

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Entwicklung einer Unterrichtsreihe zur Grünen und nachhaltigen Chemie mit digital verfügbarem Material für die Sekundarstufe II am Beispiel der Bioraffinerie von Holz

verfasst von / submitted by

Alexandra Teplá, BEd BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree
of

Master of Education (MEd)

Wien, 2023 / Vienna 2023

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

UA 199 500 504 02

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

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Lehrverbund
Unterrichtsfach Bewegung und Sport Lehrverbund
Unterrichtsfach Chemie Lehrverbund

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	III
Vorwort	IV
Einleitung.....	V
1 Theoretische Fundierung	1
1.1 Initiativen auf (bildungs-)politischer Ebene: SDGs, Green Deal und BNE	1
1.2 Naturwissenschaftliche Grundbildung als Hebel zu einer nachhaltigeren Gesellschaft	2
1.3 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion	4
2 Entwicklung einer Unterrichtsreihe zur Grünen und nachhaltigen Chemie	7
2.1 Abläufe in der Entwicklungsarbeit	7
2.2 Fachliche Klärung	9
2.2.1 Grüne und nachhaltige Chemie	9
2.2.2 Der Rohstoff Erdöl	19
2.2.3 Bioraffinerie von Holz und Holzchemie	21
2.3 Erhebung von Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie.....	32
2.3.1 Lernvoraussetzungen rund um das Thema Bioraffinerie von Holz	32
2.3.2 Erhebung von Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie.....	34
2.3.3 Beschreibung der Forschungsmethode	35
2.3.4 Beschreibung der Stichprobe.....	37
2.3.5 Beschreibung der Datenauswertung.....	37
2.3.6 Auswertung der Assoziationen und Darstellung der Ergebnisse	41
2.4 Didaktische Strukturierung.....	43
2.4.1 Das Sandwich-Prinzip.....	44
2.4.2 SpottingScience.....	45
3 Beschreibung der Lerngelegenheit zum Thema Bioraffinerie	48
3.1 Lehrplanbezug, Zielgruppe und notwendige Voraussetzungen der Lernenden ..	48
3.2 Fokussierte Prinzipien der Grünen Chemie.....	49
3.3 Beschreibung der Unterrichtseinheiten	49

3.3.1	Einheit 1: Grüne und nachhaltige Chemie.....	50
3.3.2	Einheit 2: Fossile Rohstoffe	51
3.3.3	Einheit 3: Stoffklassen und funktionelle Gruppen	52
3.3.4	Einheit 4: Der Rohstoff Holz.....	53
3.3.5	Einheit 5: Bioraffinerien.....	55
3.3.6	Einheit 6: Beispiel Essigsäureherstellung	56
4	Entwicklung von Material für ScienceSpots.....	58
4.1	Zielgruppe und Zieldefinition für die ScienceSpot	58
4.2	Schritte in der Entwicklung der ScienceSpots.....	59
4.3	Darstellung der ScienceSpots.....	60
5	Zusammenfassung und Diskussion der Leitfragen.....	63
5.1	Diskussion zu Leitfrage 1	64
5.2	Diskussion zu Leitfrage 2.....	65
5.3	Diskussion zu Leitfrage 3.....	66
6	Verzeichnisse	69
6.1	Literaturverzeichnis.....	69
6.2	Abkürzungsverzeichnis	82
6.3	Abbildungsverzeichnis	83
6.4	Tabellenverzeichnis	85
7	Anhang	87
7.1	Zusammenfassung (deutsch) und Abstract (englisch)	87
7.2	Material zur Erhebung an Schulen.....	88
7.3	Unterrichtspläne	86
7.4	Unterrichtsmaterial.....	93
7.5	Ausgefülltes Unterrichtsmaterial mit Lösungsvorschlägen	110
7.6	ScienceSpots.....	122
7.7	Kodierleitfaden zur Erhebung	136

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich diese Arbeit selbstständig und ohne Hilfe Dritter verfasst habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als Zitate kenntlich gemacht und alle verwendeten Quellen angegeben habe.

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber*innen der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Vorwort

Als zukünftige Chemielehrerin ist es mir ein Anliegen, meine Schüler:innen bestmöglich für ihr Leben als aktive Mitglieder unserer Gesellschaft vorzubereiten. In Anbetracht aktueller gesellschaftlicher Herausforderungen wie dem Klimawandel und dem Umgang mit Ressourcen ist mir wichtig, dass Chemie als Lehre von Stoffen und ihrer Umwandlung nicht nur als Schuldige gesehen, sondern vor allem auch als Lösung erkannt wird. Dazu bedarf es jedoch gut ausgebildeter Lehrpersonen und passendem Material. Mit meiner Arbeit möchte ich einen Beitrag zur Bildung eines Grundstocks an Unterrichtsmaterialien zu dem stärker an Bedeutung gewinnenden Thema der Grünen und nachhaltigen Chemie leisten.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Betreuerin Anja Lembens für die Unterstützung in allen Phasen meiner Arbeit, die Möglichkeit, meinen Interessen nachzugehen und die vielen hilfreichen Gespräche und Rückmeldungen bedanken.

Mein weiterer Dank gilt Rosina Steininger und Martina Zödl. Die Zusammenarbeit mit euch als Arbeitsgruppe Grüne Chemie am AECC Chemie hat mir stets Freude bereitet und einen Grundstein für das Gelingen dieser Arbeit gelegt.

Weiters möchte ich mich bei Rita Krebs und Marvin Rost für den wertvollen fachlichen und methodischen Austausch bedanken. Mein Dank gilt auch Moritz Meier für all unsere Schreibnachmittage und die Durchführung der Intercoder-Übereinstimmung für meine Erhebung.

Zuletzt möchte ich mich herzlich bei, meinen Eltern, meinen Schwestern und meiner Freundin Iris bedanken, die mich während meines gesamten Studiums geduldig unterstützt haben.

Einleitung

Der verantwortungsbewusste Umgang mit Ressourcen stellt angesichts des Bevölkerungswachstums, der Urbanisierung und des technologischen Fortschritts eine epochale und globale Herausforderung für unsere Gesellschaft dar. Ressourcenknappheit, beispielsweise in Hinblick auf fossile Rohstoffe oder seltene Erden, steht dabei einer steigenden Umweltverschmutzung durch Abfallprodukte gegenüber (Zuin et al., 2021). Unsere Gesellschaft steht daher vor der dringenden Notwendigkeit, nachhaltige Prozesse und Produkte zu entwickeln, um begrenzte Ressourcen zu schonen und eine vielfältige Umwelt zu erhalten. Die Chemie als Wissenschaft und Industrie spielt dabei insofern eine Schlüsselrolle, als sie Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hat, nämlich Planung, Herstellung, Handhabung und Abbau. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, muss neben innovativen Technologien und politischen Maßnahmen auch ein angemessenes Verantwortungsbewusstsein und Verhaltensänderungen auf individueller Ebene gefordert und gefördert werden. Auf politischer Ebene stellen die 17 UN-Nachhaltigkeitsziele (engl. Sustainable Development Goals, SDGs) eine Agenda für nachhaltige Entwicklung dar, die bis zum Jahr 2030 erreicht werden soll (United Nations, 2015). Auch die europäische Kommission hat mit dem Green Deal eine konzeptuelle Grundlage für den Wandel von Wirtschaft, Gesellschaft und Industrie geschaffen (Europäische Kommission, 2019). Die im Jahr 2020 gegründete Plattform Grüne Chemie soll durch die Zusammenarbeit von Vertreter:innen aus verschiedenen Interessensgruppen Lösungen zur Integration von Nachhaltigkeit in chemisches Denken und Handeln in Österreich fördern (BMK, 2021).

Im Alltag stoßen Menschen immer wieder auf implizit oder explizit chemische Fragestellungen. Diese reichen von Inhaltsstoffen in Konsumgütern über Produktionsverfahren und Stoffwechselprozesse bis hin zu Auswirkungen des individuellen Handelns auf den Klimawandel. Häufig sind solche Fragen mit der Notwendigkeit einer Entscheidung verknüpft, wie beispielsweise Entscheidungen beim Einkaufen oder die Wahl des Transportmittels zur Schule oder Arbeit. Um solche Entscheidungen nicht allein ‚aus dem Bauch heraus‘ treffen zu müssen, ist eine angemessene naturwissenschaftliche Grundbildung (engl. Scientific Literacy) notwendig, welche durch einen darauf ausgerichteten Chemieunterricht erzielt werden kann (Holbrook & Rannikmae, 2007).

Der Chemieunterricht ermöglicht die Kombination naturwissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Perspektiven, indem fachliche Grundlagen in einem authentischen Kontext mit Nachhaltigkeitsaspekten erarbeitet werden (Marks et al., 2014). Die zwölf Prinzipien Grüner Chemie nach Anastas und Warner (1998) gelten in der Forschung und Industrie als Fundament für die Implementierung von Nachhaltigkeitsaspekten in

chemisches Denken und Handeln, können jedoch auch für den Chemieunterricht herangezogen werden. Bis dato gibt es solche Unterrichtskonzepte beispielweise zu den Themen Biokunststoffe und Biotreibstoffe (z.B. Heinzle & Eckhart, 2022). In Bezug auf fossile und nachwachsende Rohstoffe hielt in den letzten Jahren die Förderung, Verarbeitung und Nutzung von Erdöl(-produkten) Einzug in Schulbücher und den Chemieunterricht. Material zu Bioraffinerien als Alternative zur Erdölraffinerie in angemessener Qualität und Komplexität ist hingegen noch rar. Beispiele dafür finden sich in Form von Holzforscherheften für die Primar- und Sekundarstufe (Bader et al., 2021; Eck et al., 2019), Multimedia-Stories zu Bioraffinerien (BIOCOM AG, 2022) oder englischsprachigen Unterrichtsplanungen rund um Grüne und nachhaltige Chemie (Beyond Benign, 2023). Die wenigen existenten Materialien sind vom Regelunterricht entkoppelt, sodass zusätzliche Unterrichtsstunden zu deren Erarbeitung beispielsweise in Form von Projekttagen genutzt werden sollen.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, Unterrichtsmaterial zum Thema Grüne und nachhaltige Chemie am Beispiel Bioraffinerie von Holz zu entwickeln. Einen Teil des Materials bildet eine Unterrichtsreihe für Schüler:innen der zwölften Schulstufe. Diese Unterrichtsreihe soll neben der Förderung von Kenntnissen und Kompetenzen zu Grüner und nachhaltiger Chemie und der Bioraffinerie von Holz auch einen Einstieg in das Kapitel der organischen Chemie bieten und dabei Inhalte wie funktionelle Gruppen und Strukturformeln behandeln. So soll vermieden werden, dass Aspekte der Grünen Chemie aufgrund von Zeitmangel nicht im Unterricht behandelt werden. Zusätzlich sollen Lernende durch die Unterrichtsreihe ihre Kompetenzen im Bereich der Bewertung und des naturwissenschaftlichen Argumentierens (z.B. Grooms et al., 2018) verbessern. Der andere Teil der Arbeit ist die Entwicklung von Material im Rahmen des Projekts SpottingScience, einer Kooperation des Österreichischen Kompetenzzentrums für Didaktik der Chemie (AECC Chemie) an der Universität Wien mit dem Fachdidaktikzentrum Chemie an der Universität Graz. Dabei sollen naturwissenschaftliche Alltagsphänomene für Lai:innen adressatengerecht und fachlich korrekt aufgearbeitet und über sogenannte ScienceSpots digital zugänglich gemacht werden. Die entstandenen ScienceSpots können dann sowohl in der Öffentlichkeit als auch im schulischen Kontext genutzt werden (Lembens et al., 2022). In der Unterrichtsreihe werden bereits vorhandene und neu entwickelte ScienceSpots zur Erarbeitung von Inhalten zu Grüner und nachhaltiger Chemie, Holz und Bioraffinerie genutzt, indem sie über QR-Codes auf Arbeitsblättern eingebettet und mit passenden Aufgaben ergänzt werden.

Im ersten Kapitel wird zuerst die Frage behandelt, welche Initiativen für eine nachhaltigere Entwicklung auf (bildungs-)politischer Ebene existieren und welche Hebel es auf der

individuellen Ebene gib. Dabei wird besonders die Rolle des Chemieunterrichts zur Bildung eines angemessenen Wissenschaftsverständnisses und die damit einhergehende Notwendigkeit eines fachlich und fachdidaktisch fundierten Unterrichts deutlich. Als Rahmen für die Entwicklung der Unterrichtseinheiten wird daher anschließend das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattman und Kolleg:innen (1997) allgemein vorgestellt. Kapitel zwei widmet sich der Entwicklung der Unterrichtsreihe. Dazu erfolgt zunächst die fachliche Klärung der für die Unterrichtsreihe relevanten Inhalte, wie beispielsweise Prinzipien der Grünen Chemie, Holzchemie und Bioraffinerien. Anschließend wird die Forschungs- und Auswertungsmethode einer Erhebung von Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie erläutert sowie die Ergebnisse der Erhebung analysiert und interpretiert. Als letzter Teil der didaktischen Rekonstruktion werden in dem Kapitel das Sandwich-Prinzip als Mittel zur Strukturierung der Unterrichtseinheiten sowie das Projekt SpottingScience beschrieben. In Kapitel drei werden die entstandenen Unterrichtseinheiten einzeln präsentiert und im Kompetenzmodell Chemie in der AHS Sekundarstufe II eingebettet. In Kapitel vier wird die Entwicklung des Materials für das Projekt SpottingScience dargelegt, die entstandenen ScienceSpots beschrieben und ihre Einbettung in die Unterrichtseinheiten erläutert. Zuletzt wird in Kapitel fünf eine Zusammenfassung der Arbeit sowie eine Diskussion der Erkenntnisse geliefert.

1 Theoretische Fundierung

“Human activities ... have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1°C above 1850-1900 in 2011-2020. Global greenhouse gas emissions have continued to increase, with unequal historical and ongoing contributions arising from unsustainable energy use, land use and land-use change, *lifestyles and patterns of consumption and production* across regions, between and within countries, and *among individuals* [Hervorhebungen der Autorin]“ (IPCC, 2023, S.4)

Dieses Zitat aus dem aktuellen Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verdeutlicht, dass der Klimawandel eindeutig durch menschliches Handeln verursacht wurde. Der Bericht zeigt jedoch auch, dass die Herausforderungen, wie beispielsweise nachhaltige Flächen- und Energienutzung oder Produktions- und Konsumverhalten, von verschiedenen Individuen und Personengruppen auf unterschiedlichen Ebenen mitgetragen werden. Im folgenden Kapitel werden daher Initiativen auf der politischen sowie Hebel auf der individuellen Ebene hin zu einer nachhaltigeren Gesellschaft vorgestellt.

1.1 Initiativen auf (bildungs-)politischer Ebene: SDGs, Green Deal und BNE

Nachhaltigkeitsaspekte nehmen einen immer größer werdenden Stellenwert in politischen Diskussionen ein. Auf nationaler sowie internationaler Ebene sind Bemühungen erkennbar, um den Übergang zu einer nachhaltigeren und ressourceneffizienteren Gesellschaft zu erreichen. Eine dieser Initiativen sind die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) der United Nations (UN), welche in 169 Unterziele unterteilt sind. Sie sollen einem wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Wandel in den Bereichen Menschen, Planet, Wohlstand, Frieden und Partnerschaft Rechnung tragen (UN, 2015). Von allen 139 Mitgliedsstaaten beschlossen, traten sie 2016 in Kraft und sollen mit Ende 2030 erreicht werden. Im Bereich Planet sollen die Ziele dazu beitragen, „durch nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion, die nachhaltige Bewirtschaftung seiner natürlichen Ressourcen und [durch] umgehende Maßnahmen gegen den Klimawandel“ (Vereinte Nationen, 2015, S. 2) eine vielfältige Umwelt für zukünftige Generationen zu erhalten, beziehungsweise wiederaufzubauen. Dem Bereich Bildung ist Ziel 4 gewidmet, welches einen gerechten und universellen Zugang zu qualitativ hochwertiger Bildung für alle Menschen fordert. Nichtsdestotrotz finden sich in fast allen der 17 Ziele relevante Aspekte für den schulischen Kontext, sodass Bildung beim Erreichen der Ziele eine Schlüsselrolle spielt.

Basierend auf den SDGs veröffentlichte die europäische Kommission 2019 den europäischen Grünen Deal für die Europäische Union (kurz: Green Deal). Darin wird besonders die Bewältigung der Klimakrise als entscheidende epochale Aufgabe hervorgehoben und eine Wachstumsstrategie zur Erreichung einer „fairen und wohlhabenden Gesellschaft mit einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft“ (Europäische

Kommission, 2019, S. 2) vorgestellt. Im Gegenzug zu den SDGs, welche eine Forderung der Vereinten Nationen sind, wird durch den Green Deal eine stärkere Verbindlichkeit durch die Mitgliedstaaten eingefordert. Ziel ist (unter anderem) die Abkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcennutzung sowie keine Netto-Treibhausgasemissionen ab dem Jahr 2050 (Europäische Kommission, 2019).

Betrachtet man einige der einleitend genannten Herausforderungen, so fällt auf, dass chemische Prozesse und Produkte einen wesentlichen Beitrag zu ihrer Entstehung geleistet haben. In Österreich wurde daher im Zuge des Green Deal im Jahr 2020 vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie in Kooperation mit dem Umweltbundesamt die Plattform Grüne Chemie gegründet, welche die Verankerung von Nachhaltigkeitsaspekten in der chemischen Wirtschaft, Industrie und Bildung vorsieht (BMK, 2021). Die Plattform ist eine Vernetzung zwischen Vertreter:innen aus Wirtschaft, Wissenschaft, Bildung, konsumenten- und umweltschutzorientierten Nichtregierungsorganisationen (NGOs) sowie Verwaltung, die gemeinsam durch die Entwicklung von Maßnahmen zur Erreichung der Ziele des Grünen Deals beitragen sollen (BMK, 2021).

Auch im bildungspolitischen Bereich rückt der Umgang mit Ressourcen sowie Verteilungsproblematiken zunehmend in den Vordergrund. Das im Jahr 2008 eingebrachte und beschlossene Bildungsanliegen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) macht es sich unter anderem zum Ziel, ohne Einbußen für die gegenwärtige Generation eine lebenswerte Umwelt für zukünftige Generationen zu erhalten (BMLFUW, 2008). In Vergleich zu den zuvor vorgestellten Initiativen, wird bei BNE ein besonderes Augenmerk auf schulische Bildung gelegt. Durch BNE soll ein „Bewusstseinswandel in Richtung Nachhaltigkeit bei Lernenden und Lehrenden unterstützt und auch die AkteurInnen vernetzt werden.“ (BMLFUW, 2008, S. 3). In Bezug auf naturwissenschaftliche und naturwissenschaftlich-gesellschaftsorientierte Aspekte baut BNE in Österreich bereits auf die Unterrichtsprinzipien Umweltbildung sowie Soziales Lernen bzw. Globales Lernen auf.

Aus den drei exemplarischen Initiativen auf (bildungs-)politischer Ebene werden Bemühungen zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten sowie zum reflektierten Umgang mit Ressourcen in unserer Gesellschaft deutlich. Nichtsdestotrotz muss auch auf individueller Ebene ein Bewusstsein geschaffen sowie Maßnahmen gefördert werden, um das Erreichen der Ziele zu ermöglichen.

1.2 Naturwissenschaftliche Grundbildung als Hebel zu einer nachhaltigeren Gesellschaft

Um globale und epochale Schlüsselprobleme unserer Welt zu bewältigen, fordert Klafki eine naturwissenschaftliche Bildung, welche die Selbstbestimmungs-, Mitbestimmungs- und

Solidaritätsfähigkeit der Lernenden fördert (Klafki, 1985). Ziel naturwissenschaftlicher Bildung ist es demnach, Menschen mit dem notwendigen Wissen sowie den Fähigkeiten auszustatten, die sie dazu befähigen,

- Auswirkungen von Naturwissenschaften und Technologien auf ihren Alltag zu erkennen,
- informierte Entscheidungen bezüglich naturwissenschaftlicher Fragestellungen zu treffen,
- naturwissenschaftliche Informationen aus Medien zu entnehmen, zu verstehen und kritisch zu reflektieren sowie
- an Diskussionen zu naturwissenschaftsbezogenen Themen teilzuhaben (Bybee & Roberts, 2014).

In den Naturwissenschaftsdidaktiken wird in diesem Kontext oftmals von naturwissenschaftlicher Grundbildung (Scientific Literacy) gesprochen. Bybee und Roberts (2014) beschreiben naturwissenschaftliche Grundbildung folgendermaßen: „As a curriculum term, scientific literacy typically incorporates a large number of diverse school science objectives associated with personal and societal issues“ (Bybee & Roberts, 2014, S. 546). Das bedeutet, dass naturwissenschaftliche Grundbildung eng mit persönlichen und gesellschaftlichen Aspekten zusammenhängt.

Im schulischen Fächerkanon kann unter anderem der Chemieunterricht zur Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Grundbildung beitragen (Bybee & Roberts, 2014). Dieser ist für das Leben der Lernenden insofern relevant, als dadurch Auswirkungen des Lernens naturwissenschaftlicher Inhalte auf die persönliche, berufliche und gesellschaftliche Dimension ausgedrückt werden können (Stuckey et al., 2014). Wie Stuckey verdeutlicht, beinhaltet die persönliche Dimension Inhalte zur Erfüllung eigener Interessen und zum Erlernen von Fähigkeiten, die im Alltag nützlich sind. Die berufliche Dimension beschreibt vor allem Aspekte der Berufsorientierung im naturwissenschaftlichen Sektor (Stuckey et al., 2014). Der Chemieunterricht ist jedoch in Hinblick auf ökologische Herausforderungen besonders aus gesellschaftlicher Sicht relevant, weil dadurch bei Lernenden das Verstehen von Wechselwirkungen zwischen Naturwissenschaft, Umwelt, Technik und Gesellschaft gefördert und so Teilhabe an zukunftsrelevanten Entscheidungen ermöglicht wird (Stuckey et al., 2014).

Die bislang vorgestellten Initiativen und Konstrukte, sowohl auf (bildungs-)politischer als auch auf individueller Ebene, beinhalten neben wirtschaftlichen und sozialen Zielen auch alltags- und zukunftsrelevante Fragestellungen mit naturwissenschaftlichen Anteilen. Der Chemieunterricht eignet sich dabei als Rahmen für den Erwerb von Urteils- und Handlungskompetenz bezüglich ebendieser Entscheidungen mit chemischem Kontext bei jungen Menschen (Marks et al., 2014). Um das Wissen zu erwerben, das für die Entwicklung

dieser Kompetenzen notwendig ist, und um diese Kompetenzen zu üben, bedarf es eines explizit darauf ausgerichteten Chemieunterrichts (Zuin et al., 2019). Lerngelegenheiten müssen dahingehend sorgfältig geplant und bestenfalls auch beforscht werden. Dazu bietet sich das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattman und Kolleg:innen (1997) an.

1.3 Das Modell der didaktischen Rekonstruktion

Fachwissen bildet eine notwendige Grundlage für die Planung, Durchführung und Reflexion von lernwirksamen Lerngelegenheiten. Ein Chemieunterricht, der Holzchemie ausschließlich basierend auf aktuellen Publikationen in Fachzeitschriften zur Zusammensetzung von Holz thematisiert, würde jedoch zweifellos zu einer Überforderung und voraussichtlich auch zu Desinteresse bei den Lernenden führen. Das liegt daran, dass der tatsächliche Unterrichtsgegenstand zunächst rekursiv aus den fachwissenschaftlichen Inhalten durch die Lehrperson hergestellt werden muss (Gropengießer, 2001). Neben den fachlichen Inhalten bilden daher auch individuelle, gesellschaftliche und erkenntnistheoretische Sachverhalte einen wichtigen Teil des Unterrichtsgegenstands (Gropengießer, 2001). Basierend auf diesen Kernideen entstand das Modell der didaktischen Rekonstruktion, welches seither stetig weiterentwickelt wird. Es wird einerseits als Werkzeug zur Unterrichtsplanung gesehen (Reinfried et al., 2009), kann aber auch zur fachdidaktischen Forschung genutzt werden (Duit, 2015). Mithilfe des Modells lässt sich einerseits herausarbeiten, ob es sinnvoll und möglich ist, bestimmte Inhalte im Chemieunterricht zu unterrichten (Duit et al., 2012). Andererseits dient das Modell der didaktischen Rekonstruktion auch als Werkzeug zur Beantwortung der Frage, wie genau der jeweilige Gegenstand für Lernende am besten zugänglich gemacht werden kann (Duit et al., 2012).

Das Modell der didaktischen Rekonstruktion ist aus drei gleichwertigen Elementen aufgebaut, nämlich (1) der Erfassung von Lernvoraussetzungen, (2) der fachlichen Klärung und (3) der didaktischen Strukturierung (Duit et al., 2012). Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung des Modells, welche im Fachdialog auch didaktisches Dreieck genannt wird.

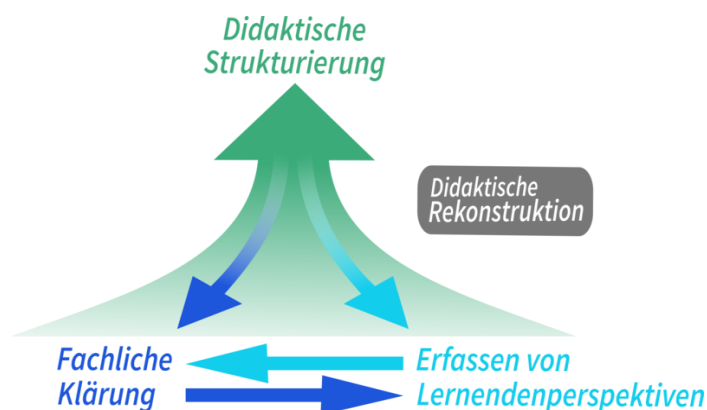


Abbildung 1: Schematische Darstellung des didaktischen Dreiecks nach Kattmann et al. (1997) von Sarah Zloklikovits. Lizenz: CC-BY-4.0

Die drei Elemente wurden ursprünglich Module genannt (Kattman et al., 1997). Nachdem der Begriff Modul jedoch einen in sich abgeschlossenen Bereich impliziert und die Verzahnung dabei nicht berücksichtigt wird, wird in dieser Arbeit der Terminus Element dafür verwendet.

(1) Das erste vorgestellte Element ist die Erfassung von Lernvoraussetzungen. Ein Schlüsselgedanke im Modell der didaktischen Rekonstruktion ist, dass Kenntnisse über Lernvoraussetzungen wie Vorwissen, Vorerfahrungen, Vorstellungen und die kognitive Entwicklung der Lernenden die Entwicklung von Unterricht substanziell beeinflussen. Gropengießer (2001) fasst unter dem Begriff Vorstellungen subjektive Begriffe, Konzepte, Denkfiguren und Theorien zusammen, die in einer Person Bedeutung erzeugen. Diese kognitiven Konstrukte lassen sich in Ebenen unterschiedlicher Komplexität einordnen (Gropengießer, 2001). Wenn von Lernendenvorstellungen die Rede ist, sind damit kognitive, soziale, emotionale, motivationale und situative Konstrukte gemeint, auf die Lernende in ihrem Alltag zurückgreifen (Gropengießer, 2001). Diese alltäglichen Konstrukte sollen im Unterricht von Lehrpersonen wertfrei behandelt werden und können parallel zu fachlich angemessenen Vorstellungen existieren, da sie immer kontextspezifisch sind und innerhalb eines gesetzten Rahmens für Lernende sinnvoll erscheinen (Gropengießer, 2001). Im Laufe der Zeit haben sich anstelle der Bezeichnung Lernendenvorstellungen die Bezeichnungen Lernendenperspektiven (Vgl. Krüger et al., 2007) oder Lernvoraussetzungen (Vgl. Reinfried et al., 2009) etabliert. Auch innerhalb der Autor:innengruppe des Modells der didaktischen Rekonstruktion scheint jedoch keine Einigkeit bezüglich der Abgrenzung der Bezeichnungen zu herrschen, vielmehr werden unterschiedliche Bezeichnungen synonym verwendet. In dieser Arbeit wurde zur Beschreibung dieses Elements der Begriff Lernvoraussetzungen gewählt, da dieser neben Lernendenvorstellungen auch eine Breite anderer für das Lernen relevanter Aspekte beinhaltet, wie beispielsweise die kognitive Entwicklung oder das Beherrschen der Unterrichtssprache. Die Erhebung von Lernvoraussetzungen wird im Fachdialog auch als Lernpotenzialerhebung bezeichnet.

Bei der Lernpotenzialerhebung geht es primär nicht darum, fachlich unangemessene Vorstellungen zu identifizieren um sie anschließend zu ersetzen, sondern verschiedene Vorstellungen aus den Lebensrealitäten der Lernenden zu erheben, um sie in die didaktische Strukturierung einzubringen (Gropengießer, 2001). Ein Abgleich der Ergebnisse aus einer Lernpotenzialerhebung mit den Inhalten der fachlichen Klärung soll im Rahmen einer sinnvollen didaktischen Strukturierung Anknüpfungspunkte für Vorstellungsänderungen bieten. Die Veränderung von Vorstellungen wird in Theorien wie Conceptual Change, Conceptual Prevalence und Conceptual Growth (z.B. Potvin, 2013; Strike & Posner, 1992) mit dem Prozess des Lernens in Verbindung gesetzt.

(2) Ein weiteres Element der didaktischen Rekonstruktion ist die fachliche Klärung. Sie ist ein rekursiver Prozess, bei dem wissenschaftliche Theorien, Methoden und Fachbegriffe systematisch und kritisch untersucht werden. Die Auswahl, Tiefe, Struktur und der Umfang werden dabei durch das Lehrziel bestimmt (Kattman et al., 1997). Auch auf Lernvoraussetzungen kann im Rahmen der fachlichen Klärung Bezug genommen werden. Alltagsvorstellungen der Lernenden können beispielsweise mit aktuellen oder historischen wissenschaftlichen Konzepten korrespondieren und deswegen im Unterricht zum Aufzeigen von Gemeinsamkeiten und Differenzen beziehungsweise in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit genutzt werden (Kattman et al., 1997). Somit können Lernvoraussetzungen auch die Auswahl der Inhalte für die fachliche Klärung beeinflussen (Kattman et al., 1997). Zur fachlichen Klärung zählen daher nicht ausschließlich fachliche Konzepte, sondern auch Aspekte aus der Natur der Naturwissenschaften und Überlegungen zur Relevanz der Inhalte für eine Gesellschaft (Duit, 2015). Um also Inhalte fachdidaktisch für Lerngelegenheiten aufzubereiten, ist eine kritische Auseinandersetzung der Lehrperson mit zugrundeliegenden Theorien, wissenschaftlichen Positionen, fachlichen Systematiken und dem eigenen fachlichen Wissen notwendig. Durch diese kritische Auseinandersetzung grenzt sich die fachliche Klärung von einer Sachanalyse ab (Gropengießer, 2001) .

