds). Sie werden durch ihren Siedebereich zwischen 50 - 100°C und 240 - 260°C charakterisiert und können so von den leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VVOC – very volatile organic compounds), den schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC – semivolatile

---

<sup>1</sup> MAK-Wert: 9100 mg/m<sup>3</sup> (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015)

<sup>2</sup> MAK-Wert: 35 mg/m<sup>3</sup> (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015)

<sup>3</sup> MAK-Wert für NO<sub>2</sub>: 0,95 mg/m<sup>3</sup>, MAK-Wert für NO: 0,63 mg/m<sup>3</sup> (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015)

<sup>4</sup> krebserzeugend Kategorie 3B (Arbeitsstoff mit Verdacht auf krebserzeugende Wirkung) (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015)

organic compounds) und den staubgebundenen organischen Verbindungen (POM – particulate organic matter) unterschieden werden. Bei der Definition über den Siedebereich müssen immer auch die verfügbaren analytischen Methoden und die Probenahmetechnik berücksichtigt werden (Roßkamp, 2010), für jede Stoffklasse werden eigene Methoden der Präanalytik, der Probenaufbereitung und der chemischen Analyse verwendet. Zur Bestimmung des TVOC (total volatile organic compounds, die Summenkonzentration aller VOC) wird beispielsweise ein Thermodesorptions-Gaschromatografie/Massenspektrometrie-Verfahren (TD-GC/MS) angewendet (Birmili et al., 2018).

Zu den VOC zählen die meisten im Innenraum nachweisbaren organischen Stoffe. Sie gelten in öffentlichen Diskussionen meist als die wichtigste Innenraumbelastung, weil sie in nahezu jedem Innenraum in der Raumluft vorkommen. Der Grund dafür ist, dass sie hauptsächlich aus Quellen freigesetzt werden, die in Innenräumen zu finden sind (Roßkamp, 2010), beispielsweise aus Farben, Reinigungsmitteln, Klebstoffen oder Kunststoffbeschichtungen (Birmili et al., 2018).

### **2.3.1.3 Schadstoffe im Hausstaub**

Stoffe mit höherem Siedepunkt als dem der VOC akkumulieren vermehrt im Hausstaub. Zu diesen Stoffen zählen die schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC) und die staubgebundenen organischen Verbindungen (POM). Viele der SVOC, besonders Holzschutzmittel und polybromierte sowie polychlorierte Biphenyle, von denen einige als Flammschutzmittel Anwendung finden, zeichnen sich durch ihre toxischen Eigenschaften, ihre Bioakkumulierung und ihre Persistenz aus (Roßkamp, 2010).

### **2.3.2 Verwendung von Brom**

Brom wird in vielen Bereichen verwendet: In seiner elementaren Form wird es in der Wasseraufbereitung verwendet. Bromverbindungen werden außerdem als Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt, so zum Beispiel Brommethan (Riedel & Sonnenberg, 2019). Auch in der Medizin sind bromhaltige Verbindungen vertreten: Bromhexin und Ambroxol werden als schleimlösende Hustenmittel eingesetzt. Bromide werden als Schlaf-, Beruhigungs- und Narkosemittel verwendet (Riedel & Sonnenberg, 2019; Sicius, 2016). Elementares Brom findet in der Energiewirtschaft Anwen-

dung, beispielsweise in der Zink-Brom-Batterie (Riedel & Sonnenberg, 2019). In über 90 % der Elektrogeräte waren oder sind Bromverbindungen als Flammschutzmittel enthalten, außerdem in Kunststoffen, Textilien, Haushaltsgeräten und in der Wärmedämmung (Riedel & Sonnenberg, 2019).

### **2.3.3 Bromierte Flammschutzmittel**

Flammschutzmittel werden verschiedenen Materialien zugegeben, um sie schwer entflammbar zu machen. Das betrifft vor allem Materialien, die in Innenräumen verwendet werden, wie Textilien, Kunststoffe, Holzwerkstoffe oder Dämmmaterialien. Die Flammschutzmittel können den Produkten dabei entweder additiv beigemischt werden oder reaktiv in das Material eingebunden werden. In Kunststoffen fungieren Flammschutzmittel meist auch als Weichmacher, wie beispielsweise polybromierte Diphenylether oder polybromierte Biphenyle (Roßkamp, 2010).

Je nach ihrer chemischen Struktur lassen sich Flammschutzmittel in vier große Gruppen einteilen (Alaee et al., 2003):

- anorganische Flammschutzmittel
- halogenierte organische Flammschutzmittel
- organisch phosphorbasierte Flammschutzmittel
- stickstoffbasierte Flammschutzmittel

Bromierte Flammschutzmittel zählen zu den „high production volume (HPV) chemicals“, also denjenigen Chemikalien mit den größten jährlichen Produktionsmengen (Morf et al., 2007), 2005 betrug der Jahresverbrauch an bromierten Flammschutzmitteln in Europa 50.000 t (Hartmann, 2016). In bromierten Flammschutzmitteln ist die wichtigste Komponente der Verbindung Brom, weil von Brom die Flammschutzwirkung ausgeht. Dabei ist weniger wichtig, wie die Grundstruktur der Verbindung aussieht. Die einzigen Kriterien, die die Verbindung erfüllen muss, sind Stabilität über die Lebensdauer des gesamten Produktes und Kompatibilität mit dem jeweiligen Material. Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen aliphatischen, aromatischen und zyko-aliphatischen Verbindungen, in denen Brom die wichtigste Komponente darstellt (Alaee et al., 2003).

Die Gruppe der bromierten Flammschutzmittel ist sehr heterogen, sie lassen sich in insgesamt fünf Hauptklassen einteilen (Tabelle 4) (EFSA, 2021):

<b>Klasse</b>	<b>Häufige Verwendung</b>
<b>Hexabromcyclododecan (HBCDD)</b>	Wärmedämmung im Bauwesen
<b>Polybromierte Diphenylether (PBDE)</b>	Kunststoffe, Textilien, Gussteile für elektronische Anwendungen
<b>Tetrabrombisphenol A (TBBPA) und andere Phenole</b>	Leiterplatten, Thermoplaste (hauptsächlich in TV-Geräten)
<b>Polybromierte Biphenyle (PBB)</b>	Klein- und Haushaltsgeräte, Textilien, Schaumstoffe
<b>andere bromierte Flammschutzmittel</b>	

Tabelle 4: Einteilung der bromierten Flammschutzmittel in fünf Hauptklassen nach EFSA (2021)

### 2.3.3.1 Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel

Um zu verstehen, wie Flammschutzmittel wirken, muss man zunächst Verbrennungsprozesse näher betrachten. Eine Verbrennung ist eine Gasphasenreaktion, an der ein Brennstoff und Sauerstoff beteiligt sind. Der Prozess besteht aus vier Schritten: dem Vorheizen, dem Zersetzen oder Verflüchtigen, der Verbrennung und der weiteren Ausbreitung des Feuers (Troitzch, 1990, zitiert nach Alae et al., 2003). Der Brennstoff wird zunächst in einer endothermen Reaktion pyrolysiert. Dabei können brennbare Gase, flüssige Produkte und Radikale entstehen. In Kombination mit Luft entstehen daraus entzündbare Gasgemische, die in Gegenwart einer Flamme und Sauerstoff in einer exothermen Reaktion zu Verbrennungsprodukten reagieren. Die dabei frei werdende Wärme kann dann erneut die Pyrolyse von weiterem Brennstoff in Gang setzen. Flammschutzmittel können hierbei in jeden dieser vier Schritte eingreifen und den Verbrennungsprozess behindern. Eine sehr effektive Methode ist beispielsweise das Einfangen freier Radikale, die während des Verbrennungsprozesses entstehen. Durch Hitzezufuhr entstehen aus halogenierten Verbindungen Halogenradikale. Diese können mit anderen freien Radikalen, die im Zuge der Pyrolyse der Brennstoffe entstehen, gut reagieren und damit die Flammenausbreitung eindämmen (Alae et al., 2003; Bruce, 2011; Luerßen et al., 2015).

Iod, Brom, Chlor und Fluor sind nicht alle gleich gut für die Verwendung als Flamm- schutzmittel geeignet: Fluor-Verbindungen sind sehr stabil und zersetzen sich erst bei hohen Temperaturen. Das Halogenradikal steht deshalb zu spät zur Verfügung, um den Verbrennungsprozess zu behindern. Iodierte Verbindungen wiederum sind sehr instabil und zersetzen sich schon bei geringeren Temperaturen, was auch sie zu einem ineffizienten Flammenschutzmittel macht. Lediglich Brom und Chlor kommen als sinnvolle Halogenkomponenten in Flammenschutzmitteln infrage, wobei Brom ein wenig effizienter im Einfangen der Radikale ist und seine Verbindungen sich zudem bereits bei geringfügig niedrigeren Temperaturen zersetzen als dies bei Chlor und seinen Verbindungen der Fall ist. Aus diesem Grund werden bromierte Flamm- schutzmittel häufiger eingesetzt als chlorierte (Alaee et al., 2003). Der Anteil an bromierten Flamm- schutzmitteln betrug 2005 in Europa ca. 11 %, was 50 000 t entsprach (Hart- mann, 2016).

### **2.3.3.2 Vorteile bromierter Flammenschutzmittel**

Flammenschutzmittel zögern die Entzündung von brennbaren Materialien wie Kunst- stoffen, Holz oder Textilien hinaus und verlangsamen die Ausbreitung der Flammen. Auf diese Weise verhindern sie Brände gänzlich oder verlängern zumindest die Zeit zur Evakuierung von Gebäuden. In einem Vollbrand brennen jedoch auch mit bromier- ten Flammenschutzmitteln behandelte Materialien, dabei entstehen korrosive Brandga- se, Dioxine und Furane (Umweltbundesamt Deutschland, 2008). Vorteile bromierter Flamm- schutzmittel sind, dass sie einerseits kostengünstig sind und andererseits mit einer Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe kombinierbar sind. Die Verwendung bro- mierter Flammenschutzmittel stieg in der vergangenen Zeit daher kontinuierlich an (Hartmann, 2016; Umweltbundesamt Deutschland, 2008). Bromierte Flamm- schutzmittel werden vor allem in Elektro- und Elektronikgeräten verwendet, aber auch in Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen und Textilien (Umweltbundesamt Deutschland, 2008).

### **2.3.3.3 Verwendungszwecke bromierter Flammenschutzmittel**

HBCDD und PBDEs werden als additive Flammenschutzmittel in der Bauindustrie in Dämmstoffen aus Polystyrol verwendet. Man findet sie auch in Elektrogeräten, Mö- beln und Textilien, aber auch in Latex, Klebern und Farben. Polystyrol-Schaum wird in seiner granulierten Form in der Landwirtschaft und im Gartenbau zur Texturver-

besserung der Böden verwendet. Der Verbrauch in Europa lag im Jahr 2006 bei ca. 12 000 t HBCDD (Germer, 2008; Hartmann, 2016). TBBPA zählt zum meistproduzierten bromierten Flammschutzmittel, pro Jahr wird ein Volumen von ca. 145 000 t produziert (Hartmann, 2016). 90 % des produzierten TBBPAs werden als reaktives Flammschutzmittel in Epoxid- und Polycarbonatharzen und in der Polymerherstellung eingesetzt (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2011c). Man findet es in Computern und Computerzubehör, in Fernsehgehäusen, in Handys, Audiosystemen aber auch in Papier und Textilien (Alaee et al., 2003; Germer, 2008; Hartmann, 2016).

#### **2.3.3.4 Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt**

Der überwiegende Teil der bromierten Flammschutzmittel wird in der Elektronikbranche und der Bauindustrie benötigt. Einen geringeren Anteil macht der Verbrauch an bromierten Flammschutzmitteln in Textilien wie beispielsweise Matratzen, Möbeln und öffentlichen Transportmitteln aus. Die bromierten Flammschutzmittel konnten jedoch auch in Produkten nachgewiesen werden, denen sie nicht zugegeben wurden, wie beispielsweise Hygieneartikel. Außerdem wurden bromierte Flammschutzmittel bereits auf allen Kontinenten – auch in der Arktis – in verschiedenen Umweltkompartimenten nachgewiesen (Germer, 2008).

Der Eintrag in die Umwelt kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, beispielsweise durch Emissionen bei der Produktion und der Verarbeitung sowie bei der Entsorgung der mit den bromierten Flammschutzmitteln versehenen Materialien. Die genauen Wege des Eintrages in die Umwelt sind bis heute aber noch nicht ausreichend untersucht (Hartmann, 2016). Beim Recycling der Materialien ist es außerdem möglich, dass die bromierten Flammschutzmittel im Nachfolgeprodukt nachweisbar sind (Germer, 2008; Jandric et al., 2020).

Zur Verbreitung auf der ganzen Erde trägt der Ferntransport durch globale Luftströme bei. Einige der bromierten Flammschutzmittel sind bioakkumulativ und in der Umwelt persistent, sie können in Bereichen wie Böden, Stäuben, Sediment, Klärschlamm und unterschiedlichen Tierarten nachgewiesen werden (Hartmann, 2016). In tierischen Lebewesen können sie aufgrund ihrer lipophilen Eigenschaften besonders gut im Fettgewebe angereichert werden. Bei der Untersuchung der Bioak-

kumulation wird ein besonderes Augenmerk auf die über die Jahre steigenden Konzentrationen in den Proben gelegt (de Wit, 2002).

Bromierte Flammschutzmittel können zwar nicht besonders gut abgebaut werden, unterschiedliche biotische und abiotische Prozesse unter bestimmten Bedingungen führen aber dazu, dass die Stoffe in andere Verbindungen umgewandelt werden, die toxisch wirken können (Hartmann, 2016).

In vielen Fällen ist das Abbauverhalten der Stoffe noch nicht ausreichend untersucht (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2011b; Hartmann, 2016).

### **2.3.3.5 Risiken bromierter Flammschutzmittel für den Menschen**

Eine Risikobewertung sollte nicht nur alleine das Vorkommen von Innenraumschadstoffen berücksichtigen, sondern zudem auch die Wege, wie diese in den menschlichen Körper gelangen können (Birmili et al., 2018).

Bromierte Flammschutzmittel können über unterschiedliche Expositionswege in den menschlichen Körper gelangen: über Wasser, Lebensmittel, Hausstaub, Innenraumluft oder Muttermilch. Die Hauptaufnahmekategorie stellt die Ernährung dar, weil es durch die Bioakkumulation in unterschiedlichen Lebewesen zu einer Anreicherung der Stoffe in der Nahrungskette kommt. So sind bromierte Flammschutzmittel beispielsweise in tierischen Lebensmitteln wie Milch, Fleisch oder Fisch und deren Erzeugnissen nachweisbar (Hartmann, 2016). In vielen Fällen ist aber die Exposition nicht allein durch die Nahrung zu erklären, es konnte gezeigt werden, dass eine erhöhte Belastung mit PBDEs mit den Konzentrationen an PBDEs im Hausstaub korreliert (Germer, 2008). Es spielt deshalb neben der Aufnahme der Stoffe über die Nahrung auch die Innenraumluft eine große Rolle (Morf et al., 2007).

Im Rahmen dieser Arbeit soll vor allem die Aufnahme über die Innenraumluft und über den Hausstaub im Vordergrund stehen, weil die Unterrichtseinheit auf Luftschadstoffe im Innenraum fokussiert. Die Aufnahme von Hausstaub über die Verdauungsorgane stellt dabei die wichtigere Aufnahmequelle dar, nicht dessen Inhalation (Koch, 2015). Bromierte Flammschutzmittel sind im Hausstaub in höheren Konzentrationen nachweisbar als in der Innenraumluft, weil bromierte Flammschutzmittel zur Gruppe der schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC) zählen (Roßkamp, 2010).

Erwachsene nehmen im Durchschnitt 50 mg Hausstaub pro Tag auf, Kleinkinder sogar bis zu 200 mg. Im Fall von Hexabromcyclododecan (HBCD) entspricht das beim Erwachsenen einer Aufnahmemenge von 328,7 ng/Tag und beim Kleinkind 1473,1 ng/Tag. Für Kinder stellt die Aufnahme des Hausstaubes über die Verdauungsorgane die Hauptaufnahmemenge von HBCD dar (Koch, 2015).

Die Wirkung der bromierten Flammschutzmittel im menschlichen Körper ist vielfältig. Viele bromierte Flammschutzmittel werden im Gastrointestinaltrakt absorbiert und reichern sich im Fettgewebe an. Neben dem eigentlichen Fettgewebe reichern sich bromierte Flammschutzmittel im menschlichen Körper vor allem in den fetthaltigeren Organen wie der Nebenniere, der Leber, den Eierstöcken, der Lunge und dem Gehirn an. Sie sind außerdem im Blut und in der Muttermilch nachweisbar. Eine Ausscheidung ist neben der Muttermilch über den Fäzes und in sehr geringem Ausmaß über den Urin möglich. Die Stoffe haben im menschlichen Organismus Auswirkungen auf das endokrine System, das Nervensystem, das Immunsystem und die Leberfunktionen. Für viele der bromierten Flammschutzmittel wird außerdem vermutet, dass sie die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und ungeborene Kinder im Mutterleib und gestillt werdende Säuglinge schädigen. Im Tierversuch mit Ratten konnte eine Erhöhung der Sterblichkeit der Ratten während der Säuglingsphase beobachtet werden. Einige der bromierten Flammschutzmittel stehen im Verdacht, persistent, bioakkumulativ und toxisch zu wirken. In vielen Fällen liegen noch nicht ausreichend Daten zur Risikoeinstufung vor. Es besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf, um die Wissenslücken und Unsicherheiten zu verringern (ECHA - European Chemicals Agency, 2021, 2021a; EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2011a, 2011b, 2011c; Germer, 2008; Hartmann, 2016).

Ein weiteres Risiko, das von bromierten Flammschutzmitteln ausgeht, kommt erst bei einem Brand zum Tragen: Im Brandfall (oder bei unkontrollierter Entsorgung der Materialien) haben stark halogenhaltige Verbindungen ein erhöhtes Potenzial, korrosive Brandgase und Dioxine und Furane zu bilden (Umweltbundesamt Deutschland, 2008).

#### **2.3.3.6 „Emerging“ und „novel“ bromierte Flammschutzmittel**

Diejenigen bromierten Flammschutzmittel, die zurzeit nur unzureichend untersucht sind, lassen sich in zwei Gruppen teilen: in „emerging“ und in „novel“ bromierte

Flammschutzmittel. Emerging (engl.: *neu auftretende*) und novel (engl.: *neuartige*) bromierte Flammschutzmittel bezeichnen Flammschutzmittel für die ein besonders wissenschaftliches Interesse besteht, weil es noch Wissenslücken zu deren physikalisch-chemischen Eigenschaften, Stabilität und Reaktivität, Produktionsvolumina, Verwendung, Vorkommen, Exposition und Toxizität gibt. Dieser Umstand führt außerdem dazu, dass in einigen Fällen eine klare Identifizierung des Stoffes nicht möglich ist, weil es noch an den spezifischen analytischen Methoden fehlt (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2012; Hartmann, 2016).

Neu auftretende („emerging“) bromierte Flammschutzmittel werden definiert als Chemikalien, die als Flammschutzmittel verwendet werden und bereits in unterschiedlichen Umweltkompartimenten wie Wildtieren, Lebensmitteln oder im menschlichen Körper detektiert wurden (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2012).

Neuartige („novel“) bromierte Flammschutzmittel werden definiert als Chemikalien, die als Flammschutzmittel verwendet werden und in Materialien in Konzentrationen über 0,1 % detektiert wurden, jedoch nicht in Umweltkompartimenten wie Wildtieren, Lebensmitteln oder im menschlichen Körper (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2012).

Das CONTAM Panel (EFSA Panel on contaminants in the food chain) hat bisher Informationen über 27 bromierte Flammschutzmittel gesammelt, von denen 17 als neu auftretende („emerging“) und 10 als neuartige („novel“) bromierte Flammschutzmittel identifiziert wurden. Es ist noch keine vollständige Risikobeschreibung der Stoffe möglich, weil die Datenlage zu Vorkommen, Exposition und Toxizität der Stoffe unvollständig ist. Einige der neu auftretenden und neuartigen bromierten Flammschutzmittel konnten aber als potentiell gesundheitsgefährdend, genotoxisch und karzinogen identifiziert werden und sollten deshalb in Zukunft in Untersuchungen besonders berücksichtigt werden (EFSA, 2021; EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), 2012).