(3) Die fachliche Klärung sowie die Erfassung der Lernvoraussetzungen beeinflussen wechselseitig und gleichwertig die didaktische Strukturierung des Unterrichts (Gropengießer, 2001). Überlegungen zur Konstruktion von Unterricht beinhalten dem Modell nach zum einen Fragen zu unterrichtspragmatischen Themen, wie beispielsweise der Zielsetzung, Dauer und Komplexität einer Einheit. Zum anderen gilt es auch die Struktur von Lernumgebungen sowie deren Wirkung und Nutzen, Abfolgen von Lernsequenzen und die Auswahl der Lernangebote zu beleuchten (Bartsch & Brandl, 2015).

Diese drei Elemente bilden keine lineare Abfolge, sondern sind während des gesamten Prozesses miteinander verzahnt. Die fachliche Klärung beeinflusst zum Beispiel, wie mit Lernvoraussetzungen umgegangen wird. Gleichzeitig beeinflussen Lernvoraussetzungen jedoch auch die Auswahl der fachlichen Inhalte und der didaktischen Strukturierung. Das Modell der didaktischen Rekonstruktion bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte Unterrichtsreihe rund um Grüne und nachhaltige Chemie. In den folgenden Kapiteln wird daher die Ausformung der einzelnen Elemente am Beispiel einer konkreten Lerngelegenheit ausführlich dargestellt.

2 Entwicklung einer Unterrichtsreihe zur Grünen und nachhaltigen Chemie

2.1 Abläufe in der Entwicklungsarbeit

In der Planungsphase der Masterarbeit wurde aufgrund vorangegangener Tätigkeiten das Konzept der Grünen und nachhaltigen Chemie als übergeordneter Inhalt gewählt. Der Schwerpunkt auf die Bioraffinerie und den Rohstoff Holz ergab sich durch eine Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Univ.-Prof. Dr. Rosenau vom Institut für Nachwachsende Rohstoffe an der Universität für Bodenkultur Wien.

Da diese Arbeit vorwiegend konzeptionellen Charakters ist, wurden anstelle einer Forschungsfrage mehrere Leitfragen zur Entwicklung der Unterrichtseinheiten formuliert. Diese lauten:

1. Wie können ausgewählte Aspekte der Grünen Chemie anhand des Beispiels Bioraffinerie von Holz mit Lernenden erarbeitet werden?
2. Wie kann eine Einführung in die organische Chemie anhand der Bioraffinerie von Holz ablaufen?
3. Wie können digitale Angebote des Projekts SpottingScience in einer Lerngelegenheit rund um Grüne Chemie am Beispiel der Bioraffinerie von Holz genutzt werden?

Als Rahmen zur Strukturierung der Entwicklungsarbeit wurde das Modell der didaktischen Rekonstruktion (Kattman et al., 1997) genutzt (Siehe Kapitel 1.3). Daraus wurden drei Arbeitsschwerpunkte für die Masterarbeit abgeleitet: Die fachliche Klärung der Themenbereiche Grüne und nachhaltige Chemie, Holzchemie, Erdölraffinerie und Bioraffinerie, die Erhebung von Assoziationen von Lernenden der elften und zwölften Schulstufe zum Thema Bioraffinerie sowie die Entwicklung einer didaktischen Strukturierung der Einheiten. Zusätzlich wurden parallel zur Unterrichtsreihe auch zwei ScienceSpots für SpottingScience entwickelt.

Die folgenden Kapitel sind nach dem Modell der didaktischen Rekonstruktion strukturiert und geben die Entwicklungsschritte der Unterrichtsreihe wieder. Dabei ist wichtig, dass die Elemente beim Lesen der Arbeit zwar linear beschrieben werden und daher eine chronologische Reihenfolge implizieren, dies jedoch nicht dem Modell der didaktischen Rekonstruktion entspricht. In der tatsächlichen Entwicklung verlief die Planung und Durchführung der drei Module parallel und miteinander verzahnt.

Zur besseren Visualisierung des Vorhabens wurde der Entstehungsprozess der Arbeit mit Moderationskarten auf einer Pinnwand festgehalten. Abbildungen 2 bis 4 zeigen den Entwicklungsstand zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten der Arbeit.

Anhand der Abbildungen wird deutlich, dass sich Inhalte und Schwerpunkte im Entwicklungsprozess dynamisch verändert haben. Einige Themen, wie beispielsweise Socio-Scientific-Issues sowie Aspekte zur Natur der Naturwissenschaften (NOS), wurden im Laufe der Arbeit weggelassen, während andere Themen, wie beispielsweise Aspekte der organischen Chemie und das Sandwich-Prinzip einen Platz in der Arbeit gefunden haben. Außerdem ist im Laufe der Entwicklung eine klarere Strukturierung sowie eine engere Eingrenzung des Themas erkennbar.



Abbildung 3: Entwicklungstand der Arbeit im März 2023. Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 2: Entwicklungsstand der Arbeit im April 2023. Quelle: Eigene Darstellung

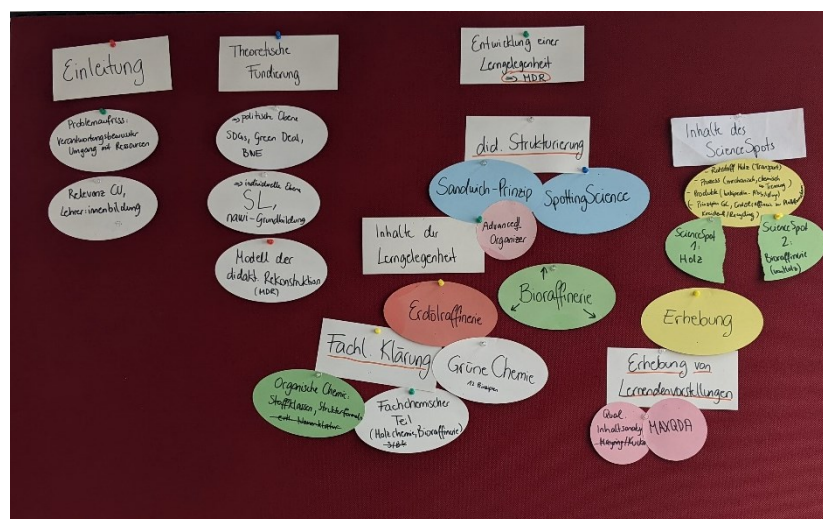


Abbildung 4: Entwicklungsstand der Arbeit im Juni 2023. Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Fachliche Klärung

Als übergeordnetes Thema der Unterrichtsreihe wurde die Grüne und nachhaltige Chemie gewählt. Die Kontrastierung von Erdölraffinerien zu Bioraffinerien von Holz dient dabei als Beispiel für Prozessoptimierung in Hinblick auf Prinzipien der Grünen und nachhaltigen Chemie. In diesem Unterkapitel werden daher vorliegende fachwissenschaftliche Erkenntnisse, Aussagen und Begriffe rund um Grüne und nachhaltige Chemie, Erdölraffinerie und Erdöl sowie Bioraffinerie und Holz untersucht und strukturiert.

2.2.1 Grüne und nachhaltige Chemie

Ende des 20. Jahrhunderts entwickelte sich in den Vereinigten Staaten von Amerika erstmals die Idee einer grüneren Chemie. Anastas und Warner (1998) definieren in dem Buch „Green Chemistry – Theory and Practice“ Grüne Chemie als einen Ansatz, um chemische Prozesse und Produkte über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg sicherer für Mensch und Umwelt zu gestalten. Während bei anderen Vorgehensweisen, wie beispielsweise Recycling oder Carbon Capture and Storage (CCS), die Optimierung einzelner Phasen eines Produkts im Mittelpunkt steht, liefert die Grüne und nachhaltige Chemie Vorschläge für alle Prozesse im Lebenszyklus eines Produkts, von der Planung über die Produktion bis zur Nutzung und Verwertung (Mammino, 2015). Die Auffassung von Grüner und nachhaltiger Chemie unterscheidet sich je nach Autor:in. Manche Autor:innen sprechen bereits bei der Reduktion chemischer Produkte und bei „nichtchemischen Alternativen“ (Kümmerer, 2017a, S.2) von Grüner und nachhaltiger Chemie. Anastas und Warner (1998) hingegen erkennen die Reduktion, Limitation oder Elimination chemischer Prozesse und Produkte nicht als Grüne Chemie an, sondern heben chemische Prozesse als Lösung naturwissenschaftlicher Problemstellungen hervor.

Nach Warner spielen auch wirtschaftliche Faktoren eine große Rolle in der Entwicklung und Implementierung nachhaltiger Prozesse. Im Rahmen einer Tagung zur Grünen Chemie im April 2023 in Wien äußerte er sich zum Thema Wirtschaftlichkeit folgendermaßen (aus dem Gedankenprotokoll):

„A green product must be cheaper or more efficient than the previous one in order to be produced on a large scale. No company will switch its production to a greener one if it makes production more expensive or there is less yield.“ (J. Warner, persönliche Kommunikation, 18.04.2023)

Diese Forderung stellt Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen weltweit vor die große Herausforderung, nicht nur nachhaltigere, sondern auch wirtschaftlichere Prozesse und Produkte zu entwickeln.

Aus den Arbeiten fortschrittlicher Wissenschaftler:innen wurden von Anastas und Warner (1998) zwölf Prinzipien der Grünen Chemie abgeleitet. Diese können einerseits als Reflexion

von Bemühungen im Bereich der Grünen Chemie gesehen werden, andererseits geben sie einen Ausblick darauf, in welche Richtung sich Grüne und nachhaltige Chemie in Zukunft bewegen kann. In Tabelle 1 sind die zwölf Prinzipien in Originalfassung sowie ihre deutsche Version aufgelistet.

Tabelle 1: Die 12 Prinzipien der Grünen Chemie.

Quelle: In Anlehnung an Anastas & Warner (1998) und BMK (2021)

	Originalfassung (Anastas & Warner, 1998)	Deutsche Version (BMK, 2021)
1	Prevention	Abfallvermeidung
2	Atom Economy	Vermeidung von Nebenprodukten (Atomökonomie)
3	Less Hazardous Synthesis	Durchführung von Synthesen mit weniger gefährlichen Stoffen
4	Design Benign Chemicals	Herstellung möglichst sicherer und umweltfreundlicher Chemikalien
5	Benign Solvents & Auxiliaries	Einsatz umweltfreundlicher Löse- und Hilfsmittel
6	Design for Energy Efficiency	Einsatz energieeffizienter Verfahren
7	Use of Renewable Feedstock	Einsatz erneuerbarer Rohstoffe
8	Reduce Derivatives	Vermeidung von Derivaten als Zwischenstufen in Synthesen
9	Catalysis	Einsatz von Katalysatoren
10	Design for Degradation	Herstellung biologisch abbaubarer Stoffe
11	Real-Time Analysis for Pollution Prevention	Einsatz von Prozessanalytik zur laufenden Überwachung der Synthesen
12	Inherently Benign Chemistry for Accident Prevention	Unfallvermeidung

Die zwölf Prinzipien der Grünen Chemie wurden bereits im Rahmen einer Bachelorarbeit beschrieben (Teplá, 2021), werden in diesem Kapitel jedoch extensiver erklärt.

Prinzip 1: Abfallvermeidung

Bereits im Jahr 1990 wurde in den Vereinigten Staaten von Amerika der Pollution Prevention Act (sinngemäß übersetzt Umweltschutzgesetz) vom Kongress beschlossen (Pollution Prevention Act of 1990, 1990). Das Vermeiden von Abfällen direkt bei ihrer Entstehung wurde damit in den Vereinigten Staaten von Amerika Teil der nationalen Politik. Besonders bei der Verwendung von gefährlichen Stoffen soll das Prinzip nicht nur ökologische, sondern auch wirtschaftliche Vorteile für die Industrie mit sich bringen. Giftige Nebenprodukte, die nicht mehr weiter genutzt werden können und daher als Abfälle anfallen, müssen mittels kostspieliger Prozesse gereinigt, kontrolliert und gelagert werden. Aus wirtschaftlicher Sicht bringen diese

Schritte Kosten mit sich, die sich unter anderem durch die Vermeidung der (gefährlichen) Abfälle ebenfalls reduzieren ließen.

Prinzip 2: Vermeidung von Nebenprodukten

Das zweite Prinzip der Grünen Chemie betrifft die Atomökonomie chemischer Prozesse. Es besagt, dass Produkte so entwickelt werden sollen, dass alle während der Herstellung genutzten Stoffe auch als Endprodukte genutzt werden können sollen (Anastas & Warner, 1998). Diese Prinzip beinhaltet Überlegungen dazu, welche Atome der Reaktanten im Produkt wiedergefunden werden, und welche Atome im Produkt nicht genutzt werden und stattdessen in Abfallprodukten entsorgt werden (Trost, 1991). Chemische Reaktionen können eine Ausbeute von 100% aufweisen, obwohl sie einen großen Anteil an Abfallprodukten generieren. Das liegt daran, dass für Berechnungen zur Ausbeute nur molare Massen der Ausgangsstoffe und des gewünschten Endprodukts herangezogen werden. Um diesen Effekt zu vermeiden und alle entstandenen Produkte in Berechnungen miteinzubeziehen, kann die Atomökonomie einer Reaktion nach Trost (1991) folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{Atomökonomie} = \left(\frac{M_{\text{erwünschtes Produkt}}}{M_{\text{gesamt}}} \right)$$

2.3.1

Die Atomökonomie einer Reaktion ergibt sich daher als Quotient der Masse des erwünschten Produkts zur Masse aller beteiligten Reaktanten. Anastas und Warner (1998) reihen verschiedene Reaktionsmechanismen basierend auf ihrer Atomökonomie. Umlagerungsreaktionen und Additionsreaktionen gelten als relativ ökonomisch, da der Großteil der Reaktanten zu Produkten reagiert, während beispielsweise bei Substitutions- und Eliminationsreaktionen Abgangsgruppen zu Abfallprodukten werden und dadurch die Atomökonomie sinkt (Anastas & Warner, 1998).

Während die Atomökonomie das Verhältnis zwischen erwünschten Produkten zu eingesetzten Reaktanten beschreibt, gibt der Environmental Impact Factor (E-Factor, siehe Formel 2.3.2) nach Sheldon (2007) den Anteil an Abfallprodukten bezogen auf die Gesamtprodukte an:

$$E - \text{Factor} = \left(\frac{M_{\text{Abfallprodukte}}}{M_{\text{Produkte}}} \right)$$

2.3.2

Anders als die theoretische Ausbeute oder die Atomökonomie beschreibt der E-Factor also, wie viele Abfallstoffe anteilig bei einer Reaktion generiert werden. Der E-Factor ist umso höher, je mehr Endprodukte auch weiterverarbeitet werden, anstatt als Abfallprodukte zu enden. Der E-Factor lässt jedoch ebenfalls nur begrenzt Aussagen zur Nachhaltigkeit einer Reaktion zu, da die Art der genutzten Rohstoffe nicht dargestellt werden kann. Betrachtet man beispielsweise die Erdölraffinerie, so ist sie zur Zeit mit einem E-Factor von <0,1 um einiges

effizienter als die Herstellung von Feinchemikalien mit einem E-Factor von 5-50 (Sheldon, 2021). Die Nutzung von Erdöl und alle damit eingehenden Problematiken finden in dieser Darstellung jedoch keinen Ausdruck.

Prinzip 3: Durchführung von Synthesen mit weniger gefährlichen Stoffen

Das dritte Prinzip der Grünen Chemie kann als Grundlage für Grüne und nachhaltige Chemie gesehen werden. Es besagt, dass, wenn möglich, aus möglichst ungefährlichen Edukten über ungefährliche Prozesse ungefährliche Produkte hergestellt werden sollen (Anastas & Warner, 1998). Um solche Synthesen zu ermöglichen, empfehlen Anastas und Warner vor allem Reaktionen mit Cope-Umlagerungen, Cycloadditionen, Mehrkomponentenreaktionen, Tandemreaktionen, enzymatische Reaktionen sowie Reaktionen mit C-H-Aktivierung (Anastas & Eghbali, 2010).

Prinzip 4: Herstellung möglichst sicherer und umweltfreundlicher Chemikalien

Betrachtet man das Risikopotenzial chemischer Reaktionen, setzt es sich aus zwei Komponenten zusammen: Einerseits muss die Wahrscheinlichkeit beachtet werden, mit der eine Person einem chemischen Stoff ausgesetzt ist. Andererseits muss das Gefahrenpotenzial des Stoffes selbst einbezogen werden. Nach Anastas & Warner (1998) ergibt sich das Risiko einer Chemikalie als Produkt der Exposition und der Gefährlichkeit des Stoffes. Grüne Chemie im speziellen kann dazu beitragen, das Risiko durch die Verwendung oder Herstellung weniger gefährlicher Stoffe zu reduzieren. Die von Chemikalien ausgehende Gefahr kann durch (öko-)toxikologische Faktoren (z.B. Bioakkumulation), oder physikalisch-chemischen Eigenschaften (z.B. Flammbarkeit, Wasserlöslichkeit, Explosionsfähigkeit, Selbstentzündungstemperatur, Siedepunkt) bewertet werden (REACH-Verordnung, 2011). Wichtig ist, dass Modifikationen hin zu einer grüneren Reaktion die Funktion des Produkts nicht beeinträchtigen. Das Ziel der Entwicklung sichererer Chemikalien ist daher die Maximierung der Funktion bei Minimierung der Gefährlichkeit.

Prinzip 5: Einsatz umweltfreundlicher Lösungs- und Hilfsmittel

Um eine chemische Reaktion grüner zu gestalten, sollten, wenn notwendig und möglich, umweltfreundliche Lösungs- und Hilfsmittel verwendet werden (Anastas & Warner, 1998). Dazu können zum einen die Kriterien aus Prinzip herangezogen werden, zum anderen müssen aber auch Überlegungen zu lösungs- und hilfsmittelspezifischen Faktoren wie der Sinnhaftigkeit in der Reaktion, dem Aufwand der Rückgewinnung und Kosten in die Entwicklung eines chemischen Prozesses einfließen (Anastas & Warner, 1998). Wasser als Lösungsmittel wird von den Autoren explizit empfohlen, weil es ungiftig und in großen Mengen vorhanden ist. Als grüne Alternativen schlagen (Anastas & Eghbali, 2010) (wenn möglich) den Verzicht auf Lösungsmittel, wässrige Lösungsmittel, superkritische Flüssigkeiten und ionische Flüssigkeiten vor.

Tabelle 2 zeigt bevorzugte, nutzbare und unerwünschte Lösungsmittel nach Alfonsi et al. (2008, S.32):

*Tabelle 2: Einteilung gängiger Lösungsmittel.
Quelle: In Anlehnung an Alfonsi et al. (2008, S.32)*

bevorzugt	nutzbar	unerwünscht
Wasser	Cyclohexan	Pentan
Aceton	Heptan	Hexan
Ethanol	Toluen	Diisopropylether
2-Propanol	Methylcyclohexan	Diethylether
1-Propanol	Methyl- <i>t</i> -butylether	Dichlormethan
Ethylacetat	Isooktan	Dichlorethan
Isopropylacetat	Acetonitril	Chloroform
Methanol	2-Methyl-Tetrahydrofuran	Dimethylformamid
Methylethylketon	Tetrahydrofuran	N-Methylpyrrolidinon
1-Butanol	Xylen	Pyridin
<i>t</i> -Butanol	Dimethylsufoxid	Dimethylacetat
	Essigsäure	Dioxan
	Ethylenglycol	Dimethoxethan
		Benzen
		Tetrachlormethan

Prinzip 6: Einsatz energieeffizienter Verfahren

Chemische Prozesse beinhalten oftmals energieintensive Schritte. Einerseits werden Stoffe erhitzt, um beispielsweise ein thermodynamisches Produkt zu erhalten. Andererseits müssen bei bestimmten Reaktionen die Bedingungen durch Kühlung kontrolliert werden, um sehr schnell ablaufende Reaktionen zu verlangsamen und gegebenenfalls Unfälle zu vermeiden. Besonders energieintensiv sind Prozesse der Auftrennung und Rückgewinnung durch Destillation und Umkristallisation. Derzeit wird für die chemische Industrie vor allem Energie aus fossilen Rohstoffen genutzt. Mit 20 Mio. Tonnen Erdöl und Erdgas pro Jahr verbraucht die chemische Industrie in Österreich 12% des Rohstoffeinsatzes (Windsperger & Windsperger, 2020). Neben dem überfälligen Umstieg auf erneuerbare Energiequellen wie Wind-, Wasser- und Solarenergie, muss zur Prozessoptimierung auch der Energiebedarf von Verfahren gesenkt werden. Anastas & Warner (1998) empfehlen, jeden Prozess in Hinblick auf den Energiebedarf zu evaluieren und gegebenenfalls auf Alternativen wie Mikrowellen-Reaktionen, Photochemische Reaktionen oder Festkörperchemie auszuweichen.

Prinzip 7: Einsatz erneuerbarer Rohstoffe

Als nachwachsende Rohstoffe werden organische Ressourcen aus land- und forstwirtschaftlichen Quellen sowie Aquakultur bezeichnet, die zur Erzeugung von Wärme, Kraftstoffen, Strom und weiteren Produkten aus dem Nichtnahrungsbereich verwendet werden

(Behr & Seidensticker, 2018). Es gibt jedoch auch Stoffe, die allgegenwärtig vorhanden sind oder in kurzer Zeit generiert werden können. Solche Stoffe, wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid- und Methangas, Hefepilze oder Zellen, werden als erneuerbare Rohstoffe bezeichnet (Anastas & Warner, 1998). Besonders Kohlenstoffdioxidgas, das sich infolge menschlicher Aktivitäten in der Atmosphäre anreichert, trägt über den Treibhauseffekt unmittelbar zur Erwärmung der Erde bei. Neben der grundsätzlichen Reduktion von Kohlenstoffdioxidgasproduktion gibt es daher auch Forschungsbestreben, um das Gas unterirdisch zu speichern oder es als erneuerbaren Rohstoff zu nutzen. Bei der als Carbon Capture and Storage (CCS) genannten Technik wird das Kohlenstoffdioxidgas in fossilen Energieversorgungsanlagen, Industrieanlagen oder Biomasseanlagen abgefangen und unterirdisch in Gas- oder Erdöllagerstätten gespeichert (Klett, 2022). Die Methode ist jedoch mit einem enormen Energieaufwand verbunden und birgt Risiken für das Grundwasser bei Kohlenstoffdioxidgas-Leckagen, sodass diese Methode nur bedingt einsatzfähig ist (Klett, 2022). Eine Weiterentwicklung von CSS ist die Methode Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). Das Ziel dieses Vorgehens ist es, Kohlenstoffdioxidgas als erneuerbaren Rohstoff zu nutzen um daraus beispielsweise Chemikalien, Treibstoffe, Kunststoffe und andere kohlenstoffhaltige Materialien herzustellen (Zhang et al., 2020). So kann beispielsweise aus dem in Stahlwerken freigesetzten Kohlenstoffdioxid-, Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffgas mittels chemischer Prozesse Harnsäure hergestellt werden und es wird weniger Kohlenstoffdioxidgas in die Atmosphäre eingebracht (De Kleijne et al., 2020).

Da fossile Rohstoffe nur begrenzt zur Verfügung stehen und daher möglicherweise zukünftigen Generationen nicht oder nur in geringen Mengen zugänglich sein werden, fallen sie per Definition nicht in den Nachhaltigkeitsbegriff. Hinzu kommt, dass die Nutzung fossiler Rohstoffe im Jahr 2019 für 85% der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Österreich verantwortlich war (Österreichischer Biomasse-Verband, 2021). Zu diesen ökologischen Aspekten kommen noch wirtschaftliche, gesundheitliche und politische Problematiken hinzu, sodass ein Umstieg auf nachwachsende und erneuerbare Rohstoffe sowohl für Akteur:innen aus den Bereichen Forschung, Wirtschaft und Industrie als auch für die allgemeine Gesellschaft an Relevanz zunimmt.

Aber auch die Herstellung von Produkten aus erneuerbaren Rohstoffen hat ihre Tücken. Werden beispielsweise Komplexe organische Moleküle (Kohlenhydrate, Fettsäuren, Lipide) zuerst auf kleinere Moleküle heruntergebrochen und anschließend wieder zu hochfunktionalisierten Molekülen synthetisiert, so widerspricht das Vorgehen nicht nur jeglicher Logik, sondern auch den Prinzipien zwei (Atomökonomie), sechs (Energieeffizienz) und acht (Vermeidung von Zwischenschritten). Ein grünerer, optimierter Prozess nutzt die Ausgangsstoffe möglichst direkt oder bricht sie nur in kleinere Stoffe herunter (Anastas & Warner, 1998).

Prinzip 8: Vermeidung von Derivaten als Zwischenstufen von Synthesen

Trotz der späten Nennung ist dieses Prinzip eines der Kernprinzipien der Grünen Chemie. Es besagt, dass Reaktionsschritte vermieden werden sollen, die durch Derivatisierung zu Zwischenschritten führen (Anastas & Warner, 1998). Solche Derivatisierungen sind beispielsweise Schutzgruppen, welche nur temporär genutzt werden, aber dennoch Energie in der Auftrennung und Rückgewinnung benötigen bzw. Abfall generieren.

Alternativen zu herkömmlichen Methoden der Derivatisierung sind Festphasenreaktionen oder die nichtkovalente Derivatisierung (z.B. Cannon & Warner, 2002; Stoler & Warner, 2015). Nichtkovalente Derivate werden gebildet, indem ein oder mehrere Moleküle über nichtkovalente Bindungen wie beispielsweise Van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrücken in eine Matrix eingebaut werden (Stoler & Warner, 2015). Die dabei entstehenden Kristalle haben eine andere Löslichkeit, Stabilität und Bioverfügbarkeit, als die zuvor getrennt vorliegenden Stoffe und können daher zielgerichtet für Materialien genutzt werden (Cannon & Warner, 2002). Auch der Einsatz von Enzymen hat sich bei der Vermeidung von Zwischenstufen als wirksam erwiesen. Die Synthese von p6-amino-Penicillinsäure (6-APA) erfolgt dank Enzymen nicht mehr bei einer Temperatur von -40°C und mit Schutzgruppen, sondern kann in einem einzelnen Schritt mit Wasser als Lösungsmittel bei einer Temperatur von 37°C durchgeführt werden.

Prinzip 9: Einsatz von Katalysatoren

Bei chemischen Reaktionen werden oftmals Reagenzien in stöchiometrischen Mengen hinzugefügt. Dies widerspricht Prinzip 1 (Abfallvermeidung), weil dabei auch Koproducte als Abfälle entstehen. Dieses Problem kann verhindert werden, indem selektive Katalysatoren in chemischen Prozessen eingesetzt werden (Anastas & Warner, 1998). Katalysatoren können in zyklischen Reaktionen chemische Reaktionen beeinflussen, indem sie die Aktivierungsenergie senken, die für die Reaktion notwendige Temperatur herabsetzen oder die Selektivität erhöhen (Chorkendorff & Niemantsverdriet, 2003). Das bedeutet, dass durch ihre Nutzung der Energiebedarf und das benötigte Material reduziert und die Atomökonomie erhöht werden kann. Bei der Wahl des Katalysators gibt es jedoch einiges zu Bedenken: Der Katalysator sollte nur in geringen Mengen benötigt und im Anschluss wiederverwendet werden können, nicht giftig oder teuer sein und keine besonderen Reaktionsbedingungen benötigen (Anastas & Warner, 1998). Als Katalysatoren eignen sich beispielsweise Enzyme, Zeolithe oder organometallische Komplexe (Chorkendorff & Niemantsverdriet, 2003).

Prinzip 10: Herstellung biologisch abbaubarer Stoffe

Das Prinzip der biologisch abbaubaren Stoffe betrifft zugleich die erste und letzte Phase eines Produkts. Es besagt, dass bereits bei der Planung von Produkten ihr Abbau beziehungsweise ihre Lagerung bedacht werden soll. Grüne Produkte sollen daher bei Standardbedingungen

biologisch abbaubar sein und zu ungefährlichen Stoffen zerfallen (Anastas & Warner, 1998). Umweltverschmutzung durch Kunststoffe, die sich nicht oder nur sehr langsam abbauen, ist eine der großen Herausforderungen unserer Gesellschaft. Im Zeitraum 1950 bis 2021 stieg die globale Kunststoffproduktion von 1,5 Mio. Tonnen auf über 390 Mio. Tonnen an (Statista Research Department, 2023b) – knapp ein Drittel davon fällt in der Verpackungsindustrie an, ein weiteres Drittel in der Bau- und Automobilindustrie. Aufgrund ihrer hohen Halbwertszeit werden die Produkte nach ihrem Gebrauch entweder auf Müllhalden gelagert oder thermisch verwertet.

Auch persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe (PBT-Stoffe) spielen eine wichtige Rolle für Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekte in der chemischen Industrie. Es handelt sich dabei um Stoffe, die in der Umwelt oder dem menschlichen Körper langsam oder gar nicht abgebaut werden, sich in den Systemen anhäufen und direkt oder indirekt toxisch wirken (REACH-Verordnung, 2011). In der REACH-Verordnung aus dem Jahr 2006 ist eine Liste mit Kriterien zur Identifikation der PBT-Stoffe zu entnehmen (REACH-Verordnung, 2011). Zu den gängigsten PBTs zählen Anthrazene, asbest-, blei-, cadmium- und quecksilberhaltige Stoffe, Halogenalkane und Chlorbenzene. Aber auch per- und polyfluoroalkylierte Stoffe (PFAS) werden aufgrund ihrer Persistenz als PBTs eingestuft. Was unsichtbar bleibt, ist, dass die Eigenschaften der Stoffe direkt mit ihrer Struktur zusammenhängen. So sind beispielsweise Tenside mit verzweigten Alkylgruppen sehr persistent und führen zur Anhäufung von Schaum im Abwasser von Produktionsstätten, während Tenside aus linearen Alkylketten eine viel bessere Wasserlöslichkeit aufweisen (Anastas & Warner, 1998).

Prinzip 11: Einsatz von Prozessanalytik

Chemische Prozesse spielen eine wichtige Schlüsselrolle in der Entstehung, aber auch in der Lösung vieler Nachhaltigkeitsproblematiken. Bei diesem Prinzip stehen analytische Methoden im Vordergrund, die Echtzeitüberwachung von Prozessen ermöglichen und damit unerwünschten Chemikalienaustritten vorbeugen (Anastas & Warner, 1998). Das Prinzip kann als Prämisse für viele anderen Prinzipien betrachtet werden, da nur messbare Eigenschaften auch kontrolliert werden können. Prozessanalytik kann Ansätze zur Optimierung eines Prozesses liefern, wie beispielsweise die Reduktion des Energieumsatzes und der Abfallstoffe oder die Erhöhung der Sicherheit oder Effizienz (Anastas & Warner, 1998).