### **2.3.3.7 Entsorgung und Recycling**

Der Verbrauch an kontrovers diskutierten Chemikalien, darunter auch bromierte Flammschutzmittel, nimmt kontinuierlich zu. Bromierte Flammschutzmittel werden zahlreichen Gegenständen des täglichen Gebrauchs zugesetzt, die nach Ge-

brauchsdauer in der Abfallwirtschaft landen. An dieser Stelle spielt das Schadstoffmanagement eine wichtige Rolle. Ein großes Problem ist, dass Recyclingprozesse, trotz großer Vorteile für die Schonung von Primärressourcen, den Nachteil haben, dass sie kritische Stoffe nicht oder nur sehr schlecht unschädlich machen oder aufkonzentrieren können. Hinzu kommt, dass im Zuge der Recyclingprozesse, besonders von halogenierten Verbindungen, unerwünschte Metaboliten entstehen und in die Umwelt entweichen können (Morf et al., 2007).

Der Einsatz von bromierten Flammschutzmitteln erschwert den Recyclingprozess von Kunststoffen aus Elektroaltgeräten, ist aber gerade in diesen Geräten besonders notwendig, weil stromführende Bauteile schnell Wärme entwickeln können und damit eine Brandgefahr nie gänzlich ausgeschlossen werden kann. Weil Kunststoffe aus Elektroaltgeräten bromierte Flammschutzmittel enthalten können und es keine Abnehmer für sie gibt, werden Kunststoffe aus Elektroaltgeräten in Österreich kaum recycelt, sondern meistens thermisch verwertet. Der Grund dafür, dass Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, nicht recycelt werden, ist der, dass sie die Qualität der jeweiligen Rezyklate mindern. Um deren Qualität zu erhöhen, werden Materialien, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, daher vom Recyclingprozess ausgeschlossen. Weil es bis heute eine Schwierigkeit darstellt, bromhaltige Kunststoffe rasch und kostengünstig zu identifizieren, werden zurzeit mehr Kunststoffe aus Elektroaltgeräten vom Recycling ausgeschlossen, als eigentlich nötig, denn nicht alle enthalten bromierte Flammschutzmittel (Jandric et al., 2020).

#### **2.3.3.8 Alternativen zu bromierten Flammschutzmitteln**

Fast alle Flammschutzmittel, die als besonders problematisch eingestuft werden, gehören zur Gruppe der halogenierten Flammschutzmittel. Das Umweltbundesamt Deutschland empfiehlt an deren Stelle halogenfreie Flammschutzmittel oder den Einsatz anderer Werkstoffe, deren Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit ausreichend untersucht sind. Zudem sollten bei der Produktherstellung und bei der Entsorgung keine Risiken für Umwelt oder Gesundheit entstehen (Umweltbundesamt Deutschland, 2008).

In den Gehäusekunststoffen und Kleinteilen von Elektro- und Elektronikgeräten können anstatt bromierter Flammschutzmittel halogenfreie organische Phosphorverbindungen verwendet werden. Dafür müssen aber die verwendeten günstigen Kunst-

stoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und High Impact Polystyrol (HIPS) gegen teurere schwerer entflammbare Mischungen dieser Kunststoffe mit Polycarbonat (PC) oder Polyphenylether (PPE) ersetzt werden. Für Polyesterkunststoffe oder Kunststoffe aus Polyamid sind auch Ersatzflammschutzmittel wie Magnesiumhydroxid, mikroverkapselter roter Phosphor oder organische Phosphate geeignet (Umweltbundesamt Deutschland, 2008).

In Textilien bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, um den Einsatz bromierter Flammschutzmittel zu verringern: Man kann Zellulose- und Polyesterfasern mit reaktiven Flammschutzmitteln auf Phosphorbasis versetzen oder nicht brennbare Glasfasern zur Herstellung der Fasern verwenden. Eine weitere effektive Möglichkeit ist es, Intumeszenz-Systeme einzusetzen. Die intumeszenten Materialien schwellen im Brandfall an und bilden auf diese Weise Sperrschichten, die die Flammen aufhalten können (Umweltbundesamt Deutschland, 2008).

Eine Alternative für HBCDD in Dämmmaterialien stellen Mineralwolle, Schaumglas, Blähton und Dämmmaterialien, die auf Holzfasern, Holzspänen, Zellulose oder Hanf basieren, dar. In Textilien ist es möglich, Stoffe aus schwer entflammbaren Fasermaterialien wie Polyamiden oder Glasfasern zu verwenden (Hartmann, 2016).

### **2.3.3.9 Gesetzliche Beschränkungen und Umweltlabels**

Aufgrund ihrer teilweise schädigenden Eigenschaften auf Mensch und Umwelt wurde die Verwendung einiger bromierter Flammschutzmittel eingeschränkt bzw. verboten. Folgende nationale und internationale Gesetzgebungen spielen dabei eine Rolle:

- REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)
- POP-Verordnung (POP = Persistent Organic Pollutants)
- RoHS (Restriction of certain Hazardous Substances) Richtlinie
- WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) Richtlinie

Einige Gütesiegel wie das Österreichische Umweltzeichen, das Europäische Umweltzeichen, der Blaue Engel oder Ökotex enthalten Vergabekriterien, die unter anderem das Vorkommen von halogenierten Flammschutzmitteln in unterschiedlichen Produkten und Produktgruppen berücksichtigen.

Eine ausführlichere Beschreibung der erwähnten Gesetzgebungen und Gütesiegel findet sich im Anhang 1 beziehungsweise im Anhang 2.

### **2.3.4 Verortung der fachchemischen Inhalte im aktuellen Lehrplan**

Die Unterrichtseinheit ist für den Einsatz in der AHS-Oberstufe konzipiert, die Inhalte der Unterstufe werden vorausgesetzt. Die Schülerinnen und Schüler sollten außerdem bereits wissen, was freie Radikale sind und wie diese reagieren, um die Wirkung von halogenierten Flammschutzmitteln verstehen zu können.

Die Unterrichtseinheit kann dann im 6. Semester (7. Klasse) durchgeführt werden, wo Schülerinnen und Schüler aus der Inhaltsdimension des Kompetenzmodells für Chemie zum „Umgang mit Materie“ „Potentielle Risiken am Beispiel ausgewählter Stoffe benennen“ und die „Entstehung und Wirkung von Schadstoffen beschreiben“ können sollen. Zusätzlich sollen die Schülerinnen und Schüler Kompetenzen aus der Handlungsdimension des Kompetenzmodells für Chemie aufbauen: Sie sollen aus unterschiedlichen Quellen fachspezifische Informationen entnehmen“ und „Entscheidungen in gesellschaftlich relevanten Fragen aus naturwissenschaftlicher Sicht begründen und bewerten“ können. (*Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 107; Kern et al., 2017*).

Chemieunterricht in der AHS-Oberstufe soll außerdem „über die Schule hinaus die Eigenständigkeit und Eigenverantwortung beim Erwerb von Wissen und Kompetenzen wie Teamfähigkeit, Problemlösekompetenz und Kommunikationsfähigkeit mit Expertinnen und Experten“ fördern (*Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021, S. 106*).

## **2.4 Bewertungsstrukturwissen**

Voraussetzung für die Auswahl einer angemessenen Entscheidungsstrategie ist Wissen über die Struktur von Bewertungs- und Entscheidungssituationen, sogenanntes Metastrategiewissen oder Bewertungsstrukturwissen (Eggert & Bögeholz, 2006).

Bewertungsstrukturwissen definieren Bögeholz et al. (2004) als „Strategiewissen über Verfahren zur Bewertung von Handlungsoptionen. Es umfasst zum Beispiel Kompetenzen zur Auswahl, Gewichtung und Verknüpfung von Entscheidungskriterien. Bewertungsstrukturwissen ist erforderlich, um mit der doppelten Komplexität –

bestehend aus faktischer und ethischer Komplexität – umzugehen, die vielen Gestaltungsaufgaben Nachhaltiger Entwicklung zugrunde liegt.“ (Bögeholz et al., 2004, S.101).

Es konnte gezeigt werden, dass Schülerinnen und Schüler ohne Bewertungsstruktur- bzw. Metastrategiewissen große Probleme damit haben, an Entscheidungsprozesse systematisch heranzutreten. Vielmehr wird in solchen Situationen intuitiv oder rechtfertigend entschieden (Eggert & Bögeholz, 2006).

Dem Metastrategiewissen sind nach Sander (2012) und Bögeholz et al. (2004) Verfahren zur Bewertung zuzuordnen, die im Kapitel „Rahmenmodell von Entscheidungsprozessen“ bereits als Entscheidungsstrategien angesprochen wurden (Sander, 2012).

Beim Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ ist nicht davon auszugehen, dass alle Optionen der Entscheidungssituation bekannt sind. Das ist im Rahmen von realen Entscheidungssituationen nur sehr selten der Fall. Die Entscheidungsstrategien, die den Schülerinnen und Schülern im Rahmen der Unterrichtseinheit zur Bewertungskompetenz deshalb eingangs nähergebracht werden sollen, sind die non-kompensatorischen und die kompensatorischen Entscheidungsstrategien.

Non-kompensatorische und kompensatorische Entscheidungsstrategien stellen die beiden Hauptstrategien dar, zusätzlich soll auch die Möglichkeit einer Mischform dieser beiden sowie intuitives Entscheiden angesprochen werden. Dabei soll deutlich gemacht werden, dass die Verwendung der Mischform und der intuitiven Entscheidung in bestimmten Situationen durchaus berechtigt sein kann. Es ist außerdem nicht immer die rationale Abwägung, die letzten Endes die Entscheidung (vor allem Entscheidungen im Alltag betreffend) ausmacht. Sehr oft laufen intuitive Entscheidungsprozesse den rationalen Entscheidungsprozess begleitend ab (Menthe & Düker, 2017).

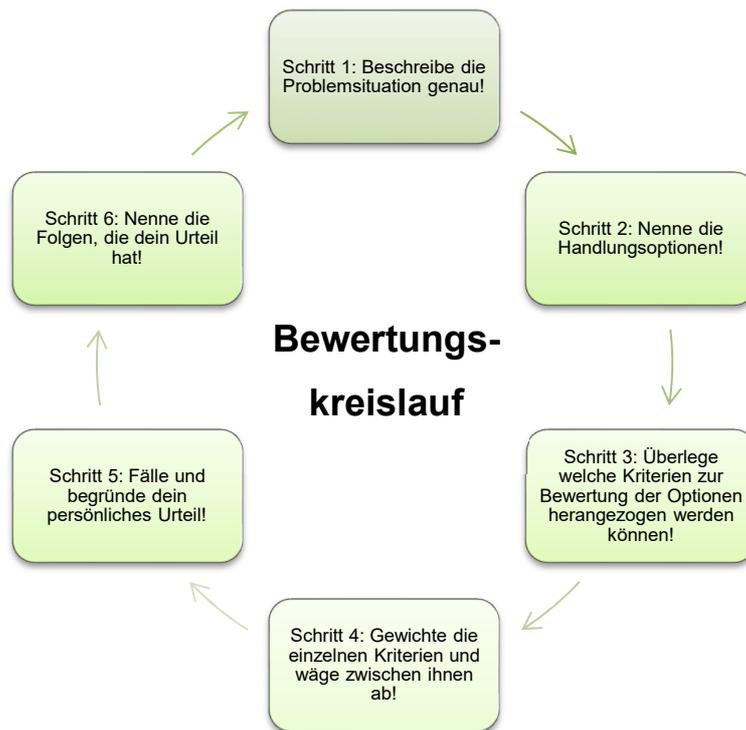
Als Hilfestellung während des gesamten Bewertungsprozesses soll den Schülerinnen und Schülern ein in der Physikdidaktik entwickelter Bewertungskreislauf dienen, der im Folgenden vorgestellt wird.

## **2.5 Der Bewertungskreislauf als Hilfestellung für kompensatorisches Bewerten**

Knittel (2013) hat einen Bewertungskreislauf entwickelt, der Lernenden helfen kann, einen Überblick über die einzelnen Schritte in einem Bewertungsprozess zu bekommen (Abbildung 2). Er umfasst 6 Schritte:

1. Eine genaue Beschreibung der Problemsituation
2. Das Nennen von Handlungsoptionen
3. Das Überlegen von Kriterien, die zur Bewertung der Optionen herangezogen werden können
4. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien und das Abwägen zwischen ihnen
5. Das Fällen und das Begründen eines persönlichen Urteils
6. Das Nennen der Folgen, die das gefällte Urteil hat

Der Bewertungskreislauf ist bewusst als geschlossener Kreislauf dargestellt, weil dadurch symbolisiert wird, dass ein Bewertungsprozess mehrmals durchlaufen werden kann. Wenn der oder die Entscheidende merkt, dass die Folgen des gefällten Urteils (Schritt 6 des Bewertungskreislaufes) nicht erstrebenswert sind, wird der Bewertungskreislauf erneut durchlaufen und ein neues Urteil gefällt werden müssen.



**Abbildung 2: Bewertungskreislauf nach Knittel (2013)**

Bei der Entwicklung von erfolgreichem Unterricht ist es notwendig, dass im Zusammenhang mit Lehrinhalten mit Alltagsbezug immer auch die bestehenden Assoziationen der Schülerinnen und Schüler mitberücksichtigt werden (Menthe, 2012). Das für die Unterrichtseinheit gewählte Thema hat zwar hohe Alltagsrelevanz, wurde aber im Unterricht bisher nicht thematisiert. Es wurde daher eine Erhebung der Schülerinnen- und Schülerassoziationen zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ durchgeführt.

## 3 Methodisches Vorgehen

### 3.1 Erhebung der Assoziationen von Schülerinnen und Schülern zum Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“

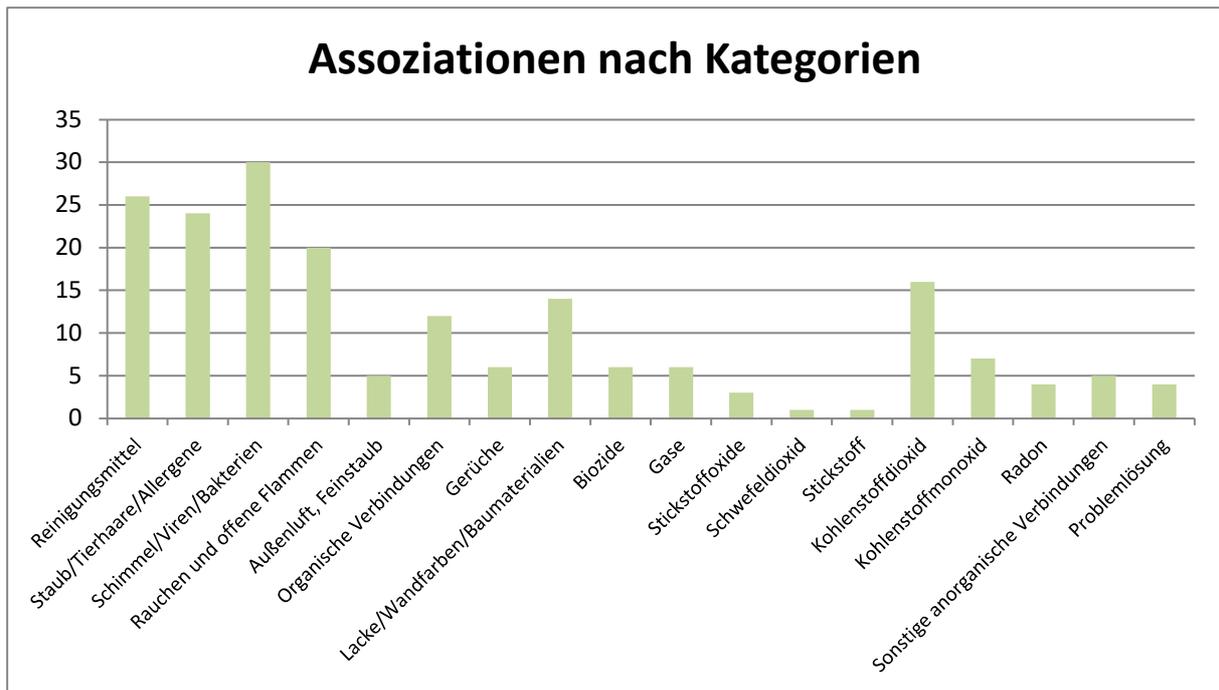
Eine Assoziation bezeichnet den *„Vorgang des Erinnerns und Bewusstwerdens. Das Auftreten neuer Ideen, Vorstellungen oder Gedächtnisinhalte, die mit den ursprünglichen nach bisher nicht eindeutig bestimmbar Regeln verknüpft sein können, beispielsweise nach Kriterien der Ähnlichkeit, der räumlichen oder zeitlichen Nähe“* (Tewes & Wildgrube, 1999, S. 37).

Um feststellen zu können, inwiefern bereits Schülerinnen- und Schülerassoziationen zum Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ vorhanden sind, wurden diese zunächst erhoben. Die Erhebungen erfolgten in der 2. Klasse einer HTL und in der 7. Klasse einer AHS ohne naturwissenschaftlichen Schwerpunkt. Insgesamt haben sich 36 Schülerinnen und Schüler an den Erhebungen beteiligt.

Den Teilnehmenden wurde dazu ein Blatt Papier ausgeteilt, in dessen Mitte der Begriff „Schadstoffe in der Innenraumluft“ zu lesen war. Sie wurden daraufhin gebeten, alles zu notieren, was ihnen zu diesem Thema einfiel.

Ziel der Assoziationsaufgabe war es, Assoziationen der Teilnehmenden zum Thema zu erfahren (vgl. Gawronski & Conrey, 2004). Die Aufgabenstellung wurde daher sehr offen gestaltet und das Layout des Aufgabenblattes schlicht gehalten.

Im Zuge der Auswertung der Erhebung wurden Kategorien gebildet, denen die zu meist stichwortartig gegebenen Antworten zugeteilt wurden. Auf diese Weise wurden 190 Stichwörter 18 Kategorien zugeordnet (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Schülerinnen- und Schülerassoziationen zum Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ wurden einzelnen Kategorien zugeordnet.**

17 der 18 Kategorien umfassen unterschiedliche Schadstoffquellen, eine Kategorie umfasst jene Assoziationen, die sich mit der Lösung des Problems der Innenraum-schadstoffe befassen.

Es fällt auf, dass am häufigsten Begriffe mit dem Thema „Schadstoffe in der Innen-raumluft“ in Verbindung gebracht wurden, die sich der Kategorie „Schimmel, Viren und Bakterien“ zuordnen lassen. Ob und in welchem Ausmaß die Corona-Pandemie hierzu beigetragen hat, geht aus der Erhebung nicht hervor.

An den nächsten Stellen rangieren die Kategorien „Reinigungsmittel“, „Staub, Tierhaare und Allergene“ und „Rauchen und offene Flammen“ als Quellen von Innen-raumschadstoffen.

Des Weiteren wurden mehrmals die Begriffe „Kohlenstoffdioxid“, „Lacke und Wandfarben“ und „Organische Verbindungen“ genannt.

Die Erhebung wurde in einem digitalen Setting durchgeführt, weshalb die Verwen-dung von Nachschlagewerken nicht ausgeschlossen werden kann.

Was deutlich aus der Erhebung hervorgeht, ist, dass Schadstoffe in der Innenraum-luft nicht mit bromierten Flammenschutzmitteln assoziiert werden.

Nachdem im Sinne der didaktischen Rekonstruktion die fachliche Klärung erfolgt ist und Assoziationen von Schülerinnen und Schülern erhoben wurden, folgt nun die didaktische Strukturierung und die Konstruktion der Unterrichtseinheit.

## **3.2 Didaktische Strukturierung**

Bei der didaktischen Strukturierung werden die wissenschaftlichen Vorstellungen und die Schülerinnen- und Schülerperspektiven in Beziehung gesetzt, um daraus eine Unterrichtseinheit zu entwickeln. Im Rahmen von Unterricht werden auch fachübergreifende Bezüge und kontroverse Auffassungen berücksichtigt, die von Forschenden in Fachwissenschaften nicht immer mitgeteilt werden. Aus diesem Grund werden die fachlich beschriebenen Sachverhalte im Unterricht stärker in umweltliche, gesellschaftliche und individuelle Zusammenhänge eingebettet als im wissenschaftlichen Bereich. Am Beispiel der entwickelten Unterrichtseinheit bedeutet das, dass es nicht ausreicht, bromierte Flammenschutzmittel anhand eines einzelnen Aspektes (beispielsweise die Effizienz als Flammenschutzmittel oder die Akkumulation in der Nahrungskette) zu bewerten. Vielmehr sollten alle diese Aspekte in einen Zusammenhang gebracht werden. Dadurch weist der didaktisch aufbereitete Gegenstand ein höheres Komplexitätslevel auf als der fachwissenschaftliche Gegenstand (Kattmann et al., 1997).