Prinzip 12: Unfallvermeidung

Wie bereits in Prinzip 4 beschrieben, bergen viele chemische Reaktionen ein Risikopotenzial. Während in Prinzip 4 jedoch vorwiegend das Risiko auf die Gesundheit thematisiert wird, bezieht sich Prinzip 12 auf das Risiko chemischer Unfälle (Anastas & Warner, 1998). Um solche Unfälle zu verhindern, sollen laut des letzten Prinzips chemische Stoffe so gewählt werden, dass sie ein minimales Risiko für chemische Unfälle wie Austritte, Explosionen und

Brände bergen (Anastas & Warner, 1998). Durch die Formulierung dieses Prinzips umfassen die zwölf Prinzipien nicht nur ökologische und ökotoxikologische Sicherheitsaspekte, sondern ganz allgemein Sicherheitsaspekte für Mensch und Umwelt. Ungünstigerweise besteht oftmals ein negativer Zusammenhang zwischen der Sicherheit eines Prozesses und seiner Effizienz (Anastas & Warner, 1998). Die Aufbereitung eines Lösungsmittels im Sinne von Prinzip 1 (Abfallvermeidung) kann zum Beispiel gleichzeitig zu einem höheren Risiko eines Brands durch Gasaustritt führen. Um die Sicherheit zu gewährleisten, kann eine Adaptation der Reaktionsbedingungen notwendig sein. Die Autoren empfehlen daher die Nutzung von festen Stoffen oder Stoffen mit niedrigen Dampfdrücken anstelle flüchtiger Flüssigkeiten oder Gase. Außerdem wird empfohlen, soweit es geht, auf Halogenverbindungen in molekularer Form zu verzichten und kontinuierliche Reaktionen anstelle zeitpunkt-sensibler Reaktionen durchzuführen (Anastas & Warner, 1998).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Zwölf Prinzipien der Grünen Chemie einen Leitfaden für Prozessoptimierungen auf mechanistischer Ebene darstellen. Für Lai:innen oder Lernende ist ein bloßes Lesen oder Auswendiglernen zwölf mechanistischer Prinzipien keineswegs zielführend, stattdessen bietet es sich an, die zwölf Prinzipien zu grundsätzlichen Zielen der Grünen und nachhaltigen Chemie zusammenzufassen. Die Plattform Grüne Chemie des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Innovation und Technologie Österreich (BMK, 2022) definiert in einem Positionspapier basierend auf den zwölf Prinzipien fünf Ziele der Grünen und nachhaltigen Chemie. Auf Abbildung 5 ist das Grüne Design einer nachhaltigen Chemikalie als zentrales Ziel in der Mitte eines Dreiecks mit den Eckpunkten Sicherheit, Kreislaufwirtschaft sowie Energie- und Rohstoffeffizienz dargestellt.

Definition Grüne Chemie

Die 12 Prinzipien der Grünen Chemie
(nach Anastas & Warner)

1. Abfallvermeidung
2. Maximale Atomökonomie
3. Design weniger gefährlicher Prozesse
4. Design sicherer Chemikalien
5. Verwendung sicherer Lösungsmittel und Reaktionsbedingungen
6. Erhöhung der Energieeffizienz
7. Einsatz erneuerbarer Rohstoffe
8. Vermeidung von Zwischenprodukten
9. Einsatz von Katalysatoren
10. Design abbaubarer Stoffe
11. Echtzeitanalyse zur Vermeidung von Umweltverschmutzung
12. Minimierung des Störfallpotentials

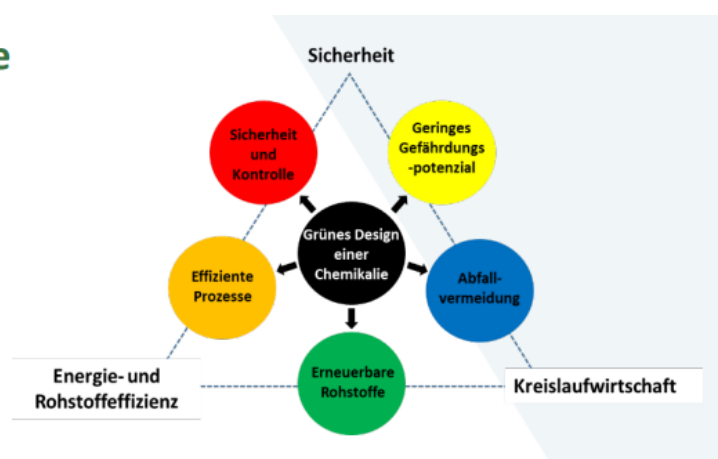


Abbildung 5: Zuordnung der 12 Prinzipien zu 5 Zielen. Quelle: BMK, 2022

Die fünf umgebenden Teilziele, nämlich Erneuerbare Rohstoffe, Effiziente Prozesse, Sichere und kontrollierte Verfahren, Geringes Gefährdungspotenzial und Abfallvermeidung fungieren als Wegweiser zum zentralen Zielen. In der Darstellung werden die Prinzipien der Grünen Chemie und ihre passenden Ziele in verschiedenen Farben hervorgehoben.

Ähnlich wie bei den Prinzipien der Grünen Chemie, ist auch bei den Zielen Grüner Chemie nicht immer eine klare Abgrenzung möglich, sodass einzelne Prinzipien auch zum Erreichen mehrerer Ziele beitragen können.

Die zwölf Prinzipien der Grünen Chemie sind zwar keine verbindlichen Vorgaben, werden jedoch von Chemiker:innen international anerkannt. Da Grüne Chemie und Nachhaltigkeitsaspekte kaum voneinander zu trennen sind, hat sich im Fachdialog die Bezeichnung Grüne und nachhaltige Chemie etabliert. Das übergreifende Ziel der Grünen und nachhaltigen Chemie ist jedenfalls der Wandel der Industrie weg von einem linearen Stoff- und Materialfluss, hin zu einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy). Der Begriff Kreislaufwirtschaft beschreibt ein industrielles Konzept, dessen grundlegendes Merkmal eine Verlängerung des Lebenszyklus von Materialien und Produkten darstellt (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Dies ist zum Beispiel durch das Wiederverwenden, Reparieren, Aufarbeiten, Recyclen sowie das Teilen und Leasen von Produkten möglich. Sobald ein Produkt am Ende des Lebenszyklus angekommen ist, werden die Komponenten zuerst mechanisch getrennt und sortiert, wenn möglich weiterverwendet, und anschließend chemisch oder physikalisch aufgeschlossen (Anastas & Warner, 1998). So werden Abfälle auf ein Minimum reduziert und Stoffe bleiben länger in der Wertschöpfungskette.

Obwohl die Kreislaufwirtschaft, wie der Name sagt, ein wirtschaftliches Modell der Produktion und des Verbrauchs ist, spielt auch die chemische Forschung und Industrie eine wichtige Rolle. Prozessoptimierungen chemischer Prozesse durch das Anwenden der Prinzipien der Grünen Chemie haben einen Einfluss auf die Produktion, Aufbereitung und Verwertung von Stoffen. Abbildung 6 zeigt schematisch den Vergleich eines linearen (blau) und eines zirkulären (grün) chemischen Prozesses. Während der Produktstrom in beiden Prozessen ähnlich stark ist, fällt im zirkulären Prozess durch Wiedergewinnung von Lösungsmitteln und die Nutzung von Katalysatoren der Abfallstrom um einiges geringer aus.

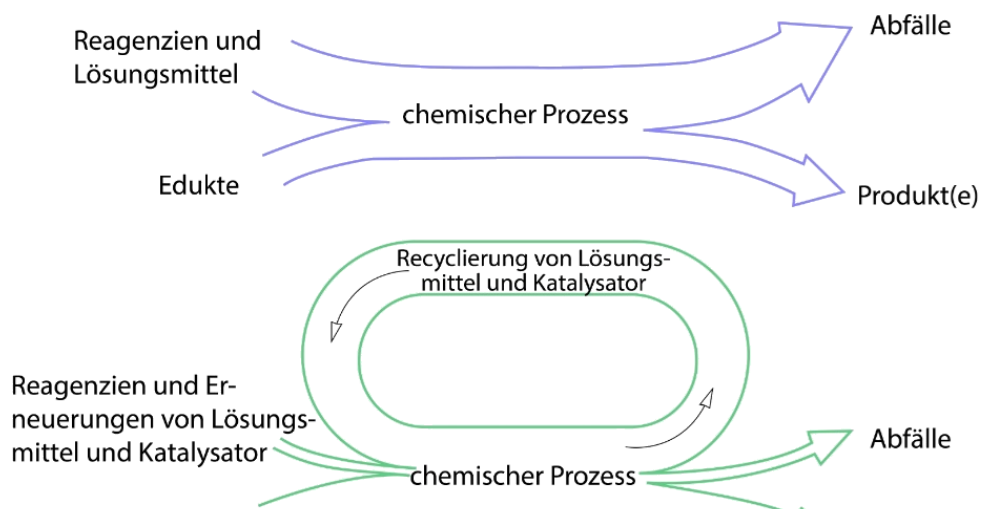


Abbildung 6: Vergleich eines linearen und eines zirkulären chemischen Prozesses. Quelle: In Anlehnung an <https://www.organische-chemie.ch/OC/themen/gruene-chemie.htm>

Aus den zwölf Prinzipien der Grünen Chemie wird deutlich, dass eine Abkehr von fossilen Rohstoffen hin zu einer Kreislaufwirtschaft basierend auf nachwachsende Rohstoffe für den Wandel zur Nachhaltigkeit notwendig ist, um die Grundbedürfnisse unserer wachsenden Gesellschaft zu befriedigen. Dies ist aber nicht durch eine direkte Umstellung der aktuellen Wirtschaft auf eine biobasierte möglich, sondern erfordert strukturelle und prozedurale Veränderungen. Eine dieser Veränderungen ist die Etablierung von Bioraffinerien, die auch im österreichischen Bioökonomie-Aktionsplan Vision 2040 angestrebt wird (BMK, 2021a).

Die chemische Industrie stellt somit einen wichtigen Hebel zur Etablierung einer nachhaltigeren Wirtschaft dar. In Hinblick auf die verantwortungsbewusste Nutzung von Ressourcen rücken Raffinerien als Betriebe, die aus natürlichen Rohstoffen Produkte herstellen (Rakoczy et al., 2013), stetig in den Vordergrund. Raffinerien können basierend auf dem genutzten Rohstoff in Erdöl- und Bioraffinerien unterteilt werden. Im folgenden Kapitel wird daher zuerst der Rohstoff Erdöl sowie seine Verarbeitung und die damit einhergehende Rohstoffproblematik thematisiert. Anschließend wird das Konzept der Bioraffinerie mit dem Rohstoff Holz erläutert.

2.2.2 Der Rohstoff Erdöl

Kraftstoffe, Klebstoffe, Kaugummis und Kerzen – Produkte aus dem Multitalent Erdöl sind aus unserem Alltag kaum mehr wegzudenken. In den letzten 50 Jahren konnte ein Anstieg des Erdölverbrauchs von ungefähr 2235 Mio. Tonnen auf 4400 Mio. Tonnen weltweit beobachtet werden, davon wird beinahe ein Drittel für Primärenergie genutzt (Statista Research Department, 2023a). Obwohl in Österreich Strom mittlerweile einen hohen Anteil an Energie aus erneuerbaren Quellen aufweist, wird der Bruttoinlandsverbrauch zu über einem Drittel aus Erdöl gedeckt (Wien Energie GmbH, 2022). Der Verkehrssektor übernimmt in Österreich dabei mit einem Anteil von 80% die Führung (Statistik Austria, 2022).

Die biogene Entstehung von Erdöl wurde bereits 1757 von Mikhailo Lomonossov aufgeklärt (Offermanns & Salesch, 2014). Vor ungefähr 150 Mio. Jahren sanken pflanzliche und tierische Überreste auf den Meeresboden herab. Auf dem Weg zum Meeresgrund werden dabei Makromoleküle wie Fette, Lipide, Kohlenhydrate und Lignine durch Bakterien zu ihren Monomeren aufgespalten und dienen als Nährstoffe für Mikroorganismen (Tissot & Welte, 1984). Überreste des organischen Materials bilden ein braunes Polykondensat, das strukturell der Huminsäure ähnlich ist (Tissot & Welte, 1984). Mit der Zeit sinkt das Material immer tiefer herab und wird aufgrund der zunehmenden Polymerisierung und dem damit einhergehenden Verlust funktioneller hydrophiler Gruppen weniger wasserlöslich (Tissot & Welte, 1984). Das junge Sediment mischt sich außerdem mit weiterem unlöslichen Material wie Pollen und Sporen, dabei bilden sich Kerogene, Vorläufer der Erdölkomponenten (Tissot & Welte, 1984). Im Laufe der Zeit wird das junge Sediment weiter von Sand und Ton überlagert und verfestigt

sich aufgrund des hohen Drucks und der hohen Temperatur zum sogenannten Muttergestein (Offermanns & Salesch, 2014). In der Tiefe herrscht ein hoher Druck, sodass die wasserunlöslichen Kerogene aufgrund ihrer geringeren Dichte als Wasser aus dem festen Gestein herausgedrückt werden und sich einen Weg an die Oberfläche des Gesteins bahnen. Erst durch diese Migration durch das Gestein bilden die Kerogene eine kompakte Masse, nämlich Erdöl (Offermanns & Salesch, 2014). Erdöllagerstätten bilden sich somit dann, wenn das Erdöl auf eine undurchlässige Schicht stößt. Damit sind Erdöllagerstätten poröse Steinschichten mit Erdölvorkommen, und keine großen, unter der Erdoberfläche liegenden Seen (Offermanns & Salesch, 2014). Der gesamte Prozess von Biopolymeren zu Geopolymeren wird Diagenese genannt (Tissot & Welte, 1984).

Abhängig vom organischen Material und dem Ort, an dem die Diagenese stattfindet, weist Erdöl eine variable Zusammensetzung auf. Die Analytik von Erdöl ist mittlerweile so weit fortgeschritten, dass 30000 Komponenten einer einzelnen Probe beschrieben werden konnten und die Existenz von Erdölproben mit bis zu einer Million Komponenten vermutet wird (McKenna, 2013). Chemisch betrachtet handelt es sich bei Erdöl um eine komplexe Mischung aliphatischer Kohlenwasserstoffmoleküle unterschiedlicher Größe, Sättigung und Flüchtigkeit (Fingas, 2022). Auch aromatische sowie stickstoff-, schwefel- und sauerstoffhaltige Verbindungen kommen in manchen Erdölsorten vor (Hassak, 1958).

Um das Rohöl stofflich nutzen zu können, müssen die einzelnen Komponenten voneinander getrennt werden. Dies geschieht durch den Prozess der fraktionierten Destillation in Erdölraffinerien (Offermanns & Salesch, 2014). Die fraktionierte Destillation ist eine Gegenstrom-Destillation, welche auch Rektifikation genannt wird (Lohrengel, 2012). Sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Gasphase der erhitzten Stoffe kontinuierlich im Gegenstrom zur flüssigen Phase läuft. In einem Röhrenofen wird das Rohöl zuerst auf 370°C erhitzt und in eine Glockenbodenkolonne mit atmosphärischem Druck geleitet (Behr et al., 2010). Dort werden Fraktionen des Rohöls nach Siedebereichen getrennt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Siedebereiche von Alkanen sowie Anwendungsbeispiele für die Fraktionen.

*Tabelle 3: Überblick über die Fraktionen bei der fraktionierten Destillation.
Quelle: In Anlehnung an Behr et al. (2010)*

Siedebereich [°C]	Fraktion	Anwendung
<20	Flüssiggas	Heizgase, Ausgangsstoffe für chem. Industrie (z.B. Ethan, Ethen, Methan)
20-75	Leichtbenzin	PKW-Benzin, Lösemittel Petrolether
75-175	Schwerbenzin	Autobenzin
175-225	Kerosin	Kraftstoff für Flugzeuge
225-360	Gasöle	Dieselmotor, Brennstoff
>360	Atmosphärenrückstand	Verarbeitung in Vakuumdestillation, Schmieröl, Paraffin, Bitumen

Kurzkettige Alkane weisen einen niedrigen Siedebereich auf und sammeln sich daher am Kolonnenkopf. Mit der Kettenlänge und der Fähigkeit, intermolekulare Wechselwirkungen einzugehen, steigt auch der Siedebereich der Alkane. Für die Industrie sind besonders die niedrigsiedenden Fraktionen relevant, da sie als Ausgangsstoffe für die chemische Industrie genutzt werden.

Um weitere industriell wichtige Stoffe aus dem Atmosphärenrückstand zu erhalten, kann an die atmosphärische Destillation noch eine Vakuumdestillation gekoppelt werden (Behr et al., 2010). Mithilfe von Dampfstrahlpumpen wird ein Unterdruck von 40-70mbar erreicht und Partialdrücke können durch zusätzlich zugeführten Wasserdampf gesenkt werden (Behr et al., 2010). In diesem Schritt entstehen die Fraktionen Vakuumgasöl, leichtes und schweres Wachsdestillat sowie Vakuumrückstand (Behr et al., 2010).

Die im Zuge der fraktionierten Destillation gewonnenen Moleküle können daraufhin durch chemische Verfahren umgewandelt werden – diesen Schritt nennt man Konversion (Behr et al., 2010). Dabei werden langkettige Kohlenwasserstoffketten primär durch katalytisches Cracken mithilfe pulverförmiger Zeolith-Katalysatoren zu kurzkettigen Kohlenwasserstoffketten gespalten (Behr et al., 2010). Eine weitere Möglichkeit der Konversion ist das Hydrotreating, bei dem ungesättigte Moleküle hydriert und Heteroatome wie Schwefel- und Stickstoffatome entfernt werden (Behr et al., 2010). Außerdem können Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise *n*-Alkane durch Isomerisierung in Iso- oder Cycloalkane überführt und gesättigte Verbindungen wie Cyclohexan durch Dehydrierung in ungesättigte Verbindungen wie Benzen überführt werden (Behr et al., 2010).

Erdöl gehört heutzutage zu den bedeutendsten Ressourcen für die Gewinnung von Kraftstoffen, Energie und chemischen Produkten (Offermanns & Salesch, 2014). Die Förderung, Verarbeitung und Verwertung von Erdöl und Erdölprodukten ist jedoch in Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte problematisch. Umweltorganisationen, wie beispielsweise Greenpeace, unternehmen große Anstrengungen, um auf die Gefahren von Erdöl für Umwelt, Klima und Natur aufmerksam zu machen (vgl. Greenpeace e.V., 2014). Eine Alternative zur Herstellung vieler Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen liefern Bioraffinerien.

2.2.3 Bioraffinerie von Holz und Holzchemie

Der Begriff Bioraffinerie wird derzeit auf zwei Arten verwendet: Zum einen wird darunter eine Produktionsstätte verstanden, in der Biomasse zu Produkten verarbeitet wird, zum anderen als Prozess zum Umgang mit Biomasse (BMWK, 2012). In der Deutsche Roadmap Bioraffinerie wird der Begriff folgendermaßen definiert:

„Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte

(Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inkl. Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt.“ (BMWK, 2012, S.7)

Diese Definition klingt zu Beginn etwas abstrakt, und wird daher an dieser Stelle weiter erläutert. Der Begriff integrativ bezieht sich auf das Ausmaß einer Bioraffinerie und beschreibt Synergien, die durch eine Kopplung der Biomasseverarbeitung, Materialienproduktion und Energiebereitstellung entstehen (Peters et al., 2014). Die Vorteile solcher Synergien sind beispielsweise gemeinsame Wasser-, Abwasser-, Müll- und Energiesysteme, eine größere Produktionskapazität und geringere Kosten. Auch hier darf der wirtschaftliche Faktor nicht vernachlässigt werden – die entstandenen Produkte müssen konkurrenzfähig gegenüber vorhandenen Konzepten sein. Bioraffinerien bewegen sich also in einem Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit sowie Verfahrenssicherheit und Innovation (Peters et al., 2014).

Biomasse nimmt eine zentrale Rolle im Konzept Bioraffinerie ein. Im Gegenzug zu Strom, der auch aus Sonnen-, Wasser- und Windkraft gewonnen werden kann, sind Biomasse sowie Methan- und Kohlenstoffdioxid die einzigen nicht-fossilen Quellen für kohlenstoffbasierte Produkte. Obwohl Biomasse als nachwachsend und erneuerbar gilt, ist sie doch limitiert: Die Anbauflächen sind begrenzt, saisonal und stehen oft in Konkurrenz zu anderer Flächennutzung wie der Nahrungsmittelproduktion oder dem Naturschutz (Peters et al., 2014). Bioraffinerien müssen daher die vorhandenen Ressourcen maximal effizient nutzen und gleichzeitig ökologische und ökonomische Faktoren berücksichtigen. Anders, als beispielsweise die Papierindustrie oder Biogasanlagen, nutzen Bioraffinerien alle Rohstoffkomponenten. Mit Blick auf Ressourcenverluste und -effizienz ist es wichtig, dass Stoffkreisläufe geschlossen werden, (Zwischen-)Produkte durch Recycling mehrfach genutzt werden und Produkte langlebig sind (Peters et al., 2014).

Europaweit konnten im Jahr 2017 224 Bioraffinerie identifiziert werden, vier davon in Österreich (Nova Institute for Ecology and Innovations, 2017). Bereits drei Jahre später betrug allein die Anzahl der Bioraffinerien von Holz europaweit 139, neun davon in Österreich (Kantola et al., 2020). Aus diesen beiden Erhebungen geht hervor, dass Bioraffinerien in Europa an Bedeutung gewinnen.

Allgemeines Verfahrensschema in Bioraffinerien

Alle Bioraffinerien folgen einem ähnlichen Verfahrensschema. Zuerst werden in der Primärraffination durch physikalische und (bio-)chemische Prozesse aus dem Rohstoff Biomasse Vorläufer gewonnen. In einem zweiten Schritt, der Sekundärraffination genannt wird, werden die Vorläufer durch biochemische Konversionsprozesse zu sogenannten Plattformchemikalien verarbeitet. Als Plattformchemikalien werden biobasierte Synthesebausteine bezeichnet, die aus den Vorläufern Fette, Proteine, Kohlenhydrate und

Lignin durch Konversion gewonnen werden und die für die Herstellung einer Vielzahl anderer Stoffe verfügbar sind (Kamm, 2008). Anschließend können die Plattformchemikalien erneut mittels (bio-)chemischer Prozesse zu Produkten und Anwendungen veredelt werden. Abbildung 7 zeigt schematisch die allgemeinen Verfahrensketten in Bioraffinerien im Vergleich zu Erdölraffinerien. In der linken Spalte werden die Überbegriffe für die jeweiligen Produktionsstufen genannt, daneben stehen jeweils die Fachtermini aus der Bio- und Erdölraffinerie. Aus der Abbildung wird deutlich, dass aus unterschiedlichen Rohstoffen über

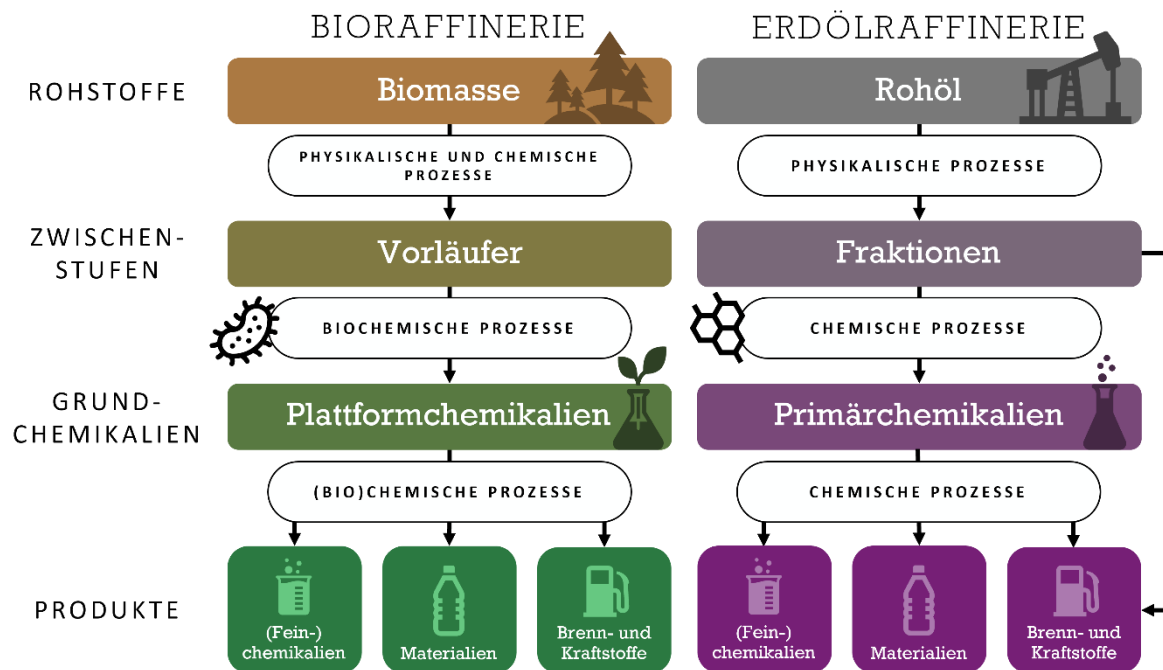


Abbildung 7: Vergleich der allgemeinen Verfahrenskette und der Begrifflichkeiten in der Bio- und Erdölraffinerie.
Quelle: Eigene Darstellung

unterschiedliche Prozesse dieselben Produkte gewonnen werden können.

Je nachdem, welche Biomasse genutzt wird, variieren die durchgeführten Prozesse. Es handelt sich dabei um

- physikalische und mechanische Prozesse, wie beispielsweise das Trocknen oder Zerkleinern von Rohstoffen, Filtrationen, Destillationen, Extraktionen und Umkristallisationen
- thermochemische Verfahren, wie Pyrolyse, Verbrennungen, Vergasungen und Thermolyse
- chemische Verfahren wie Oxidationen, Veresterungen, Hydrierungen, Polymerisierungen und Isomerisierungen oder
- biochemische Verfahren wie enzymatische Umwandlungen und Fermentationsprozesse (Peters et al., 2014).

Bioraffinerien können anhand der genutzten Biomasse eingeteilt werden. Eine Möglichkeit der Einteilung ist in Zucker-/Stärke-Bioraffinerien, Pflanzenöl-Bioraffinerien, Lignocellulose-Bioraffinerien, Grüne Bioraffinerien, Synthesegas-Bioraffinerien und Biogas-Bioraffinerien (BMWK, 2012). Jede Art von Bioraffinerie hat ihre Vor- und Nachteile und ist bislang unterschiedlich reif in ihrer Entwicklung. In den folgenden Absätzen werden die gängigsten Arten der Bioraffinerie beschrieben.

Zucker-/Stärke-Bioraffinerie

In Zucker-/Stärke-Bioraffinerien werden als Biomasse Zuckerrüben, Zuckerrohr, Erdäpfel und Getreide genutzt (BMWK, 2012). Daraus werden primär die Präkursoren Saccharose und Stärke hergestellt, welche anschließend zu Kristallzucker, Ethanol, Milchsäure, Zitronensäure, Papier und Pappe sowie Verdickungsmitteln weiterverarbeitet werden können (Peters et al., 2014). Vorteile dieser Art von Bioraffinerien sind, dass sie auf bereits vorhandene technische Strukturen und Anlagen aufbauen können, mittlerweile gut beforscht sind und ausreichend Rohstoffe in Österreich verfügbar sind (BMWK, 2012). Dagegen spricht, dass die Verfahrensketten noch nicht ausreichend divers sind und so nur eine kleine Vielfalt an Produkten hergestellt werden kann und dass die benötigte Biomasse in Konkurrenz mit der Lebensmittelindustrie steht (BMWK, 2012).

Pflanzenöl-Bioraffinerie

Pflanzenöl-Bioraffinerien nutzen, wie der Name schon sagt, Ölsaaten und Ölfrüchte als Biomasse (Peters et al., 2014). Daraus wird als Präkursor Pflanzenöl hergestellt, welches anschließend entweder in Fettsäuren und Glycerin gespalten werden kann oder direkt als Biokraftstoff, Bioschmierstoff oder Lösungsmittel genutzt werden kann (BMWK, 2012). Produkte der Pflanzenölraffinerie sind demnach sehr vielfältig: Neben Erzeugnissen wie Kosmetika, Farben und Lacken sowie Tensiden bildet das dabei ebenfalls gewonnene Glycerin einen Ausgangsstoff für viele weitere Chemikalien (Peters et al., 2014). Auch hier kann zwar auf bereits vorhandene Infrastruktur aufgebaut werden, aufgrund der Verfügbarkeit der Rohstoffe sind jedoch nur mittel- und langkettige Fettsäuren in Europa produzierbar (BMWK, 2012). Zudem steht die Herstellung chemischer Produkte bei dieser Art der Bioraffinerie ebenfalls in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie – aktuell wird daher an alternativen Prozesswegen mit/auf der Basis von Algenlipiden geforscht (BMWK, 2012).

Synthesegas-Bioraffinerie

Synthesegas-Bioraffinerien unterscheiden sich in ihrer Verfahrenskette von anderen Bioraffinerien. Als Rohstoff kann jegliches lignocellulosehaltiges Material verwendet werden, wie beispielsweise Stroh, Holz, Energiepflanzen und Papierabfälle (BMWK, 2012). Anders als bei den zuvor beschriebenen Bioraffineriekonzepten werden im Zuge der Primärraffination die

Rohstoffkomponenten nicht getrennt, sondern alle Bestandteile bis zum Rohprodukt Synthesegas (Gasgemisch aus unterschiedlichen Anteilen Kohlenstoffmonoxidgas und Wasserstoffgas) abgebaut (Peters et al., 2014). Das Synthesegas kann dann entweder vor Ort energetisch genutzt oder zu Biokraftstoffen, Biokunststoffen, Alkoholen und anderen chemischen Produkten weiterverarbeitet werden (Peters et al., 2014). Synthesegas-Bioraffinerien stellen zwar im Gegenzug zu Zucker-/Stärke-Bioraffinerien und Pflanzenöl-Raffinerien keine unmittelbare Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion dar, dafür muss die Nutzung des Rohstoffes Holz gegenüber den multidimensionalen Aufgaben der Wälder abgewogen werden (BMWK, 2012). Zudem sind Synthesegas-Bioraffinerien sehr teuer, biotechnologische Prozesse für Synthesegas-Konversion noch nicht weit entwickelt und auch die Produktvielfalt ist aktuell noch nicht ausgeschöpft, sodass sie vor der Nutzung im industriellen Maßstab noch weiterentwickelt werden müssen (Peters et al., 2014).

Grüne Bioraffinerie

Auch Grüne Bioraffinerien können verschiedene cellulosehaltige Rohstoffe, wie beispielsweise frische Gräser und grünes Getreide nutzen (BMWK, 2012). Sie werden im Zuge der Primärraffination durch Pressen in die Komponenten Presssaft und cellulosehaltiger Presskuchen getrennt (Peters et al., 2014). Die Kopplung an eine Biogasanlage und teilweise Nutzung der Komponenten als Kosubstrate macht Wärme- und Wasserströme in Grünen Bioraffinerien deutlich wirtschaftlicher als der getrennte Betrieb (BMWK, 2012). In der Sekundärraffination können aus dem Presssaft chemische Produkte wie Essigsäure, Milchsäure, Aminosäuren und Proteine abgetrennt werden, während der Presskuchen für die Herstellung von Produkten auf Basis von Cellulosefasern wie Dämmstoffe, Kunststoffe genutzt werden kann (Peters et al., 2014). Zudem kann der Presskuchen hydrolysiert und fermentiert werden, wodurch sich weitere chemische Produkte erschließen lassen (Peters et al., 2014). Vorteile Grüner Bioraffinerien inkludieren eine sehr weit fortgeschrittene Forschung, dennoch ist die Qualität der Produkte im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren noch nicht ausreichend (BMWK, 2012). Hinzu kommt, dass Grüne Bioraffinerien mit dem Rohstoff frische Biomasse nur in grünlandreichen Regionen und saisonal betrieben werden können (BMWK, 2012).

Lignocellulose-Bioraffinerie

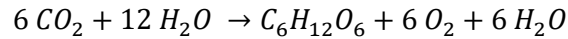
Die Lignocellulose-Bioraffinerie wird im Vergleich zu den anderen Bioraffinerie-Konzepten ausführlicher beschrieben, weil es sich dabei um einen Schwerpunkt der Unterrichtseinheiten und damit der Masterarbeit handelt. Bevor jedoch auf die genauen Prozesse innerhalb der Lignocellulose-Bioraffinerie (LC-Bioraffinerie) eingegangen werden kann, muss eine fachliche Klärung mit Blick auf die dafür notwendige Biomasse, nämlich Holz, erfolgen.

Wie kaum ein anderes Material findet Holz seit Beginn der Menschheitsgeschichte Anwendung. Einige Anwendungsmöglichkeiten sind früher wie heute die Nutzung zur Herstellung von Werkzeugen als Baustoff für Unterkünfte und Brennstoff für deren Heizung. Aber auch die stoffliche Verwertung als Ausgangspunkt für Chemikalien ist Menschen schon länger bekannt. Überlieferungen des römischen Schriftstellers Plinius beschreiben die Verwendung von Holzdestillationsprodukten, wie beispielsweise Holzessig, zur Einbalsamierung der Toten im alten Ägypten (Klar, 1903). Tatsächlich wurde bis ins 19. Jahrhundert der Großteil an Aceton und Methanol aus Holz hergestellt (Wagemann, 2014). Mit dem ersten Weltkrieg konnte die chemische Industrie einen ersten Wendepunkt verzeichnen: Als Grundstoff für chemische Produkte wie Aromaten und acetylgruppenhaltige Stoffe sowie zur Herstellung von Treibstoffen diente nicht mehr Holz, sondern Kohle, und anschließend Erdöl (Wagemann, 2014). Bis heute werden 90% der chemischen Produkte aus Erdöl hergestellt (GWM, 2007). Angesichts einer Rohstoffverknappung und den mit Erdöl verbundenen Umweltproblemen ist die Entwicklung neuer, nachhaltiger Verfahren für nachhaltigere Produkte aus erneuerbaren Rohstoffen notwendig.

Chemische Grundlagen der Photosynthese

Wie allen Pflanzen, Moosen und Farnen liegt auch dem Wachstum von Bäumen die Photosynthese zugrunde. Sie ist ein biochemischer Prozess, bei dem Pflanzen Lichtenergie (genauer genommen elektromagnetische Strahlung) zu chemischer Energie umwandeln und so organische Verbindungen synthetisieren können (Sonnewald, 2014). Die Molekularstrukturen, in denen die Photosynthese abläuft, sind Chlorophyllmoleküle (Weiler et al., 2008). Chemisch betrachtet ist der Grundkörper der Chlorophyllmoleküle ein Chelatkomplex mit einem Magnesium-Zentralion und einem derivatisierten Porphyrinmolekül-Liganden (Sonnewald, 2014) und ist daher Hämgruppen sehr ähnlich, die anstelle des Magnesiumions ein Eisenion aufweisen. Chlorophyllarten unterscheiden sich anhand der Seitenketten, die an den Grundkörper angehängt sind (Weiler et al., 2008). Um aus niedermolekularen Verbindungen wie Wassermolekülen und Kohlenstoffdioxidmolekülen energiereiche Verbindungen wie Glucosemoleküle und Sauerstoffmoleküle zu machen, müssen zwei Phasen durchlaufen werden. Die erste Phase ist die sogenannte Lichtreaktion, bei der Chlorophyllmoleküle photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) mit einer Wellenlänge von 400-480 nm (Blau) und 550-700 nm (Gelb bis Rot) absorbieren (Weiler et al., 2008). In der Zellmembran der Chloroplasten, der Thylakoidmembran, findet ein Elektronen- und Protonentransport statt, sodass das reduzierte Redoxäquivalent NADPH und aus Adenosindiphosphat- (ADP) Adenosintriphosphatmoleküle (ATP) synthetisiert werden (Weiler et al., 2008). Die zweite Phase ist die Dunkelreaktion, die zwar kein Licht, dafür aber die Produkte der Lichtreaktion benötigt (Sonnewald, 2014). Sie findet im Stroma statt, einer farblosen Flüssigkeit innerhalb der Zelle, und kann durch den Calvin-Zyklus beschrieben

werden (Sonnewald, 2014). Innerhalb von vier Schritten werden zuerst Kohlenstoffdioxidmoleküle fixiert, reduziert, das dazu notwendige Enzym RubisCO regeneriert und Kohlenhydrate assimiliert (Sonnewald, 2014). Die aus der Licht- und Dunkelreaktion folgende Gesamtreaktion der Photosynthese lautet:



2.3.3

Trotz immenser Forschungsbemühungen ist der genaue Mechanismus der Photosynthese bis heute noch nicht vollständig geklärt (Weiler et al., 2008). Die dabei gewonnene Glucose wird von der Pflanze zum Teil als Energieträger für das Pflanzenwachstum genutzt. Gleichzeitig bilden Glucose und die im Stoffwechselprozess entstehenden Glucosederivate auch Grundbausteine für diverse Strukturen einer Pflanze, wie beispielsweise den Baumstamm (Sonnewald, 2014).

Die Bestandteile von Holz

Holz bietet sich insofern als Rohstoff für die chemische Industrie an, als die Zellwände aus unterschiedlichen Komponenten bestehen, die wiederum unterschiedliche Produktionsketten ermöglichen. Die Komponenten werden aufgrund ihrer Extraktionseigenschaften unterteilt in (1) Cellulose, (2) Hemicellulosen, (3) Lignin und (4) Extraktstoffe.

(1) Die Entdeckung der Cellulose geht auf den Chemiker Anselme Payen im Jahr 1834 zurück. Er behandelte Holz mit Salpetersäurelösung und Natronlauge und nannte den daraus gewonnenen Stoff Cellulose (Weiler et al., 2008). Payen erkannte außerdem, dass Cellulosemoleküle Biopolymere aus mehreren hundert bis tausend Glucosemolekülen sind und daher der Struktur von Stärke (Amylosemoleküle) sehr ähnlich sind (Behr & Seidensticker, 2018). Der Unterschied zur Stärke liegt darin, dass in Cellulosemolekülen Glucosemoleküle durch β -1,4-glykosidische Bindungen miteinander verknüpft sind, während bei Amylosemolekülen die Moleküle α -1,4-glykosidisch verknüpft sind (Behr & Seidensticker, 2018). Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus einem Cellulose- (links) und einem Amylosemolekül (rechts).

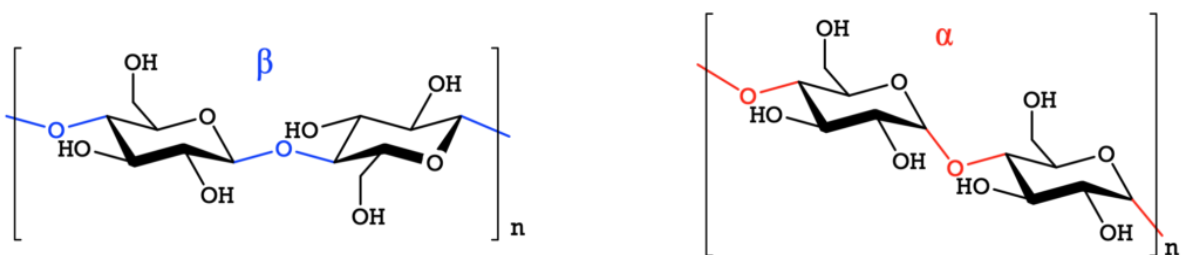


Abbildung 8: Struktur eines Cellulosemoleküls (links) und eines Amylosemoleküls (rechts).
Quelle: Eigene Darstellung

Je nach Baumart hat Holz einen Anteil von 30% bis 50% an Cellulose (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021). Sie kann durch verschiedene Verfahren aus dem Holz gewonnen werden, das gängigste ist jedoch das Kraftverfahren (Ek et al., 2009a).

(2) Hemicellulosemoleküle bestehen wie Cellulosemoleküle ebenfalls aus verknüpften Zuckermolekülen. Dabei handelt es sich jedoch nicht ausschließlich um Glucosemoleküle, sondern um Heteropolysaccharide aus Glucose-, Mannose- und Galactosemolekülen (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021). Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt aus einem Hemicellulose-Molekül, bestehend aus den Monomeren Galactose, Glucose, Mannose, Xylose, Arabinose und einer Acetyl-Gruppe.

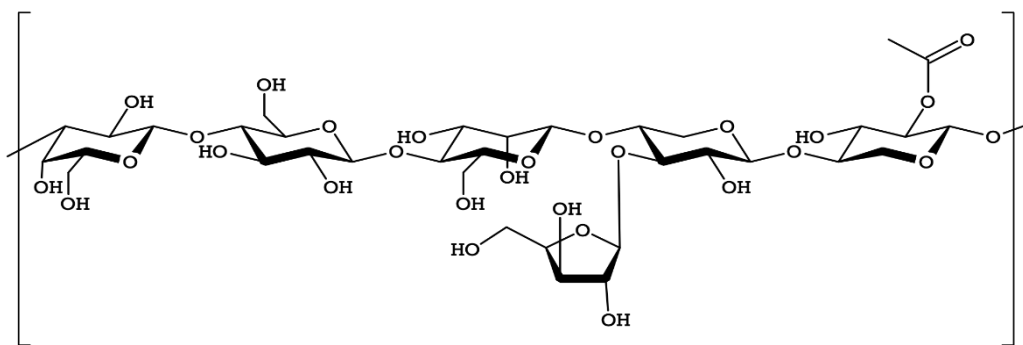


Abbildung 9: Struktur eines Hemicellulosemoleküls. Quelle: Eigene Darstellung

Hemicellulosen sind daher eine Gruppe sehr heterogener, verzweigter Hexose- und Pentosemoleküle. In Vergleich zur Cellulose weisen Hemicellulosen eine niedrigere chemische und thermische Stabilität auf, sodass sie während des Holzaufschlusses je nach Bedingungen erhalten bleibt oder zerstört werden kann (Ek et al., 2009b). Auch der Anteil an Hemicellulosen variiert je nach Pflanzenart und reicht von 5% bei Baumwolle bis zu 20-30% bei Hölzern (Behr & Seidensticker, 2018). Hemicellulosen und Cellulosen fungieren als Strukturkohlenhydrate und sind für die Stabilität und Struktur der Zellwände verantwortlich (Ek et al., 2009b). Aufgrund ihrer Vielfalt lassen sich aus Hemicellulosen auch vielseitige Produkte entwickeln, die Hauptanwendung ist die Synthese von Xylit als Zuckeraustauschstoff (Peters et al., 2014).

(3) Den dritten großen Anteil von Holz bilden Lignine, Makromoleküle auf Phenolbasis. Ähnlich wie bei Hemicellulosen, handelt es sich auch hierbei um eine Gruppe an Makromolekülen – mit dem Unterschied, dass diese Gruppe noch heterogener ist und es daher keine definierte Grundstruktur für Lignine gibt (Behr & Seidensticker, 2018). Phenylpropanoide (Phenole mit einer C3-substituierten Seitenkette) bilden die Grundeinheit der Lignine und können beispielsweise als Coniferylalkohol, Cumarylalkohol oder Sinapylalkohol in einer dreidimensional vernetzten Struktur vorliegen (Behr & Seidensticker, 2018). Die Vernetzung entsteht dabei durch Aryl-Ether-Bindungen an den jeweiligen α - und β -ständigen Kohlenstoffatomen. Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt aus einem Lignin-Molekül.

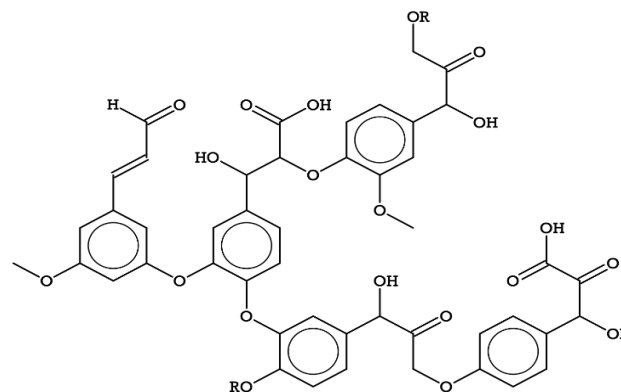


Abbildung 10: Ausschnitt aus der Struktur eines Lignin-Moleküls.
Quelle: Eigene Darstellung

Durch die Funktion als Kitt gibt Lignin Pflanzen die Fähigkeit zur Verholzung und damit ihre Stabilität und Widerstandsfähigkeit (Behr & Seidensticker, 2018). Je nach Pflanzenart reicht der Ligninanteil von 17% (Gräser) bis zu 33% (Fichte) (Ek et al., 2009a). Neben der Verholzung sind Lignine jedoch auch für andere wichtige Funktionen in Pflanzen verantwortlich. Aufgrund des hydrophoben Charakters verringern sie den Übergang von Wasser in der Zellwand und unterstützen damit den Wasser- und Nährstofftransport (Behr & Seidensticker, 2018). Der aromatische Charakter der Lignine schützt Pflanzen zudem vor UV-Licht (Behr & Seidensticker, 2018).

Aktuell werden die durch den Holzaufschluss gewonnenen Lignine aufgrund ihres hohen Brennwertes vor allem thermisch verwertet (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021). Nur rund 2% der weltweit anfallenden Lignine werden stofflich genutzt (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021). Davon wird rund die Hälfte als Dispergiermittel in Zement, Gips und Beton zugemischt (Behr & Seidensticker, 2018). Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind die Nutzung als Bindemittel in Pellets, Briketts, Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln, die Verarbeitung zu Kunststoffen (Arboform®) sowie die Weiterverarbeitung zu Chemikalien (Behr & Seidensticker, 2018). Durch Vergasung kann aus Lignin Synthesegas gewonnen werden, durch Pyrolyse eine Vielzahl an Kohlenwasserstoffen und durch Hydrierung substituierte Phenole für Duroplasten (Behr & Seidensticker, 2018). Aus der Ablauge des Holzaufschlusses kann zudem Vanillin als

Aromastoff und Ausgangsstoff für Arzneimittel gewonnen werden (Behr & Seidensticker, 2018). Auch Whiskey, der in Holzfässern gelagert werden muss, bekommt durch Lignine seinen Geschmack – neben der Entstehung von Phenolen, die für den charakteristischen Geschmack verantwortlich sind, kommt es im Holzfass zum oxidativen Abbau von Lignin und Vanillin entsteht (Behr & Seidensticker, 2018).

(4) Zur Vollständigkeit soll an dieser Stelle noch die Gruppe der Extraktstoffe beschrieben werden. Extraktstoffe sind niedermolekulare Verbindungen, die in geringen Mengen in Holz vorkommen und daraus mithilfe von Extraktionsverfahren gewonnen werden (Ek et al., 2009b). Ihre Funktionen sind vielfältig und reichen von der Beteiligung an Stoffwechselprozessen der Pflanze bis hin zur Wirkung als Fungi- und Insektizide (Ek et al., 2009b). Sie werden häufig in aliphatische Extraktstoffe, Terpenoide und Phenole unterteilt (Ek et al., 2009b). Phenolische Extraktstoffe weisen eine bessere Wasserlöslichkeit auf und spielen daher eine geringere Rolle beim Holzaufschluss, als beispielsweise Extraktstoffe mit lipophilem Charakter wie Fette und Fettsäuren, Sterole und Terpenoide (Ek et al., 2009b). Diese Extraktstoffe können den Prozess des Holzaufschlusses beeinflussen, indem sie klebrige Rückstände auf den genutzten Materialien und Maschinen bilden (Ek et al., 2009b). Auch das ungewollte Schäumen der im Holzaufschluss genutzten und entstehenden Lösungen wird durch Extraktstoffe verursacht (Ek et al., 2009b). Der Großteil der Extraktstoffe liegt jedoch gelöst in der Ablauge vor und wird daher entweder zusammen mit der Lignin-Komponente thermisch verwertet oder davon abgetrennt und zu Feinchemikalien verarbeitet (Ek et al., 2009b).

Primärraffination von Holz

Um die Rohstoffkomponenten stofflich nutzen zu können, müssen sie mithilfe physikalischer und chemischer Methoden zunächst voneinander getrennt werden. Nachdem das Holz in kleine Holzschnitzel gehackt wurde, kann es mithilfe unterschiedlicher chemischer Prozesse aufgeschlossen werden. Dazu wird vor allem der im Jahr 1879 von Carl Ferdinand Dahl entwickelte Kraftprozess genutzt (Ek et al., 2009a). Den Namen verdankt der Prozess dem Deutschen Wort Kraft, weil ursprünglich die dabei erhaltenen Fasern aufgrund eines hohen Ligninanteils sehr kräftig waren und daher für Kartons und Sackpapiere geeignet waren (Ek et al., 2009a). Der Prozess wurde mittlerweile weiterentwickelt und ermöglicht auch die Gewinnung von bleichbaren Fasern mit einem geringeren Ligningehalt (Ek et al., 2009a). Um die Cellulosefasern von der Ablauge (Mischung aus Lignin und Hemicellulosen) abzutrennen,

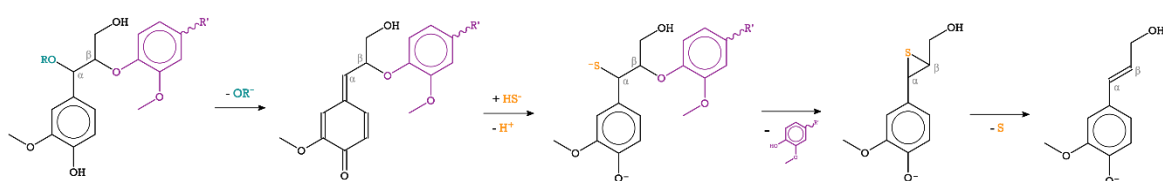


Abbildung 11: Reaktionsschema der Kraft-Aufschlusses. Quelle: In Anlehnung an Otromke et al. (2019)

werden die Hackschnitzel bei ungefähr 160-170°C und einem Druck von 7 bar unter Zugabe von Natriumsulfid (Na_2S) und Natriumhydroxid (NaOH) gekocht, die Kochlauge wird auch *white Liquor* genannt (Ek et al., 2009a). In wässriger Lösung hydrolysieren die Natriumsulfid und Natriumhydroxid fast vollständig zu Hydrogensulfidionen und Hydroxid- sowie Natriumionen. Abbildung 11 zeigt die Reaktionen des Kraftaufschlusses (Otromke et al., 2019).

Die basischen Bedingungen führen dazu, dass zuerst die Phenolfunktion deprotoniert wird, die Aryl-Etherbindung in Alphaposition gespalten wird und ein Chinon-Methid entsteht. Angetrieben durch eine Rearomatisierung des Chinon-Methids erfolgt ein nucleophiler Angriff eines Hydrogensulfidions auf das α -Kohlenstoffatom und es bildet sich ein Thiol. Da das Sulfidion relativ groß ist und freie Elektronenpaare zur Verfügung hat, bindet es an das benachbarte β -Kohlenstoffatom. Erst an dieser Stelle findet der Schlüsselschritt der Reaktion statt, nämlich die Spaltung der Sauerstoffbindung am β -Kohlenstoffatom. Dabei entsteht ein dreiatomiger, instabiler Thiiranring, welcher zuletzt zerfällt und eine Doppelbindung entsteht.

Nach dem Kraft-Prozess liegen Cellulosefasern und die Ablauge getrennt vor. Die Ablauge wird aufgrund ihrer dunklen Farbe und ihrer dickflüssigen Konsistenz auch *black liquor* genannt und besteht aus dem abgetrennten Lignin und teilweise aus hydrolysierten Hemicellulosen (Peters et al., 2014).

Sekundärraffination der Holzkomponenten

Für die Sekundärraffination von Cellulose und Hemicellulosen stehen nun zwei Wege zur Verfügung:

(1) Aus der Cellulose und den Hemicellulosen werden durch gemeinsame enzymatische Umsetzung direkt fermentierbare Kohlenhydrate hergestellt (Peters et al., 2014). Dazu werden Cellulose und Hemicellulosen mit spezifischen Enzymen in einem Fermentor behandelt und daraus monomere Zucker wie Glucose und Xylose gewonnen (Peters et al., 2014). Diese Zucker können wiederum fermentiert werden und so zur biotechnologischen Produktion von Ethanol, Essigsäure, Furfural und Hydroxymethylfurfural beitragen (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021).

(2) Die Komponenten werden getrennt weiterverarbeitet (Peters et al., 2014). Die Cellulose kann dabei zum Beispiel in die Papier- und Zellstoffindustrie eingeführt werden oder ebenfalls mithilfe von Enzyme zu Glucosemonomeren hydrolysiert werden (Peters et al., 2014). Aus den Hemicellulosen können einzelne Bestandteile wie C5- und C6-Monomere abgetrennt werden und fermentativ veredelt werden. Aus den Hemicellulosen fallen auch bei dieser Vorgehensweise Furfural und Essigsäure an, die wiederum weiterverarbeitet werden können (Raspolli Galletti & Antonetti, 2021).

Bei beiden Vorgehensweisen fällt zudem ein Stoffstrom für Lignin an. Dieses kann thermisch verwertet werden und so in die Energieversorgung der Bioraffinerie einfließen, stofflich genutzt werden oder zu Chemikalien weiterverarbeitet werden.

Mit dem großen Kapitel der Bioraffinerie kommt die fachliche Klärung der für die Unterrichtsreihe relevanten fachlichen Inhalt zu einem Ende. Um aus diesen Inhalten eine Unterrichtsreihe zu entwickeln, müssen sie jedoch auch für Lernende bedeutsam werden. Dazu ist nach Duit et al. (2012) Wissen zu Lernvoraussetzungen notwendig.

2.3 Erhebung von Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie

„Vorstellungen bestimmen das Lernen, weil man das Neue nur durch die Brille des bereits Bekannten ‚sehen‘ kann“ (Duit, 2010, S.1).

Eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der Unterrichtsreihe ist daher eine Verknüpfung der fachlichen Klärung mit individuellen Perspektiven der Lernenden. Die Perspektiven wurden zum einen in einschlägiger Fachliteratur recherchiert, zum anderen mittels eines Assoziationstests erhoben. Die Analyse bekannter Lernvoraussetzungen gibt schlussendlich Auskunft über die inhaltliche Strukturierung der Unterrichtsreihe sowie der einzelnen Unterrichtseinheiten.

2.3.1 Lernvoraussetzungen rund um das Thema Bioraffinerie von Holz

Lernvoraussetzungen zu grundlegenden Themen der Chemie, wie beispielsweise Säure-Base-Reaktionen oder dem Prozess der Verbrennung, sind bereits in einschlägiger Fachliteratur zu finden (z.B. Barke, 2006; Garnett et al., 1995; Kind, 2004). Bezogen auf die fachlichen Inhalte der Unterrichtsreihe wurden bei der Entwicklung der Unterrichtsreihe vier Kernbereiche identifiziert, denen in Hinblick auf Lernvoraussetzungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Diese sind: (1) Erdölraffinerie, (2) Photosynthese, (3) Holz und (4) Bioraffinerien. In diesem Unterkapitel werden die Themen in der Reihenfolge beschrieben, in der sie in der Unterrichtsreihe vorkommen. In der tatsächlichen Entwicklung wurde jedoch erst aufgrund der Ergebnisse aus der Erhebung das Thema Erdöl in die Unterrichtsreihe eingebaut und daher fand auch die Literaturrecherche zu Lernvoraussetzungen erst später statt.

(1) Der erste, in der Unterrichtsreihe sehr präsente Bereich, ist die Erdölraffination. Hier werden primär Vorstellungen rund um Energie bedient. Kind (2004) beschreibt dabei die Idee, dass Treibstoffe (sei es Erdöl für Fahrzeuge oder Nahrungsmittel für Menschen) Energiespeicher sind und Energie beinhalten, die durch Reaktionen wieder frei wird. Sie empfiehlt an erster Stelle das Prinzip der Masseerhaltung im Unterricht zu fokussieren und dabei besonders auf konsequent fachlich angemessene Sprache zu achten. Mit Blick auf Zustandsänderungen, wie sie bei der fraktionierten Destillation vorkommen, scheinen

Lernende Schwierigkeiten mit der Vorstellung der Kondensation auf Teilchenebene zu haben. Ein mangelndes Verstehen von Zustandsänderungen auf der Teilchenebene führt dazu, dass Verdampfungsprozesse als Auftrennung von Molekülen in ihre Teilchen verstanden werden und damit einhergehend Kondensationsprozesse ein Zusammenfinden der Teilchen zu ihren ursprünglichen Teilchenverbunden sind (Kind, 2004). Vorschläge für den Umgang mit dieser Art von Vorstellungen sind das Aufzeigen von Zustandsänderungen anhand unterschiedlicher Stoffe, das Aufweisen von Grenzen der Idee, dass Moleküle beim Verdampfen aufbrechen sowie eine vertiefte Auseinandersetzung mit Zustandsänderungen auf der Teilchenebene (Kind, 2004).

Diese Erkenntnisse sind vor allem für die Einheit mit dem Schwerpunkt Erdölraffinerie relevant. Bei der Planung der Einheit sowie der Entwicklung des zugehörigen Materials wurde daher beispielsweise auf Ausdrücke wie die Gewinnung, Entstehung oder der Verbrauch von Energie verzichtet und stattdessen die Umwandlung von Energie thematisiert. Der zweite Aspekt, nämlich Schwierigkeiten zu Zustandsänderungen, wurde besonders bei der Auswahl eines Erklärvideos zur fraktionierten Destillation beachtet. Das Video zeigt die Komponenten von Rohöl bei der Destillation nicht als Teilchenverbund (zum Beispiel als Strukturformel oder Kugelmodell), sondern reduziert Moleküle auf einzelne Kugeln, die nicht aufgetrennt oder zusammengeführt werden können. Dadurch wird deutlich, dass eine Trennung der Stoffe aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften stattfindet und kein Aufbrechen der Stoffe selbst. Problematisch ist an dieser abstrahierten und reduzierten Darstellung jedoch, dass sie bei Lernenden die Idee hervorrufen könnte, dass Moleküle bunte Kugeln unterschiedlicher Größe sind. Ein grundlegendes Wissen über Modelle in der Chemie (Modellverstehen) sowie Fähigkeiten im Umgang damit (Modellkompetenz) sind daher Voraussetzungen für die Einheit.

(2) Das zweite Thema, zu dem Lernvoraussetzungen recherchiert wurden, ist die Photosynthese. Aus chemischer und chemiedidaktischer Sicht ist beim Thema Holz zuallererst die Entstehung durch den biochemischen Prozess interessant. Eine alternative Lernvoraussetzung wird erkennbar, wenn Menschen ein Stück Holz gegeben wird und sie gefragt werden, woher die Masse für das Holz stammt. Lernende antworten auf diese Frage oftmals mit der Erklärung, das Holz stamme aus dem Erdboden (Taber, 2002 zitiert nach Barke, 2006). Weitere Lernvoraussetzungen zur Photosynthese wurden im Rahmen von Abschlussarbeiten erhoben (Burger, 2001). Dabei wurden Vorstellungen identifiziert, dass Pflanzen aus Wasser und Kohlenstoffdioxidgas Energie herstellen oder aus der Lichtenergie Chlorophyll entsteht (Burger, 2001). Solche Vorstellungen lassen sich nach Kind (2004) ebenfalls in den Bereich der Ideen über Thermodynamik einordnen und sind ein Beispiel für Vorstellungen zur Entstehung und zum Verbrauch von Energie. Außerdem scheint es für Lernende eine schwierige Vorstellung zu sein, dass aus zwei unsichtbaren Gasen Feststoffe wie Holz entstehen können (Burger, 2001).

Diese Erkenntnisse begründen an erster Stelle den Einstieg in das Thema Holz über die Photosynthese-Reaktion. Fachlich angemessene Vorstellungen werden dabei Alltagsvorstellungen gegenübergestellt und sollen Lernende zur Reflexion über Photosynthese anregen. Obwohl angenommen wird, dass den Lernenden die Photosynthese aus dem Biologieunterricht bekannt ist, soll der chemische Charakter als Reaktion zur Energieumwandlung mithilfe von drei Darstellungsweisen (Summenformel, Wortgleichung und Kugelmodell) verdeutlicht werden.

(3) Vorstellungen rund um das Thema Holz bilden den dritten Bereich der Literaturanalyse zur Lernvoraussetzungen. Einerseits ist auch hier mit Vorstellungen zu rechnen, die die Masseerhaltung in Frage stellen. Die Verbrennung von Holz kann dann zu alternativen Vorstellungen führen, wenn die Verbrennung nicht als Oxidationsreaktion bekannt ist und angenommen wird, dass der verbrannte Anteil verschwunden ist (Kind, 2004). Bezüglich der Temperatur von Holz scheint außerdem die Vorstellung vorzuherrschen, dass Holz grundsätzlich ein warmer Stoff ist, während beispielsweise Metall oder Glas als kalter Stoff gilt (Schiefer, 2018). Nachdem jedoch in der Unterrichtsreihe verstärkt die stoffliche Nutzung von Holz im Gegenzug zur Verbrennung thematisiert wird, wurden Vorstellungen rund um die Verbrennung von Holz oder zur Temperatur von Holz in der Entwicklung der Unterrichtsreihe nur bedingt berücksichtigt.

(4) Der letzte große Themenbereich betrifft Vorstellungen rund um Bioraffinerien. In der fachdidaktischen Literatur wurden bereits für das Thema relevante, chemiespezifische Lernvoraussetzungen identifiziert (z.B. Burger, 2001 zu Photosynthese; Kind, 2004 zum Energiekonzept; Schiefer, 2018 zu Eigenschaften von Holz), zusätzlich zu diesen Vorstellungen über Holz und Erdölraffinerien spielen jedoch auch über das Unterrichtsfach Chemie hinausgehende, kontextspezifische Vorstellungen rund um Bioraffinerien eine Rolle bei der Entwicklung der Unterrichtsreihe. Dazu gibt es bis dato noch keine Daten, sodass im Rahmen dieser Arbeit eine Erhebung zur Ermittlung von Assoziation zum Begriff Bioraffinerie durchgeführt wurde.

2.3.2 Erhebung von Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie

Ziel der Erhebung war es, Informationen über vorunterrichtliche Vorstellungen von Schüler:innen der Sekundarstufe II und von Passant:innen zu sammeln, um den Ausgangspunkt der Lernenden abzubilden. Die zu beantwortende Forschungsfrage lautet: Welche Assoziationen haben Lernende der Sekundarstufe II zum Begriff Bioraffinerie?

Es wird angenommen, dass wenige fachliche Grundlagen rund um den Begriff Bioraffinerie bekannt sind. Eine weitere Hypothese ist die Assoziation des Begriffs Bioraffinerie mit Aspekten der Nachhaltigkeit, wie beispielsweise ‚Bio‘ und ‚grün‘. Oder, dass ‚Raffinerie‘ mit

„Industrie“ und somit eher negativ assoziiert wird und dadurch ein innerer Widerspruch entsteht.