## **3.3 Darstellung der Entwicklung der Lerngelegenheit und der Unterrichtsmaterialien**

### **3.3.1.1 Lehrziele**

Die Lehrziele wurden auf Basis des Göttinger Modells der Bewertungskompetenz ausgearbeitet. Der Fokus soll dabei auf den beiden Teilkompetenzen „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ und „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ liegen.

Im naturwissenschaftlichen Kompetenzmodell für die AHS-Oberstufe (Kern et al., 2017; *Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021, 2021*) lassen sich die einzelnen Lehrziele folgenden Handlungsdimensionen zuordnen:

## **1) Wissen organisieren: Recherchieren, Darstellen, Kommunizieren**

Schülerinnen und Schüler können aus den zur Verfügung gestellten Quellen fachspezifische Informationen zu Flammenschutzmitteln, deren Eigenschaften und deren Vor- und Nachteilen entnehmen und in einer übersichtlichen Form darstellen (Teilkompetenz „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“).

Schülerinnen und Schüler können anhand der zur Verfügung gestellten Informationen zu bromierten Flammenschutzmitteln fachlich korrekt beschreiben, welcher Nutzen für die Gesellschaft und welche Risiken für Mensch, Natur und Umwelt von bromierten Flammenschutzmitteln ausgehen (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

## **2) Konsequenzen ziehen: Bewerten, Entscheiden, Handeln**

Schülerinnen und Schüler kennen den Bewertungskreislauf und die beiden Bewertungsstrategien (kompensatorische und non-kompensatorische Bewertungsstrategie), deren Mischform und die intuitive Bewertung und können Beispiele für deren Anwendung nennen (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler können zur Verfügung gestellte Bewertungskriterien kritisch reflektieren, anhand derer der Einsatz von Flammenschutzmitteln bewertet werden kann (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler legen fest, welches Gewicht sie den Bewertungskriterien zur Bewertung von Flammenschutzmitteln zuweisen und können ihren Standpunkt begründen (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler können bromierte Flammenschutzmittel anhand der zuvor aus den Informationstexten entnommenen, übersichtlich dargestellten Informationen in jedem der zur Verfügung gestellten Bewertungskriterien bewerten (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler können anhand der Gewichtung und der Bewertung die Vor- und Nachteile der Verwendung von bromierten Flammenschutzmitteln gegeneinander abwägen und auf diese Weise zu einem Gesamturteil gelangen (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler können ihren persönlichen Entscheidungsprozess kritisch reflektieren, indem sie jeden Teilschritt begründen können (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

Schülerinnen und Schüler können begründen, warum die von diversen Agenturen durchgeführten Warentests nicht generell als objektiv zu sehen sind (Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“).

## Unterrichtsverlaufsplan der Unterrichtseinheit zu „Schadstoffen in der Innenraumluft“

Dauer	Unter- richts- phase	Inhalt, roter Faden	SchülerInnenaktivität	LehrerInnenaktivität	Sozialform/ Methode	Medien
4 min	Ein- stiegs- phase	Aktivierung des Vorwissens der Schülerinnen und Schüler zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ durch ein einführendes Unterrichtsgespräch	Beteiligen sich am Unterrichtsgespräch	Anregung des Unterrichtsgesprächs	Unterrichtsgespräch	
6 min		Hinführung zum Thema: Lehrperson legt die Kontroverse mit Hilfe eines Einführungstextes im Überblick dar	Lesen und Zusammenfassen des Einführungstextes zu bromierten Flammenschutzmitteln, Formulieren von drei Fragen zum Text	Steuerung des Gesprächs, Schriftliches Festhalten der von den SuS formulierten Fragen zum Einführungstext	Unterrichtsgespräch	Einführungstext zu bromierten Flammenschutzmitteln
4 min		Vertiefung des Zuganges zur Kontroverse durch Lesen von vier Zeitungsartikeln und Auffinden passender Überschriften	Lesen von vier Zeitungsartikeln in Einzelarbeit	Einteilung der Gruppen, Austeilen der Zeitungsartikel	Einzelarbeit	Zeitungsartikel 1 - 4
9 min		Finden von passenden Überschriften in Kleingruppen, Zusammenfassen des Artikels und Vorlesen der gefundenen Überschrift vor der Klasse	Begleitung der Arbeitsphase	Gruppenarbeit	Zeitungsartikel 1 - 4	
6 min		Einleitung der Erarbeitungsphase: Diskussion, ob bromierte Flammenschutzmittel weiter verwendet werden sollten	Beteiligung an der Diskussion	Anregung und Steuern der Diskussion	Diskussion im Plenum	
3 min		Ar- beits- phase	Vorstellung der Entscheidungsstrategien durch die Lehrperson		Vorstellung der Entscheidungsstrategien, Austeilen der Arbeitsblätter	Lehrervortrag

5 min		Finden von Alltagsbeispielen durch die SuS	Bearbeiten des Arbeitsblattes 1 zu Entscheidungsstrategien	Begleitung der Arbeitsphase	Einzelarbeit anschließend Gespräch im Plenum	Arbeitsblatt 1
3 min		Vorstellung des Bewertungskreislaufes als Hilfsmittel der kompensatorischen Entscheidungsstrategie		Vorstellen des Bewertungskreislaufes	Lehrervortrag	Bewertungskreislauf (an die Tafel projiziert)
30 min		Sammeln von Informationen zum Thema „bromierte Flammenschutzmittel“	Lesen der Informationstexte und Bearbeitung der zugehörigen Aufgaben auf einem Arbeitsblatt	Begleitung der Arbeitsphase	Einzelarbeit	Informationstexte, Arbeitsblatt 2 mit Aufgaben zu den Informationstexten
5 min		Beschreibung der Problemsituation und Nennen von Handlungsoptionen	Beschreibung der Problemsituation unter Zuhilfenahme der eingangs erarbeiteten Fragen, Vorlesen der Antworten, Nennen der Handlungsoptionen	Projizieren der Eingangsfragen	Einzelarbeit anschließend Unterrichtsgespräch	Arbeitsblatt 3
5 min		Reflexion der vorgegebenen Bewertungskriterien	Reflektieren der Kriterien im Plenum	Steuern des Gesprächs in der Klasse	Gespräch in der Klasse	Arbeitsblatt 4
5 min		Gewichtung der vorgegebenen Bewertungskriterien	Gewichtung der Kriterien in Einzelarbeit, Vergleich der Gewichtungen in der Klasse	Begleitung der Arbeitsphase	Einzelarbeit	Arbeitsblatt 4
5 min		Verteilung der Punkte, Berechnung der Teilnutzen und des Gesamtnutzens	Vergeben der Punkte für bromierte Flammenschutzmittel in den einzelnen Kriterien zunächst in Einzelarbeit und dann in Gruppen, Berechnung des Gesamtnutzens	Einteilung der Gruppen, Erklärung der Arbeitsaufträge	Gruppenarbeit	Arbeitsblatt 4

5 min		Beantwortung der Frage, ob bromierte Flammschutzmittel weiter verwendet werden sollen	Begründete Beantwortung der Frage, ob bromierte Flammschutzmittel weiter verwendet werden sollen	Begleitung der Arbeitsphase	Think-Pair-Share	Arbeitsblatt 5
2 min	Ab- schluss phase	Reflexion des Bewertungsprozesses	Schriftliche Beantwortung der Reflexionsfragen in Einzelarbeit	Begleitung der Arbeitsphase	Einzelarbeit	Arbeitsblatt 6
3 min			Schriftliche Beantwortung der Reflexionsfrage zu Warentests in Kleingruppen	Begleitung der Arbeitsphase	Gruppenarbeit	Arbeitsblatt 7

Die im Folgenden abgebildeten Unterrichtsmaterialien finden sich im Anhang 3.

### **3.3.1.2 Einstiegsphase**

Um das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ zu aktivieren, wird der Einstieg der Unterrichtseinheit so gestaltet, dass zunächst im Unterrichtsgespräch herausgearbeitet wird, welche Stoffe man als Luftschadstoffe in Innenräumen bezeichnen könnte und warum.

Folgende Inhalte könnten dabei thematisiert werden:

- Menschen in Mitteleuropa verbringen sehr viel Zeit in Innenräumen, hier werden Luftschadstoffe zum Großteil aufgenommen.
- Viele der Stoffe können sich nachteilig auf die Gesundheit auswirken. Das kann sich einerseits in Befindlichkeitsstörungen wie Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche oder Müdigkeit äußern, andererseits können einige Stoffe bei andauernder Exposition zu ernsthaften Erkrankungen führen.

Im Anschluss daran erfolgt eine Überleitung zu bromierten Flammschutzmitteln. Die Kontroverse wird ähnlich wie in der von Burmeister und Eilks (2011) vorgestellten Warentestmethode thematisiert: Die Schülerinnen und Schüler erhalten einen Einführungstext zur Problematik bromierter Flammschutzmittel, der ihnen einen ersten Zugang zur kontroversen Problematik ermöglichen soll (Abbildung 4). Der Text wird von einer Schülerin oder einem Schüler vorgelesen und in der Klasse zusammengefasst. Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten in der Klasse insgesamt drei Fragen zum Text, die die Lehrperson schriftlich festhält (das sollte am besten digital geschehen, damit die Fragen später wieder aufgegriffen und an die Tafel projiziert werden können).

### **Flammschutzmittel**

*„Flammschutzmittel dienen dazu, die Entzündung brennbarer Materialien, wie Kunststoffe, Textilien oder Holz, hinauszuzögern und die Flammenausbreitung zu verlangsamen. Es handelt sich um unterschiedliche chemische Verbindungen, die sich beispielsweise in Kunststoffgehäusen von Fernsehern und Computern, Wohnraumtextilien, Dämm- und Montageschäumen befinden. [...] Sie sind [...] in der Umwelt weit verbreitet, schwer abbaubar und zum Teil bioakkumulierend; das heißt, sie reichern sich in Lebewesen an. [Sie] sind toxisch für Gewässerorganismen und [...] wurden auch in Muttermilch und im Blut des Menschen gefunden.“*

(BMU, 2021)

**Abbildung 4: Einführungstext zur Problematik bromierter Flammschutzmittel**

Um diesen ersten Zugang zur Kontroverse zu vertiefen und um die nachfolgende Erarbeitungsphase einzuleiten und zu entlasten, beschäftigen sich die Schülerinnen und Schüler als nächstes mit vier Zeitungsartikeln, die das Thema „Flammschutzmittel“ thematisieren. Dazu werden die Schülerinnen und Schüler in Gruppen zu je drei bis vier Personen eingeteilt. Jeder Gruppe wird ein Zeitungsartikel (Abbildung 5 - Abbildung 8) zugeteilt, wobei jede Schülerin und jeder Schüler jeweils ein eigenes Exemplar erhält. Diesen lesen die Schülerinnen und Schüler zunächst in Einzelarbeit durch und danach soll in der Gruppe eine passende Überschrift für den jeweiligen Artikel gefunden werden. Im Anschluss daran fasst jeweils ein Gruppenmitglied aus jeder Gruppe den Zeitungsartikel vor der Klasse zusammen und liest die gefundene Überschrift dazu vor.

8. Januar 2018

Mit einem neuen Forschungsprojekt will das Fraunhofer LBF das Recycling halogenfrei flammgeschützter Kunststoffe verbessern.

Der katastrophale Brand des Grenfell-Tower in London hat bewiesen, wie wichtig Brandschutz ist. [...] „Flammschutzmittel können die Entstehung von Bränden verzögern“, erläutert Oliver Kutsch, Geschäftsführer des Marktforschungsinstituts Ceresana: „Sie verschaffen Feuerwehr und Betroffenen oft entscheidende Minuten und Sekunden für die Rettung. [...] Laut der aktuellen Studie werden in Baumaterialien, Kunststoffprodukten, Elektro-Geräten und Textilien derzeit weltweit pro Jahr rund 2.21 Mio. t Flammschutzmittel eingesetzt. [...] Die Bauindustrie ist der wichtigste Absatzmarkt für Flammschutzmittel: Rund 30 % der weltweiten Nachfrage kommen aus diesem Bereich. [...] Bei zahlreichen Bauprodukten aus Gummi, in Klebstoffen sowie Farben und Lacken kommen Flammschutzmittel ebenfalls zum Einsatz. Die Elektronik-Branche braucht sie für Einzelkomponenten wie Leiterplatten, Computergehäuse sowie Haushalts- und Telekommunikationsgeräte. [...] Bis 2024 erwarten die Marktforscher von Ceresana das größte prozentuale Wachstum der Flammschutzmittel-Nachfrage im Bereich der Fahrzeugindustrie. Baumaterialien werden allerdings auch in den kommenden acht Jahren weiterhin das größte Anwendungsgebiet bleiben. [...]

(K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie, 2018, gekürzt und vereinfacht)

Abbildung 5: Zeitungsartikel 1

11. September 2019

Alternative zu bisherigen Produkten: Grafe hat ein effektives Flammschutzmittel für Polycarbonat entwickelt, das weder halogen- noch phosphorhaltig ist. [...] „Die zunehmende Verwendung von Elektronik im Haushalt und im Büro erhöht die Gefahr von Feuerschäden“, so Dr. Stadermann. „Zumeist werden bromhaltige Flammschutzmittel für elektronische Bauteile verwendet. [Sie] sind sehr effektiv, sehen sich aber verstärkt europäischen Regularien ausgesetzt, die teilweise bis zum Verbot reichen“, erläutert er die Hintergründe für die Suche nach einer Alternative.

Auch andere zurzeit verwendete Flammschutzmittel haben Nachteile. „Produkte auf reiner Stickstoffbasis zeigen nicht die notwendige Effektivität und einige phosphorbasierte Flammschutzmittel können zu Korrosion in elektronischen Produkten führen“, erklärt der Experte. [...]

(K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie, 2019)

Abbildung 6: Zeitungsartikel 2

6. Mai 2014

Kunststoffe lassen sich mit einigen Zusätzen unbrennbar machen. Eine neue Folie soll Gebäude und Fahrzeuge besser vor Feuer schützen. Es entstehen dabei keine toxischen Dämpfe. [...]

[Um Kunststoffe unbrennbar zu machen] stehen verschiedene Mittel zur Wahl. Halogenierte Flammschutzmittel etwa sind in geringer Dosis wirksam und vertragen sich mit den meisten Polymeren. Sie werden für Textilien, elektrische und elektronische Geräte eingesetzt. Unter Hitze hemmen die Halogene die Reaktion mit Sauerstoff. Allerdings können im Fall eines Brandes [giftige Gase] entstehen.

Breite Anwendung finden auch phosphorhaltige Flammschutzmittel. Sie bilden unter Feueereinwirkung eine isolierende Schutzschicht, sind aber in manchen Kunststoffen nur schwer zu verarbeiten. Auch hier könnten sich giftige Dämpfe bilden, sagt Stadter. Haupteinsatzgebiet sind geschäumte Kunststoffe in Möbeln und im Bau. Anorganische Flammschutzmittel wie Aluminiumhydroxid und Magnesiumhydroxid kühlen die Brandstelle und verhindern, dass der Kunststoff weiterbrennt. Sie sind nicht teuer, und ihr größter Vorzug ist, dass sie im Feuer keine schädlichen Gase bilden. [...] Allerdings müssen sie für eine ausreichende Wirksamkeit in großen Mengen zugemischt werden. Das beeinträchtigt dann die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs. [...]

Stadter ist es nun [...] gelungen, die anorganischen Flammschutzmittel so einzubinden, dass die guten Eigenschaften der Kunststoffe zum großen Teil erhalten bleiben. [...]

(Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2014)

Abbildung 7: Zeitungsartikel 3

15. April 2014

Flammschutzmittel retten Leben: Sie verhindern oder verzögern das Verbrennen von Plastik, Baumaterialien und Textilien. [...] Flammschutzmittel werden vor allem im Bausektor gebraucht: Im Wohnungsbau kommen vermehrt brennbare Materialien zur Wärmedämmung und Verbesserung der Energieeffizienz zum Einsatz; Rohre und Kabel aus Kunststoff ersetzen zunehmend traditionelle Metallrohre – folglich muss der Brandschutz verbessert werden. Noch stärker wächst jedoch die Nachfrage von Elektrik & Elektronik: Die Hersteller von Smartphones und Tablet-PCs verbrauchen immer mehr flammgeschützte Kunststoffe. Dabei spielt für sie die Verträglichkeit der verwendeten Flammschutzmittel für Umwelt und Gesundheit eine immer größere Rolle.

Umweltschützer halten halogenierte Flammschutzmittel für problematisch: Sie drängen zum Verzicht auf bromierte und chlorierte Produkte. In manchen Ländern werden trotzdem neue Flammschutzmittel auf der Basis von Brom angeboten. Halogenierte Flammschutzmittel verlieren jedoch zunehmend Marktanteile an umweltfreundlichere Produkte. [...] In China dominieren noch halogenierte Flammschutzmittel; in Westeuropa und Nordamerika machen [halogenfreie Flammschutzmittel] die Hälfte des Markts aus. Die Region Asien-Pazifik ist der größte Absatzmarkt für Flammschutzmittel, wobei allein China fast ein Viertel der gesamten Produktion abnimmt. [...] In Zukunft wird die Region Asien-Pazifik, angetrieben von China und Indien, voraussichtlich ihren Vorsprung ausbauen. [...]

(FeuerTrutz Network GmbH, 2014)

Abbildung 8: Zeitungsartikel 4

Den Abschluss der Einstiegsphase bildet eine Diskussion auf Grundlage der Informationen aus den Zeitungsartikeln im Plenum, ob bromierte Flammschutzmittel weiter verwendet sollten oder nicht.

Um die Diskussion zu beginnen und um zu verhindern, dass sie ins Stocken gerät, können von der Lehrperson folgende Fragen aufgeworfen werden:

- Welche Nachteile können unterschiedliche Flammschutzmittel haben?
- Kann auf Flammschutzmittel verzichtet werden? Begründet!
- Wie seid ihr zu einer Entscheidung gelangt?

Aus der Diskussion soll hervorgehen, dass erstens zu wenige Informationen für eine begründete Entscheidung gegeben wurden und zweitens eine reflektierte Entscheidung nur strukturiert unter Verwendung einer angemessenen Entscheidungsstrategie gefällt werden kann. Auf diese Weise erfolgt gleichzeitig die Überleitung zum ersten Schritt der Erarbeitungsphase: Die Schülerinnen und Schüler lernen Entscheidungsstrategien kennen.

### **3.3.1.3 Erarbeitungsphase**

In diesem Teil der Unterrichtseinheit werden den Schülerinnen und Schülern Entscheidungsstrategien sowie der von Knittel (2013) entwickelte Bewertungskreislauf als Hilfestellung für kompensatorisches Bewerten vorgestellt, sie sammeln Informationen und beantworten am Ende dieser Phase die Frage, ob die Weiterverwendung bromierter Flammschutzmittel vertretbar ist.

Die beiden Entscheidungsstrategien werden zunächst von der Lehrperson vorgestellt und anhand des Beispiels „Schuhkauf“ illustriert. (siehe Arbeitsblatt „Entscheidungsstrategien“, Abbildung 9).

Entscheidungsstrategien		
	Kompensatorische Entscheidungsstrategie	Non-kompensatorische Entscheidungsstrategie
Beschreibung	Vergleich von verschiedenen Optionen anhand unterschiedlicher Kriterien. Dabei können Nachteile in einem Kriterium durch Vorteile in einem anderen Kriterium aufgewogen werden.	Ein Nachteil in einem Kriterium kann nicht durch einen Vorteil in einem anderen Kriterium aufgewogen werden. Hierbei wird jene Option gewählt, die als erste eine zufriedenstellende Lösung darstellt.
Beispiel „Schuhkauf“	Beim Schuhkauf werden die Kriterien „Preis“ und „Marke“ herangezogen, wobei das Kriterium „Marke“ stärker gewichtet ist. Wenn das Paar Schuhe zwar sehr teuer ist, aber es von einer bestimmten Marke ist, wird das Paar Schuhe gekauft, obwohl es im Kriterium „Preis“ schlecht abschneidet.	Beim Kauf eines Paares Schuhe könnte sich der oder die Kaufende folgende <i>Cut-offs</i> vorgeben: Die Farbe der Schuhe sollte schwarz sein und der Preis darf höchstens bei 60,00 € liegen. Die erste Option, die diese Kriterien erfüllt, wird ausgewählt.

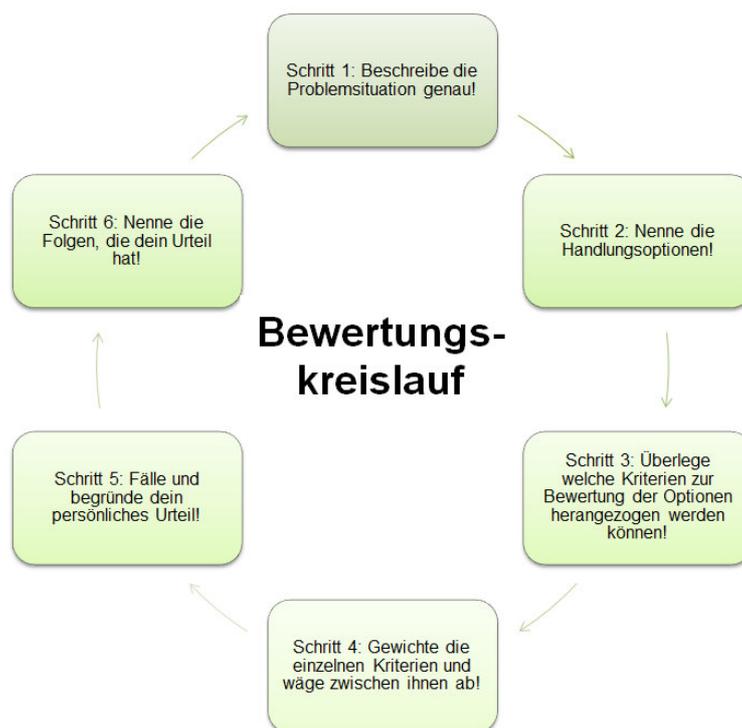
**Aufgabe:** Finde und erläutere ein eigenes Beispiel aus deinem Alltag, in der einmal eine kompensatorische und einmal eine non-kompensatorische Entscheidungsstrategie sinnvoll zur Anwendung kommt.

Abbildung 9: Arbeitsblatt 1 „Entscheidungsstrategien“

Im Anschluss soll noch die Möglichkeit einer Mischform beider Entscheidungsstrategien und die Berechtigung intuitiver Entscheidungen in manchen Situationen erwähnt werden. Eine Mischform der kompensatorischen und non-kompensatorischen Entscheidungsstrategie kann vor allem dann Sinn machen, wenn aus vielen möglichen Optionen anhand der non-kompensatorischen Entscheidungsstrategie die Optionen auf wenige eingegrenzt werden sollen und im Anschluss daran durch Anwendung der kompensatorischen Entscheidungsstrategie eine einzige Option ausgewählt werden soll.

Danach sollen die Schülerinnen und Schüler selbst ein Beispiel für eine Entscheidungssituation finden, in der die beiden Entscheidungsstrategien sinnvoll angewendet werden können. Dabei soll deutlich werden, dass die zuvor vorgestellten Entscheidungsstrategien in allen Bereichen des Alltags eingesetzt werden können, in denen reflektierte Entscheidungen getroffen werden sollen. Anschließend werden die Problemsituationen und die gewählten Entscheidungsstrategien im Plenum besprochen.

Als nächstes stellt die Lehrperson den Schülerinnen und Schülern den Bewertungskreislauf als Hilfsmittel der kompensatorischen Bewertungsstrategie vor. Der Bewertungskreislauf (Abbildung 10) soll ein Hilfsmittel zur Verdeutlichung eines Bewertungsprozesses für die Schülerinnen und Schüler darstellen. Die Darstellung als Kreislauf soll symbolisieren, dass ein Bewertungsprozess mehrmals durchlaufen werden kann. Bemerkt der oder die Entscheidende, dass die Folgen der gewählten Option nicht wünschenswert sind, so wird ein erneutes Durchlaufen des Prozesses nötig sein. Bei jedem Durchlaufen kann die Intensität der jeweiligen Schritte variieren. Der soeben beschriebene Hintergrund wird von der Lehrperson erläutert und der Bewertungskreislauf an die Tafel projiziert, sodass er für die Schülerinnen und Schüler während des gesamten Bewertungsprozesses gut sichtbar ist.



**Abbildung 10: Bewertungskreislauf nach Knittel (2013)**

Den nächsten Abschnitt der Unterrichtseinheit stellt das Einholen von Informationen dar. Mithilfe der didaktisch reduzierten Informationstexte (Abbildung 11 - Abbildung 18), bearbeiten die Schülerinnen und Schüler Aufgaben (Abbildung 19 und Abbildung

20: Arbeitsblatt 2). Dadurch soll das Leseverstehen gefördert werden (vgl. Leisen, 2012).

### Verwendung von Bromverbindungen

Bromverbindungen werden als Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt, so zum Beispiel Brommethan. Auch in der Medizin sind bromhaltige Verbindungen als schleimlösende Hustenmittel, Schlaf-, Beruhigungs- und Narkosemittel vertreten.

In über 90 % der Elektrogeräte waren oder sind Bromverbindungen als Flammschutzmittel enthalten, außerdem in Kunststoffen, Textilien, Haushaltsgeräten und in der Wärmedämmung (Abbildung 13).

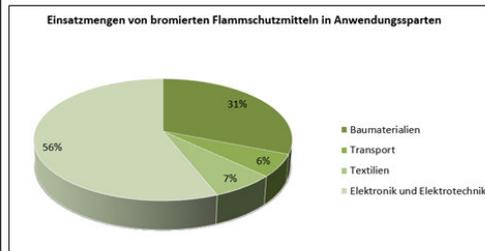


Abbildung 13: Einsatzmengen von bromierten Flammschutzmitteln in Anwendungssparten (Germer, 2008)

Flammschutzmittel werden verschiedenen Materialien zugegeben, um sie schwer entflammbar zu machen. Das betrifft vor allem Materialien, die in Innenräumen verwendet werden, wie Textilien, Kunststoffe, Holzwerkstoffe oder Dämmmaterialien. In Kunststoffen haben Flammschutzmittel meist auch eine Funktion als Weichmacher.

Bromierte Flammschutzmittel zählen zu denjenigen Chemikalien mit den größten jährlichen Produktionsmengen, 2018 betrug der Jahresverbrauch an bromierten Flammschutzmitteln weltweit ca. 406.800 t (Ceresana eK, 2022). Es gibt eine Vielzahl von Verbindungen, die zur Gruppe der bromierten Flammschutzmittel zählt. Allen gemeinsam ist, dass sie Brom enthalten, weil von Brom die Flammschutzwirkung ausgeht.

Abbildung 11: Informationstext „Verwendung von Bromverbindungen“

### Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel

Um zu verstehen, wie Flammschutzmittel wirken, muss man zunächst Verbrennungsprozesse näher betrachten. Eine Verbrennung ist eine Gasphasenreaktion, an der ein Brennstoff und Sauerstoff beteiligt sind, sie besteht aus vier Schritten:

Der Brennstoff wird zunächst in einer endothermen Reaktion einer thermochemischen Umwandlung (=Pyrolyse) ausgesetzt. Dabei können brennbare Gase, flüssige Produkte und Radikale entstehen. In Kombination mit Luft entstehen daraus entzündbare Gasgemische, die in Gegenwart einer Flamme und Sauerstoff in einer exothermen Reaktion zu Verbrennungsprodukten reagieren. Die dabei freierwirdende Wärme kann dann erneut die Pyrolyse von weiterem Brennstoff in Gang setzen.

Flammschutzmittel können hierbei in jeden dieser vier Schritte eingreifen und den Verbrennungsprozess behindern. Eine sehr effektive Methode ist beispielsweise das Einfangen freier Radikale, die während des Verbrennungsprozesses entstehen. Durch Hitzezufuhr entstehen aus halogenierten Verbindungen Halogenradikale. Diese können mit anderen freien Radikalen, die im Zuge der Pyrolyse der Brennstoffe entstehen, gut reagieren und damit die Flammenausbreitung eindämmen

Iod, Brom, Chlor und Fluor sind nicht alle gleich gut für die Verwendung als Flammschutzmittel geeignet: Fluor-Verbindungen sind sehr stabil und zersetzen sich erst bei hohen Temperaturen. Das Halogenradikal steht deshalb zu spät zur Verfügung, um den Verbrennungsprozess zu behindern. Iodierte Verbindungen sind sehr instabil und zersetzen sich schon bei geringeren Temperaturen, was auch sie zu einem ineffizienten Flammschutzmittel macht. Nur Brom und Chlor kommen als sinnvolle Halogenkomponenten in Flammschutzmitteln infrage, wobei Brom ein wenig effizienter im Einfangen der Radikale ist und seine Verbindungen sich zudem bereits bei geringfügig niedrigeren Temperaturen zersetzen als dies bei Chlor und seinen Verbindungen der Fall ist. Aus diesem Grund werden bromierte Flammschutzmittel häufiger eingesetzt als chlorierte.

Abbildung 12: Informationstext "Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel"

### Vorteile bromierter Flammschutzmittel

Flammschutzmittel zögern die Entzündung von brennbaren Materialien wie Kunststoffen, Holz oder Textilien hinaus und verlangsamen die Ausbreitung der Flammen. Auf diese Weise verhindern sie Brände gänzlich oder verlängern zumindest die Zeit zur Evakuierung von Gebäuden.

Die Verwendung bromierter Flammschutzmittel stieg in der vergangenen Zeit daher kontinuierlich an. Bromierte Flammschutzmittel in der Bauindustrie in Dämmstoffen aus Polystyrol verwendet. Man findet sie auch in Elektrogeräten, Möbeln und Textilien, aber auch in Latex, Klebern und Farben. Polystyrol-Schaum wird in seiner granulierten Form in der Landwirtschaft und im Gartenbau zur Texturverbesserung der Böden verwendet.

Vorteile bromierter Flammschutzmittel sind, dass sie einerseits kostengünstig sind und andererseits mit einer Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe kombinierbar sind. In den Gehäusekunststoffen und Kleinteilen von Elektro- und Elektronikgeräten können anstatt bromierter Flammschutzmittel halogenfreie organische Phosphorverbindungen verwendet werden. Dafür müssen aber die verwendeten günstigen Kunststoffe gegen teurere schwerere entflammbare Mischungen dieser Kunststoffe ersetzt werden.

Abbildung 13: Vorteile bromierter Flammschutzmittel

In tierischen Lebewesen können sie aufgrund ihrer lipophilen Eigenschaften besonders gut im Fettgewebe angereichert werden.

Bromierte Flammschutzmittel können zwar nicht besonders gut abgebaut werden, sie können aber bestimmten Bedingungen zu anderen Verbindungen umgebaut werden, die toxisch wirken können.

In vielen Fällen ist das Abbauverhalten der Stoffe noch nicht ausreichend untersucht.

Im Brandfall oder bei unkontrollierter Entsorgung der Materialien können aus halogenhaltigen Verbindungen umweltschädliche Gase freigesetzt werden.

Abbildung 15: Informationstext "Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt"

### Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt

Bromierte Flammschutzmittel wurden bereits auf allen Kontinenten – auch in der Arktis – in verschiedenen Umweltkompartimenten nachgewiesen.

Der Eintrag in die Umwelt kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, beispielsweise durch Emissionen bei der Produktion und der Verarbeitung sowie bei der Entsorgung der mit den bromierten Flammschutzmitteln versehenen Materialien. Die genauen Wege des Eintrages in die Umwelt sind bis heute aber noch nicht ausreichend untersucht. Über Windsysteme wurden und werden die Stoffe auf der ganzen Erde verbreitet. Einige der bromierten Flammschutzmittel sind bioakkumulativ (sie reichern sich in Organismen an) und können in unterschiedlichen Bereichen nachgewiesen werden (siehe Abbildung 12) (Umweltbundesamt Deutschland, 2008):

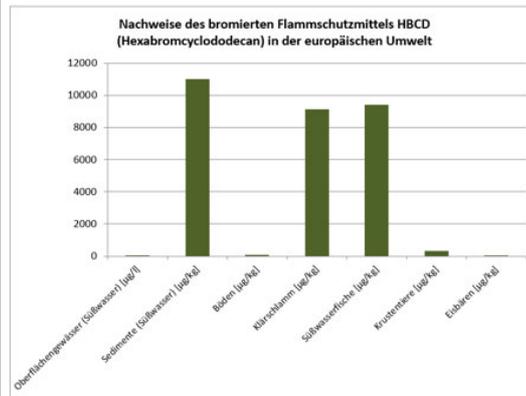


Abbildung 14: Nachweise eines bromierten Flammschutzmittels in der europäischen Umwelt (Umweltbundesamt Deutschland, 2008)

Abbildung 14: Informationstext "Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt"

### Risiken bromierter Flammschutzmittel für den Menschen

Bromierte Flammschutzmittel können über unterschiedliche Expositionswege in den menschlichen Körper gelangen: über Wasser, Lebensmittel, Hausstaub, Innenraumluft oder Muttermilch. Die Hauptaufnahmekategorie stellt die Ernährung dar, weil es durch die Bioakkumulation in unterschiedlichen Lebewesen zu einer Anreicherung der Stoffe in der Nahrungskette kommt. So sind bromierte Flammschutzmittel beispielsweise in tierischen Lebensmitteln wie Milch, Fleisch oder Fisch und deren Erzeugnissen nachweisbar. In vielen Fällen ist aber die Exposition nicht allein durch die Nahrung zu erklären. Neben der Aufnahme der Stoffe über die Nahrung spielt auch die Innenraumluft eine große Rolle.

Die Aufnahme von Hausstaub über die Verdauungsorgane stellt dabei die wichtigere Aufnahmequelle dar, nicht dessen Inhalation. Weil bromierte Flammschutzmittel schwer flüchtige Verbindungen sind, sind sie im Hausstaub in höheren Konzentrationen nachweisbar als in der Innenraumluft.

Die Wirkung der bromierten Flammschutzmittel im menschlichen Körper ist vielfältig. Viele bromierte Flammschutzmittel werden im Gastrointestinaltrakt absorbiert und reichern sich im Fettgewebe an. Neben dem eigentlichen Fettgewebe sammeln sich bromierte Flammschutzmittel im menschlichen Körper vor allem in den fetthaltigeren Organen wie der Nebenniere, der Leber, den Eierstöcken, der Lunge und dem Gehirn an. Sie sind außerdem im Blut und in der Muttermilch nachweisbar.

Eine Ausscheidung ist neben der Muttermilch über den Fäzes und in sehr geringem Ausmaß über den Urin möglich. Die Stoffe haben im menschlichen Organismus Auswirkungen auf das endokrine System, das Nervensystem, das Immunsystem und die Leberfunktionen. Für viele der bromierten Flammschutzmittel wird außerdem vermutet, dass sie die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und ungeborene Kinder im Mutterleib und gestillt werdende Säuglinge schädigen. In vielen Fällen liegen noch nicht ausreichend Daten zur Risikoeinstufung vor. Es besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf, um die Wissenslücken und Unsicherheiten zu verringern.

Abbildung 16: Informationstext "Risiken bromierter Flammschutzmittel"

### Noch nicht ausreichend untersuchte bromierte Flammschutzmittel

Viele der bromierten Flammschutzmittel sind zurzeit noch nicht ausreichend untersucht. Für sie besteht ein besonderes wissenschaftliches Interesse, weil es noch Wissenslücken zu deren physikalisch-chemischen Eigenschaften, Stabilität und Reaktivität, Produktionsvolumina, Verwendung, Vorkommen, Exposition und Toxizität gibt. Es ist noch keine vollständige Risikobeschreibung der Stoffe möglich, weil die Datenlage zu Vorkommen, Exposition und Toxizität der Stoffe unvollständig ist. Einige der noch nicht ausreichend untersuchten bromierten Flammschutzmittel konnten aber als potenziell gesundheitsgefährdend, genotoxisch und karzinogen identifiziert werden und sollten deshalb in Zukunft in Untersuchungen besonders berücksichtigt werden.

### Entsorgung und Recycling

Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, werden nicht recycelt, weil der Gehalt an bromierten Flammschutzmitteln die Qualität der jeweiligen Rezyklate mindert. Um deren Qualität zu erhöhen, werden Materialien, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, daher vom Recyclingprozess ausgeschlossen und meist thermisch verwertet.

### Gesetzliche Beschränkungen und Gütesiegel

Aufgrund ihrer teilweise schädigenden Eigenschaften auf Mensch und Umwelt wurde die Verwendung einiger bromierter Flammschutzmittel eingeschränkt bzw. verboten.

Darüber hinaus gibt es einige Gütesiegel (z.B. das österreichische Umweltzeichen, europäisches Umweltzeichen, Ökotex oder blauer Engel), die Produkte kennzeichnen, die umweltverträglicher sind als vergleichbare Produkte. Dabei werden Kriterien wie die Umweltauswirkungen bei der Herstellung, beim Gebrauch und bei der Entsorgung, aber auch der Rohstoff- und Energieverbrauch, die Toxizität der Inhaltsstoffe, anfallende Abfälle und die Recyclingfähigkeit, die Verpackung, der Vertrieb und der Transport, die Sicherheit, die Langlebigkeit und die Reparaturfreundlichkeit berücksichtigt.

### Quellen:

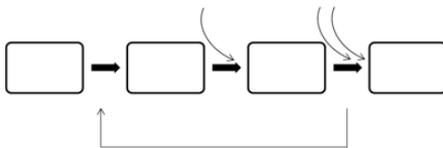
- Alesee, M., Arias, P., Sjödin, A., & Bergman, A. (2003). An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environment International*, 29(6), 883–889. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00121-1)
- Birmili, W., Kolossa-Gehring, M., Valtanen, K., Debiał, M., & Salthammer, T. (2018). Schadstoffe im Innenraum – aktuelle Handlungsfelder. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 61(6), 856–866. <https://doi.org/10.1007/s00105-018-2737-9>
- Bruice, P. Y. (2011). *Organische Chemie* (5. Aufl.). Pearson Studium.
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021). Information on Chemicals. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021a). Substance Infocard: 2,2',6,6'-tetrabromo-4,4'-isopropylidenediphenol. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.001.125>
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021b). Bromierte Flammschutzmittel [Website-Beitrag]. <https://www.efsa.europa.eu/de/topics/topic/brominated-flame-retardants>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2012). Scientific Opinion on Emerging and Novel Brominated Flame Retardants (BFRs) in Food. *EFSA Journal*, 2012, 10(10):2908. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2908>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011b). Scientific Opinion on Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in Food. *EFSA Journal*, 9(7). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2296>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011a). Scientific Opinion on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Food. *EFSA Journal*, 2011, 9(5):2156. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2156>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011c). Scientific Opinion on Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and its derivatives in food. *EFSA Journal*, 9(12):2477, 1–67. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2477>
- Germer, S. (2008). Effekte bromierter Flammschutzmittel auf den Fremdstoffmetabolismus. Technische Universität Kaiserslautern.
- Hartmann, C. (2016). Bromierte Flammschutzmittel in der Umwelt (S. 1–73) [Report]. Umweltbundesamt GmbH.
- Jandric, A., Part, F., Fink, N., Huber-Humer, M., Salhofer, S., & Zafu, C. (2020). Bromierte Flammschutzmittel in Elektroaltgeräten: Untersuchung der Brom-Konzentration nach Kunststofftypen und Gerätekategorien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. *Osterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(1–2), 68–76. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00639-7>
- Koch, C. (2015). Das Umweltverhalten von HBCD und daraus resultierende juristische Folgen. *Mitt Umweltchem Ökotox*, 4/2015, 113–115.
- Luerßen, B., Pepler, K., Ries, M., Janek, J., & Over, H. (2015). Die Kerze: Ein physikalisch-chemisches Wunderwerk... *Chemie in unserer Zeit*, 49(6), 362–370. <https://doi.org/10.1002/ctuz.201500987>
- Morf, L. S., Taverna, R., & Buser, A. (2007). Ressourcen- und Schadstoffmanagement in der Abfallwirtschaft: Die steigende Bedeutung der Recyclingprozesse am Beispiel der bromierten Flammschutzmittel. *Osterr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, März/April 2007, 23–30.
- Riedel, S., & Sonnenberg, K. (2019). Chemie der Elemente: Brom—Eines von zwei flüssigen Elementen (S. 92–94). Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
- Rothkamp, E. (2010). *Innenraum. In Toxikologie* (Bd. 1). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Stius, H. (2016). Halogene: Elemente der siebten Hauptgruppe. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10190-9>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2008). Bromierte Flammschutzmittel—Schutzengel mit schlechten Eigenschaften? Umweltbundesamt Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bromierte-flammschutzmittel-schutzengel-schlechten>

Abbildung 17: Informationstext "Noch nicht ausreichend untersuchte bromierte Flammschutzmittel", "Entsorgung und Recycling", "Gesetzliche Beschränkungen und Gütesiegel"

Abbildung 18: Quellen der Informationstexte

### Bearbeite folgende Aufgaben zum Text:

1. Die folgende Grafik soll einen Verbrennungsprozess darstellen. Ergänze sie mit den Informationen aus dem Text „Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel“. Markiere farbig, an welcher Stelle Halogenradikale den Prozess behindern können.