2.3.3 Beschreibung der Forschungsmethode

Um Vorstellungen zum Begriff Bioraffinerie zu erheben, bedarf es einer Methode zur Externalisierung von Gedankenstrukturen. Um dieses noch wenig erforschte Themenfeld explorativ zu erschließen, eignet sich ein qualitativer, hypothesengenerierender Ansatz (Mayring & Gläser-Zikuda, 2008). In dieser Arbeit wurde dazu eine Mapping-Variante gewählt. Bislang wurden Concept-Mapping-Methoden oftmals als Diagnoseinstrument zur Ermittlung des Wissensstands oder zur Leistungsbeurteilung genutzt (z.B. Schecker & Klieme, 2000). Als Methode zur Erfassung konzeptioneller Lernprozesse müssen Concept-Maps jedoch kritisch betrachtet werden. Dunker (2010) zeigte in ihrer Studie zu Concept-Maps im Sachunterricht, dass eine hohe Anzahl an Nennungen und ein hoher Grad der Vernetzung mit einer hohen Anzahl an fachlich richtigen Nennungen einhergehen. Plotz (2016) hingegen kam in einer Studie zur Validität von Concept-Maps als Messinstrument zu der Erkenntnis, dass ein großes Konzeptverstehen auch zu einer Verkleinerung der Concept-Maps und ein mangelndes Verstehen zu größeren und dichterem Concept-Maps führen kann.

Da es sich bei der Erhebung jedoch keineswegs um eine Leistungsüberprüfung oder Wissenserhebung handelt, wurde als Erhebungsmethode ein Assoziationstest angelehnt an Own-Word-Mapping (Sumfleth & Tiemann, 2000) gewählt. Innerhalb eines thematischen (zentraler Begriff), räumlichen (eine DIN A4-Seite) und zeitlichen (fünf Minuten) Rahmens notieren Proband:innen assoziativ Begriffe zu einem vorgelegten Begriff. Diese Methode eignet sich insofern zur Erhebung von Gedankenstrukturen, als sie niedrigere Anforderungen an Proband:innen stellt als beispielsweise Concept-Mapping-Varianten (Hahn-Laudenberg, 2017), qualitativen Analysen zugänglich ist und durch ihren niedrigen Grad an Strukturierung bessere Möglichkeiten zur Entwicklung und Formulierung von Vorstellungen bietet (Sumfleth & Tiemann, 2000).

Im Vergleich zur ursprünglichen Methode des Own-Word-Mappings nach Sumfleth und Tiemann (2000) wurden bei der Erhebung zwei Adaptationen durchgeführt. Erstens wurde nur ein einzelner zentraler Begriff, nämlich Bioraffinerie, anstelle eines Ausgangs- und eines Endbegriffs vorgegeben. Dies wird dadurch begründet, dass der Begriff Bioraffinerie eben nicht als reiner Prozess verstanden werden kann und angenommen wurde, dass durch die Vorgabe von Ausgangs- oder Endbegriffen ein Problemlöseprozess impliziert wird. Zweitens wurde nur ein Durchgang durchgeführt, in dem Assoziationen notiert wurden, und kein zweiter zur Verknüpfung der Begriffe. Dieser Entscheidung lagen zum einen forschungspragmatische Aspekte zugrunde, zum anderen werden Concept-Maps aufgrund des beschränkten Raumes

schnell unübersichtlich. Außerdem wird angenommen, dass Relationen von den Proband:innen entsprechend gekennzeichnet werden.

Die Erhebung wurde im Zeitraum März 2023 bis April 2023 durchgeführt. Nachdem die Direktionen der beteiligten Schulen ggf. unter Einbezug des Schulgemeinschaftsausschuss die Erhebung genehmigt hatte, wurden Lehrpersonen zur Teilnahme gebeten und Schüler:innen über die Erhebung informiert. Auf Verlangen der Direktionen wurden manchen Lehrpersonen Einverständniserklärungen an Erziehungsberechtigte ausgehändigt. An einzelnen Schulen wurde die Einverständniserklärung elektronisch eingeholt. Da die Erhebung größtenteils an Kooperationsschulen der Universität Wien stattfand, vollkommen anonym war und keine persönlichen Daten abgefragt wurden, wurde eine Einverständniserklärung an manchen Schulen von den Direktionen als nicht notwendig erachtet. Am Tag der Erhebung erhielten nach einer Begrüßung alle teilnehmenden Personen ein DinA4-Blatt im Querformat mit dem zentralen Begriff Bioraffinerie (Abbildung. Anschließend hatten sie fünf Minuten Zeit, um ihre Assoziationen zum zentralen Begriff auf dem Erhebungsbogen zu notieren. Als Antworten wurden Stichwörter, ganze Sätze und Zeichnungen in strukturierter und unstrukturierter Form antizipiert und akzeptiert. Material zur Erhebung liegen in Anhang 7.1 bei, das erhobene Datenmaterial ist nach Kontaktaufnahme mit der Autorin zugänglich.

Im Rahmen einer Masterarbeit in Zusammenhang mit dem Projekt SpottingScience entwickeln wir eine Lerngelegenheit rund um das Thema „Bioraffinerie“. Daher interessiert uns, was dir alles zum Begriff „Bioraffinerie“ einfällt. Deine Teilnahme ist freiwillig und anonym. Dauer: 5 min.

Was fällt dir zum Begriff *Bioraffinerie* ein?
Bitte notiere und/oder zeichne alles, was dir in den nächsten fünf Minuten dazu in den Kopf kommt. Es gibt kein Richtig oder Falsch.
Vielen Dank für deine Mitarbeit!

Bioraffinerie

 universität wien  Bei Fragen kontaktiere uns gerne unter:
Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie (AECC Chemie) <https://aeccc.univie.ac.at>
Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens anja.lembens@univie.ac.at
Alexandra Teplá, BEd BSc alexandra.tepla@univie.ac.at

Abbildung 12: Erhebungsbogen für den Assoziationstest. Quelle: Eigene Darstellung

2.3.4 Beschreibung der Stichprobe

Die Stichprobe umfasste 231 Schüler:innen, die zum Zeitpunkt der Erhebung die elfte (N=167) oder zwölfte (N=64) Schulstufe einer Wiener AHS und BHS besuchten und (wenn erforderlich) eine unterschriebene Einverständniserklärung vorweisen konnten. Abbildung 12 zeigt eine Aufteilung der Schüler:innen nach Schulstufe und Schulart.

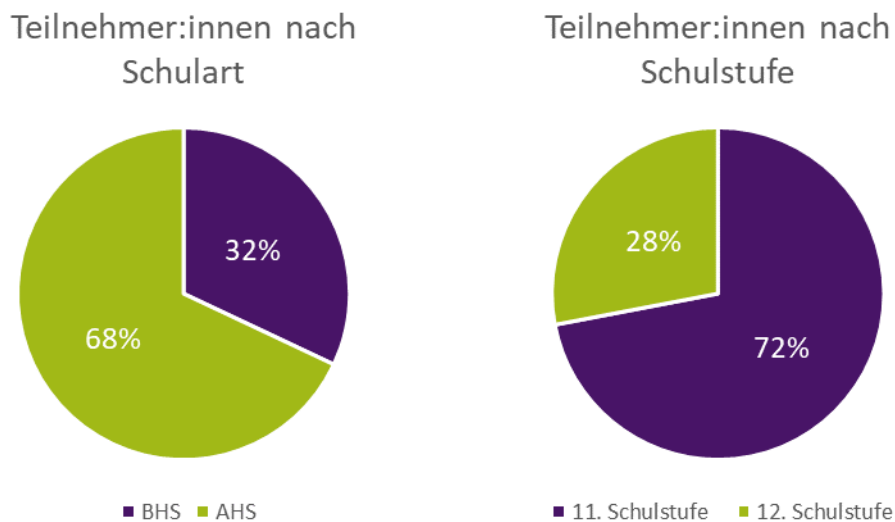


Abbildung 13: Kreisdiagramme mit prozentuellen Anteilen von AHS-/BHS- Schüler:innen und Schüler:innen der 11. und 12. Schulstufe. Quelle: Eigene Darstellung

2.3.5 Beschreibung der Datenauswertung

Die erhobenen Daten wurden anschließend mittels qualitativer strukturierender Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) mit induktiver Kategorienbildung in Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage analysiert. In Abbildung 13 wird das Vorgehen bei der Erhebung schematisch dargestellt.

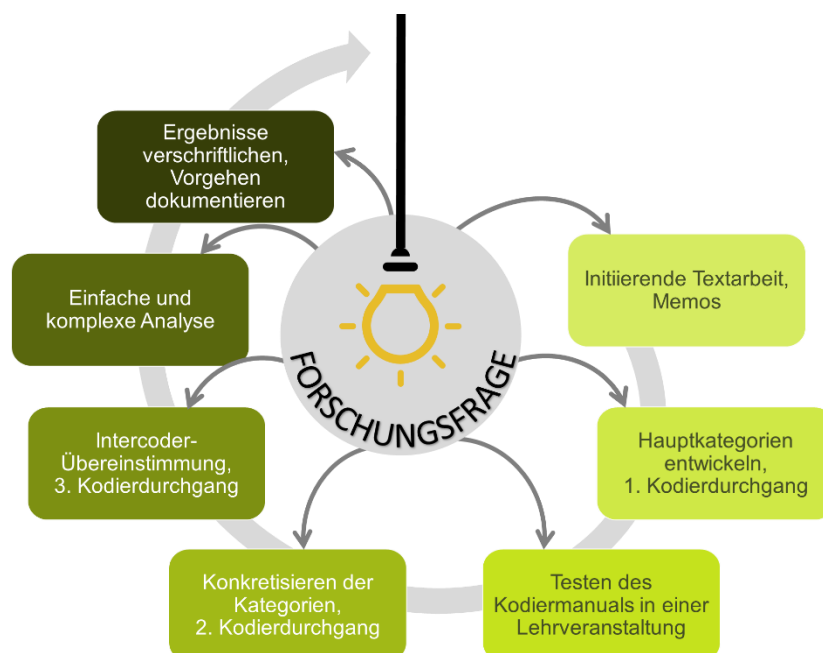


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Datenanalyse. Quelle: In Anlehnung an Mayring und Gläser-Zikuda (2008)

Die Forschungsfrage ist ein zentrales Merkmal in der qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2012; Kuckartz & Rädiker, 2022; Mayring & Gläser-Zikuda, 2008) und lautet: Welche Assoziationen haben Lernende der Sekundarstufe II zum Begriff Bioraffinerie?

Zu Beginn der Auswertung wurde das Textmaterial vor dem Hintergrund der Forschungsfrage intensiv gelesen. Ausgehend von den Erhebungsbögen wurden induktiv (sprich aus dem Material heraus) in einem ersten Kodierprozess thematische Hauptkategorien gebildet. Diese thematischen Kategorien bezeichnen „ein bestimmtes Thema, auch ein bestimmtes Argument, eine bestimmte Denkfigur etc.“ (Kuckartz, 2012. S. 34) und wurden in einem Kodierleitfaden zusammen mit ihrer Beschreibung, Ankerbeispielen und Kodierregeln festgehalten. Nach dem ersten Kodierprozess werden induktiv Subkategorien aus den Hauptkategorien gebildet. Als Zwischenschritt wurde an dieser Stelle das Kategoriensystem im Rahmen einer Lehrveranstaltung von sieben Studierenden sowie drei Lehrveranstaltungsleiter:innen getestet. Dazu bekam jede Person den aktuellen Kodierleitfaden sowie zwei Erhebungsbögen, codierte diese und gab Rückmeldung bezüglich Anwendbarkeit der Kategorien sowie Änderungsvorschläge bzw. Ergänzungen. Basierend auf diesen Rückmeldungen wurde das Kategoriensystem nochmals überarbeitet und das gesamte Material erneut mithilfe des Programms MAXQDA codiert. Mehrfachzuordnungen waren im Kodierprozess möglich. Abbildung 14 zeigt das finale, ausdifferenzierte Kodiersystem:

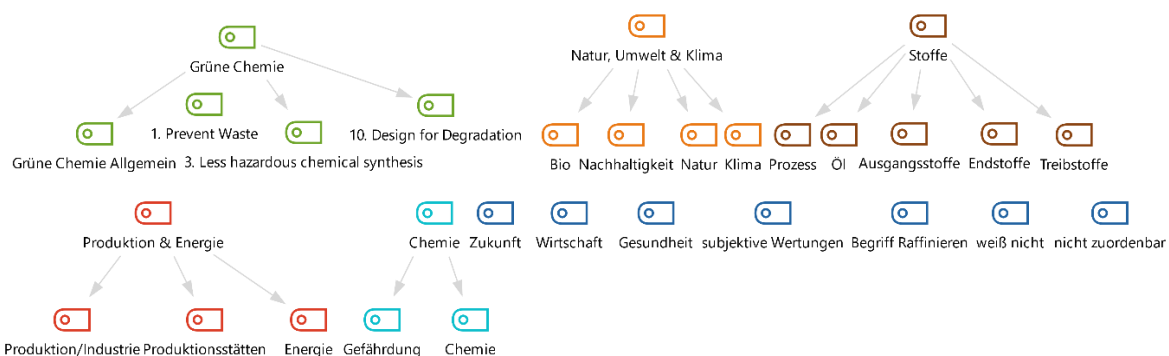


Abbildung 15: Darstellung der entwickelten Haupt- und Subkategorien. Quelle: Eigene Darstellung

Das Kodiersystem besteht aus insgesamt 30 Haupt- und Subkategorien. Die Kategorien *Grüne Chemie*, *Stoffe*, *Produktion & Energie*, *Chemie* sowie *Natur, Umwelt und Klima* sind Oberkategorien und dienen als Überbegriffe für die Subkategorien – sie wurden also im Kodierprozess nicht vergeben. Zum Kodiersystem wurde ein Kodierleitfaden verfasst, in dem jede Kategorie beschrieben und anhand von Ankerbeispielen und Kodierregeln konkretisiert wurde (siehe Anhang 7.6). Die Kategorienbeschreibung soll nun exemplarisch anhand der Subkategorien *Natur* und *Endstoffe* dargestellt werden.

Die Kategorie *Natur* ist eine Subkategorie zur Kategorie *Natur, Umwelt & Klima*. In diese Kategorie fallen Nennungen zu Lebewesen und Gegenständen aus der Natur, die keinen

Prozess beschreiben. Nach den ersten Kodierdurchgängen konnten die Ankerbeispiele ‚Pflanzen‘, ‚naturfreundlich‘, ‚Zeichnung einer Sonne‘ formuliert werden. Um die Kategorie von ähnlichen Kategorien wie beispielsweise *Nachhaltigkeit* abzugrenzen, wurde folgende Kodierregel erstellt: Wenn ein Prozess in der Natur beschrieben wird, der ökologische Aspekte mit sich bringt, dann wird stattdessen die Kategorie *Nachhaltigkeit* zugeordnet.

Die Kategorie *Endstoffe* ist eine Subkategorie zur Kategorie *Stoffe*. Sie beinhaltet Nennungen, die im gegebenen Kontext (Dokument) Vermutungen zu Produkten (Endstoffen) einer Bioraffinerie sein können. Die Verbindung zur Bioraffinerie muss deutlich erkennbar sein. Auch das Nennen von Wörtern wie Produkt, Emissionen und Rauch fällt in diese Kategorie, weil es eine Stoffumwandlung von Rohstoffen zu Endstoffen impliziert. Ankerbeispiele dieser Kategorie sind beispielsweise Umwandlung von Holz zu Lignin, Erzeugung von Endprodukten, Abgase und Entstehung von Futter. Auch hier wurden zur Konkretisierung Kodierregeln aufgestellt. Wenn ein Stoff nur genannt wurde und kein Bezug zu einer Veränderung erkennbar war, dann waren zumeist die Kategorie *Öl* oder *Natur* angemessen. Als Kontexteinheit gilt ein Erhebungsbogen. Wenn bestimmten Endstoffen eine Gefahr zugesprochen wird (z.B. gefährliche chemische Abfälle) kann auch die Kategorie *Gefährdung* zugeordnet werden.

Nachdem alle Erhebungsbögen kodiert waren, wurde der Kodierleitfaden in Hinblick auf mithilfe einer Intercoder-Übereinstimmung getestet. Auf 20% des Materials wurden Segmente a-priori festgelegt, die anschließend von einer weiteren Person mit Codes versehen wurden. Fragen und Probleme wurden mit Memos gekennzeichnet. Bei der zweiten Person handelt es sich um einen Mitarbeiter am AECC Chemie, welcher speziell für diese Aufgabe in computergestützte qualitative Inhaltsanalyse eingeschult wurde. In einem ersten Schritt wurden die Kodierungen der beiden Kodierenden in einem als konsensuelles Kodieren (Kuckartz, 2012) bekannten Verfahren besprochen und verglichen. Uneinigkeiten in der Kategorienzuordnung wurden unter Einbezug des Kodierleitfadens diskutiert und überarbeitet, gegebenenfalls wurden auch Kategorienbeschreibungen angepasst. In einem zweiten Schritt wurde computergestützt eine prozentuelle Übereinstimmung am gleichen Segment von 74% bei insgesamt 25 Kategorien zwischen den Kodierenden berechnet. Anschließend wurde der zufallsbereinigte Koeffizient Kappa nach Brennan und Prediger (1981) mithilfe folgender Formeln berechnet:

$$\rho_e = \frac{1}{\text{Anzahl der Kategorien}} = 0,04$$

2.3.1

$$\kappa = \frac{\rho_0 - \rho_e}{1 - \rho_e} = \frac{0,74 - 0,04}{1 - 0,04} = 0,73$$

2.3.2

Dieser Koeffizient bestimmt die zufällige Übereinstimmung der Codierenden anhand der Kategorienanzahl, anstelle von Randhäufigkeiten (Cohen, 1960). Das ist insofern angemessen, als es bei a-priori vorgegebenen Segmenten keine Segmente geben kann, die von beiden Kodierenden uncodiert bleiben.

Zuletzt wurden die Kodierungen genutzt, um einfache und komplexe Analysen durchzuführen. Pro Schulstufe und Schulart wurden Codewolken mit Codehäufigkeiten sowie Codelandkarten mit Überschneidungen im selben Dokument erstellt. Das Erforschen von Überschneidungen innerhalb eines Dokuments hat den Vorteil, dass Codes innerhalb einer Kontexteinheit Auskünfte über für eine:n Proband:in scheinbar sinnvoll zusammenhängende Assoziationen geben. Auf das Erforschen von Überschneidungen am Segment wurde in diesem Fall verzichtet, weil diese im Grunde die Denkweise der:s Kodierenden überprüfen würden.

Abschließend soll in diesem Unterkapitel noch auf Maßnahmen zur Sicherstellung der Qualitätskriterien qualitativer Forschung eingegangen werden. Diese sind im Vergleich zu Gütekriterien quantitativer Forschungsdesigns kontroverser und weniger konsensfähig (Döring, 2023). Kuckartz (2012) schlägt für die Auswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse eine Unterscheidung in Kriterien interner und externer Studiengüte vor. Die Konstrukte sind angelehnt an die interne und externe Validität aus der quantitativen Forschung, berücksichtigen jedoch aufgrund einer Ausweitung besonders den prozeduralen Charakter qualitativer Forschung. Interne Studiengüte wird in der durchgeführten Erhebung vor allem durch das Offenlegen der Datenerfassung sowie der Durchführung der Analyse erzielt. Erfasste Daten wurden anonymisiert auf den Erhebungsbögen fixiert und die Passung der Erhebungs- und Auswertungsmethode zur Forschungsfrage genau begründet. Auch die Entwicklung des Kategoriensystems wurde transparent anhand konkreter Beispiele für Kategorien in einem Kodierleitfaden festgehalten, sodass die Auditierbarkeit der Kodierungen gegeben ist. Die Daten wurden computergestützt analysiert, sodass die Kategorisierung nachvollziehbar ist. Hinzu kommt, dass das Material von mehreren Kodierenden in drei Zyklen bearbeitet und deren Übereinstimmung berechnet wurde. Externe Studiengüte lässt sich zum einen durch die Möglichkeit der Verallgemeinerung der Ergebnisse aufgrund der relativ umfangreichen und vielfältigen Stichprobe begründen. Zum anderen wurden regelmäßig Diskussionen mit Expert:innen aus dem Bereich Chemiedidaktik geführt (peer debriefing) und Stellungnahmen zur Vorgehensweise und den Ergebnissen eingeholt.

2.3.6 Auswertung der Assoziationen und Darstellung der Ergebnisse

Insgesamt konnten 1766 Assoziationen zum Begriff Bioraffinerie identifiziert werden. Abbildung 15 zeigt das prozentuelle Vorkommen der Kategorien in den Dokumenten an. Es fällt auf, dass Nennungen aus den Kategorien Bio und Prozess mit 69% respektive 65% in knapp zwei Drittel aller Dokumente vorkommen. Auch Nachhaltigkeitsaspekte (53%) finden sich in mehr als der Hälfte aller Dokumente wieder. Eher selten sind Nennungen zu finden, die das Klima (4%), konkrete Ziele der Grünen und nachhaltigen Chemie (2%), oder Gesundheitsaspekte (2%) thematisieren.

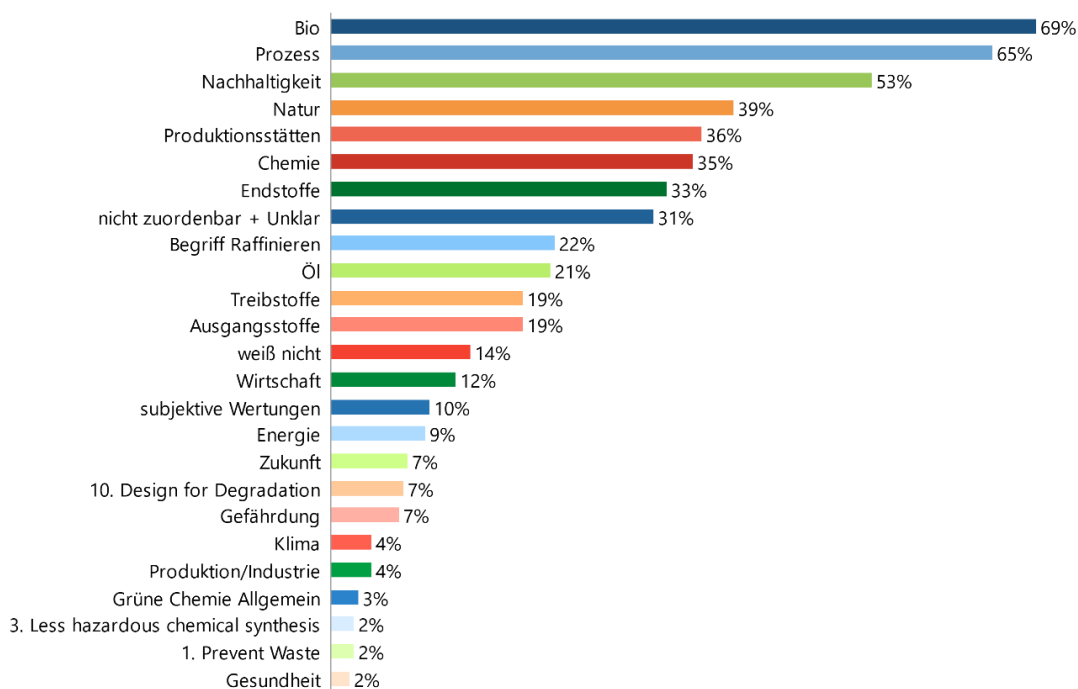


Abbildung 16: Prozentuelles Vorkommen von Nennungen der Kategorien in der Summe der Dokumente.
Quelle: Eigene Darstellung

Betrachtet man Codewolken der 11. und 12. Schulstufe (Abbildung 15), wird deutlich, dass sich die Assoziationen zwischen den Altersstufen nicht stark unterscheiden. Nennungen aus den Kategorien Bio, Prozess und Nachhaltigkeit stehen in beiden Schulstufen im Vordergrund. Klassen von berufsbildenden höheren Schulen weisen zudem eine häufigere Nennung von Assoziationen aus der Kategorie Produktionsstätte auf, welche auf eine Vielzahl an Zeichnungen von Fabriken zurückzuführen ist.



Abbildung 17: Codewolken der 11. Schulstufe (links) und der 12. Schulstufe (rechts). Quelle: Eigene Darstellung

Zuletzt wurden vom Programm erstellte Codelandkarten verglichen, welche das Vorkommen von Codes im gleichen Dokument darstellen. In allen vier Gruppen stehen die Kategorien Bio, Prozess und Nachhaltigkeit in engem Bezug zueinander – Assoziationen aus diesen Kategorien wurden also häufig im selben Dokument genannt. Außerdem fällt auf, dass die Kategorien Bio, Natur und Nachhaltigkeit ebenfalls in engem Zusammenhang zur Kategorie Chemie stehen. Dies ist insofern interessant, als angenommen wird, dass in der nicht-chemischen Gesellschaft eine antagonistische Sichtweise von Chemie und Natur vorherrscht (Kaufmann, 2000). Außerdem fällt auf, dass Nennungen aus den Kategorien Öl und Treibstoffe zwar in fast einem Viertel aller Dokumente vorkamen, Assoziationen in diese Kategorien jedoch weniger vereinbar mit den übrigen Kategorien sind.

Bioraffinerien scheinen daher für Lernenden ein Begriff zu sein, bei dem das Bild der Chemie nicht einseitig negativ behaftet ist, sondern Chemie und Natur als gleichwertig und gleich wertvoll angesehen werden. Abbildung 17 zeigt die Codelandkarte für die gesamte Stichprobe.

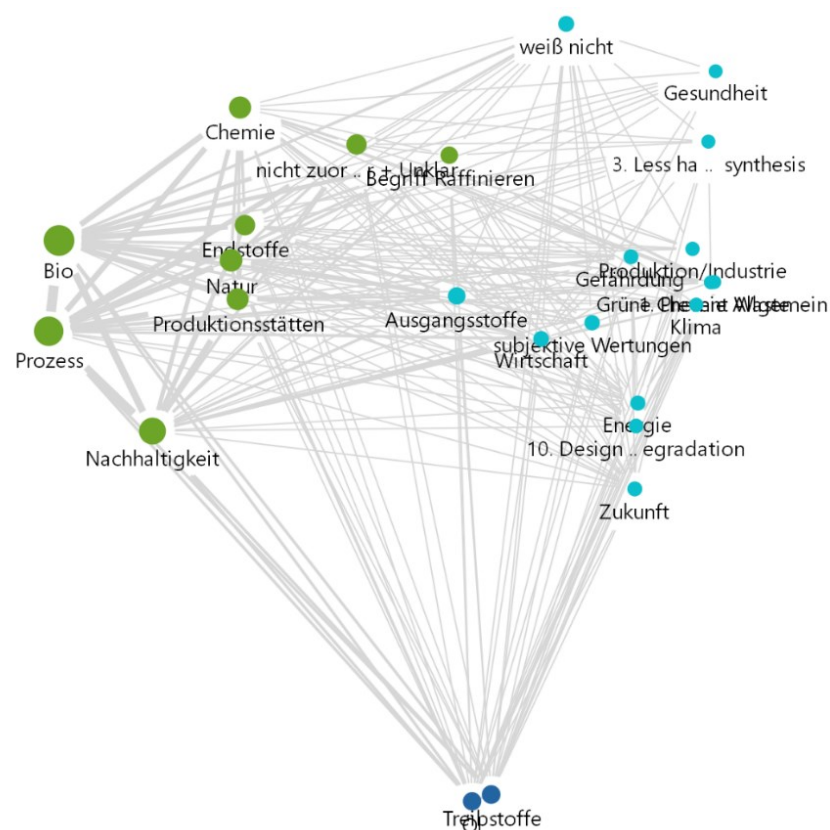


Abbildung 18: Codelandkarte über die gesamte Stichprobe. Quelle: Eigene Darstellung.

Allgemein sind einige Muster in den Ergebnissen zu erkennen. Erstens fällt auf, dass sich weder die prozentuellen Häufigkeiten noch die Codelandkarten bei unterschiedlichen Schularten und Schulstufen unterscheiden. Daraus kann geschlossen werden, dass Lernende unabhängig von der Schulart sowohl im schulischen noch im außerschulischen Bereich mit dem Thema Bioraffinerien wenige Erfahrungen machen. Zweitens kommt aus den Nennungen eine starke Assoziation des Begriff Bioraffinerie mit Erdölraffinerie hervor, wohingegen das

Wort Holz insgesamt nur einmal genannt wurde. Diese Erkenntnis führte dazu, dass in der Entwicklung der Unterrichtsreihe Erdölraffinerien als Anknüpfungspunkt gewählt wurden, um anschließend Bioraffinerien einzuführen und zu kontrastieren. Drittens konnten einige Muster in der Haltung zu Bioraffinerien identifiziert werden. Während auf manchen Erhebungsbögen vorwiegend positiv behaftet Assoziationen notiert wurden, finden sich auf anderen vorwiegend negativ behaftet Nennungen. Auch die eingangs erwähnte Hypothese, dass der Begriff Bioraffinerie zu einem inneren Widerspruch führt, lässt sich in den Erhebungsbögen finden. Abbildung 18 zeigt einen Erhebungsbogen, aus dem eine mögliche Unvereinbarkeit der Konstrukte Bio und Raffinerie herauszulesen ist:

Aus der Erhebung der Assoziationen konnten schließlich Anknüpfungspunkte sowie



Abbildung 19: Ausschnitt aus einem Erhebungsbogen, auf dem ein innerer Widerspruch der Konstrukte Bio und Raffinerie erkennbar ist. Quelle: Eigene Darstellung

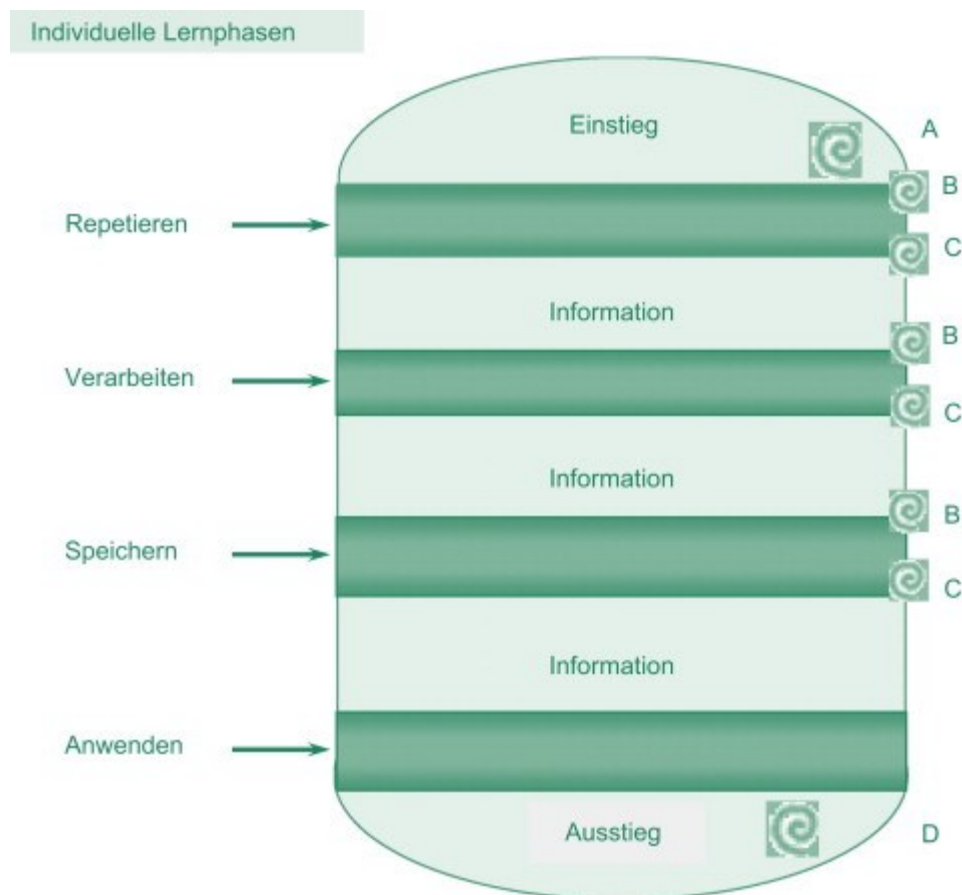
nennenswerte Themen für die Unterrichtseinheit identifiziert werden. Diese wurden in der didaktischen Strukturierung der Unterrichtsreihe berücksichtigt.

2.4 Didaktische Strukturierung

Die didaktische Strukturierung steht nach Duit et al. (2012) in einem engen Verhältnis zur fachlichen Klärung und zu Lernvoraussetzungen. In diesem Kapitel werden die für die Unterrichtsreihe relevanten Planungsmodelle vorgestellt und ihre Auswahl begründet.

Das Sandwich-Prinzip wurde im Jahr 2013 von Wahl geprägt. Es beschreibt ein Modell der Unterrichtsstrukturierung, das individuelle und kollektive Lernphasen kombiniert. Wahl beschreibt das Sandwich-Prinzip als

In einer Unterrichtseinheit nach dem Sandwich-Prinzip wechseln sich also Phasen der kollektiven Vermittlung und der subjektiven Auseinandersetzung ab (Abbildung 19).



Die Übergangsstellen zwischen den einzelnen Phasen werden Gelenkstellen genannt (Wahl, 2013). Ein Aspekt, der bei Gelenkstellen berücksichtigt werden muss, ist der Übergang zwischen Sozialformen. Während kollektive Vermittlungsphasen primär im Plenum und lehrpersonenzentriert stattfinden, gibt es bei individuellen Aneignungsphasen eine Vielzahl an Methoden, die einzeln, in Paaren oder in verschiedenen großen Kleingruppen genutzt werden können (Wahl, 2013). In den entwickelten Unterrichtsreihen wurden primär Kleingruppen-Sozialformen wie die Think-Pair-Share-Methode gewählt, vereinzelt finden auch Präsentationen im Plenum oder die Methode ‚Blitzlicht‘ statt. Das Einbauen von Gelenkstellen

bei der Unterrichtsstrukturierung ermöglicht Überlegungen zu Sozialformwechseln wie Gruppeneinteilungen oder die Synchronisierung unterschiedlicher Gruppen zum gemeinsamen Weiterarbeiten. Es geht dabei aber nicht nur um organisatorische Aspekte, sondern auch um das Formulieren von Arbeitsanweisungen für die individuelle Phase und das Mitteilen von Erkenntnissen aus ebendieser vor einer kollektiven Phase (Wahl, 2013). Diese Gelenkstellen können, abhängig von den vorangegangenen und nachfolgenden Phasen, Sozialformen, Inhalten und Aufgaben unterschiedlich lang sein. Besondere Aufmerksamkeit verdienen die erste und letzte Gelenkstelle des Sandwiches.

Die erste Gelenkstelle ist ein Teil des Einstiegs und kann beispielsweise das Begrüßen der Lernenden, ein Stunderitual oder das Vorstellen des Stundenthemas und der Unterrichtsziele sein (Wahl, 2013). Eine Möglichkeit, um Lernenden einen einfachen Einstieg zu ermöglichen, ist die Nutzung eines Advance Organizer, welcher von David Ausubel in den 60er Jahren im Zuge der Theorie des bedeutungsvollen Lernens (Ausubel, 1963) eingeführt wurde. Advance Organizer sind Organisationshilfen, die Lernende schon zu Beginn der Einheit erhalten und die bereits eine umfassende, aber abstrahierte Strukturierung der Lerninhalte beinhalten (Wahl, 2013). Diese Vorstrukturierung soll Lernende dabei unterstützen, ihre Vorkenntnisse mit neuen Inhalten besser zu verknüpfen und dadurch ein umfangreicheres Verstehen der Inhalte zu ermöglichen (Wahl, 2013). Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde daher ein Advance Organizer für die letzte Unterrichtseinheit erstellt, in der die Schüler:innen in Form eines Bürger:innenforums unterschiedliche Herstellungsverfahren von Essigsäure aus verschiedenen Perspektiven betrachten und diskutieren sollen. Die letzte Gelenkstelle bildet den Abschluss des Sandwiches. Dabei können Ergebnisse zusammengefasst, Hausaufgaben erteilt oder Verabschiedungen ausgesprochen werden (Wahl, 2013).

Für die Phasen subjektiver Aneignung wurden vorwiegend Arbeitsblätter erstellt, die selbstständig von Lernenden bearbeitet werden können. Alle dazu benötigten Informationen wurden im Zuge des Projekt SpottingScience erstellt und über die Projekthomepage verfügbar gemacht.

2.4.2 SpottingScience

SpottingScience ist ein Kooperationsprojekt des Österreichischen Kompetenzzentrums für Didaktik der Chemie an der Universität Wien mit dem Fachdidaktikzentrum der Universität Graz. Das Projekt zielt darauf ab, naturwissenschaftliche Alltagsphänomene fachlich korrekt und adressatengerecht für Lai:innen darzustellen (Lembens et al., 2022). Die ursprüngliche Idee, chemische Phänomene in der Natur zu bearbeiten, stammt von Borrows (1984). Im Rahmen der sogenannten Pimlico-Trails entwickelte er Stationen rund um eine Schule, bei denen auf Schautafeln Phänomene wie Luftverschmutzung, Tropfsteinbildung und das Rosten von Metall erklärt wurden. Auf den Pimlico-Trails basierte das von Spitzer (2014) entwickelte

Vorgänger-Projekt zu SpottingScience namens Chem-Tracking. Auch dabei konnten Stationen mithilfe von GPS-Koordinaten besucht werden, jedoch waren die Informationen nicht mehr auf Schautafeln angeschrieben, sondern konnten mithilfe von Quick-Response-Codes (QR-Codes) abgerufen werden. Als Kontext für Chem-Tracking wurde das Thema Wald gewählt und unter anderem eine Station zum Thema Baumrinde erstellt – die Stationen sind jedoch nicht mehr zugänglich. Aus dem Chem-Tracking-Projekt entstand schlussendlich das aktuelle SpottingScience-Projekt, bei dem Informationen ebenfalls durch QR-Codes zugänglich sind (Lembens et al., 2022), jedoch kein vorgegebener Weg mehr durch GPS-Koordinaten abgegangen werden kann, sondern ScienceSpots unabhängig voneinander an ihren Standorten besucht werden können.

Mit den ScienceSpots werden mehrere Ziele verfolgt: Ein Schwerpunkt ist die Aufbereitung naturwissenschaftlicher Inhalte für Passant:innen, Lehrpersonen und Schüler:innen (Lembens et al., 2022). Die Kommunikation wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden an eine nicht-wissenschaftliche Zielgruppe wird Wissenschaftskommunikation genannt und grenzt sich von einer unidimensionalen Vermittlung von Faktenwissen ab (Davies & Horst, 2016). SpottingScience ist dabei auf der Mikroebene der Wissenschaftskommunikation angesiedelt (Davies & Horst, 2016) und strebt eine Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung sowie die Anbahnung von Urteils- und Handlungskompetenz an.

Der zweite Schwerpunkt liegt auf der Lehrer:innenbildung. ScienceSpots werden im Rahmen von Seminaren, Bachelor- oder Masterarbeiten entwickelt und in Unterrichtssituationen eingebettet (Lembens et al., 2022). Die Vorteile dadurch sind immens – neben dem Erwerb von Fachwissen lernen Studierende beispielsweise bei der Materialentwicklung die Zielgruppe und deren Vorwissen zu beachten, digitale Medien für ihren Unterricht zu nutzen und graphische Darstellungen vor einem fachdidaktischen Hintergrund auszuwählen, zu diskutieren und zu erstellen (Lembens et al., 2022). In Wien sind aktuell fünf ScienceSpots am Campus der Universität Wien aufgestellt, die von Zeit zu Zeit mit neuen Inhalten befüllt werden, aber auch in Graz gibt es ScienceSpots. Der Schwerpunkt der ScienceSpots in Wien liegt aktuell auf Themen rund um Grüne und nachhaltige Chemie, dazu wurden bereits ScienceSpots zu Grüner Chemie und Menthol (Teplá, 2021) sowie zu biogenen Kunststoffen (Heinzle & Eckhart, 2022) von Studierenden entwickelt.

Das Projekt SpottingScience wurde im Rahmen dieser Masterarbeit einerseits als Sammelmedium für die entwickelten Inhalte gewählt und andererseits in Bezug auf das Modell der didaktischen Rekonstruktion zur didaktischen Strukturierung von drei Unterrichtseinheiten herangezogen. Dies hat mehrere Gründe:

- Der Themenbereich Holz reiht sich inhaltlich an die zuvor entwickelten Stationen rund um Grüne und nachhaltige Chemie ein. Holz ist ein Stoff, mit dem ein Großteil der Menschheit bereits Erfahrungen hat.
- Anhand der Bioraffinerie von Holz lassen sich Forschungsbestreben hin zu einer nachhaltigeren Gesellschaft begründen und darstellen, sodass sich das Thema für Wissenschaftskommunikation und damit für das Projekt SpottingScience eignet.
- Der Aufbau der ScienceSpots ermöglicht eine individuelle Vertiefung je nach Interesse und Kompetenz der Nutzer:innen, weshalb sich ScienceSpots sowohl für die Allgemeinheit als auch für die schulische Nutzung eignen.
- Das Österreichische Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF) verfolgt seit dem Jahr 2020 die zentrale Reform der Digitalen Schule (BMBWF, 2020). Damit wird neben der Einführung einer digitalen Infrastruktur in Schulen auch das Ziel verfolgt, digitale Kompetenzen durch das Lernen über und mit digitalen Medien zu fördern. Der Einbezug des Projekts SpottingScience in die Unterrichtsreihe kann solche Maßnahmen zur Digitalisierung mit chemischen Inhalten und didaktischen Ansätzen verknüpfen.

3 Beschreibung der Lerngelegenheit zum Thema Bioraffinerie

Basierend auf der fachlichen Klärung sowie der Erhebung der Assoziationen zum Begriff der Bioraffinerie in Kapitel 2 wurde eine Unterrichtsreihe zur Grünen und nachhaltigen Chemie am Beispiel der Bioraffinerie von Holz geplant. Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Voraussetzungen erläutert sowie die Einheiten beschrieben und in den Lehrplan eingebettet.

3.1 Lehrplanbezug, Zielgruppe und notwendige Voraussetzungen der Lernenden

In Bezug auf den aktuellen Lehrplan (BMBWF, 2023) werden mit den Unterrichtseinheiten besonders Aspekte aus den Bildungsbereichen Natur und Technik sowie Mensch und Gesellschaft bedient. Schüler:innen sollen im Verlauf der Unterrichtsreihe Kenntnisse und Kompetenzen erwerben, dank derer sie „Verantwortung für den nachhaltigen Umgang mit materiellen und energetischen Ressourcen über Grenzen hinweg“ (BMBWF, 2023, Bildungs- und Lehraufgabe Chemie 7. und 8. Klasse) übernehmen können. Außerdem soll besonders anhand der Komponenten von Holz ein „Verständnis für die Beziehung von Struktur und Eigenschaften von Stoffen“ (BMBWF, 2023, Bildungs- und Lehraufgabe Chemie 7. und 8. Klasse) sowie die Bedeutung für ihre Anwendung ermöglicht werden.

Die Unterrichtseinheiten sollen im Allgemeinen zur Förderung grundlegender Kenntnisse über den Rohstoff Holz sowie zur Entwicklung von Urteilsfähigkeit und Handlungskompetenz bei naturwissenschaftlichen Fragestellungen beitragen. Bei der Entwicklung der Unterrichtsreihe wurden zudem besonders die allgemeindidaktischen Grundsätze „Stärken von Selbsttätigkeit und Eigenverantwortung“ sowie „Herstellung von Bezügen zur Lebenswelt“ (BMBWF, 2023, Didaktische Grundsätze Chemie 7. und 8. Klasse) beachtet. Chemiedidaktische Grundsätze, die in der Unterrichtsreihe zum Tragen kommen, sind „Mit instruktionaler Unterstützung lernen“, „Situier und anhand authentischer Probleme lernen“ sowie „In einem sozialen Umfeld lernen“ (BMBWF, 2023, Didaktische Grundsätze Chemie 7. und 8. Klasse).

Die entstandenen Unterrichtseinheiten wurden primär für den Chemieunterricht der zwölften Schulstufe an Allgemeinbildenden höheren Schulen entwickelt, eignen sich jedoch auch für andere Schultypen, wenn die Schüler:innen folgende fachliche Voraussetzungen erfüllen:

Lernende ...

- ✓ kennen die kovalente Bindung und wissen, dass zwischen zwei Kohlenstoff-Atomen Einfach-, Doppel- und Dreifachbindungen vorkommen können.
- ✓ können Strukturformeln, Halbstrukturformeln und Skelettformeln verschiedener Moleküle zeichnen und diese ineinander umwandeln.
- ✓ können Aggregatzustände und deren Übergänge auf der Teilchenebene beschreiben und fachlich korrekt benennen.

- ✓ wissen, dass die Eigenschaften eines Stoffes von seiner molekularen Struktur abhängen (Stoff-Eigenschaftskonzept).
- ✓ besitzen grundlegendes Wissen über die Funktion und Nutzung von Modellen in der Chemie sowie Fähigkeiten im Umgang damit (Modellkompetenz).
- ✓ kennen die Photosynthese als energieliefernden Prozess für Pflanzen und können die daran beteiligten Stoffe nennen.
- ✓ kennen die Sesselkonformation als Darstellungsform von Cyclohexanen.
- ✓ kennen Redoxreaktionen als Elektronenübertragungsreaktion und können Oxidationszahlen in einfachen Molekülen bestimmen.

3.2 Fokussierte Prinzipien der Grünen Chemie

In der Unterrichtsreihe werden an mehreren Stellen Aspekte der Grünen und nachhaltigen Chemie bearbeitet. In der ersten Einheit werden alle Prinzipien grob vorgestellt und der Übersicht halber zu fünf Zielen zusammengefasst. In den weiteren Einheiten spielen besonders die Prinzipien 1 (Vermeidung von Abfällen) und 7 (Einsatz erneuerbarer Rohstoffe) eine wichtige Rolle.

Die Wahl der Prinzipien lässt sich mit dem LC-Bioraffinerien zugrundeliegenden Konzept begründen, bei denen alle Komponenten des Rohstoffs Holz (Cellulose, Hemicellulosen und Lignine) verwendet werden. Der nachwachsende Rohstoff Holz kann dabei eine Alternative zur Herstellung erdölbasierter Produkte bieten und durch die Verarbeitung aller Rohstoffkomponenten fallen im Vergleich zu beispielsweise Cellulosefabriken weniger Abfallstoffe an.

3.3 Beschreibung der Unterrichtseinheiten

Basierend auf der Erhebung der Lernvoraussetzungen und der fachlichen Klärung sind im Rahmen der Masterarbeit sechs Unterrichtseinheiten für Lehrpersonen und Schüler:innen der zwölften Schulstufe entstanden. Die Unterrichtseinheiten wurden nach dem Sandwich-Prinzip (Wahl, 2013) gestaltet. In diesem Kapitel werden die Unterrichtseinheiten beschrieben und in das österreichische Kompetenzmodell (Lehrplan der Allgemeinbildenden Höheren Schulen - Anlage A, 2016) eingebettet. Die Abkürzungen WO, KO und EO stehen dabei für die Handlungsdimensionen Wissen organisieren Oberstufe (WO), Erkenntnisse gewinnen Oberstufe (EO) und Konsequenzen ziehen Oberstufe (KO). Genaue Unterrichtspläne sowie erstelltes Material zu den einzelnen Einheiten sind als Anhang 7.2, 7.3 und 7.4 beigelegt.

3.3.1 Einheit 1: Grüne und nachhaltige Chemie

Inhaltsdimension(en)	Umgang mit Materie: Den Umgang mit materiellen und energetischen Ressourcen bewerten und dabei regionale und europäische Besonderheiten berücksichtigen.
Handlungsdimension(en)	EO 7 die Relevanz von Untersuchungsergebnissen im Hinblick auf eine konkrete Frage, Vermutung oder Problemstellung einschätzen. WO 1 Unterschiedliche, relevante Quellen ausfindig machen und daraus fachspezifische Informationen entnehmen KO 6 Bedeutung, Chancen und Risiken der Anwendungen von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen für mich persönlich und für die Gesellschaft einschätzen
Anforderungsniveau	Niveau II: Schüler:innen werden angeleitet durch die Aufgaben geführt

Die erste Unterrichtseinheit dient der Einführung in die Grüne und nachhaltige Chemie als Grundlage für die darauffolgenden Einheiten. Als Einstieg wurde ein Video der Plattform Grüne Chemie (<https://www.youtube.com/watch?v=28BKssnPXSg>) gewählt, welches die Notwendigkeit einer grüneren und nachhaltigeren Chemie aufzeigt und Beispiele für Grüne und nachhaltige Chemie in Österreich zeigt. Im Anschluss an das Video findet ein Reflexionszyklus nach der Think-Pair-Share Methode statt, in dem bekannte, neue, überraschende und irritierende Aspekte besprochen werden sollen. Nach diesem Einstieg erfolgt über die Prinzipien der Grünen Chemie der Übergang in eine Kleingruppenphase. Innerhalb der Kleingruppen sollen die zwölf Prinzipien zu fünf übergreifenden Zielen zugeordnet werden. Informationen zu den Prinzipien der Grünen Chemie sind mithilfe eines QR-Codes auf dem Arbeitsblatt auf der Projektwebseite von SpottingScience zu finden. Nachdem sich die Schüler:innen in Kleingruppen mit den Prinzipien beschäftigt haben und eine Zuordnung getroffen haben, werden die Zuordnungen im Plenum besprochen und mögliche Unterschiede zwischen den Gruppen diskutiert. Dabei soll erkenntlich werden, dass die Prinzipien oftmals nicht nur einem Ziel zuordenbar sind, sondern teilweise zu mehreren Zielen passen und auch ineinandergreifen. Abschließend soll die Relevanz der Grünen und nachhaltigen Chemie vor dem Hintergrund aktueller Herausforderungen (Klimakrise, Umgang mit Ressourcen) reflektiert werden. Am Ende der Einheit sollten die Schüler:innen den Begriff Grüne Chemie erklären können, zwölf Prinzipien der Grünen Chemie kennen, sowie zur Relevanz der Grünen und nachhaltigen Chemie anhand der übergreifenden Ziele Stellung nehmen können.

3.3.2 Einheit 2: Fossile Rohstoffe

Inhaltsdimension(en)	Struktur und Reaktion: Zusammenhänge von Strukturen und Eigenschaften am Beispiel von Kohlenstoffverbindungen inklusive funktioneller Gruppen beschreiben. Substanz und Energie: Herstellung und Verwendung wichtiger organisch-chemischer Grundprodukte darstellen; Gewinnung, Verwendung und Wiederverwertung von makromolekularen Stoffen darstellen
Handlungsdimension(en)	EO 7 die Relevanz von Untersuchungsergebnissen im Hinblick auf eine konkrete Frage, Vermutung oder Problemstellung einschätzen. WO 1 Unterschiedliche, relevante Quellen ausfindig machen und daraus fachspezifische Informationen entnehmen. WO 5 die Bedeutung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für die Entwicklung von Zivilisation und Kultur darstellen, erläutern und diskutieren
Anforderungsniveau	Niveau II Schüler:innen bearbeiten die Aufgaben(n) selbstständig

In der zweiten Einheit dreht sich alles um das Thema Erdöl. Es handelt sich hierbei um eine Selbstlernaufgabe, die die Schüler:innen einzeln oder in Paaren, angeleitet durch das Arbeitsblatt 'Der Rohstoff Erdöl' bearbeiten sollen. Das Thema Erdöl wird dabei chronologisch von der Entstehung über die fraktionierte Destillation bis hin zu Erdölprodukten aufgearbeitet. Als Ausgangspunkt dient die Frage, wieso Erdöl oftmals „schwarzes Gold“ genannt wird. Die erste Aufgabe soll die Entstehung von Erdöl darstellen. Um Erdöl als Stoffgemisch hervorzuheben, wurde in der zweiten Aufgabe ein Augenmerk auf die Komponenten von Erdöl gelegt und dazu eine Aufgabe zu Formelschreibweisen von Erdölkomponenten eingebaut. Als Beispiele wurden bewusst sowohl Kohlenwasserstoffe mit ausschließlich Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen gewählt als auch Kohlenwasserstoffderivate mit sauerstoffhaltigen funktionellen Gruppen. Als Datenquelle für die fraktionierte Destillation wurde ein Ausschnitt aus dem Film „Multitalent Erdöl“ (Brenner, 2023) gewählt, zu dem anschließend Aufgaben bearbeitet werden sollen. Aus den zugehörigen Aufgaben soll hervorgehen, dass die Komponenten des Erdöls aufgrund unterschiedlicher Kettenlänge auch unterschiedliche Siedebereiche haben und demnach mittels physikalischer Trennverfahren aufgetrennt werden können. Diese Aufgabe bedient das Basiskonzept Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, indem die physikalischen Eigenschaften der Stoffe (in diesem Fall Siedebereich) auf ihre Struktur (in diesem Fall Kettenlänge) zurückgeführt werden. Die darauffolgende Aufgabe soll anschließend einen Reflexionsanstoß zum Umgang mit erdölbasierten Kunststoffen liefern. Aus einer Auswahl an Internetquellen (unter anderem ein ScienceSpot zu biogenen Kunststoffen) sollen die Schüler:innen Informationen dazu entnehmen, wie erdölbasierte

Produkte in ihrer Herstellung, Verwendung und Entsorgung zu den Herausforderungen unserer Gesellschaft beitragen. Abschließend sollen die Schüler:innen die Anfangsfrage zum schwarzen Gold basierend auf das neu konstruierte Wissen reflektieren und eine begründete Vermutung zur Namensgebung aufstellen. Dabei werden Argumente erwartet, die die eingeschränkte und endliche Verfügbarkeit des Rohstoffs Erdöl (analog zum Seltenheitsfaktor von Gold) sowie wirtschaftliche Aspekte thematisieren. Am Ende der Einheit sollen die Schüler:innen die Entstehung von Erdöl und die fraktionierte Destillation sowie deren zugrundeliegenden Mechanismen erklären können. Sie sollen Kohlenwasserstoffe in verschiedenen Schreibweisen darstellen können und Stoffe anhand ihres Siedepunktes zu Fraktionen zuteilen können. Zudem sollen sie die Bedeutung von Erdöl(-produkten) für unsere Gesellschaft und die damit einhergehenden Umweltproblematiken erläutern können.

3.3.3 Einheit 3: Stoffklassen und funktionelle Gruppen

Inhaltsdimension(en)	Struktur und Reaktion: Zusammenhänge von Strukturen und Eigenschaften am Beispiel von Kohlenstoffverbindungen inklusive funktioneller Gruppen beschreiben.
Handlungsdimension(en)	WO 2 Daten sowie Vorgänge und Phänomene in Natur, Umwelt und Technik in verschiedenen Formen (Text, Grafik, Tabelle, Bild, Diagramm, Modell, ...) adressatengerecht darstellen, erläutern und diskutieren. EO 4 naturwissenschaftliche Modelle verwenden, um Daten und Ergebnisse von Untersuchungen sowie Vorgänge und Zusammenhänge zu erklären
Anforderungsniveau	Niveau I: Schüler:innen werden angeleitet durch die Aufgaben geführt.

Um in den folgenden Stunden auf den Rohstoff Holz sowie Prozesse in Bioraffinerien eingehen zu können, ist ein Grundwissen über sauerstoffhaltige funktionelle Gruppen notwendig. In der dritten Einheit liegt daher der Fokus rein auf der Einführung von Stoffklassen und funktionellen Gruppen. Die Aktivierung erfolgt mittels der Blitzlicht-Methode, indem in beliebiger Reihenfolge jede:r Schüler:in einen Satz sagt, der aus der letzten Einheit in Erinnerung geblieben ist. Als Gelenkstelle zu den funktionellen Gruppen soll eine einzelne Folie dienen, auf der nochmals aus Erdöl gewonnene Stoffe dargestellt sind. Dabei wird deutlich, dass es sich größtenteils um Kohlenwasserstoffe aus ausschließlich Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen handelt. In der chemischen Industrie werden jedoch auch Stoffe verwendet und hergestellt, die aus anderen Atomen bestehen. Um diese besser einteilen zu können, wird der Begriff der Stoffklassen eingeführt. Dabei soll deutlich werden, dass Stoffe aufgrund ihrer strukturellen Merkmale, den funktionellen Gruppen, unterschiedliche Eigenschaften haben. Nach dieser Phase kollektiver Vermittlung werden die Schüler:innen in Kleingruppen eingeteilt und sollen mithilfe ihres Chemiebuches ein Merkheft zu funktionellen Gruppen ausfüllen. Jede Kleingruppe beschäftigt

sich dabei mit einer funktionellen Gruppe, recherchiert ihre Struktur, die Benennung und ein Beispiel. Anschließend werden die Gruppen so gemischt, dass in den neu entstanden Gruppen jeweils ein:e Schüler:in pro funktioneller Gruppe ist. Innerhalb der neuen Gruppen werden anschließend die Informationen zu den zugeteilten funktionellen Gruppen ausgetauscht und im Merkheft ergänzt. Zum Abschluss und zur Festigung dient eine abgewandelte Version des TV-Klassikers „1, 2 oder 3“. Dabei sollen die Schüler:innen Beispiele aus der Erdölraffinerie und Bioraffinerie ihren passenden Stoffklassen zuordnen. Das Spiel kann dabei entweder analog oder digital (beispielsweise mithilfe der Website kahoot.com) durchgeführt werden. Am Ende der Einheit sollen die Schüler:innen ausgewählte Stoffklassen mit ihren funktionellen Gruppen benennen, beschreiben und zeichnen können sowie Beispiele angeben. Sie sollen außerdem großtechnisch relevante Chemikalien nach Stoffklassen ordnen können.

3.3.4 Einheit 4: Der Rohstoff Holz

Inhaltsdimension(en)	Struktur und Reaktion: Zusammenhänge von Strukturen und Eigenschaften am Beispiel von Kohlenstoffverbindungen inklusive funktioneller Gruppen beschreiben. Substanz und Energie: Ausgewählte Stoffwechselprozesse skizzieren.
Handlungsdimension(en)	EO 5 zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen, Vermutungen aufstellen und Problemstellungen definieren, die mit Hilfe naturwissenschaftlicher Kenntnisse und Untersuchungen bearbeitet bzw. überprüft werden können. WO 1 Unterschiedliche, relevante Quellen ausfindig machen und daraus fachspezifische Informationen entnehmen. WO 4 Wissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten aus anderen Disziplinen heranziehen, um naturwissenschaftliches Wissen zu organisieren.
Anforderungsniveau	Niveau II Schüler:innen bearbeiten die Aufgaben(n) größtenteils selbstständig

In Einheit vier wird zum ersten Mal in der Unterrichtsreihe der Schwerpunkt auf Holz als nachwachsenden Rohstoff gelenkt. Die Einheit beginnt mit einer Problematisierung der Erdölförderung und -verarbeitung sowie von Erdölprodukten anhand einer Bildersammlung. Die Schüler:innen sollen dabei zuerst erkennbare negative Aspekte benennen und anschließend Lösungsvorschläge oder Alternativen mit Blick auf Grüne und nachhaltige Chemie formulieren. Es wird angenommen, dass im Rahmen des Unterrichtsgesprächs das Thema der nachwachsenden Rohstoffe aufkommt. Es folgt eine kurze, lehrpersonenzentrierter Phase, in der nachwachsende Rohstoffe definiert und Beispiele gesammelt werden. In der

darauffolgenden Gelenksstelle erfolgt der Übergang zu individuellen Lernphasen, in denen analog zu Einheit drei eine Selbstlerneinheit zum Thema Holzchemie einzeln oder in Kleingruppen bearbeitet werden soll. Die Selbstlerneinheit wird über ein Arbeitsblatt strukturiert und beginnt mit einer Wiederholung der Photosynthese-Reaktion mithilfe eines Concept-Cartoons. Dieser soll die Schüler:innen dabei unterstützen, ihr Vorwissen zum Thema zu aktivieren sowie eigene Vorstellungen dazu zu konzeptualisieren (Feige & Lembens, 2020).

Für die folgenden Aufgaben wurde Material in Form eines ScienceSpots erstellt, auf den die Schüler:innen mit einem internetfähigen Endgerät zugreifen sollen. Aufgabe 1 behandelt die Komponenten von Holz und soll für die Schüler:innen eine Eingewöhnung für den Arbeitsmodus bieten. In den weiteren Aufgaben werden die einzelnen Komponenten detaillierter und jeweils in Verbindung mit fachchemischen Inhalten erarbeitet. Anhand der Reaktion von Glucose-Molekülen zu Cellulose-Molekülen wird beispielsweise die Kondensationsreaktion als Grundmuster eingeführt. Im Rahmen der Aufgabe zu Hemicellulosen wird das Identifizieren verschiedener Zucker-Monomere in einer Hemicellulose-Struktur geübt. Die vernetzte Struktur der Lignine eignet sich dazu, das Wissen über funktionellen Gruppen (siehe Einheit 3) zu festigen. Die Aufgaben zum Holzaufschluss hat das Ziel, die Identifikation einzelner Reaktionsschritte in Reaktionsgleichungen zu erkennen und auszuformulieren und damit das Lesen von Reaktionsgleichungen als grundlegende chemische Fähigkeit zu fördern. Anschließend sollen Produkte der Bioraffinerie von Holz ihren jeweiligen Komponenten zugeordnet werden, um die Vielfaltigkeit des Rohstoffes Holz zu verdeutlichen. Zusätzlich wird für schnelle und/oder besonders interessierte Schüler:innen eine Aufgabe zum chemischen Rechnen angeboten, bei der basierend auf Stoffmengen-Verhältnisse berechnet werden soll, wie viel Kohlenstoffdioxid-Gas ein Kubikmeter Holz bindet. Am Ende der Einheit sollen die Schüler:innen Holz als nachwachsenden Rohstoff kennen, die Komponenten von Holz aus chemischer Sicht beschreiben sowie die Eigenschaften der Komponenten grob mit ihrer chemischen Zusammensetzung erläutern können.