2. Nenne zwei Vorteile von bromierten Flammschutzmitteln gegenüber anderen Flammschutzmitteln.
3. Nenne zwei Wege, auf denen der Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt erfolgen kann.

4. Bromierte Flammschutzmittel sind auch in Eisbären nachweisbar. Erkläre, wie bromierte Flammschutzmittel in die Arktis gelangen können.

5. Gib an, in welchen drei Umweltkompartimenten die größten Mengen an HBCD (Hexabromocyclododecan) nachgewiesen werden konnten.

6. Nenne drei gesundheitliche Auswirkungen, die bromierte Flammschutzmittel auf den menschlichen Körper haben können.

7. Erkläre, weshalb Elektroaltgeräte, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, nicht recycelt werden. Was passiert stattdessen mit den Geräten?

Abbildung 19: Arbeitsblatt 2

Abbildung 20: Arbeitsblatt 2



Rahmen zu bleiben (Tabelle 5). Es wird mit den Schülerinnen und Schülern gemeinsam im Plenum diskutiert, ob die Auswahl der Kriterien sinnvoll ist.

Bewertungskriterien	Gewichtung		Punktevergabe		Teilnutzen
	individuell	Mittelwert	individuell	in der Gruppe	
<b>Verbraucherinteressen</b>					
Effizienz als Flammschutzmittel					
Preis					
Entstehung von gefährlichen Brandgasen					
gesundheitliche Auswirkungen bei Anreicherung im menschlichen Körper					
<b>Materialeigenschaften</b>					
gut mit den Kunststoffen kombinierbar					
<b>Nachhaltigkeit</b>					
Anreicherung in der Umwelt mit negativen Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere					
Ausreichend erforscht?					
Recyclingfähigkeit					
<b>Gesamtnutzen</b>					

**Tabelle 5:Arbeitsblatt 4 „Kriterien zur Bewertung der Optionen“**

Die Schülerinnen und Schüler legen daraufhin in Einzelarbeit fest, welche Kriterien sie wie gewichten (Spalte „Gewichtung – individuell“). Die Gewichtungen werden dann in Zweiergruppen besprochen, danach wird im Plenum verglichen, wie unterschiedlich die Gewichtungen aussehen und ob es Gemeinsamkeiten gibt. Aus den einzelnen Gewichtungen wird ein Mittelwert gebildet, mit dem weitergearbeitet wird

(Spalte „Gewichtung – Mittelwert“). Dadurch kommt es gleichzeitig zu einer Nivellierung von extremen Gewichtungen.

Im Anschluss daran ist die Aufgabe der Schülerinnen und Schüler, eine Punktevergabe in den jeweiligen Kriterien in Einzelarbeit durchzuführen (Spalte „Punktevergabe – individuell“). Dabei werden Punkte von 1 bis 5 vergeben, wobei 5 für ein gutes Abschneiden im jeweiligen Kriterium steht und 1 für schlechtes Abschneiden. Die Texte und bearbeiteten Aufgaben der vorigen Phase stehen durchgehend zur Verfügung. Nach der individuellen Vergabe der fünf Ziffern werden die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen von vier bis fünf Personen eingeteilt und einigen sich in diesen Kleingruppen auf eine einheitliche Punktevergabe (Spalte „Punktevergabe – in der Gruppe“). Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler ihre individuelle Punktevergabe begründen, bevor sie sich auf eine Punktevergabe in der Gruppe einigen.

Am Ende soll in diesen Kleingruppen die eingangs gestellte Frage, ob die Verwendung der bromierten Flammenschutzmittel vertretbar ist, begründet beantwortet werden. Dazu werden die einzelnen Gewichtungen (Spalte „Gewichtung – Mittelwert“) der Kriterien mit den vergebenen Punkten (Spalte „Punktevergabe – in der Gruppe“) multipliziert. Daraus errechnet sich der Teilnutzen im jeweiligen Kriterium (Spalte „Teilnutzen“). Die Summe der Werte der Teilnutzen ergibt den Gesamtnutzen.

Die Beantwortung der Frage erfolgt schriftlich auf dem Arbeitsblatt 5 (Abbildung 22). Nachdem die Schülerinnen und Schüler die individuellen Bewertungen und deren Begründung in Zweiergruppen miteinander verglichen haben, wird im Plenum diskutiert, wie die unterschiedlichen Urteile ausgefallen sind. Es soll außerdem angesprochen werden, aus welchen Gründen sich Unterschiede in den Bewertungen ergeben haben. Im Zuge der Diskussion soll deutlich werden, dass bei der Bewertung Nachteile in einem Bereich durch Vorteile in einem anderen Bereich aufgewogen werden konnten.



**Abbildung 22: Arbeitsblatt 5**

Im Unterschied zur Unterrichtseinheit von Burmeister und Eilks (2011), in der drei verschiedene Kunststofftypen bewertet werden, wird in dieser Einheit der Einsatz bromierter Flammschutzmittel bewertet. Ein Vergleich der Alternativen untereinander wird als letzter Schritt der Warentestmethode nicht durchgeführt. Es soll darum gehen, den Einsatz bromierter Flammschutzmittel zu bewerten, ohne dabei konkrete Alternativen in Betracht zu ziehen. Ein Vergleich möglicher Alternativen würde einen neuen Bewertungsprozess notwendig machen, im Zuge dessen neue Informationen zu den einzelnen Alternativen gesammelt werden müssen und neue Kriterien festgelegt und gewichtet werden müssen. Das würde den zeitlichen Rahmen der Unterrichtseinheit sprengen und ist deshalb auch nicht in den für diese Einheit festgelegten Lehrzielen enthalten.

#### **3.3.1.4 Abschlussphase**

Den Abschluss der Unterrichtseinheit bildet eine Reflexion der getroffenen Entscheidungen. Dazu sollen die Schülerinnen und Schüler drei Fragen zunächst einzeln auf dem Arbeitsblatt 6 (Abbildung 23) beantworten.

**Beantworte folgende Fragen als Vorbereitung auf eine Diskussion in der Klasse:**

Welche individuellen Entscheidungen haben Einfluss auf das Ergebnis genommen?

Wodurch wurden diese individuellen Entscheidungen beeinflusst?

Welche Auswirkungen hatten die individuellen Entscheidungen auf das Ergebnis (auf die Beantwortung der Entscheidungsfrage)?

**Abbildung 23: Arbeitsblatt 6**

Im Anschluss an die Einzelarbeitsphase soll in Kleingruppen eine zusätzliche Frage beantwortet werden (Abbildung 24).

**Beantwortet folgende Frage in Kleingruppen:**

In Warentests werden Produkte hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bewertet. Diese Bewertungen werden von Personen durchgeführt, die meist nicht im wissenschaftlichen Bereich tätig sind, sondern sich das Wissen über die Produkte eigenaneignen müssen. Diese Personen entscheiden dann über die Gewichtung und die Bewertung der einzelnen Kriterien in Warentests. Erkläre, warum vor diesem Hintergrund Warentests nicht generell als objektiv zu sehen sind und was das für euren Umgang mit solchen Warentests bedeutet.

**Abbildung 24: Arbeitsblatt 7**

Danach werden die unterschiedlichen Antworten im Plenum diskutiert. Dabei sollte deutlich werden, dass die Aushandlungs- und Entscheidungsprozesse im Vordergrund eines Bewertungsprozesses stehen. Je nachdem, wie die Aushandlungsphase verlaufen ist, führt das am Ende zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Gesamtbewertung. Um das noch zu verdeutlichen, wird die Frage in den Raum gestellt, wie das Ergebnis in einer anderen Klasse aussehen würde. Auch wenn der Prozess nach demselben Schema abläuft, kann es durch eine andere Gewichtung und Punktevergabe leicht zu einem anderen Ergebnis kommen.

## 4 Conclusio

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ für die Sekundarstufe II zu konzipieren, mit deren Hilfe Bewertungskompetenz ausgebaut werden kann. Zusätzlich soll die Einheit ermöglichen, Lehrziele aus der Inhaltsdimension des naturwissenschaftlichen Kompetenzmodells für die AHS-Oberstufe zu erreichen, die anhand des Göttinger Modells der Bewertungskompetenz ausgearbeitet wurden.

Zunächst wurde der Begriff der „Scientific Literacy“ geklärt und dessen Verortung im aktuellen Lehrplan gezeigt. Scientific Literacy geht weit über das bloße Verstehen naturwissenschaftlicher Begriffe hinaus. Zusammenhänge in den Naturwissenschaften und naturwissenschaftlich-technische Anwendungen im Alltag sollen nicht nur verstanden werden, sondern die Erkenntnisse sollen bei eigenen Entscheidungen der Schülerinnen und Schüler berücksichtigt werden. Voraussetzung dafür sind unterschiedliche Kompetenzen, deren Aufbau in naturwissenschaftlichem Unterricht ermöglicht werden soll. Der Erwerb dieser Kompetenzen ist im österreichischen Lehrplan für die AHS Oberstufe explizit angeführt, wodurch sich Scientific Literacy im Lehrplan der AHS widerspiegelt.

Kompetenz ist schwer messbar, die Bewertung und Überprüfung von Kompetenz verlangt deshalb nach einem Bezugsrahmen, der zeigt, welche Kriterien zur Bewertung von Kompetenz geeignet sind. Dieser Bezugsrahmen wurde in Form von Kompetenzmodellen ausgearbeitet, die eine Brücke zwischen Bildungszielen und konkreten Unterrichtsaufgaben schlagen.

Dass die Definition und Abgrenzung des Begriffes „Bewertungskompetenz“ nicht so einfach sind, zeigt die Tatsache, dass es bisher keine einheitliche Begriffsdefinition gibt. Aus diesem Grund sind in der fachdidaktischen Forschung viele Ansätze zur Definition von Bewertungskompetenz entstanden. In dieser Arbeit wurde jene Definition verwendet, die auch Eggert und Bögeholz (2006) zur Ausarbeitung des Göttinger Modells der Bewertungskompetenz verwendet haben.

Um Bewertungskompetenz zu operationalisieren, wurden in den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken Kompetenzmodelle ausgearbeitet, die jeweils unterschiedliche

Bereiche von Bewertungskompetenz abdecken. Die Orientierung an einem Kompetenzmodell bildet die Grundlage für eine wirksame Lernumgebung, weil dadurch der Aufbau und die Entwicklung von Kompetenzen dargelegt werden und die Teilkompetenzen damit operationalisiert werden können.

Für die Entwicklung der Unterrichtseinheit zu Luftschadstoffen in Innenräumen kamen das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz (Eggert & Bögeholz, 2006), das Modell zur ethischen Urteilskompetenz (Reitschert et al., 2007) und das dreidimensionale ESNaS (Evaluation der *Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I*) Kompetenzmodell zur Beschreibung von Bewertungskompetenz (Kauertz et al., 2010) infrage.

Keines der drei Bewertungskompetenzmodelle wurde speziell in der Chemiedidaktik entwickelt, sie eignen sich nicht alle gleichermaßen gut, um sie zur Entwicklung einer Unterrichtseinheit heranzuziehen. Die Auswahl eines der drei in Frage kommenden Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz erfolgte danach, mit welcher Zielsetzung und für welche Kontexte sie entwickelt wurden.

Für die Entwicklung der Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ wurde das Göttinger Modell der Bewertungskompetenz herangezogen. Zusätzlich zum Aufbau von Bewertungskompetenz sollen in der Unterrichtseinheit Lehrziele aus der Inhaltsdimension des naturwissenschaftlichen Kompetenzmodells für die AHS-Oberstufe erreicht werden können.

Für die Entwicklung von erfolgreichem Unterricht ist es notwendig, dass im Zusammenhang mit Lehrinhalten mit Alltagsbezug immer auch die bestehenden Assoziationen der Schülerinnen und Schüler mitberücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt die Schülerinnen- und Schülerassoziationen zum Thema „Schadstoffe in der Innenraumluft“ erhoben. Aus der Erhebung ging hervor, dass Schülerinnen und Schüler in Zusammenhang mit „Schadstoffen in der Innenraumluft“ sehr häufig die Begriffe „Schimmel, Viren und Bakterien“ nennen. Außerdem erwähnte der Großteil der Befragten „Reinigungsmittel“, „Staub, Tierhaare und Allergene“ und „Rauchen und offene Flammen“.

Das für die Unterrichtseinheit gewählte Thema hat zwar hohe Alltagsrelevanz, wurde aber im Unterricht bisher nicht thematisiert. Das spiegelt sich auch in den erhobenen Schülerinnen- und Schülerassoziationen wider. Bromierte Flammschutzmittel wurden

von den befragten Schülerinnen und Schülern nicht mit Schadstoffen in der Innenraumlufte assoziiert. Aus der Erhebung wird sichtbar, dass es zum Thema „Schadstoffe in Innenräumen“ bereits Assoziationen gibt, die als Einstieg in die Unterrichtseinheit genutzt wurden.

Um die Assoziationen der Schülerinnen und Schüler zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ zu nutzen, wird der Einstieg der Unterrichtseinheit so gestaltet, dass zunächst im Unterrichtsgespräch herausgearbeitet wird, welche Stoffe man als Luftschadstoffe in Innenräumen bezeichnen könnte und warum. Im Anschluss folgt eine Überleitung zur Kontroverse, die im weiteren Verlauf nach der Warentestmethode von Burmeister und Eilks (2011) aufgearbeitet wird.

Um zu einer begründeten und reflektierten Entscheidung zu gelangen, ist die Auswahl einer angemessenen Entscheidungsstrategie Voraussetzung. Das Kennenlernen von Entscheidungsstrategien stellt deshalb den zweiten Schritt nach dem Einstieg in die Unterrichtseinheit dar.

Im weiteren Verlauf der Einheit werden Informationen aus didaktisch reduziertem Textmaterial gesammelt bevor der eigentliche Bewertungsprozess folgt. An dieser Stelle soll durch das Gewichten vorgegebener Kriterien die Frage „Ist die Weiterverwendung bromierter Flammschutzmittel vertretbar?“ beantwortet werden.

Den Abschluss der Unterrichtseinheit bildet eine Reflexion der getroffenen Entscheidungen.

### **Reflexion und Ausblick**

Für mich lag die erste Schwierigkeit darin, den Begriff „Bewertungskompetenz“ zu definieren. Wie sich herausstellte, hätte das aber den Rahmen der Arbeit gesprengt, nicht zuletzt deshalb, weil es keine einheitliche Definition des Begriffes „Bewertungskompetenz“ gibt. Als Lösung des Problems wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit diejenige Definition herangezogen, die auch Eggert & Bögeholz (2006) im Göttinger Modell der Bewertungskompetenz verwenden. Sie bezieht sich auf Bewerten und Entscheiden im Kontext nachhaltiger Entwicklung. Bewerten wird hier als die Fähigkeit definiert, *„sich in komplexen Problemsituationen begründet und systematisch bei unterschiedlichen Handlungsoptionen zu entscheiden, um kompetent am gesellschaftlichen Diskurs um die Gestaltung von nachhaltiger Entwicklung teilhaben zu können“* (Bögeholz, 2007, S. 209, zitiert nach Hostenbach, 2011, S. 21).

Eine weitere Herausforderung betraf das Festlegen der Lehrziele. Im Zusammenhang mit Bewertungskompetenz muss genau geklärt werden, was bewertet werden soll. Auf der einen Seite können Problemsituationen mithilfe von Informationen bewertet werden, es können aber auch die Informationen an sich im Hinblick auf ihre Filterung bewertet werden. Gefilterte Informationen bezeichnen grundsätzlich alle Informationen, die nicht zu fachwissenschaftlicher Originalliteratur zählen, beispielsweise populärwissenschaftliche Literatur oder Schul- und Lehrbücher. Diese Art von Literatur hat bereits Filterungsprozesse hinter sich, weil mit jeder Person, die die Informationen neu aufbereitet ein neuer Filterungsprozess hinzukommt. Die ausgearbeitete Unterrichtseinheit zum Thema „Luftschadstoffe in Innenräumen“ strebt die Bewertung einer Problemsituation mithilfe von Informationen an, nicht eine Bewertung der Informationen im Hinblick auf ihre Filterung.

Methodisch orientiert sich die Unterrichtseinheit an der von Burmeister und Eilks (2011) entwickelten Warentestmethode. In einigen Punkten wurden allerdings Änderungen vorgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass Schülerinnen und Schüler ohne Bewertungsstruktur- bzw. Metastrategiewissen große Probleme damit haben, an Entscheidungsprozesse systematisch heranzutreten (Eggert & Bögeholz, 2006). Vielmehr wird in solchen Situationen intuitiv oder rechtfertigend entschieden. Dem eigentlichen Bewertungsprozess wurde daher ein Abschnitt vorgelagert, in dem Schülerinnen und Schüler Entscheidungsstrategien sowie den von Knittel (2013) entwickelten Urteilskreislauf als Hilfestellung für kompensatorisches Bewerten kennenlernen. Dieser Abschnitt läuft nach dem Vorbild des „Expliziten Bewertungstrainings“ ab, dass von Knittel (2013) im Rahmen der Unterrichtseinheit PEBU (Photovoltaik, Energie, Bewerten und Umwelt) zur Förderung von Bewertungskompetenz entwickelt wurde.

Um die Unterrichtseinheit zeitlich im Rahmen zu halten, wurden die Kriterien, anhand derer der Einsatz bromierter Flammenschutzmittel bewertet werden soll, bereits vorgegeben. Mit den Schülerinnen und Schülern wird gemeinsam im Plenum diskutiert, ob die Auswahl der Kriterien sinnvoll ist.

Als weiterführende Forschung wäre es interessant zu untersuchen, in welchem Ausmaß die entwickelte Unterrichtseinheit eine Veränderung der Bewertungskompetenz bei Schülerinnen und Schülern ermöglicht. Bewertungskompetenz wird nicht innerhalb einer Unterrichtseinheit aufgebaut, sondern kann von Schülerinnen und Schü-

lern nur über längerfristige Prozesse entwickelt werden. Das spiegeln auch die Kompetenzniveaus wieder, die im Rahmen der Kompetenzmodelle zur Bewertungskompetenz von Eggert und Bögeholz (2006), Hostenbach (2011) und Reitschert et al. (2007) entwickelt wurden.