3.3.5 Einheit 5: Bioraffinerien

Inhaltsdimension(en)	Substanz und Energie: Herstellung und Verwendung wichtiger organisch-chemischer Grundprodukte darstellen. Chemische Grundlagen des Lebens: Erläutern, wie alle Lebensvorgänge auf stofflichen und energetischen Veränderungen beruhen und die Menschen von ihrer stofflichen Umwelt abhängig sind.
Handlungsdimension(en)	EO 5 zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen, Vermutungen aufstellen und Problemstellungen definieren, die mit Hilfe naturwissenschaftlicher Kenntnisse und Untersuchungen bearbeitet bzw. überprüft werden können. WO 1 Unterschiedliche, relevante Quellen ausfindig machen und daraus fachspezifische Informationen entnehmen. KO 6 Bedeutung, Chancen und Risiken der Anwendungen von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen für mich persönlich und für die Gesellschaft einschätzen.
Anforderungsniveau	Niveau II Schüler:innen bearbeiten die Aufgaben(n) größtenteils selbstständig

In der fünften Einheit stehen Bioraffinerien als Weg zu einer Bioökonomie im Mittelpunkt. Der Einstieg erfolgt durch eine Audiodatei, in der Bioraffinerien knapp erklärt sowie ihre Ausgangsstoffe, Prozesse und Produkte in Kontrast zu Erdölraffinerien gesetzt werden. Die Audiodatei greift dabei einerseits auf zuvor gelernte Inhalte (Erdölraffinerie, Stoffklassen) zurück, bietet jedoch auch einen Ausblick auf die restliche Einheit. Es folgt eine Phase der kollektiven Vermittlung, welche durch eine Präsentation mit Beispielen und Analogien strukturiert ist. Die wesentlichen Grundgedanken dieser Phase sind die Terminologie von Bioraffinerien (zum Beispiel Fachtermini wie Vorläufer und Plattformchemikalie) sowie grundlegende Abläufe in Bioraffinerien.

Eine Gelenkstelle leitet anschließend in eine Phase der subjektiven Auseinandersetzung mit dem Thema über. Schüler:innen erhalten ein Arbeitsblatt mit Aufgaben, welches sie analog zu Einheit vier mithilfe eines ScienceSpots und eines mobilen Endgeräts in Paaren oder Kleingruppen bearbeiten sollen. Das Arbeitsblatt ist so gestaltet, dass einerseits Informationen aus dem ScienceSpots entnommen und auf das Arbeitsblatt übertragen werden sollen, andererseits aber auch Inhalte aus dem ScienceSpot fachlich vertieft werden. Zu Beginn soll eine Diskussion über lineare und zirkuläre Materialflüsse geführt und dokumentiert werden. Die Diskussion wird durch Leitfragen strukturiert, die Überlegungen zu Auswirkungen und Relevanz verschiedener Materialflüsse für unterschiedliche Personen und Interessensgruppen initiieren sollen. Anschließend folgen zwei Aufgaben zu unterschiedlichen

Bioraffinerien sowie zu deren zugrundeliegenden Schemata, welche im Bereich der Reproduktion und der Transferleitung angesiedelt sind. Die folgenden beiden Aufgaben dienen einerseits zur Wiederholung und Festigung der zuvor gelernten Stoffklassen und Strukturformelschreibweisen, andererseits dienen sie zur Vorbereitung auf die letzte Einheit rund um die Essigsäureherstellung. Besonderes Augenmerk wurde bei der letzten Aufgabe auf der Einführung der Redoxreaktionen in der organischen Chemie gelegt. Dabei soll induktiv, also vom Speziellen ausgehend, aus der Reaktion von Ethanol über Ethanal zu Ethansäure auf das allgemeine Reaktionsschema der Oxidation primärer Alkohole über Aldehyde zu Carbonsäuren geschlossen werden. Als Aufgabe mit Problemlösungscharakter soll anschließend die Oxidation sekundärer Alkohole erarbeitet werden. In der abschließenden Aufgabe sollen Bioraffinerien vor dem Hintergrund Grüner und nachhaltiger Chemie in einem Think-Pair-Share Prozess reflektiert werden sowie allgemein Veränderungen zur Optimierung von Prozessen in Produktionsstätten basierend auf Grüner und nachhaltiger Chemie vorgeschlagen werden. Am Ende der Einheit sollen Lernende Rohstoffe, Vorläufer, Plattformchemikalien und Produkte aus Bioraffinerien – speziell Lignocellulose-Bioraffinerien – nennen sowie relevante Prozesse in der Primär- und Sekundärraffination von Holz erläutern können. Außerdem sollen sie Bioraffinerien und Erdölraffinerien in Bezug auf Grüne und nachhaltige Chemie kontrastieren können.

3.3.6 Einheit 6: Beispiel Essigsäureherstellung

Inhaltsdimension(en)	Chemische Grundlagen des Lebens: Erläutern, wie alle Lebensvorgänge auf stofflichen und energetischen Veränderungen beruhen und die Menschen von ihrer stofflichen Umwelt abhängig sind. Substanz und Energie: Gewinnung, Verwendung und Wiederverwertung von makromolekularen Stoffen darstellen.
Handlungsdimension(en)	KO 4 Daten, Fakten und Ergebnisse aus verschiedenen Quellen sowie Schlussfolgerungen kritisch hinterfragen und Gründe für deren Annahme oder Verwerfung angeben. KO 5 einen Problemlöseprozess kritisch reflektieren und gegebenenfalls alternative Strategien entwickeln. KO 7 Entscheidungen in gesellschaftlich relevanten Fragen aus naturwissenschaftlicher Sicht begründen und bewerten.
Anforderungsniveau	Niveau II: Schüler:innen bearbeiten die Aufgabe(n) selbstständig.

In der abschließenden Einheit soll einerseits das zuvor erworbene Wissen problemorientiert eingesetzt, andererseits das fachliche Argumentieren geübt werden. Die Problemstellung, die dieser Stunde zugrunde liegt, ist folgende:

Die Schüler:innen sind Mitglieder einer regionalen Kommission. In ihrer Gemeinde soll eine Bioraffinerie zur Produktion von Essigsäure gebaut werden. Es ist jedoch noch unklar, welches Verfahren zur Produktion genutzt und wie mit dem anfallenden Lignin umgegangen werden soll. Die Schüler:innen sollen daher im Rahmen eines Planspiels eine Empfehlung für den Bau der Bioraffinerie und den Umgang mit Lignin angeben und ihre Entscheidung begründen. Die Daten für die Einheit basieren auf Budsberg et al. (2020).

Um eine solche Diskussion führen zu können, brauchen Schüler:innen einerseits das fachliche Wissen aus den vorangegangenen Unterrichtsstunden, andererseits auch spezifisches Wissen zu den Herstellungsverfahren von Essigsäure. Zur Vorbereitung auf die Einheit wird daher in der vorherigen Stunde Informationsmaterial ausgeteilt (siehe Arbeitsblatt ‚Herstellungsverfahren Essigsäure‘), damit sich die Schüler:innen einlesen können. Auf dem Arbeitsblatt sind Aufgaben zur Vorbereitung auf die Diskussion gestellt. Für den Einstieg in das Thema Essigsäure wurde ein Advance Organizer (Wahl, 2013) erstellt, der eine übersichtliche und abstrahierte Vorstrukturierung der relevanten Inhalte darstellt. Anschließend haben die Schüler:innen Zeit, in Paaren und anschließend in Kleingruppen ihre Erkenntnisse zu diskutieren. Die Argumente sollen in der Gruppe geteilt, besprochen, sortiert und gegebenenfalls gereiht werden. Die Kleingruppen präsentieren ihre Empfehlungen einem Rat aus Schüler:innen, der an dieser Stelle ausgewählt wird. Es wird angenommen, dass die Gruppen unterschiedliche Empfehlungen aussprechen und es dadurch zu einer Diskussion kommt. Die Diskussion wird durch eine:n ausgewählte:n Moderator:in moderiert und durch eine:n Schriftführer:in dokumentiert. Das Ziel dieser Aufgabe, nämlich das Üben von naturwissenschaftlichem Argumentieren und Entscheiden, soll schon zu Beginn der Einheit klar kommuniziert werden. Schlussendlich muss der Rat basierend auf die zuvor erstellten Kriterien eine begründete Entscheidung treffen. Ziele für diese Einheit sind, dass Schüler:innen selbstständig relevante Informationen aus vorgegebenen Quellen auswählen, (Gegen-)Argumente zu den zwei Herstellungsverfahren von Essigsäure formulieren und sich aktiv an einer Diskussion zu den Herstellungsverfahren beteiligen können.

4 Entwicklung von Material für ScienceSpots

Der dritte Teil dieser Arbeit war die Entwicklung von zwei ScienceSpots rund um das Thema Holz. Diese dienen einerseits der Wissenschaftskommunikation im weitesten Sinne an Lai:innen, andererseits werden sie auch im Rahmen der entwickelten Unterrichtseinheiten genutzt.

4.1 Zielgruppe und Zieldefinition für die ScienceSpot

Das Material, das auf der SpottingScience-Projektwebseite verfügbar ist, soll zwei Zielgruppen ansprechen, nämlich Passant:innen und Schüler:innen.

Am Campus der Universität Wien sind fünf Holzpflocke mit QR-Codes aufgestellt, über die interessierte Passant:innen zur Projektwebseite gelangen. Auf dem Campusgelände befinden sich neben sozialwissenschaftlichen Fakultäten auch ein Supermarkt, ein Kinderspielplatz sowie Restaurants, daher passieren nicht nur Studierende unterschiedlicher (nicht-naturwissenschaftlicher) Studienrichtungen die Stationen, sondern auch Elternteile mit Kindern, Angestellte auf dem Heimweg oder Senior:innen während Spaziergängen. Dementsprechend inhomogen ist die erste Zielgruppe. Die Inhalte wurden daher so konzipiert, dass der Hauptstrang auch für Menschen mit wenig chemischen Fachwissen verständlich ist. Ziel der ScienceSpots ist hierbei, über die Aufarbeitung von Alltagsphänomenen auf naturwissenschaftliche Aspekte im Alltag aufmerksam zu machen und dadurch zur naturwissenschaftlichen Grundbildung (Bybee & Roberts, 2014) beizutragen.

Auf die Inhalte der ScienceSpots kann nicht nur über die auf Holzpflocken befestigten QR-Codes zugegriffen werden, sondern auch durch das Scannen der Codes von einem anderen Medium, beispielsweise Papier. Auf diese Möglichkeit wird in der entwickelten Unterrichtsreihe zurückgegriffen, indem QR-Codes auf Arbeitsblättern für Schüler:innen zur Verfügung gestellt werden. Dementsprechend richtet sich auch ein Teil der entwickelten ScienceSpots an dieselbe Zielgruppe, wie die Unterrichtsreihe – nämlich Lernende im Chemieunterricht der zwölften Schulstufe.

Die Herausforderung ist es, Inhalte für beide Zielgruppen angemessen zu konzipieren. Dieser Brückenschlag gelang mithilfe von Haupt- und Nebensträngen in den ScienceSpots, die unterschiedliche fachliche Komplexität und Informationsdichte aufweisen.

4.2 Schritte in der Entwicklung der ScienceSpots

Die ScienceSpots sind parallel zur Entwicklung der Unterrichtsreihe in Ko-Konstruktion mit Mag. Martina Zödl entstanden. Nach der Auswahl der fachlichen Inhalte wurde mithilfe eines cloudbasierten Textverarbeitungsprogramms der Rohentwurf geschrieben und mit Platzhaltern für Abbildungen, Verlinkungen und interaktive Elemente versehen. Der Rohentwurf wurde in mehreren Runden gemeinsam überarbeitet sowie die Abbildungen und interaktiven Elemente erstellt. Daraufhin wurde der Aufbau des jeweiligen ScienceSpots mithilfe eines Mind-Mapping-Tools erarbeitet. Grundsätzlich weisen alle ScienceSpots einen ähnlichen Aufbau auf: Ein Hauptstrang führt Leser:innen durch das Thema und ist fachlich und inhaltlich weniger komplex als Nebenstränge. In den Nebensträngen werden einzelne relevante Themen aufgegriffen und detaillierter herausgearbeitet.

Bei den ScienceSpots handelt es sich um Material mit rezeptivem Charakter. Die diskontinuierlich-narrative Schreibweise zeichnet sich dadurch aus, dass Abbildungen Teil der Erklärung sind und der Wortschatz grundsätzlich einfach und erzählend gehalten wird (Kernen, 2012). Besonders im Hauptstrang, der eine niedrigere Informationsdichte aufweist, ist daher ein totaler Lesestil zur Aufnahme aller Informationen möglich. Bezüglich der Textkomplexität wurden Sätze kurz gehalten und wichtige Aussagen möglichst präzise formuliert, um den Lesefluss nicht aufgrund einer zu hohen Informationsdichte zu unterbrechen. In Hinblick auf Wortschatzkomplexität finden sich im Hauptstrang nur die wichtigsten Fachtermini, im Nebenstrang ist die Dichte der Fachtermini weitaus höher. Auf Komposita wurde (wenn möglich) verzichtet. Da jedoch besonders auf der Teilchenebene Komposita notwendig sind, wurden die jeweiligen Begriffe der Lesbarkeit halber mit Bindestrichen getrennt – ein Beispiel dafür ist die getrennte Schreibweise des Wortes Phosphat-Ion anstelle von Phosphation. Bei Fachtermini, die nicht im Text erklärt werden, wurde eine Mouse-Over-Erklärung eingefügt. Außerdem wurde auf die konsistente Nutzung der Fachtermini sowie die sprachliche Trennung zwischen der Phänomenebene, der submikroskopischen Ebene und der Symbolebene (Johnstone 1991) geachtet.

Die überarbeiteten Texte wurden schließlich mit selbst erstellten Abbildungen und interaktiven Elementen auf der Projektwebsite eingebettet und es wurden QR-Codes für den Zugriff mittels eines internetfähigen Endgeräts generiert.

4.3 Darstellung der ScienceSpots

Über folgende QR-Codes und Links kann auf die fertigen ScienceSpots zugegriffen werden:



Der erste entstandene ScienceSpot behandelt das Thema Holz. Abbildung 20 zeigt den schematischen Aufbau des ScienceSpots Holz:

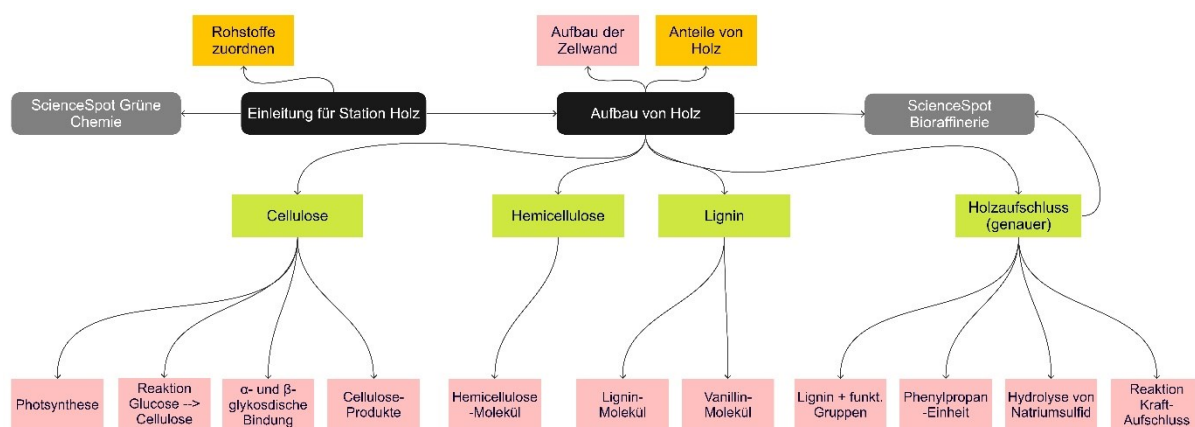


Abbildung 21: Struktur des ScienceSpots 'Holz'.

Legende: Hauptstrang (schwarz), Nebenstränge (grün), Verweise zu anderen ScienceSpots (grau), Abbildungen (rosa), interaktive Elemente (gelb). Quelle: Eigene Darstellung

Die Allgegenwärtigkeit von Erdölprodukten im Alltag soll in der Einleitung für Leser:innen einen Anknüpfungspunkt zu ihrem Alltag bieten. Anschließend wird über die Problematik von Erdöl für Menschen, Klima und Umwelt das Konzept der Grünen und nachhaltigen Chemie eingeführt. Zur Grünen Chemie und ihren Prinzipien wurde bereits ein ScienceSpot erstellt, auf den interessierte Leser:innen durch das Klicken auf einen Hyperlink zugreifen können. Als Alternative zu Erdöl werden daraufhin nachwachsende Rohstoffe genannt und Leser:innen sollen durch ein Spiel, bei dem Rohstoffe in die Kategorien erneuerbar und nicht-erneuerbar eingeteilt werden sollen, selbst aktiv werden. Während bis zu diesem interaktiven Element ein Problemaufriss über Erdöl und den damit einhergehenden Problematiken stattgefunden hat, wird ab dem Spiel der Fokus auf die Biomasse Holz sowie Grüne und nachhaltige Chemie als Lösungsansatz gelenkt. Zentral ist zu Beginn der Aufbau der Zellen, die Holz bilden. Dieser wird mithilfe einer Abbildung auf der Teilchenebene dargestellt. Nach einem Schätzspiel zu den Anteilen der Holzkomponenten im Holz haben Lesende die Möglichkeit, über Buttons zu den Nebensträngen Cellulose, Hemicellulosen und Lignin zu gelangen. Anschließend wird im

Hauptstrang der Kraftaufschluss grob erklärt und auf den Nebenstrang ‚Holzaufschluss‘ für Leser:innen mit vertieftem Interessen verwiesen.

Im Nebenstrang ‚Cellulose‘ wird der molekulare Aufbau von Cellulose genauer betrachtet und die Bildung von Glucosemolekülen bei der Photosynthese beschrieben. Der Nebenstrang ‚Hemicellulose‘ stellt besonders die Zusammensetzung von Hemicellulosen aus unterschiedlichen Zucker-Monomeren in den Vordergrund. Im Lignin-Nebenstrang wird zuerst die chemische Struktur von Lignin anhand eines Beispiels gezeigt und auf Ähnlichkeiten zu Vanillin hingewiesen. Der Holzaufschluss nach dem Kraft-Verfahren wird ebenfalls in einem Nebenstrang genauer erklärt. Dazu werden anhand derselben Ligninmolekül-Darstellung wie beim Nebenstrang ‚Lignin‘ funktionelle Gruppen eingeführt. Das Wissen über funktionelle Gruppen ist an dieser Stelle insofern notwendig, als beim Holzaufschluss Etherbindungen gebrochen werden und sich die Löslichkeiten des Polymers und der Lignin-Bruchstücke aufgrund ihrer funktionellen Gruppen unterscheiden. Auch im Seitenstrang ‚Holzaufschluss‘ wird mithilfe eines Hyperlinks der nahtlose Übergang in die zweite entwickelte Station zum Thema Bioraffinerie ermöglicht.

Der zweite entwickelte ScienceSpot behandelt die Themen Kreislaufwirtschaft, Bioraffinerien und die Herstellung von Essigsäure als Beispiel für einen Prozess aus der Lignocellulose-Raffinerie. Abbildung 21 zeigt den schematischen Aufbau des ScienceSpots:

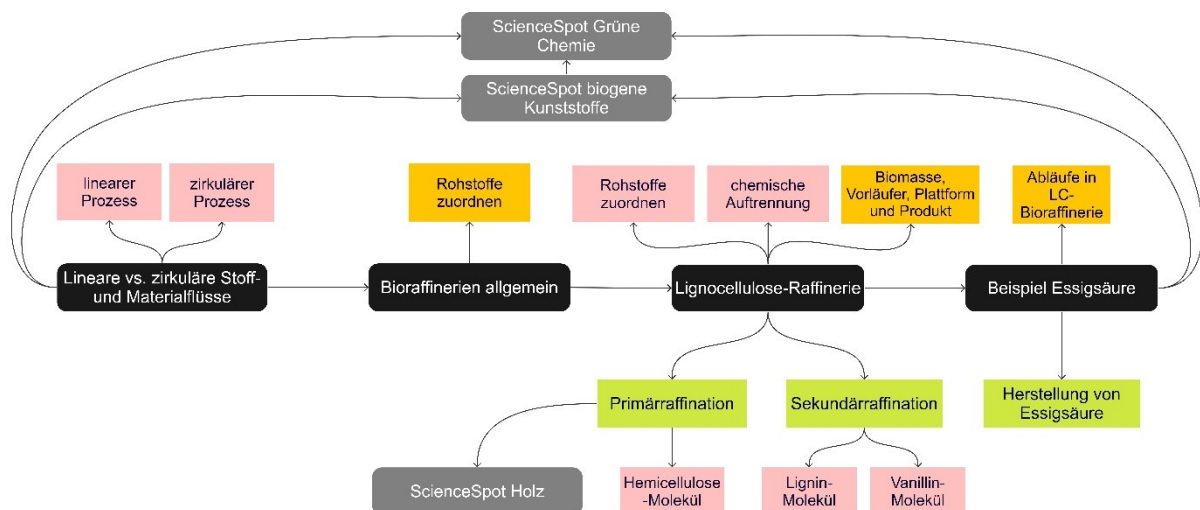


Abbildung 22: Struktur des ScienceSpots 'Bioraffinerie'.

Legende: Hauptstrang (schwarz), Nebenstränge (grün), Verweise zu anderen ScienceSpots (grau), Abbildungen (rosa), interaktive Elemente (gelb). Quelle: Eigene Darstellung

Der Einstieg in das Thema Bioraffinerien erfolgt über die Problematisierung linearer Stoff- und Materialflüsse am Beispiel einer Einweggabel aus Kunststoff, welche einen Anknüpfungspunkt aus dem Alltag der Lesenden bieten soll. Es wird besonders auf die Verbrennung von erdölbasierten Kunststoffen am Ende ihrer Verwendung eingegangen und Leser:innen haben die Möglichkeit, über einen Link zu einem weiteren ScienceSpot rund um die Bedeutung von Kunststoffen im Kontext von Umweltproblematiken zu gelangen. Anschließend werden im

Kontrast zu linearen Prozessen zirkuläre Prozesse und damit die Kreislaufwirtschaft eingeführt sowie anhand der Prinzipien Grüner Chemie begründet. Beide Stoff- und Materialflüsse werden durch eine Infografik dargestellt. Um Kreislaufwirtschaft zu etablieren, wird das Konzept von Bioraffinerien vorgestellt. Es folgt ein Zuordnungsspiel zu Bioraffinerien und ihren Biomassen. Danach wird der Fokus auf Lignocellulose-Bioraffinerien und die Prozesse und Produkte der Primär- und Sekundärraffination gelegt. Die Informationstexte werden durch Abbildungen ergänzt, die im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Universität Wien mit Fokus auf fachliche, fachdidaktische und medienpädagogische Aspekte erstellt wurden (Ortner, 2023). Im Fließtext wird häufig auf die Nebenstränge ‚Cellulose‘, ‚Hemicellulosen‘ und ‚Lignin‘ aus dem ScienceSpot Holz verwiesen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Einführung der Fachtermini Vorläufer, Plattformchemikalie sowie Primär- und Sekundärraffinerie gelegt. Abschließend wird beispielhaft die Herstellung von Essigsäure in Bioraffinerien aufbereitet und die Vertiefung über einen Nebenstrang angeboten. Im Nebenstrang zur Essigsäureherstellung werden die biochemischen und die petrochemischen Herstellungsverfahren kontrastiert und fachlich aufgearbeitet. Abschließend erfolgt über die Kunststoffverpackung eines Essigreinigers, der Holzessig enthält, eine Überleitung zum bereits vorhandenen ScienceSpot zu biogenen Kunststoffen.

5 Zusammenfassung und Diskussion der Leitfragen

„[...] while green chemistry has also been described as the Hippocratic Oath for the Chemist ('First, do no harm.'), the true definition of a subdiscipline or an area of investigation comes from the research and the accomplishments that are conducted therein” (Anastas & Warner, 1998, S. 37)

Dieses Zitat verdeutlicht, dass Grüne und nachhaltige Chemie nicht nur für Chemiker:innen in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen relevant ist, sondern vielmehr von verschiedenen Forschungsdisziplinen getragen wird. Damit sind Forschungsbestrebungen auf der industriellen oder politischen Ebene nicht ausreichend für die Bewältigung globaler Herausforderungen. Das Ziel, ein Bewusstsein für und einen kompetenten, verantwortungsvollen Umgang mit Entscheidungen bezüglich Nachhaltigkeitsaspekten im Alltag jeder:s Einzelnen zu fördern, gewinnen Forschungsbestrebungen im Bildungsbereich an Bedeutung. Der Chemieunterricht kann dazu beitragen, Urteils- und Handlungskompetenzen in Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte zu fördern (Zuin et al., 2021). Dazu bedarf es zielgerichtet ausgebildeter Lehrpersonen sowie fachlich und fachdidaktisch adäquater Unterrichtsmaterialien rund um Themen der Grünen und nachhaltigen Chemie. Die Arbeit trägt dazu in folgender Weise bei:

- a) Der theoretische Teil dieser Arbeit bietet einen Überblick über fachdidaktische Modelle und fachliche Inhalte, die für die Thematisierung von Grüner und nachhaltiger Chemie am Beispiel Bioraffinerie von Holz in der Sekundarstufe II relevant sind (siehe Kapitel 1 und Kapitel 2.2).
- b) Im empirischen Teil dieser Arbeit wurden Assoziationen von Lernenden zum Begriff Bioraffinerie erhoben und analysiert. Dadurch konnten erstmalig Lernvoraussetzungen zu ebendiesem Thema auf einer Ebene niedriger Komplexität identifiziert und so Anknüpfungspunkte für den Chemieunterricht und für weitere Forschungsvorhaben geboten werden (siehe Kapitel 2.3).
- c) Im konzeptuellen Teil wurde Material rund um das Thema Grüne und nachhaltige Chemie am Beispiel Bioraffinerie von Holz erstellt. Ein Teil davon ist für den schulischen Kontext konzipiert (siehe Kapitel 2.5), der andere Teil dient im Rahmen des Projekts SpottingScience der Wissenschaftskommunikation im Sinne eines Public Understanding of Science (siehe Kapitel 2.6).

Die folgende Diskussion ist nach den eingangs erwähnten Leitfragen gegliedert.

5.1 Diskussion zu Leitfrage 1

Wie können ausgewählte Aspekte der Grünen Chemie anhand des Beispiels Bioraffinerie von Holz mit Lernenden erarbeitet werden?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde exemplarisch eine Unterrichtsreihe mit sechs Unterrichtseinheiten zu je 45 Minuten sowie dazugehöriges Unterrichtsmaterial entwickelt. Die Unterrichtseinheiten sind im Bereich der Grünen und nachhaltigen Chemie angesiedelt und decken die Themen Grüne Chemie, Erdölraffinerie, Holzchemie, Bioraffinerie von Holz und Herstellung von Essigsäure ab.

Da in Hinblick auf konstruktivistische Lerntheorien zur Planung einer Lerngelegenheit unter anderem unterrichtliche und vorunterrichtliche Vorstellungen der Schüler:innen berücksichtigt werden müssen, wurde zunächst eine Erhebung von Assoziationen bei Lernenden der elften und zwölften Schulstufe ($N=231$) durchgeführt und mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) ausgewertet. Jedoch nach Gropengießer (2001) sind die erhobenen Assoziationen Vorstellungen auf der Ebene der niedrigsten Komplexität. Die Nennungen sind aufgrund des Forschungsinstruments und der Bedingungen bei der Datenerhebung spontane Assoziationen, die auch emotionale, affektive und teilweise kognitive Konstrukte enthalten können. Nichtsdestotrotz ermöglicht eine vorsichtige Interpretation der Ergebnisse das Aufstellen von Vermutungen bezüglich Vorstellungen der Lernenden rund um Bioraffinerien. Aus den Ergebnissen der Erhebung konnten einerseits Anknüpfungspunkte für die entwickelte Unterrichtseinheit identifiziert werden. Andererseits können die Ergebnisse auch als Grundlage für eine vertiefte fachdidaktische Forschung im Bereich der Lernvoraussetzungen zu Themen der Grünen Chemie genutzt werden. Nachdem bis dato noch wenige Informationen und validierte Forschungsinstrumente zu diesem Thema vorliegen, bieten sich dazu explorative Forschungsmethoden an.

Parallel zur Erhebung wurde eine fachliche Klärung der geplanten Inhalte (z.B. Grüne und nachhaltige Chemie, Holzchemie, Bioraffinerien) durchgeführt und anschließend basierend auf den Ergebnissen der Erhebung mit relevanten Inhalten ergänzt (z.B. Erdölraffinerie, Kreislaufwirtschaft). Außerdem wurde zur didaktischen Strukturierung das Sandwich-Prinzip (Wahl, 2013) gewählt. Dieses scheint aus mehreren Gründen für diese Unterrichtsreihe zur Erarbeitung von Nachhaltigkeitsaspekten geeignet: Erstens wurde aus der Erhebung deutlich, dass Lernende bei diesem spezifischen Thema einen vergleichbaren Stand an Vorwissen und Vorerfahrungen aufweisen. Daher bieten sich die im Sandwich-Prinzip stattfindenden Lernphasen dazu an, Lernenden neue Inhalte anzubieten und ihnen Wissen und Material zur Erarbeitung des Themas zur Verfügung zu stellen. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass trotz einer scheinbar homogenen Lernendengruppe in solchen kollektiven Lernphasen Schüler:innen nicht „gleichgeschaltet“ (Wahl, 2013, S.110) werden, da die Aufnahme der

Inhalte individuellen Faktoren unterliegt und die Präsentation von Inhalten durch eine Lehrkraft gegen konstruktivistische Lerntheorien spricht (Siebert, 2005). In den entwickelten Unterrichtseinheiten wurde aus diesem Grund Wert darauf gelegt, in kollektiven Lernphasen Material zur Verfügung zu stellen, das anschließend in individuellen Lernphasen bearbeitet werden kann. Der zweite Grund zur Eignung des Sandwich-Prinzips zur Erarbeitung von Nachhaltigkeitsaspekten sind ebensolche individuellen Lernphasen. Da Entscheidungen zu Nachhaltigkeitsaspekten im Alltag ebenfalls hochindividuell sind, ist es naheliegend, solche Themen auch in einer kleineren Sozialformen mit sozialen Bezügen zu erarbeiten. Dabei können Lernende selbst Verantwortung für ihr Lernen übernehmen und sich mit den Inhalten selbstständig Auseinandersetzen.

Zusammenfassend wurde im Rahmen dieser Arbeit Literatur zu fachlichen und fachdidaktischen Inhalten aufgearbeitet, Lernvoraussetzungen erhoben und darauf aufbauend ein didaktisch begründetes Unterrichtskonzept entwickelt. Ausständig geblieben ist die Evaluation des Konzepts in der Praxis. Diese kann Forschungsgegenstand zukünftiger Masterarbeiten oder Dissertationen sein. Als Anknüpfungspunkt für weitere Untersuchungen sind Fragen zur Lernwirksamkeit oder zur Veränderung der Haltung von Lernenden zu Themen der Grünen und nachhaltigen Chemie interessant. Eine Möglichkeit, diese zu erheben, wäre eine Kombination von Design-Based-Research (DBRC, 2003) und Akzeptanzbefragungen in einem prä-post-Test Design.

5.2 Diskussion zu Leitfrage 2

Wie kann eine Einführung in die organische Chemie anhand der Bioraffinerie von Holz ablaufen?