## 5 Literaturverzeichnis

- Abels, S., Becker, R., Kern, G., Kerschbaumer, M., Koliander, B., Langer, E., Lembens, A., Puddu, S. & Steininger, R. (2012). *Die kompetenzorientierte Reifeprüfung aus Chemie - Richtlinien und Beispiele für Themenpool und Prüfungsaufgaben*. BMUKK.
- Alaee, M., Arias, P., Sjödin, A. & Bergman, A. (2003). An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environment International*, 29(6), 683–689. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00121-1)
- Betsch, T., Funke, J. & Plessner, H. (2011). *Denken - Urteilen, Entscheiden, Problemlösen: Mit 14 Tabellen*. Springer.
- BGBI. II. (2009). *Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich - 1. Verordnung: Bildungsstandards im Schulwesen*.
- Birmili, W., Kolossa-Gehring, M., Valtanen, K., Dębiak, M. & Salthammer, T. (2018). Schadstoffe im Innenraum – aktuelle Handlungsfelder. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 61(6), 656–666. <https://doi.org/10.1007/s00103-018-2737-8>
- BMB - Bundesministerium für Bildung. (2016). *Bildungsstandards - Ein Beitrag zur Unterrichts- und Schulentwicklung*. Bundesministerium für Bildung, Wien. <https://www.bmbwf.gv.at/dam/jcr:68240e12-4ce4-4188-9b88-1778db41bb6d/bildungsstandards.pdf>
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2021). *Österreichisches Umweltzeichen - Ihr unabhängiges*

*Gütesiegel für Umwelt und Qualität.*

<https://www.umweltzeichen.at/de/f%C3%BCr-interessierte/richtlinien/>

BMUKK. (2009). *Naturwissenschaftliche Bildungsstandards - Berufsbildende Höhere Schulen - Das Kompetenzmodell.*

<https://www.bildungsstandards.berufsbildendeschulen.at/sites/default/files/broschuere/BBS-Bildungsstandards-Broschuere-Naturwissenschaften-BHS.pdf>

Bögeholz, S. (2007). Bewertungskompetenz für systematisches Entscheiden in komplexen Gestaltungssituationen Nachhaltiger Entwicklung. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung. Ein Handbuch für Lehramtsstudenten und Doktoranden* (S. 209–220). Springer Berlin Heidelberg.

Bögeholz, S., Hössle, C., Langlet, J., Sander, E. & Schlüter, K. (2004). Bewerten - Urteilen - Entscheiden im biologischen Kontext: Modelle in der Biologiedidaktik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 89–115.

Brechner, E. (2001). Luftschadstoffe. In *Kompaktlexikon der Biologie*. Spektrum Akademischer Verlag. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/luftschadstoffe/7139>

Breuer, D., Sagunski, H., Ball, M., Hebisch, R., von Hahn, N., Lahrz, T., Nitz, G., Pannwitz, K.-H., Rosenberger, W. & Schwabe, R. (2014). Empfehlungen zur Ermittlung und Beurteilung chemischer Verunreinigungen der Luft von Innenraumarbeitsplätzen. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 74, 354–360.

Bruice, P. Y. (2011). *Organische Chemie* (5. Aufl.). Pearson Studium.

Bundesarbeitskammer. (2021). *Arbeitsstoffe: Warum gibt es in Österreich keine „risiko-basierten Grenzwerte“ nach dem Vorbild Deutschlands?*

[https://www.arbeiterkammer.at/beratung/arbeitundgesundheit/Arbeitsumfeld/Grenzwerte\\_und\\_Messungen.html](https://www.arbeiterkammer.at/beratung/arbeitundgesundheit/Arbeitsumfeld/Grenzwerte_und_Messungen.html)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2021).

*Bromierte Flammenschutzmittel* [Website-Beitrag].

<https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/chemikalien/bromierte-flammenschutzmittel>

*Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 17.05.2021.* (2021).

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>

Burmeister, M. & Eilks, I. (2011). Ist ein Bio-Kunststoff immer besser als PVC? *PdN CHEMIE in der Schule*, 5/60/2011, 33–36.

Ceresana eK. (2022). *Marktstudie Flammenschutzmittel* [Website-Beitrag]. Ceresana eK.

<https://www.ceresana.com/de/marktstudien/chemikalien/flammenschutzmittel/>

de Wit, C. A. (2002). An overview of brominated flame retardants in the environment. *Chemosphere*, 46/2002, 583–624.

Deutsche Forschungsgemeinschaft. (2015). *MAK-undBAT- Werte-Liste 2015*. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.

DR Deutsche Recycling Service GmbH. (2021). *WEEE-Richtlinie: Umsetzung in Deutschland und Europa*. <https://deutsche-recycling.de/weee-eu-richtlinie/>

ECHA - European Chemicals Agency. (2021). *Information on Chemicals*. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>

- ECHA - European Chemicals Agency. (2021b). *REACH verstehen*.  
<https://echa.europa.eu/de/regulations/reach/understanding-reach>
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021a). *Substance Infocard: 2,2',6,6'-tetrabromo-4,4'-isopropylidenediphenol*. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.001.125>
- EFSA. (2021). *Bromierte Flammschutzmittel* [Website-Beitrag].  
<https://www.efsa.europa.eu/de/topics/topic/brominated-flame-retardants>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2012). Scientific Opinion on Emerging and Novel Brominated Flame Retardants (BFRs) in Food. *EFSA Journal*, 2012;10(10):2908.  
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2908>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011b). Scientific Opinion on Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in Food. *EFSA Journal*, 9(7). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2296>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011a). Scientific Opinion on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Food. *EFSA Journal*, 2011;9(5):2156. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2156>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011c). Scientific Opinion on Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and its derivatives in food. *EFSA Journal*, 9(12):2477, 1–67. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2477>
- Eggert, S. & Bögeholz, S. (2006). Göttinger Modell der Bewertungskompetenz – Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ für Gestaltungsaufgaben Nachhaltiger Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12(12), 177–197.

- EUR-Lex Access to European Union law. (2019). *Schutz der Gesundheit und der Umwelt vor persistenten organischen Schadstoffen*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/LSU/?uri=CELEX:32019R1021>
- European Commission. (2021). *More about the EU Ecolabel*. <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/the-ecolabel-scheme.html>
- FeuerTrutz Network GmbH. (2014, April 15). Marktstudie zu Flammschutzmitteln. *FeuerTrutz Network GmbH*. <https://www.feuertrutz.de/marktstudie-zu-flammschutzmitteln-15042014>
- Fischler, H., Gebhard, U. & Rehm, M. (2018). Naturwissenschaftliche Bildung und Scientific Literacy. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 11–29). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_2)
- Frankfurter Allgemeine Zeitung. (2014, Mai 6). 4 Millimeter Folie gegen 1200 Grad Celsius. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/akusta-plast-fire-stop-kunststofffolien-als-feuerschutz-12921830.html>
- Gawronski, B. & Conrey, F. R. (2004). Der Implizite Assoziationstest als Maß automatisch aktivierter Assoziationen: Reichweite und Grenzen. *Psychologische Rundschau*, 55(3), 118–126. <https://doi.org/10.1026/0033-3042.55.3.118>
- Gebhard, U., Höttecke, D. & Rehm, M. (2017). *Pädagogik der Naturwissenschaften*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-19546-9>
- Germer, S. (2008). *Effekte bromierter Flammschutzmittel auf den Fremdstoffmetabolismus*. Technische Universität Kaiserslautern.

- Greenpeace. (2005). Schwer bekömmlich: Flammschutzmittel in Aalen. *Greenpeace*.  
<https://www.greenpeace.de/presse/presseerklarungen/schwer-bekommlich-flammschutzmittel-aalen>
- Grimm, R. (2014, Dezember 19). Alternatives Flammschutzmittel: Polymer-FR schützt Styropor vor Feuer. *Baustoffwissen*.  
<https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/alternative-brandhemmer-polymer-fr-styropor-feuer/>
- Hartmann, C. (2016). *Bromierte Flammschutzmittel in der Umwelt* (S. 1–73) [Report]. Umweltbundesamt GmbH.
- Heinz, W. (2019). Technische Richtkonzentrationen (TRK). In *Verzeichnis Deutsch-Europäischer Arzneinamen* (S. 463–465). De Gruyter.
- Hopf, M., Kapelari, S. & Lembens, A. (2017). Naturwissenschaftliche Grundbildung - Welchen Beitrag kann kompetenzorientierter Unterricht dazu leisten? *Plus Lucis*, 1/2017, 4–10.
- Hostenbach, J. (2011). *Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht*. Logos-Verl.
- Jandric, A., Part, F., Fink, N., Huber-Humer, M., Salhofer, S. & Zafiu, C. (2020). Bromierte Flammschutzmittel in Elektroaltgeräten: Untersuchung der Bromkonzentration nach Kunststofftypen und Gerätekategorien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(1–2), 68–76. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00639-7>
- K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie. (2018, Januar 8). Kunststoff-Additive, die Leben retten. *K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie*. <https://www.k-zeitung.de/kunststoff-additive-die-leben-retten/>

- K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie. (2019, September 11). Grafe entwickelt halogenfreien Flammenschutz für Polycarbonat. *K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie*. <https://www.k-zeitung.de/grafe-entwickelt-halogenfreien-flammenschutz-fuer-polycarbonat/>
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3–18.
- Kauertz, A., Fischer, H. E., Mayer, J., Sumfleth, E. & Walpuski, M. (2010). Standardbezogene Kompetenzmodellierung in den Naturwissenschaften der Sekundarstufe I. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 135–153.
- Kern, G., Koliander, B. & Lembens, A. (2017). Wissen und Können erwerben, anwenden und sichtbar machen - Kompetenzmodelle in den naturwissenschaftlichen Fächern. *Plus Lucis*, 1/2017, 19–23.
- Kleine Zeitung. (2018, Oktober 17). Recycling-Produkte aus Elektroschrott können giftig sein. *Kleine Zeitung*. [https://www.kleinezeitung.at/wirtschaft/5514833/Gesundheitsgefahr\\_Recycling-Produkte-aus-Elektroschrott-koennen](https://www.kleinezeitung.at/wirtschaft/5514833/Gesundheitsgefahr_Recycling-Produkte-aus-Elektroschrott-koennen)
- KMK - Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife* (S. 3–28). Wolters Kluwer Deutschland GmbH.

- Knittel, C. (2013). *Eine Feldstudie zur Untersuchung der Förderung von Bewertungskompetenz - Am Beispiel der Photovoltaik*. Pädagogische Hochschule Freiburg.
- Koch, C. (2015). Das Umweltverhalten von HBCD und daraus resultierende juristische Folgen. *Mitt Umweltchem Ökotox*, 4/2015, 113–115.
- Köller, O. (2004, Dezember 20). *Bildungsstandards in der Bundesrepublik und ihre Bedeutung für die Schul- und Unterrichtsentwicklung* [Präsentation]. Bildungsstandards und Fortbildung.
- Kronenzeitung. (2009, März 31). Schlechte Noten für HP, Lenovo und Dell. *Kronenzeitung*. <https://www.krone.at/139419>
- Lave, J. (1988). *Cognition in Practice: Mind, Mathematics and Culture in Everyday Life* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511609268>
- Leisen, J. (2012). *Der Umgang mit Sachtexten im Fachunterricht*. leseforum.ch.
- Lembens, A. & Rehm, M. (2010). Chemie und Demokratielernen - Zwei unvereinbare Welten? In *Politisches Lernen* (S. 281–302). Studienverlag Ges.m.b.H.
- Lembens, A., Weiglhofer, H. & Stadler, H. (2009). PISA 2006 Naturwissenschaft: Das Konzept aus fachdidaktischer Sicht. In *PISA 2006 - Österreichischer Expertenbericht zum Naturwissenschafts-Schwerpunkt* (S. 32–53). Leykam Buchverlagsgesellschaft m.b.H. Nfg. & Co. KG.
- Luerßen, B., Peppler, K., Ries, M., Janek, J. & Over, H. (2015). Die Kerze: Ein physikalisch-chemisches Wunderwerk... *Chemie in unserer Zeit*, 49(6), 362–370. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201500687>

- Marks, R., Bertram, S. & Eilks, I. (2006). Chemiebezogene Bewertungskompetenz entwickeln. *Unterricht Chemie*, 17(94/95), 69–73.
- Marks, R., Burmeister, M., Lippel, M. & Eilks, I. (2012). Bewerten lernen - Gefilterte Information und die Imitierung gesellschaftlicher Praktiken im gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterricht. *Unterricht Chemie*, 23(127), 32–36.
- Menthe, J. (2012). Wider besseren Wissens?! Conceptual Change: Vermutungen, warum erworbenes Wissen nicht notwendig zur Veränderung des Urteilens und Bewertens führt. *Zeitschrift für interpretative Schul- und Unterrichtsforschung*, 1(1), 161–183.
- Menthe, J. & Düker, P. (2017). Schülervorstellungen sind entscheidend. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 159, 38–43.
- Mittelsten Scheid, N. & Hößle, C. (2008). Bewerten im Biologieunterricht: Niveaus von Bewertungskompetenz. *Erkenntnisweg Biologiedidaktik*, 6, 87–104.
- Morf, L. S., Taverna, R. & Buser, A. (2007). Ressourcen- und Schadstoffmanagement in der Abfallwirtschaft: Die steigende Bedeutung der Recyclingprozesse am Beispiel der bromierten Flammschutzmittel. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, März/April 2007, 23–30.
- Neumann, K., Kauertz, A., Lau, A., Notarp, H. & Fischer, H. (2007). Die Modellierung physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 101–121.
- OEKO-TEX Service GmbH. (2021). OEKO-TEX. <https://www.oeko-tex.com/de/ueber-uns>

- Pfister, H.-R., Jungermann, H. & Fischer, K. (2017). *Die Psychologie der Entscheidung: Eine Einführung*. Springer Berlin Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53038-2>
- Pflaumbaum, W. (2021). MAK. In *Thieme RÖMPP [online]*. Georg Thieme Verlag.  
<https://roempp-thieme-de.uaccess.univie.ac.at/H2IWH>
- RAL gGmbH. (2021). *Blauer Engel - Das Umweltzeichen*. <https://www.blauer-engel.de/de/blauer-engel/unser-zeichen-fuer-die-umwelt>
- Reitschert, K., Langlet, J., Hössle, C., Mittelsten Scheid, N. & Schlüter, K. (2007). Dimensionen ethischer Urteilskompetenz. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 60/2007, 43–51.
- Riedel, S. & Sonnenberg, K. (2019). *Chemie der Elemente: Brom - Eines von zwei flüssigen Elementen* (S. 92–94). Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
- Roßkamp, E. (2010). Innenraum. In *Toxikologie* (Bd. 1). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sander, H. (2012). *Der Einfluss von Bewertungsstrukturwissen auf Bewertungskompetenz bei Schüler/innen - Instrumententwicklung und -erprobung*.
- Sauermost, R. (1999). Schadstoffe. In *Lexikon der Biologie*. Spektrum Akademischer Verlag. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/schadstoffe/58910>
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 45–66.
- Schiele, R. (2006). Grenzwerte - Die Lösung aller Probleme? *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 46/2006, 2577–2578.

- Schmitz, L. & Reiners, C. S. (2019). Entscheidungstagebuch - Bewertungskompetenz individuell fördern. In *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (Bd. 39).
- Sicius, H. (2016). *Halogene: Elemente der siebten Hauptgruppe*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10190-9>
- Streller, S., Bolte, C., Dietz, D. & Noto La Diega, R. (2019). *Chemiedidaktik an Fallbeispielen: Anregungen für die Unterrichtspraxis*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58645-7>
- Tappler, P. (2018). *Wegweiser für eine gesunde Raumluf - Die Chemie des Wohnens*. BMNT.
- Tappler, P. & Twrdik, F. (2004). Wo stehen wir heute? Geschichten aus dem Innenraum. In *Gesunde Raumluf - Schadstoffe in Innenräumen* (S. 7–15). IBO-Verlag.
- Tewes, U. & Wildgrube, K. (Hrsg.). (1999). *Psychologie-Lexikon*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783486801743>
- Umweltbundesamt. (2007). Beurteilung von Innenraumlufkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten: Handreichung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 50(7), 990–1005. <https://doi.org/10.1007/s00103-007-0290-y>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2008). *Bromierte Flammschutzmittel - Schutzengel mit schlechten Eigenschaften?* Umweltbundesamt Deutschland.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bromierte-flammschutzmittel-schutzengel-schlechten>

Wiener Zeitung. (2014, Juni 16). Europas Gewässer stark mit Chemie belastet. *Wiener Zeitung*.

[https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wissen/mensch/638283\\_Europas-Gewaesser-stark-mit-Chemie-belastet.html](https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wissen/mensch/638283_Europas-Gewaesser-stark-mit-Chemie-belastet.html)

Wirtschaftskammer Österreich. (2017). *CE-Kennzeichnung von elektrotechnischen Produkten, Teil 2: RoHS-Richtlinie*.

## 6 Anhang

### 6.1 Anhang 1: Gesetzliche Beschränkungen

Aufgrund ihrer teilweise schädigenden Eigenschaften auf Mensch und Umwelt wurde die Verwendung einiger bromierter Flammschutzmittel eingeschränkt bzw. verboten. Folgende nationale und internationale Gesetzgebungen spielen dabei eine Rolle:

#### ***REACH***

REACH steht für „Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals“, die Verordnung trat am 1.6.2007 in Kraft. Die REACH-Verordnung wurde von der europäischen Union (EU) erlassen, um gleichzeitig die Risiken für Mensch und Umwelt, die durch unterschiedliche Chemikalien entstehen können, einzudämmen und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie der EU zu verbessern. Weil die REACH-Verordnung nicht nur für jene Chemikalien gilt, die in chemischen Prozessen Anwendung finden, sondern auch für diejenigen, die im täglichen Leben vorkommen (in Reinigungsmitteln etc.), betrifft die Verordnung fast alle Unternehmen mit Sitz in der europäischen Union. Die Unternehmen müssen gegenüber der European Chemicals Agency (ECHA) aufzeigen, wie die in Verkehr gebrachten Stoffe sicher und risikoarm verwendet werden können. Die REACH-Verordnung legt Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Stoffeigenschaften fest, mit dem Ziel, die Risiken der Stoffe zu beherrschen und zu kontrollieren. Wenn Risiken von Stoffen nicht beherrschbar sind, können diese Stoffe von Behörden verboten werden oder deren Verwendung eingeschränkt werden (ECHA – European Chemicals Agency, 2021b).

#### ***POP-Verordnung***

Die Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe hat zum Ziel, durch die Beschränkung der Verwendung persistenter organischer Schadstoffe (Persistent Organic Pollutants – POP) die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu schützen. Die Verordnung verbietet bzw. beschränkt daher die Herstellung und das Inverkehrbringen der gelisteten Substanzen (EUR-Lex Access to European Union law, 2019).

## **RoHS**

Die RoHS (Restriction of certain Hazardous Substances) Richtlinie 2011/65/EU gilt europaweit, wobei die Umsetzung in nationales Recht auf Bundesebene erfolgt. In Österreich erfolgt die Umsetzung in der Elektroaltgeräte-Verordnung (EAG-VO). Sie hat zum Ziel, die Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten zu beschränken, um die menschliche Gesundheit zu schützen und eine umweltgerechte Verwertung und Beseitigung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten zu gewährleisten. Derzeit beschränkt die Richtlinie die Verwendung von folgenden Stoffen: Blei, Quecksilber, Cadmium, sechswertiges Chrom, polybromierte Biphenyle (PBB) und polybromierte Diphenylether (PBDE) und seit 2019 auch von Bis (2-ethylhexyl)phthalat (DEHP), Benzylbutylphthalat (BBP), Dibutylphthalat (DBP) und Diisobutylphthalat (DIBP) (Wirtschaftskammer Österreich, 2017).

## **WEEE-Richtlinie**

Die WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) Richtlinie 2012/19/EU soll eine fachgerechte Entsorgung von Elektroaltgeräten innerhalb der EU sicherstellen. Die Rahmenbedingungen müssen in jedem EU-Staat auf nationaler Ebene umgesetzt werden. Die Richtlinie legt unter anderem fest, dass die Kosten, die durch Sammel- und Verwertungssysteme entstehen, nicht die Verbraucher, sondern die Hersteller und Vertreiber der Geräte tragen müssen. Zudem müssen alle in Verkehr gebrachten Elektrogeräte registriert und gekennzeichnet werden und die Menge der Geräte auf dem Markt muss kontinuierlich erfasst werden. Seit 2018 gilt die Richtlinie auch für Möbel und Textilien mit elektrischen Funktionen. In Österreich wird auch die WEEE-Richtlinie durch die Elektroaltgeräte-Verordnung (EAG-VO) umgesetzt (DR Deutsche Recycling Service GmbH, 2021).

In der EU unterliegen bromierte Flammschutzmittel zurzeit der Richtlinie zu Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE-Richtlinie) und müssen aus den in Altstoffsammelstellen gesammelten Kunststoffen entfernt werden (Hartmann, 2016).

## **6.2 Anhang 2: Umweltzeichen, Gütesiegel, Labels**

### ***Österreichisches Umweltzeichen***

Von der Republik Österreich werden jene Produkte mit dem österreichischen Umweltzeichen zertifiziert, die die Richtlinien auf Basis eines „Lebenszyklus-Ansatzes“ erfüllen. Im Rahmen dieses Ansatzes werden die Produkte nach verbindlichen Kriterien bewertet, welche von Fachexpertinnen und Fachexperten erstellt und alle vier Jahre überarbeitet werden. In diese Kriterien fließen neben den Umweltauswirkungen bei der Herstellung, beim Gebrauch und bei der Entsorgung auch der Rohstoff- und Energieverbrauch, die Toxizität der Inhaltsstoffe, anfallende Abfälle und die Recyclingfähigkeit, die Verpackung, der Vertrieb und der Transport, die Sicherheit, die Langlebigkeit und die Reparaturfreundlichkeit mit ein (BMK, 2021).

### ***Europäisches Umweltzeichen***

Mit dem EU Ecolabel werden am europäischen Markt umweltfreundliche Produkte und Dienstleistungen gekennzeichnet, wobei die Rohmaterialgewinnung, die Produktion, der Vertrieb und die Entsorgung bzw. die Recycelfähigkeit berücksichtigt werden. Es wurde 1992 von der Europäischen Kommission gegründet und wird von der Europäischen Kommission und den Mitgliedsstaaten der EU geführt (BMK, 2021; European Commission, 2021)

### ***Blauer Engel***

Dieses Umweltzeichen zeichnet Produkte und Dienstleistungen aus, die umweltfreundlicher sind als vergleichbare, konventionelle Produkte und Dienstleistungen. Bei der Bewertung der jeweiligen Produkte wird der gesamte Lebenszyklus miteinbezogen, wobei für jede Produktgruppe eigene Kriterien erarbeitet werden, die alle vier Jahre überarbeitet werden. Der Blaue Engel wird von vier Institutionen getragen: Der Inhaber des Umweltzeichens ist das Deutsche Bundesumweltministerium (BMU), das die Grundsätze für die Vergabe festlegt. Das Deutsche Umweltbundesamt (UBA) ist für die fachliche Expertise zuständig, seine Expertinnen und Experten erarbeiten und überprüfen die fachlichen Kriterien, die die Produkte und Dienstleistungen erfüllen müssen. Die Jury des Umweltzeichens sind unabhängige, unparteiische und ehrenamtliche Entscheider, die die vom UBA vorgeschlagenen Vergabekriterien schließlich beschließen und über neue Produktgruppen entscheiden. Die Jury umfasst 15 Ver-

treterinnen und Vertreter unter anderem aus Umwelt- und Verbraucherverbänden, Gewerkschaften, Industrie, Handel, Wissenschaft und Medien. Die RAL gGmbH (gemeinnützige GmbH) stellt den unabhängigen Prüfer dar. Nach Einreichung eines Antrages von einem Unternehmen für ein Produkt wird dieser geprüft und schließlich ein Vertrag mit dem Unternehmen über die Nutzung des Umweltzeichens „Blauer Engel“ abgeschlossen (RAL gGmbH, 2021).

### **Ökotex**

Das Label wurde 1992 gegründet und vergibt unabhängige Zertifikate für gesundheitlich unbedenkliche, umweltfreundliche und sozialverträglich hergestellte Produkte. Ökotex umfasst 18 unabhängige Forschungs- und Prüfinstitute in Europa und Japan, die die Prüfmethode und Grenzwerte entwickeln, die für die Vergabe des Labels erfüllt werden müssen (OEKO-TEX Service GmbH, 2021).

## 6.3 Anhang 3: Unterrichtsmaterialien

### Flammschutzmittel

*„Flammschutzmittel dienen dazu, die Entzündung brennbarer Materialien, wie Kunststoffe, Textilien oder Holz, hinauszuzögern und die Flammenausbreitung zu verlangsamen. Es handelt sich um unterschiedliche chemische Verbindungen, die sich beispielsweise in Kunststoffgehäusen von Fernsehern und Computern, Wohnraumtextilien, Dämm- und Montageschäumen befinden. [...] Sie sind [...] in der Umwelt weit verbreitet, schwer abbaubar und zum Teil bioakkumulierend; das heißt, sie reichern sich in Lebewesen an. [Sie] sind toxisch für Gewässerorganismen und [...] wurden auch in Muttermilch und im Blut des Menschen gefunden.“*

(BMU, 2021)

### Einführungstext zu bromierten Flammschutzmitteln

---

8. Januar 2018

Mit einem neuen Forschungsprojekt will das Fraunhofer LBF das Recycling halogenfrei flammgeschützter Kunststoffe verbessern.

Der katastrophale Brand des Grenfell-Tower in London hat bewiesen, wie wichtig Brandschutz ist. [...] „Flammschutzmittel können die Entstehung von Bränden verzögern“, erläutert Oliver Kutsch, Geschäftsführer des Marktforschungsinstituts Ceresana: "Sie verschaffen Feuerwehr und Betroffenen oft entscheidende Minuten und Sekunden für die Rettung. [...] Laut der aktuellen Studie werden in Baumaterialien, Kunststoffprodukten, Elektro-Geräten und Textilien derzeit weltweit pro Jahr rund 2,21 Mio. t Flammschutzmittel eingesetzt. [...] Die Bauindustrie ist der wichtigste Absatzmarkt für Flammschutzmittel: Rund 30 % der weltweiten Nachfrage kommen aus diesem Bereich. [...] Bei zahlreichen Bauprodukten aus Gummi, in Klebstoffen sowie Farben und Lacken kommen Flammschutzmittel ebenfalls zum Einsatz. Die Elektronik-Branche braucht sie für Einzelkomponenten wie Leiterplatten, Computergehäuse sowie Haushalts- und Telekommunikationsgeräte. [...] Bis 2024 erwarten die Marktforscher von Ceresana das größte prozentuale Wachstum der Flammschutzmittel-Nachfrage im Bereich der Fahrzeugindustrie. Baumaterialien werden allerdings auch in den kommenden acht Jahren weiterhin das größte Anwendungsgebiet bleiben. [...]

(K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie, 2018, gekürzt und vereinfacht)

## **Zeitungsartikel 1**

---

11. September 2019

Alternative zu bisherigen Produkten: Grafe hat ein effektives Flammenschutzmittel für Polycarbonat entwickelt, das weder halogen- noch phosphorhaltig ist. [...] „Die zunehmende Verwendung von Elektronik im Haushalt und im Büro erhöht die Gefahr von Feuerschäden“, so Dr. Stadermann. „Zumeist werden bromhaltige Flammenschutzmittel für elektronische Bauteile verwendet. [Sie] sind sehr effektiv, sehen sich aber verstärkt europäischen Regularien ausgesetzt, die teilweise bis zum Verbot reichen“, erläutert er die Hintergründe für die Suche nach einer Alternative.

Auch andere zurzeit verwendete Flammenschutzmittel haben Nachteile. „Produkte auf reiner Stickstoffbasis zeigen nicht die notwendige Effektivität und einige phosphorbasierte Flammenschutzmittel können zu Korrosion in elektronischen Produkten führen“, erklärt der Experte. [...]

(K Zeitung - Das Branchenblatt der Kunststoffindustrie, 2019)

## **Zeitungsartikel 2**

---

6. Mai 2014

Kunststoffe lassen sich mit einigen Zusätzen unbrennbar machen. Eine neue Folie soll Gebäude und Fahrzeuge besser vor Feuer schützen. Es entstehen dabei keine toxischen Dämpfe. [...]

Wie man Kunststoffe mit Zusätzen unbrennbar macht, ist tatsächlich kein Geheimnis, sondern seit Jahrzehnten erprobte Technik. Dazu stehen verschiedene Mittel zur Wahl. Halogenierte Flammschutzmittel etwa sind in geringer Dosis wirksam und vertragen sich mit den meisten Polymeren. Sie werden für Textilien, elektrische und elektronische Geräte eingesetzt. Unter Hitze hemmen die Halogene die Reaktion mit Sauerstoff. Allerdings können im Fall eines Brandes [giftige Gase] entstehen.

Breite Anwendung finden auch phosphorhaltige Flammschutzmittel. Sie bilden unter Feuerwirkung eine isolierende Schutzschicht, sind aber in manchen Kunststoffen nur schwer zu verarbeiten. Auch hier könnten sich giftige Dämpfe bilden, sagt Stadter. Haupteinsatzgebiet sind geschäumte Kunststoffe in Möbeln und im Bau. Anorganische Flammschutzmittel wie Aluminiumhydroxid und Magnesiumhydroxid kühlen die Brandstelle und verhindern, dass der Kunststoff weiterbrennt. Sie sind nicht teuer, und ihr größter Vorzug ist, dass sie im Feuer keine schädlichen Gase bilden. [...] Allerdings müssen sie für eine ausreichende Wirksamkeit in großen Mengen zugemischt werden. Das beeinträchtigt dann die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs. [...]

Stadter ist es nun anscheinend gelungen, die anorganischen Flammschutzmittel so einzubinden, dass die guten Eigenschaften der Kunststoffe zum großen Teil erhalten bleiben. [...] Die Folie [...] sei leicht zu verarbeiten, sagt Stadter. [Sie] lässt sich verkleben, verschweißen und [...] einlaminiert. [...] Bei der Verbrennung seines Produktes entstünden nur Wasserdampf und Kohlendioxid. Das ist der Grund, warum er für seine Demonstration keinen Atemschutz braucht. Die Reste können als Hausmüll entsorgt werden.

(Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2014)

### **Zeitungsartikel 3**

---

15. April 2014

Flammschutzmittel retten Leben: Sie verhindern oder verzögern das Verbrennen von Plastik, Baumaterialien und Textilien. [...] Flammschutzmittel werden vor allem im Bausektor gebraucht: Im Wohnungsbau kommen vermehrt brennbare Materialien zur Wärmedämmung und Verbesserung der Energieeffizienz zum Einsatz; Rohre und Kabel aus Kunststoff ersetzen zunehmend traditionelle Metallrohre – folglich muss der Brandschutz verbessert werden. Noch stärker wächst jedoch die Nachfrage von Elektrik & Elektronik: Die Hersteller von Smartphones und Tablet-PCs verbrauchen immer mehr flammgeschützte Kunststoffe. Dabei spielt für sie die Verträglichkeit der verwendeten Flammschutzmittel für Umwelt und Gesundheit eine immer größere Rolle.

Umweltschützer halten halogenierte Flammschutzmittel für problematisch: Sie drängen zum Verzicht auf bromierte und chlorierte Produkte. In manchen Ländern werden trotzdem neue Flammschutzmittel auf der Basis von Brom angeboten. Halogenierte Flammschutzmittel verlieren jedoch zunehmend Marktanteile an umweltfreundlichere Produkte. [...] In China dominieren noch halogenierte Flammschutzmittel; in Westeuropa und Nordamerika machen [halogenfreie Flammschutzmittel] die Hälfte des Markts aus. Die Region Asien-Pazifik ist der größte Absatzmarkt für Flammschutzmittel, wobei allein China fast ein Viertel der gesamten Produktion abnimmt. [...] In Zukunft wird die Region Asien-Pazifik, angetrieben von China und Indien, voraussichtlich ihren Vorsprung ausbauen. [...]

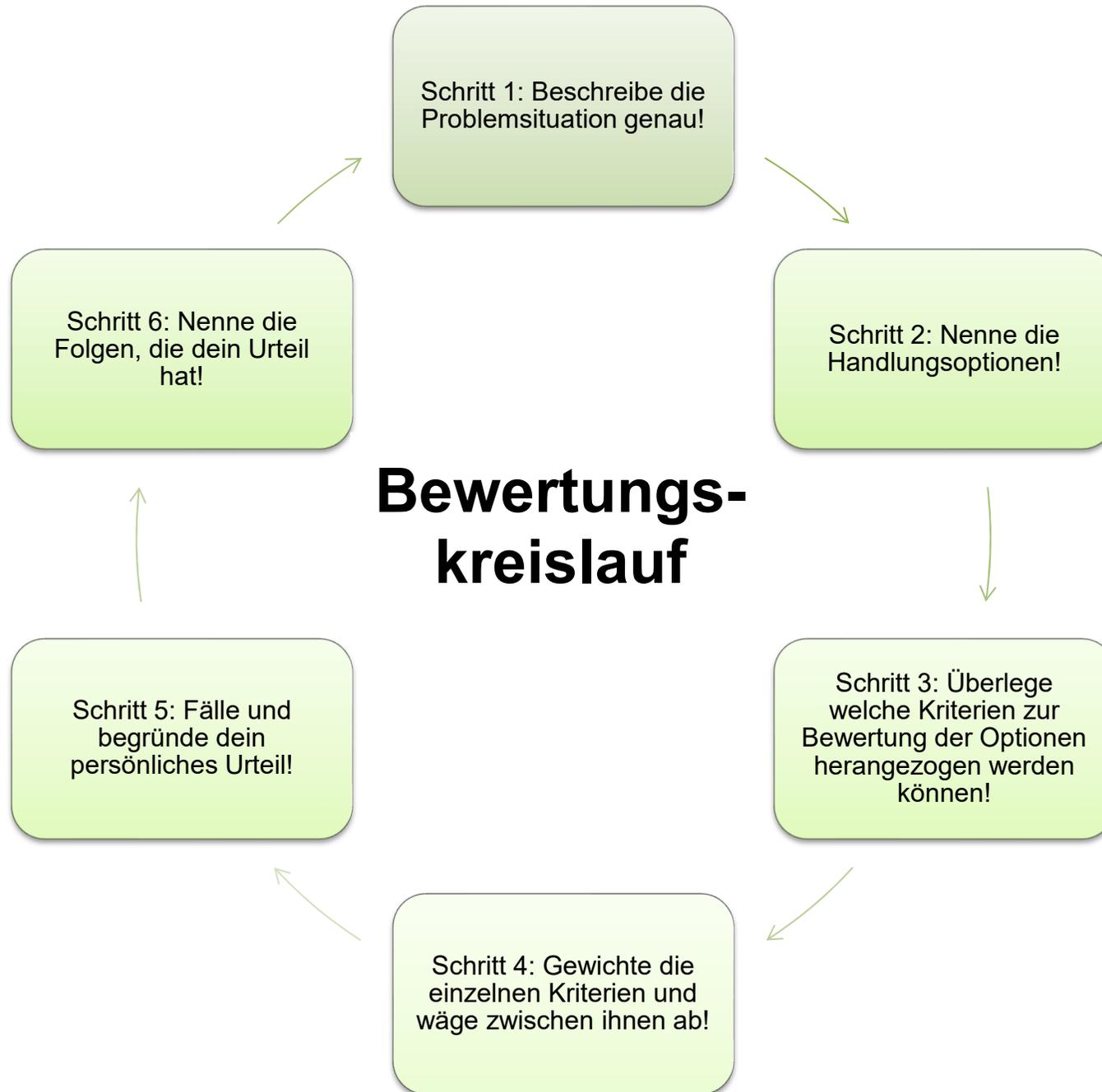
(FeuerTrutz Network GmbH, 2014)

#### **Zeitungsartikel 4**

## Entscheidungsstrategien

	Kompensatorische Entscheidungsstrategie	Non-kompensatorische Entscheidungsstrategie
Beschreibung	Vergleich von verschiedenen Optionen anhand unterschiedlicher Kriterien. Dabei können Nachteile in einem Kriterium durch Vorteile in einem anderen Kriterium aufgewogen werden.	Ein Nachteil in einem Kriterium kann nicht durch einen Vorteil in einem anderen Kriterium aufgewogen werden. Hierbei wird jene Option gewählt, die als erste eine zufriedenstellende Lösung darstellt.
Beispiel „Schuhkauf“	Beim Schuhkauf werden die Kriterien „Preis“ und „Marke“ herangezogen, wobei das Kriterium „Marke“ stärker gewichtet ist. Wenn das Paar Schuhe zwar sehr teuer ist, aber es von einer bestimmten Marke ist, wird das Paar Schuhe gekauft, obwohl es im Kriterium „Preis“ schlecht abschneidet.	Beim Kauf eines Paares Schuhe könnte sich der oder die Kaufende folgende <i>Cut-offs</i> vorgeben: Die Farbe der Schuhe sollte schwarz sein und der Preis darf höchstens bei 60,00 € liegen. Die erste Option, die diese Kriterien erfüllt, wird ausgewählt.

**Aufgabe:** Finde und erläutere ein eigenes Beispiel aus deinem Alltag, in dem einmal eine kompensatorische und einmal eine non-kompensatorische Entscheidungsstrategie sinnvoll zur Anwendung kommt.



## Verwendung von Bromverbindungen

Bromverbindungen werden als Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt, so zum Beispiel Brommethan. Auch in der Medizin sind bromhaltige Verbindungen als schleimlösende Hustenmittel, Schlaf-, Beruhigungs- und Narkosemittel vertreten.

In über 90 % der Elektrogeräte waren oder sind Bromverbindungen als Flamm-  
schutzmittel enthalten, außerdem in Kunststoffen, Textilien, Haushaltsgeräten und in  
der Wärmedämmung (Abbildung 25).

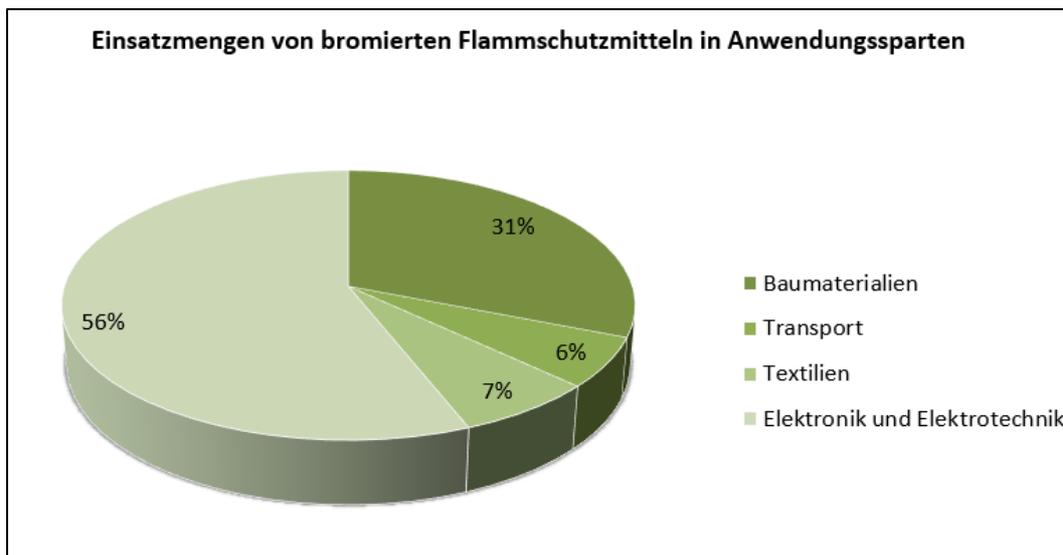


Abbildung 25: Einsatzmengen von bromierten Flammenschutzmitteln in Anwendungssparten (Germer, 2008)

Flammenschutzmittel werden verschiedenen Materialien zugegeben, um sie schwer entflammbar zu machen. Das betrifft vor allem Materialien, die in Innenräumen verwendet werden, wie Textilien, Kunststoffe, Holzwerkstoffe oder Dämmmaterialien. In Kunststoffen haben Flammenschutzmittel meist auch eine Funktion als Weichmacher.

Bromierte Flammenschutzmittel zählen zu denjenigen Chemikalien mit den größten jährlichen Produktionsmengen, 2018 betrug der Jahresverbrauch an bromierten Flammenschutzmitteln weltweit ca. 406.800 t (Ceresana eK, 2022). Es gibt eine Vielzahl von Verbindungen, die zur Gruppe der bromierten Flammenschutzmittel zählt. Allen gemeinsam ist, dass sie Brom enthalten, weil von Brom die Flammenschutzwirkung ausgeht.

## **Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel**

Um zu verstehen, wie Flammschutzmittel wirken, muss man zunächst Verbrennungsprozesse näher betrachten. Eine Verbrennung ist eine Gasphasenreaktion, an der ein Brennstoff und Sauerstoff beteiligt sind, sie besteht aus vier Schritten:

Der Brennstoff wird zunächst in einer endothermen Reaktion einer thermochemischen Umwandlung (=Pyrolyse) ausgesetzt. Dabei können brennbare Gase, flüssige Produkte und Radikale entstehen. In Kombination mit Luft entstehen daraus entzündbare Gasgemische, die in Gegenwart einer Flamme und Sauerstoff in einer exothermen Reaktion zu Verbrennungsprodukten reagieren. Die dabei freiwerdende Wärme kann dann erneut die Pyrolyse von weiterem Brennstoff in Gang setzen.

Flammschutzmittel können hierbei in jeden dieser vier Schritte eingreifen und den Verbrennungsprozess behindern. Eine sehr effektive Methode ist beispielsweise das Einfangen freier Radikale, die während des Verbrennungsprozesses entstehen. Durch Hitzezufuhr entstehen aus halogenierten Verbindungen Halogenradikale. Diese können mit anderen freien Radikalen, die im Zuge der Pyrolyse der Brennstoffe entstehen, gut reagieren und damit die Flammenausbreitung eindämmen

Iod, Brom, Chlor und Fluor sind nicht alle gleich gut für die Verwendung als Flammschutzmittel geeignet: Fluor-Verbindungen sind sehr stabil und zersetzen sich erst bei hohen Temperaturen. Das Halogenradikal steht deshalb zu spät zur Verfügung, um den Verbrennungsprozess zu behindern. Iodierte Verbindungen sind sehr instabil und zersetzen sich schon bei geringeren Temperaturen, was auch sie zu einem ineffizienten Flammschutzmittel macht. Nur Brom und Chlor kommen als sinnvolle Halogenkomponenten in Flammschutzmitteln infrage, wobei Brom ein wenig effizienter im Einfangen der Radikale ist und seine Verbindungen sich zudem bereits bei geringfügig niedrigeren Temperaturen zersetzen als dies bei Chlor und seinen Verbindungen der Fall ist. Aus diesem Grund werden bromierte Flammschutzmittel häufiger eingesetzt als chlorierte.

### **Vorteile bromierter Flammschutzmittel**

Flammschutzmittel zögern die Entzündung von brennbaren Materialien wie Kunststoffen, Holz oder Textilien hinaus und verlangsamen die Ausbreitung der Flammen. Auf diese Weise verhindern sie Brände gänzlich oder verlängern zumindest die Zeit zur Evakuierung von Gebäuden.

Die Verwendung bromierter Flammschutzmittel stieg in der vergangenen Zeit daher kontinuierlich an. Bromierte Flammschutzmittel werden in der Bauindustrie in Dämmstoffen aus Polystyrol verwendet. Man findet sie auch in Elektrogeräten, Möbeln und Textilien, aber auch in Latex, Klebern und Farben. Polystyrol-Schaum wird in seiner granulierten Form in der Landwirtschaft und im Gartenbau zur Texturverbesserung der Böden verwendet.

Vorteile bromierter Flammschutzmittel sind, dass sie einerseits kostengünstig sind und andererseits mit einer Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe kombinierbar sind. In den Gehäusekunststoffen und Kleinteilen von Elektro- und Elektronikgeräten können anstatt bromierter Flammschutzmittel halogenfreie organische Phosphorverbindungen verwendet werden. Dafür müssen aber die verwendeten günstigen Kunststoffe gegen teurere schwerer entflammbarere Mischungen dieser Kunststoffe ersetzt werden.

## Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt

Bromierte Flammschutzmittel wurden bereits auf allen Kontinenten – auch in der Arktis – in verschiedenen Umweltkompartimenten nachgewiesen.

Der Eintrag in die Umwelt kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, beispielsweise durch Emissionen bei der Produktion und der Verarbeitung sowie bei der Entsorgung der mit den bromierten Flammschutzmitteln versehenen Materialien. Die genauen Wege des Eintrages in die Umwelt sind bis heute aber noch nicht ausreichend untersucht. Über Windsysteme wurden und werden die Stoffe auf der ganzen Erde verbreitet. Einige der bromierten Flammschutzmittel sind bioakkumulativ (sie reichern sich in Organismen an) und können in unterschiedlichen Bereichen nachgewiesen werden (siehe Abbildung 26) (Umweltbundesamt Deutschland, 2008):

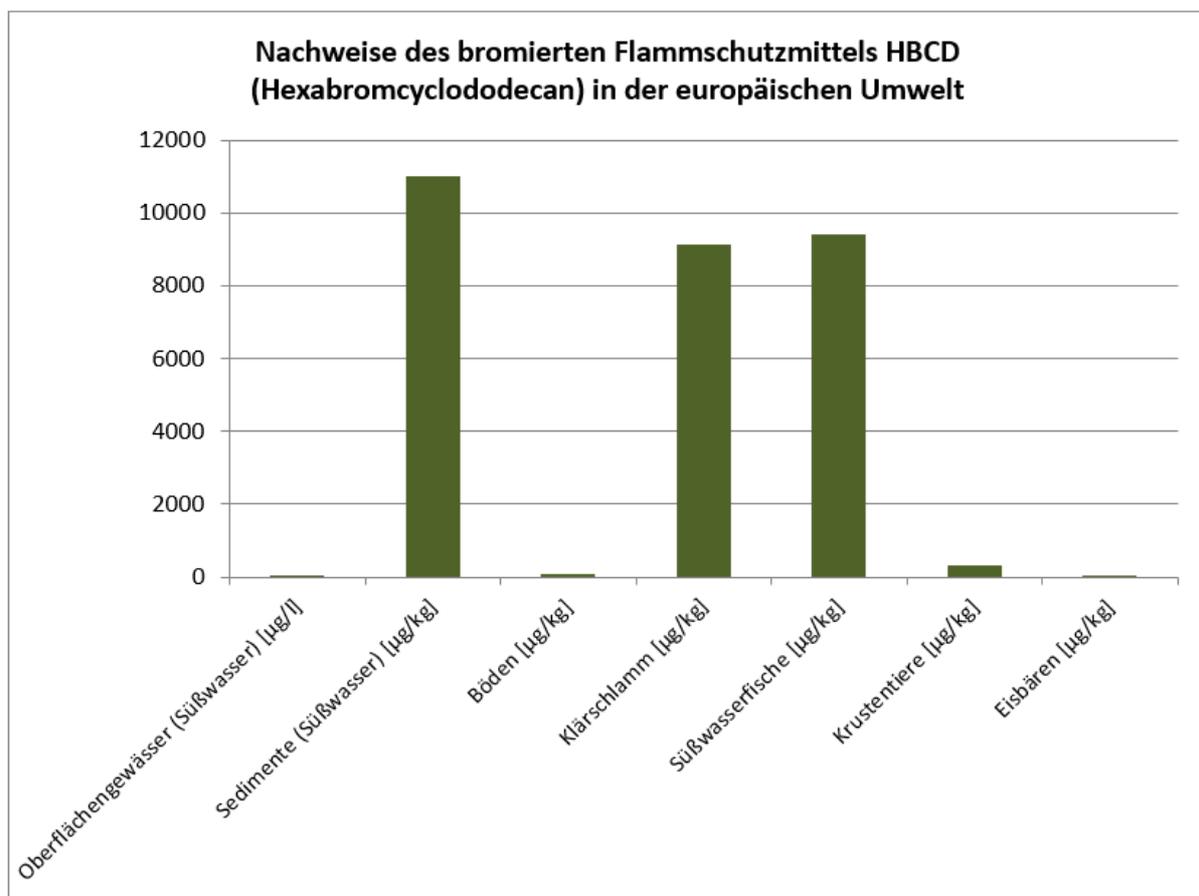


Abbildung 26: Nachweise eines bromierten Flammschutzmittels in der europäischen Umwelt (Umweltbundesamt Deutschland, 2008)

In tierischen Lebewesen können sie aufgrund ihrer lipophilen Eigenschaften besonders gut im Fettgewebe angereichert werden.

Bromierte Flammschutzmittel können zwar nicht besonders gut abgebaut werden, sie können aber bestimmten Bedingungen zu anderen Verbindungen umgebaut werden, die toxisch wirken können.

In vielen Fällen ist das Abbauverhalten der Stoffe noch nicht ausreichend untersucht.

Im Brandfall oder bei unkontrollierter Entsorgung der Materialien können aus halogenhaltigen Verbindungen umweltschädliche Gase freigesetzt werden.

## **Risiken bromierter Flammenschutzmittel für den Menschen**

Bromierte Flammenschutzmittel können über unterschiedliche Expositionswege in den menschlichen Körper gelangen: über Wasser, Lebensmittel, Hausstaub, Innenraumluft oder Muttermilch. Die Hauptaufnahmekette stellt die Ernährung dar, weil es durch die Bioakkumulation in unterschiedlichen Lebewesen zu einer Anreicherung der Stoffe in der Nahrungskette kommt. So sind bromierte Flammenschutzmittel beispielsweise in tierischen Lebensmitteln wie Milch, Fleisch oder Fisch und deren Erzeugnissen nachweisbar. In vielen Fällen ist aber die Exposition nicht allein durch die Nahrung zu erklären. Neben der Aufnahme der Stoffe über die Nahrung spielt auch die Innenraumluft eine große Rolle.

Die Aufnahme von Hausstaub über die Verdauungsorgane stellt dabei die wichtigere Aufnahmequelle dar, nicht dessen Inhalation. Weil bromierte Flammenschutzmittel schwer flüchtige Verbindungen sind, sind sie im Hausstaub in höheren Konzentrationen nachweisbar als in der Innenraumluft.

Die Wirkung der bromierten Flammenschutzmittel im menschlichen Körper ist vielfältig. Viele bromierte Flammenschutzmittel werden im Gastrointestinaltrakt absorbiert und reichern sich im Fettgewebe an. Neben dem eigentlichen Fettgewebe sammeln sich bromierte Flammenschutzmittel im menschlichen Körper vor allem in den fetthaltigeren Organen wie der Nebenniere, der Leber, den Eierstöcken, der Lunge und dem Gehirn an. Sie sind außerdem im Blut und in der Muttermilch nachweisbar.

Eine Ausscheidung ist neben der Muttermilch über den Fäzes und in sehr geringem Ausmaß über den Urin möglich. Die Stoffe haben im menschlichen Organismus Auswirkungen auf das endokrine System, das Nervensystem, das Immunsystem und die Leberfunktionen. Für viele der bromierten Flammenschutzmittel wird außerdem vermutet, dass sie die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und ungeborene Kinder im Mutterleib und gestillt werdende Säuglinge schädigen. In vielen Fällen liegen noch nicht ausreichend Daten zur Risikoeinstufung vor. Es besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf, um die Wissenslücken und Unsicherheiten zu verringern.

### **Noch nicht ausreichend untersuchte bromierte Flammschutzmittel**

Viele der bromierten Flammschutzmittel sind zurzeit noch nicht ausreichend untersucht. Für sie besteht ein besonders wissenschaftliches Interesse, weil es noch Wissenslücken zu deren physikalisch-chemischen Eigenschaften, Stabilität und Reaktivität, Produktionsvolumina, Verwendung, Vorkommen, Exposition und Toxizität gibt. Es ist noch keine vollständige Risikobeschreibung der Stoffe möglich, weil die Datenlage zu Vorkommen, Exposition und Toxizität der Stoffe unvollständig ist. Einige der noch nicht ausreichend untersuchten bromierten Flammschutzmittel konnten aber als potenziell gesundheitsgefährdend, genotoxisch und karzinogen identifiziert werden und sollten deshalb in Zukunft in Untersuchungen besonders berücksichtigt werden.

### **Entsorgung und Recycling**

Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, werden nicht recycelt, weil der Gehalt an bromierten Flammschutzmitteln die Qualität der jeweiligen Rezyklate mindert. Um deren Qualität zu erhöhen, werden Materialien, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, daher vom Recyclingprozess ausgeschlossen und meist thermisch verwertet.

### **Gesetzliche Beschränkungen und Gütesiegel**

Aufgrund ihrer teilweise schädigenden Eigenschaften auf Mensch und Umwelt wurde die Verwendung einiger bromierter Flammschutzmittel eingeschränkt bzw. verboten.

Darüber hinaus gibt es einige Gütesiegel (z.B. das österreichische Umweltzeichen, europäisches Umweltzeichen, Ökotex oder blauer Engel), die Produkte kennzeichnen, die umweltverträglicher sind als vergleichbare Produkte. Dabei werden Kriterien wie die Umweltauswirkungen bei der Herstellung, beim Gebrauch und bei der Entsorgung, aber auch der Rohstoff- und Energieverbrauch, die Toxizität der Inhaltsstoffe, anfallende Abfälle und die Recyclingfähigkeit, die Verpackung, der Vertrieb und der Transport, die Sicherheit, die Langlebigkeit und die Reparaturfreundlichkeit berücksichtigt.

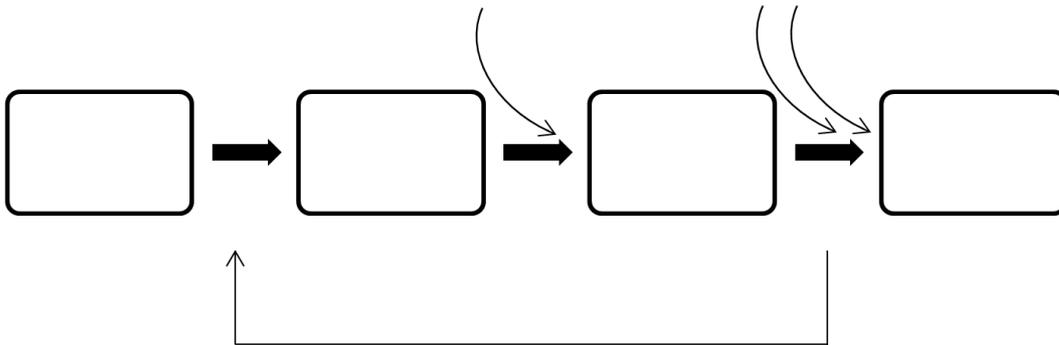
## Quellen:

- Alaee, M., Arias, P., Sjödin, A. & Bergman, A. (2003). An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environment International*, 29(6), 683–689. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00121-1)
- Birmili, W., Kolossa-Gehring, M., Valtanen, K., Dębiak, M. & Salthammer, T. (2018). Schadstoffe im Innenraum – aktuelle Handlungsfelder. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 61(6), 656–666. <https://doi.org/10.1007/s00103-018-2737-8>
- Bruice, P. Y. (2011). *Organische Chemie* (5. Aufl.). Pearson Studium.
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021). Information on Chemicals. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>
- ECHA - European Chemicals Agency. (2021a). Substance Infocard: 2,2',6,6'-tetrabromo-4,4'-isopropylidenediphenol. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.001.125>
- EFSA. (2021). Bromierte Flammschutzmittel [Website-Beitrag]. <https://www.efsa.europa.eu/de/topics/topic/brominated-flame-retardants>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2012). Scientific Opinion on Emerging and Novel Brominated Flame Retardants (BFRs) in Food. *EFSA Journal*, 2012;10(10):2908. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2908>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011b). Scientific Opinion on Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in Food. *EFSA Journal*, 9(7). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2296>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011a). Scientific Opinion on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Food. *EFSA Journal*, 2011;9(5):2156. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2156>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel). (2011c). Scientific Opinion on Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and its derivatives in food. *EFSA Journal*, 9(12):2477, 1–67. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2477>
- Germer, S. (2008). Effekte bromierter Flammschutzmittel auf den Fremdstoffmetabolismus. Technische Universität Kaiserslautern.
- Hartmann, C. (2016). Bromierte Flammschutzmittel in der Umwelt (S. 1–73) [Report]. Umweltbundesamt GmbH.
- Jandric, A., Part, F., Fink, N., Huber-Humer, M., Salhofer, S. & Zafiu, C. (2020). Bromierte Flammschutzmittel in Elektroaltgeräten: Untersuchung der Brom-Konzentration nach Kunststofftypen und Gerätekategorien mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(1–2), 68–76. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00639-7>
- Koch, C. (2015). Das Umweltverhalten von HBCD und daraus resultierende juristische Folgen. *Mitt Umweltchem Ökotox*, 4/2015, 113–115.
- Luerßen, B., Peppler, K., Ries, M., Janek, J. & Over, H. (2015). Die Kerze: Ein physikalisch-chemisches Wunderwerk... *Chemie in unserer Zeit*, 49(6), 362–370. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201500687>
- Morf, L. S., Taverna, R. & Buser, A. (2007). Ressourcen- und Schadstoffmanagement in der Abfallwirtschaft: Die steigende Bedeutung der Recyclingprozesse am Beispiel der bromierten Flammschutzmittel. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, März/April 2007, 23–30.
- Riedel, S. & Sonnenberg, K. (2019). *Chemie der Elemente: Brom—Eines von zwei flüssigen Elementen* (S. 92–94). Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
- Roßkamp, E. (2010). Innenraum. In *Toxikologie* (Bd. 1). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sicius, H. (2016). *Halogene: Elemente der siebten Hauptgruppe*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10190-9>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2008). Bromierte Flammschutzmittel—Schutzengel mit schlechten Eigenschaften? Umweltbundesamt Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bromierte-flammschutzmittel-schutzengel-schlechten>

## Informationstexte

**Bearbeite folgende Aufgaben zum Text:**

1. Die folgende Grafik soll einen Verbrennungsprozess darstellen. Ergänze sie mit den Informationen aus dem Text „Wirkungsweise von bromhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel“. Markiere farbig, an welcher Stelle Halogenradikale den Prozess behindern können.



2. Nenne zwei Vorteile von bromierten Flammschutzmitteln gegenüber anderen Flammschutzmitteln.
3. Nenne zwei Wege, auf denen der Eintrag bromierter Flammschutzmittel in die Umwelt erfolgen kann.

4. Bromierte Flammschutzmittel sind auch in Eisbären nachweisbar. Erkläre, wie bromierte Flammschutzmittel in die Arktis gelangen können.
  
5. Gib an, in welchen drei Umweltkompartimenten die größten Mengen an HBCD (Hexabromcyclododecan) nachgewiesen werden konnten.
  
6. Nenne drei gesundheitliche Auswirkungen, die bromierte Flammschutzmittel auf den menschlichen Körper haben können.
  
7. Erkläre, weshalb Elektroaltgeräte, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, nicht recycelt werden. Was passiert stattdessen mit den Geräten?

**Arbeitsblatt 2: Aufgaben zu den Informationstexten**

**Beschreibe die Problemsituation. Gehe dabei auch auf die zu Beginn der Einheit festgehaltenen Fragen ein!**

**„Ist die Weiterverwendung bromierter Flammschutzmittel vertretbar?“ Nenne die beiden Handlungsoptionen!**

	Gewichtung		Punktevergabe		
Bewertungskriterien	individuell	Mittelwert	individuell	in der Gruppe	Teilnutzen
<b>Verbraucherinteressen</b>					
Effizienz als Flammschutzmittel					
Preis					
Entstehung von gefährlichen Brandgasen					
gesundheitliche Auswirkungen bei Anreicherung im menschlichen Körper					
<b>Materialeigenschaften</b>					
gut mit den Kunststoffen kombinierbar					
<b>Nachhaltigkeit</b>					
Anreicherung in der Umwelt mit negativen Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere					
Ausreichend erforscht?					
Recyclingfähigkeit					
<b>Gesamtnutzen</b>					

#### Arbeitsblatt 4 „Kriterien zur Bewertung der Optionen“

**„Ist die Weiterverwendung bromierter Flammschutzmittel vertretbar?“ Begründe deine Antwort unter Zuhilfenahme des errechneten Gesamtnutzens.**

**Beantworte folgende Fragen als Vorbereitung auf eine Diskussion in der Klasse:**

Welche individuellen Entscheidungen haben Einfluss auf das Ergebnis genommen?

Wodurch wurden diese individuellen Entscheidungen beeinflusst?

Welche Auswirkungen hatten die individuellen Entscheidungen auf das Ergebnis (auf die Beantwortung der Entscheidungsfrage)?

**Beantwortet folgende Frage in Kleingruppen:**

In Warentests werden Produkte hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bewertet. Diese Bewertungen werden von Personen durchgeführt, die meist nicht im wissenschaftlichen Bereich tätig sind, sondern sich das Wissen über die Produkte eigens aneignen müssen. Diese Personen entscheiden dann über die Gewichtung und die Bewertung der einzelnen Kriterien in Warentests. Erklärt, warum vor diesem Hintergrund Warentests nicht generell als objektiv zu sehen sind und was das für euch und euren Umgang mit solchen Warentests bedeutet.