Die Beantwortung der zweiten Frage ergab sich primär aus der fachlichen Klärung der Lerngelegenheit. Die Inhalte wurden in Hinblick auf Überschneidungen mit dem österreichischen Lehrplan für Chemie sowie dem Kompetenzmodell für die Sekundarstufe II analysiert und relevante Schwerpunktthemen identifiziert. Die Inhalte der einzelnen Einheiten wurden anschließend so strukturiert, dass sie ausgewählte Aspekte der organischen Chemie mit Aspekten aus dem Themenfeld Bioraffinerie von Holz kombinieren. Dies ist besonders durch die Thematisierung funktioneller Gruppen sowie einzelner organischer Reaktionsschemata gelungen. Funktionelle Gruppen werden zunächst in einer Einheit eingeführt und können anschließend von Schüler:innen am Beispiel Lignin gefestigt werden. Weiters können sich Schüler:innen durch eine angeleitete Aufgabe das Prinzip von Kondensationsreaktionen beispielhaft anhand der Reaktion von Glucosemolekülen zu Cellulosemolekülen herleiten. Die biochemische Herstellung von Essigsäure mittels Fermentation konnte mit einer Aufgabe zur Oxidation von Alkoholen verknüpft werden. Mit

dieser Leitfrage wurde das Ziel verfolgt, die Unterrichtseinheit im Lehrplan und damit im Chemieunterricht zu verorten. Dies hat den Vorteil, dass Lehrpersonen ihren regulären Unterrichtsstoff anhand von Themen nachhaltiger Chemie erarbeiten können und keine weiteren Unterrichtseinheiten für ein zusätzliches Thema genutzt werden müssen. Nichtsdestotrotz bietet sich das Thema Bioraffinerie von Holz in Kombination mit dem Projekt SpottingScience auch für Projektunterricht oder für Projektwettbewerben an.

5.3 Diskussion zu Leitfrage 3

Wie können digitale Angebote des Projekts SpottingScience in einer Lerngelegenheit rund um Grüne Chemie am Beispiel der Bioraffinerie von Holz genutzt werden?

Die dritte Leitfrage betrifft die Nutzung des Projekts SpottingScience als Ressource für digital unterstützten Chemieunterricht. Bis dato wurden ScienceSpots primär für die Wissenschaftskommunikation an Lai:innen im außerschulischen Bereich genutzt, jedoch bergen sie auch im schulischen Bereich Potenzial als außerschulischer Lernort oder zur Förderung digitaler Kompetenzen. Aus den zwei Zielgruppen von SpottingScience (Schüler:innen und Passant:innen) resultieren einige Herausforderungen in der Konzeption der ScienceSpots: Inhalte müssen für ein breites Spektrum an Menschen mit unterschiedlichem Vorwissen, Interessen sowie zeitlichen Ressourcen und Lernzielen in angemessener Komplexität ausgewählt und ausformuliert werden. Der Brückenschlag gelang dabei durch die Einbettung der ScienceSpots in Unterrichtseinheiten mit begleitendem Unterrichtsmaterial. Es sind zwei ScienceSpots entstanden, die im Hauptstrang eine geringere Informationsdichte aufweisen und im Nebenstrang detailliertere Informationen bieten, sodass sich Leser:innen nach Belieben in die Inhalte vertiefen können. Um sicherzustellen, dass Schüler:innen die relevanten Stellen in der jeweiligen Unterrichtseinheit auch lesen beziehungsweise bearbeiten, wurde Begleitmaterial mit Aufgaben erstellt, die passgenau auf die Inhalte der ScienceSpots abgestimmt sind.

Betrachtet man das Thema Nachhaltigkeit, so fällt auf, dass bei (natur-)wissenschaftlichen Fragestellungen auch soziale, politische und wirtschaftliche Aspekte eine Rolle spielen. Damit können Nachhaltigkeitsaspekte durch den alleinigen Schwerpunkt im Chemieunterricht nicht von allen Seiten beleuchtet werden. Fragestellungen aus diesem Bereich bieten sich daher besonders gut für fächerübergreifenden Unterricht an. Durch fächerübergreifendes Arbeiten (beispielsweise mit dem Fach Biologie, Geografie oder Geschichte) können naturwissenschaftliche Fragestellungen mit gesellschaftspolitischen Aspekten kombiniert und somit die unterschiedlichen Facetten von Nachhaltigkeit beleuchtet werden. Um Bioraffinerien ganzheitlicher zu betrachten, müssten beispielsweise sozioökonomische Faktoren wie faire Bezahlung der Arbeiter:innen, wirtschaftliche Entscheidungen bezogen auf Angebot-

Nachfrage-Modelle von Grund- und Feinchemikalien oder die Rentabilität eines Umstiegs auf nachwachsende Rohstoffe im Vergleich zu fossilen Rohstoffen berücksichtigt werden.

Obwohl bei Herausforderungen unserer Gesellschaft chemische Prozesse und Produkte oftmals eine tragende Rolle spielen, ist nicht allein ‚die Chemie‘ dafür verantwortlich. Vielmehr handelt es sich im Ursprung um ein Zusammenspiel wirtschaftlicher, politischer, sozialer und individueller Faktoren, die schlussendlich zu Entscheidungen bei Menschen mit unterschiedlichem Einfluss in verschiedenen Kontexten führen. Diese Menschen können Politiker:innen sein, die Einfluss auf wichtige Entscheidungen zur Nachhaltigkeitsfrage haben. Aber auch vermeintlich kleine Entscheidungen im Alltag jeder:s Einzelnen betreffen Nachhaltigkeitsfragen, sei es die Wahl eines neuen T-Shirts oder des Transportmittels zur Schule oder in den Urlaub. Im Zentrum der Herausforderungen unserer Welt stehen daher immer die Menschen, die durch ihre Handlungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen können. Dies soll keineswegs bedeuten, dass Personen und Interessensgruppen mit großem Einfluss aus der Verantwortung gezogen werden können und Veränderungen allein auf individueller Ebene stattfinden sollen. Stattdessen soll deutlich werden, dass Nachhaltigkeitsentscheidungen auch von Individuen mitgetragen werden können. Ein Ziel des Chemieunterrichts sollte daher sein, Nachhaltigkeitsaspekte im Unterricht zu thematisieren und damit Schüler:innen mit notwendigem Wissen und den Kompetenzen für eine aktive Teilhabe an Entscheidungen in unserer Gesellschaft auszustatten.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- Alfonsi, K., Colberg, J., Dunn, P. J., Fevig, T., Jennings, S., Johnson, T. A., Kleine, H. P., Knight, C., Nagy, M. A., Perry, D. A. & Stefaniak, M. (2008). Green chemistry tools to influence a medicinal chemistry and research chemistry based organisation. *Green Chemistry*, 10(1), 31–36. <https://doi.org/10.1039/B711717E>
- Anastas, P. & Eghbali, N. (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.*, 39(1), 301–312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anastas, P. & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.
- Ausubel, D. P. (1963). *The Psychology of Meaningful Verbal Learning*. Grune & Stratton.
- Barke, H.-D. (2006). *Chemiedidaktik: Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*.
- Bartsch, S. & Brandl, W. (2015). Von der Didaktischen Rekonstruktion zu einer Didaktik subjektorientierten Lernens und Lehrens. *Haushalt in Bildung & Forschung*, 4(2), 116–125. <https://doi.org/10.3224/hibifo.v4i2.19503>
- Behr, A., Agar, D. W. & Jörisen, J. (2010). Thermische Trennverfahren I (Destillation und Rektifikation). In A. Behr, D. W. Agar & J. Jörisen (Hrsg.), *Einführung in die Technische Chemie* (S. 75–92). Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2195-1_7
- Behr, A. & Seidensticker, T. (2018). *Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe: Vorkommen, Konversion, Verwendung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55255-1>
- Borrows, P. (1984). The Pimlico Chemistry Trail. *School Science Review*, 66(235), 221–233.
- Brennan, R. L. & Prediger, D. J. (1981). Coefficient Kappa: Some Uses, Misuses, and Alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41(3), 687–699. <https://doi.org/10.1177/001316448104100307>

- Brenner, H. (Regisseur). (2023). *Multitalent Erdöl* [Lehrfilm]. SWR Fernsehen.
<https://www.planet-schule.de/schwerpunkt/total-phaenomenal-energie/multitalent-erdoel-film-100.html>
- Budsberg, E., Morales-Vera, R., Crawford, J. T., Bura, R. & Gustafson, R. (2020). Production routes to bio-acetic acid: Life cycle assessment. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), 154.
<https://doi.org/10.1186/s13068-020-01784-y>
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF). (2020). *Digitale Schule*. <https://www.bmbwf.gv.at/Themen/schule/zrp/dibi.html>
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF). (2023, Juli 13). *RIS - Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen—Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.07.2023.* Rechts Informationssystem.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Innovation und Technologie Österreich (BMK) (Hrsg.). (2021a). *Leuchttürme der Bioökonomie in Österreich*.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Innovation und Technologie Österreich (BMK). (2022). *Definition der Grünen Chemie. Positionspapier der österreichischen Plattform Grüne Chemie (PGC)* [Positionspapier].
https://www.gruenechemieoesterreich.at/fileadmin/inhalte/greenchem/pdf/22-06definition_der_gruenen_chemie_ua.pdf
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Innovation und Technologie Österreich (BMK). (2021b). *Plattform „Grüne Chemie“*.
https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/chemiepolitik/gruene_chemie/gruene_chemie_plattform.html
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (Hrsg.). (2008). *Österreichische Strategie zur Bildung für nachhaltige Entwicklung*.
https://www.bmbwf.gv.at/dam/jcr:682ba1b6-f2da-46ee-9627-a20c31deba0f/bine_strategie_18299.pdf

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.). (2012). *Roadmap Bioraffinerien*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/roadmap-bioraffinerien.html>
- Burger, J. (2001). *Schülervorstellungen zu „Energie im biologischen Kontext“—Ermittlungen, Analysen und Schlussfolgerungen* [Dissertation, Universität Bielefeld]. <https://dnb.info/964842416/34>
- Bybee, D. A. R., Rodger W. & Roberts, D. A. R. (2014). Scientific Literacy, Science Literacy, and Science Education. In *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (S. 545–585). Routledge.
- Cannon, A. S. & Warner, J. C. (2002). Noncovalent Derivatization: Green Chemistry Applications of Crystal Engineering. *Crystal Growth & Design*, 2(4), 255–257. <https://doi.org/10.1021/cg0255218>
- Chorkendorff, I. & Niemantsverdriet, J. W. (2003). *Concepts of modern catalysis and kinetics*. Wiley-VCH.
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Davies, S. R. & Horst, M. (2016). *Science communication: Culture, identity and citizenship*. Palgrave Macmillan.
- De Kleijne, K., James, J., Hanssen, S. V. & Van Zelm, R. (2020). Environmental benefits of urea production from basic oxygen furnace gas. *Applied Energy*, 270, 115119. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115119>
- Döring, N. (2023). Qualitätskriterien in der empirischen Sozialforschung. In N. Döring (Hrsg.), *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (S. 79–118). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64762-2_3
- Duit, R. (2010). Piko-Brief 1: Schülervorstellungen und Lernen von Physik. *Physik im Kontext*.

- Duit, R. (2015). Model of Educational Reconstruction. In R. Gunstone (Hrsg.), *Encyclopedia of Science Education* (S. 654–656). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2150-0_157
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattman, U. & Parchmann, I. (2012). The Modell of Educational reconstruction—A framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe: A Retrospective and Prospective* / (S. 13–37). Brill | Sense,. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-6091-900-8>
- Dunker, N. (2010). *Concept maps im naturwissenschaftlichen Sachunterricht: Didaktische Rekonstruktion am Beispiel des Lerngegenstandes Feuer*. BIS Verlag. <http://oops.uni-oldenburg.de/1021/>
- Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. (2009a). *Pulping chemistry and technology* (Bd. 2). De Gruyter.
- Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. (2009b). *Wood Chemistry and Biotechnology* (Bd. 1). De Gruyter.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards the Circular Economy—Economic and business rationale for an accelerated transition*. https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf
- Europäische Kommission. (2019). *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Der europäische Grüne Deal*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX%3A52019DC0640#document2>
- Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), Pub. L. No. 2006R1907, Europäisches Recht (2011). <https://doi.org/10.15358/9783800639366>

- Feige, E.-M. & Lembens, A. (2020). *Concept Cartoons im naturwissenschaftlichen Unterricht einsetzen*. *MNU Journal*, 370–376.
- Fingas, M. (Hrsg.). (2022). *The Chemistry of Oil and Petroleum Products*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110694529>
- Garnett, P., Garnett, P. & Hackling, M. (1995). Students' Alternative Conceptions in Chemistry: A Review of Research and Implications for Teaching and Learning. *Studies in Science Education*, 25, 69–96. <https://doi.org/10.1080/03057269508560050>
- Greenpeace e.V. (2014). *Erdöl—Gefahr für Umwelt, Klima, Menschen* (Hintergrund Öl). https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2014/33020/pdf/erdoel_gefahr_fuer_die_umwelt_0.pdf
- Grooms, J., Sampson, V. & Enderle, P. (2018). How concept familiarity and experience with scientific argumentation are related to the way groups participate in an episode of argumentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(9), 1264–1286. <https://doi.org/10.1002/tea.21451>
- Gropengießer, H. (2001). *Didaktische Rekonstruktion des Sehens: Wissenschaftliche Theorien und die Sicht der Schüler in der Perspektive der Vermittlung* (U. Kattmann, B. Moschner & I. Parchmann, Hrsg.; Bd. 1). https://usearch.uaccess.univie.ac.at/primo-explore/fulldisplay/UWI_alma21270909630003332/UWI
- Hahn-Laudenberg, K. (2017). Die Entwicklung der Concept-Maps. In K. Hahn-Laudenberg (Hrsg.), *Konzepte von Demokratie bei Schülerinnen und Schülern: Erfassung von Veränderungen politischen Wissens mit Concept-Maps* (S. 163–179). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18392-9_9
- Hassak, K. (1958). *Anorganische Waren sowie Kohle und Erdöl* (A. Kutzelnigg, Hrsg.; 8. neu bearb. Aufl. Reprint 2019, Bd. 1). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110863802>
- Heinzle, G. & Eckhart, B. (2022, Jänner 16). ScienceSpot Grüne Chemie 4 – Biokunststoffe. *SpottingScience*. <https://spottingscience.at/sciencespot-gruene-chemie-4-biokunststoffe/>

- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–34.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7, 75–83.
- Kamm, B. (2008). *Biomasse-Wirtschaft und Bioraffinerie-Systeme*. Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e.V. https://www.leibniz-institut.de/archiv/kamm_16_07_08.pdf
- Kantola, J., Rushton, M., Dima, D. P., Nikkilä, A., Mustamäki, A., Niemi, T. & Fors, S. (2020). *Biorefineries in Europe*. Confederation of European Paper Industries (Cepi).
https://task42.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/02/Cepi_Biorefineries-in-Europe_master_161220_finalappendixes.pdf
- Kattman, 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.
<https://doi.org/ZfDN>
- Kaufmann, H. (2000). *Chemieunterricht und das Problem der antagonistischen Sicht von „Natur“ und „Chemie“: Zur grundlegenden Bedeutung unterschiedlichen Wissens und Wertens im Zusammenhang mit Lehr- und Lernprozessen*. LIT Verlag Münster.
- Kernen, N. (2012). *Textschwierigkeiten in Lehrmitteln für den naturwissenschaftlichen Unterricht in der Sekundarstufe I: Eine Analyse von der Pädagogischen Hochschule FHNW Zentrum Lesen im Auftrag des Departements Bildung, Kultur und Sport des Kantons Aargau*. Ilz.
- Kind, V. (2004). *Beyond Appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas*. 84.

- Klafki, W. (1985). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik: Beiträge zur kritisch-konstruktiven Didaktik*. Beltz.
- Klar, M. (1903). Geschichte der Holzdestillation. In M. Klar (Hrsg.), *Technologie der Holzverkohlung und der Fabrikation von Essigsäure, Aceton, Methylalkohol und sonstiger Holzdestillate* (S. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-99309-1_1
- Klett, G. (2022, Mai 23). *Carbon Capture and Storage* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage>
- Krüger, D., Vogt, H. & Kattman, U. (Hrsg.). (2007). Didaktische Rekonstruktion—Eine praktische Theorie. In *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (1. Aufl., S. 93–103). Springer.
- Kuckartz, U. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. <https://content-select-com.uaccess.univie.ac.at/de/portal/media/view/5e623532-20b8-4f33-b19e-4a1db0dd2d03?forceauth=1>
- Kümmerer, K. (2017). Nachhaltige Chemie—Das künftige Leitbild. *Angewandte Chemie*, 129(52), 16640–16641. <https://doi.org/10.1002/ange.201709949>
- Lehrplan der Allgemeinbildenden Höheren Schulen—Anlage A, (2016). https://aeccc.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/z_aeccc/AECC_Chemie/Fuer_Lehrer_innen/Offizielle_Dokumente/Kompetenzmodell_Chemie_AHS_Oberstufe_2016.pdf
- Lembens, A., Heinzle, G., Tepla, A., Maulide, N., Preinfalk, A., Kaiser, D. & Spitzer, P. (2022). SpottingScience – a digital learning environment to introduce Green Chemistry to secondary students and the public. *Chemistry Teacher International*, 4(2), 143–154. <https://doi.org/10.1515/cti-2021-0025>

- Lohrengel, B. (2012). Einführung in die thermischen Trennverfahren: Trennung von Gas-, Dampf- und Flüssigkeitsgemischen. In *Einführung in die thermischen Trennverfahren*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486717433>
- Mammino, L. (2015). A Great Challenge of Green Chemistry Education: The Interface between Provision of Information and Behaviour Patterns. In V. Zuin & L. Mammino (Hrsg.), *Worldwide Trends in Green Chemistry Education* (S. 1–15). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782621942-00001>
- Marks, R., Stuckey, M. & Eilks, I. (2014). Die gesellschaftliche Dimension naturwissenschaftlich-technischer Sachfragen. Die Perspektive der naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächer. *GW-Unterricht*, 134(2), 19–28.
- Mayring, P. & Gläser-Zikuda, M. (Hrsg.). (2008). *Die Praxis der qualitativen Inhaltsanalyse* (2., neu ausgestattete Auflage). Beltz Verlag.
- McKenna, A. (2013). Expansion of the Analytical Window for Oil Spill Characterization by Ultrahigh Resolution Mass Spectrometry: Beyond Gas Chromatography. *Environmental Science & Technology*. https://www.academia.edu/18220482/Expansion_of_the_Analytical_Window_for_Oil_Spill_Characterization_by_Ultrahigh_Resolution_Mass_Spectrometry_Beyond_Gas_Chromatography
- Nova Institute for Ecology and Innovations. (2017). *Mapping Biorefineries 2017* (Bio based Industries Consortium, Hrsg.). https://biconsortium.eu/sites/biconsortium.eu/files/downloads/MappingBiorefineriesAppendix_171219.pdf
- Offermanns, H. & Salesch, M. (2014). Das Erdölzeitalter. *Chemie in unserer Zeit*, 48(5), 364–375. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201400632>
- Ortner, V. (2023). *Anwendung fach- und mediendidaktischen Prinzipien auf die Analyse und Entwicklung von Grafiken zur Lignocellulose-Bioraffinerie* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Universität Wien.

- Österreichischer Biomasse-Verband (Hrsg.). (2021). *Basisdaten Bioenergie 2021.pdf*.
<https://www.biomasseverband.at/wp-content/uploads/Basisdaten-Bioenergie-2021.pdf>
- Österreichisches Gesellschafts- und Wirtschaftsmuseum (GWM). (2007). *Produkte aus Erdöl*.
https://www.wirtschaftsmuseum.at//media/pdf-archiv/_EadT_1-7-PDF/EadT_4_PDF/EadT_4-06.pdf
- Otromke, M., White, R. & Sauer, J. (2019). Hydrothermal Base Catalyzed Depolymerization and Conversion of Technical Lignin – An Introductory Review. *Carbon Resources Conversion*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.01.002>
- Peters, D., Ulber, R. & Wagemann, K. (2014). Bioraffinerien. *Chemie in unserer Zeit*, 48(1), 46–59. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201400622>
- Plotz, T. (2016). Sind Concept Maps ein valides Messinstrument für konzeptuelles Lernen? In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (Bd. 37, S. 784–787). s.n. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/144871>
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: Conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2(1), 16–43. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.16>
- Rakoczy, R. A., Ernst, S., Böckler, F., Dill, B., Eisenbrand, G., Faupel, F., Fugmann, B., Gamse, T., Matissek, R., Pohnert, G., Rühling, A., Schmidt, S. & Sprenger, G. (2013). *Raffinerie* [dataset]. Thieme Gruppe; RÖMPP. <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-00161>
- Raspolli Galletti, A. M. & Antonetti, C. (2021). Biomass pretreatment: Separation of cellulose, hemicellulose and lignin. Existing technologies and perspectives. In M. Aresta, A. Dibenedetto & F. Dumeignil (Hrsg.), *Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels* (S. 165–198). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110705386-007>

- Reinfried, S., Mathis, C. & Kattmann, U. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *BzL - Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 27(3), Article 3.
- Schecker, H. & Klieme, E. (2000). Erfassung physikalischer Kompetenz durch Concept-Mapping-Verfahren. In H. Fischler & J. Peuckert (Hrsg.), *Concept mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S. 23–57). Logos-Verl.
- Schiefer, P. (2018). *Eine empirische Studie zur Untersuchung und Aufdeckung von Schulervorstellungen in der Wärmelehre* [Diplomarbeit, Universität Wien].
<https://services.phaidra.univie.ac.at/api/object/o:1342463/get>
- Sheldon, R. A. (2007). The E Factor: Fifteen years on. *Green Chemistry*, 9(12), 1273.
<https://doi.org/10.1039/b713736m>
- Sheldon, R. A. (2021). *E-factor*. Rodger Sheldon. <https://www.sheldon.nl/roger/efactor.html>
- Siebert, H. (2005). *Pädagogischer Konstruktivismus: Lernzentrierte Pädagogik in Schule und Erwachsenenbildung* (3., überarb. und erw. Aufl). Beltz.
- Sonnewald, U. (2014). Stoffwechselphysiologie. In J. W. Kadereit, C. Körner, B. Kost & U. Sonnewald (Hrsg.), *Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften* (S. 337–446). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54435-4_19
- Spitzer, P. (2014). Chemistry to go! *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie*, 25(144), 43–47.
- Statista Research Department. (2023a). *Weltweiter Erdölverbrauch bis 2022*. Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/40612/umfrage/welt-insgesamt-erdoelverbrauch-in-millionen-tonnen/>
- Statista Research Department. (2023b, April 14). *Kunststoffproduktion weltweit und in Europa bis 2021*. Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>

- Statistik Austria. (2022). *Erdölverbrauch nach Sektoren in Österreich—Anteil in Prozent*. Positionen Wien Energie. <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/erdoelverbrauch-in-oesterreich/>
- Stoler, E. & Warner, J. (2015). Non-Covalent Derivatives: Cocrystals and Eutectics. *Molecules*, 20(8), 14833–14848. <https://doi.org/10.3390/molecules200814833>
- Strike, K. & Posner, G. (1992). *A revisionist theory of conceptual change*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-revisionist-theory-of-conceptual-change-Strike-Posner/2459747b42c8892e911ab4b2f02cb1ab805e9baf>
- Stuckey, M., Sperling, J. P., Hofstein, A., Mamlok-Naaman, R. & Eilks, I. (2014). Ein Beitrag zum Verständnis der Relevanz des Chemieunterrichts. *CHEMKON*, 21(4), 175–180. <https://doi.org/10.1002/ckon.201410227>
- Sumfleth, E. & Tiemann, R. (2000). Own-Word-Mapping—Ein alternativer Zugang zu Schülervorstellungen. In H. Fischler & J. Peuckert (Hrsg.), *Concept mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S. 179–204). Logos-Verl.
- Taber, K. (2002). *Chemical misconceptions. 2: Classroom resources*. Royal Society of Chemistry.
- Teplá, A. (2021). *Entwicklung von SpottingScience-Stationen mit Fokus auf Aspekte der Grünen Chemie anhand des Beispiels Menthol* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Universität Wien.
- The Design-Based Research Collective. (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5–8. <https://doi.org/10.3102/0013189X032001005>
- Tissot, B. P. & Welte, D. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- Trost, B. (1991). The Atom Economy—A Search for Synthetic Efficiency. *Science*, 254(5037), 1471–1477. <https://doi.org/10.1126/science.1962206>

United Nations (UN). (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>

Pollution Prevention Act of 1990, Pub. L. No. 6601, 101–508 Public Law (1990).

Vereinte Nationen. (2015). *Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015*. <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>

Wagemann, K. (2014). Herstellung von Grundchemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe als Alternative zur Petrochemie? *Chemie Ingenieur Technik*, 86(12), 2115–2134. <https://doi.org/10.1002/cite.201400108>

Wahl, D. (2013). *Lernumgebungen erfolgreich gestalten: Vom trägen Wissen zum kompetenten Handeln* (3. Auflage mit Methodensammlung). Verlag Julius Klinkhardt.

Weiler, E. W., Nover, L. & Nultsch, W. (2008). *Allgemeine und molekulare Botanik: 30 Tabellen*. Thieme.

Wien Energie GmbH. (2022, Oktober 24). *Energiemix Österreich—Energieverbrauch nach Energieträgern*. Positionen Wien Energie. <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/energiemix-in-oesterreich/>

Windsperger, D. A. & Windsperger, D. B. (2020). *Die chemische Industrie auf dem Pfad zur Klimaneutralität 2040* (Institut für industrielle Ökologie & Fachverband der chemischen Industrie, Hrsg.). <https://www.fcio.at/media/15100/studie-chemieindustrie-klimaneutralitaet-september-2020.pdf>

Zhang, Z., Wang, T., Blunt, M. J., Anthony, E. J., Park, A.-H. A., Hughes, R. W., Webley, P. A. & Yan, J. (2020). Advances in carbon capture, utilization and storage. *Applied Energy*, 278, 115627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115627>

Zuin, V., Eilks, I., Elschami, M. & Kümmerer, K. (2021). Education in green chemistry and in sustainable chemistry: Perspectives towards sustainability. *Green Chemistry*, 23(4), 1594–1608. Scopus. <https://doi.org/10.1039/d0gc03313h>

Zuin, V., Segatto, M. L., Zandonai, D. P., Grosseli, G. M., Stahl, A., Zanotti, K. & Andrade, R. S. (2019). Integrating Green and Sustainable Chemistry into Undergraduate Teaching Laboratories: Closing and Assessing the Loop on the Basis of a Citrus Biorefinery Approach for the Biocircular Economy in Brazil. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2975–2983. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00286>

6.2 Abkürzungsverzeichnis

AECC	Austrian Educational Competence Center
BMBWF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klima
BNE	Bildung für nachhaltige Entwicklung
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture, Storage and Utilization
DBR	Design-Based-Research
EO	Erkenntnisse gewinnen Oberstufe
KO	Konsequenzen ziehen Oberstufe
LC-Bioraffinerie	Lignocellulose-Bioraffinerie
LP	Lehrperson(en)
PBT-Stoffe	Persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe
QR-Codes	Quick-Response-Codes
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
SDGs	Sustainable Development Goals
SuS	Schüler:innen
WO	Wissen organisieren Oberstufe

6.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des didaktischen Dreiecks nach Kattmann et al. (1997) von Sarah Zloklikovits. Lizenz: CC-BY-4.0	4
Abbildung 2: Entwicklungsstand der Arbeit im April 2023. Quelle: Eigene Darstellung	8
Abbildung 3: Entwicklungsstand der Arbeit im März 2023. Quelle: Eigene Darstellung	8
Abbildung 4: Entwicklungsstand der Arbeit im Juni 2023. Quelle: Eigene Darstellung	8
Abbildung 5: Zuordnung der 12 Prinzipien zu 5 Zielen. Quelle: BMK, 2022	17
Abbildung 6: Vergleich eines linearen und eines zirkulären chemischen Prozesses. Quelle. In Anlehnung an https://www.organische-chemie.ch/OC/themen/gruene-chemie.htm	18
Abbildung 7: Vergleich der allgemeinen Verfahrenskette und der Begrifflichkeiten in der Bio- und Erdölraffinerie. Quelle: Eigene Darstellung	23
Abbildung 8: Struktur eines Cellulosemoleküls (links) und eines Amylosemoleküls (rechts). Quelle: Eigene Darstellung	27
Abbildung 9: Struktur eines Hemicellulosemoleküls. Quelle: Eigene Darstellung	28
Abbildung 10: Ausschnitt aus der Struktur eines Lignin-Moleküls. Quelle: Eigene Darstellung	29
Abbildung 11: Reaktionsschema der Kraft-Aufschlusses. Quelle: In Anlehnung an Otromke et al. (2019)	30
Abbildung 12: Erhebungsbogen für den Assoziationstest. Quelle: Eigene Darstellung	36
Abbildung 13: Kreisdiagramme mit prozentuellen Anteilen von AHS-/BHS- Schüler:innen und Schüler:innen der 11. und 12. Schulstufe. Quelle: Eigene Darstellung	37
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Datenanalyse. Quelle: In Anlehnung an Mayring und Gläser-Zikuda (2008)	37
Abbildung 15: Darstellung der entwickelten Haupt- und Subkategorien. Quelle. Eigene Darstellung	38
Abbildung 16: Prozentuelles Vorkommen von Nennungen der Kategorien in der Summe der Dokumente. Quelle: Eigene Darstellung	41
Abbildung 17: Codewolken der 11. Schulstufe (links) und der 12. Schulstufe (rechts). Quelle: Eigene Darstellung	41
Abbildung 18: Codelandkarte über die gesamte Stichprobe. Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abbildung 19: Ausschnitt aus einem Erhebungsbogen, auf dem ein innerer Widerspruch der Konstrukte Bio und Raffinerie erkennbar ist. Quelle: Eigene Darstellung	43
Abbildung 20: Schematischer Aufbau einer Unterrichtseinheit nach dem Sandwich-Prinzip. Quelle: Kadmon et al. (2008), S.630	44
Abbildung 21: Struktur des ScienceSpots 'Holz'. Legende: Hauptstrang (schwarz), Nebenstränge (grün), Verweise zu anderen ScienceSpots (grau), Abbildungen (rosa), interaktive Elemente (gelb). Quelle: Eigene Darstellung	60

Abbildung 22:Struktur des ScienceSpots 'Bioraffinerie'. Legende: Haupstrang (schwarz), Nebenstränge (grün), Verweise zu anderen ScienceSpots (grau), Abbildungen (rosa), interaktive Elemente (gelb). Quelle: Eigene Darstellung61

6.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die 12 Prinzipien der Grünen Chemie. Quelle: In Anlehnung an Anastas & Warner (1998) und BMK (2021)	10
Tabelle 2: Einteilung gängiger Lösungsmittel. Quelle: In Anlehnung an Alfonsi et al. (2008, S.32)	13
Tabelle 3: Überblick über die Fraktionen bei der fraktionierten Destillation. Quelle: In Anlehnung an Behr et al. (2010)	20

7 Anhang

7.1 Zusammenfassung (deutsch) und Abstract (englisch)

Zusammenfassung

Fossile Rohstoffe, seltene Erden, Wasser – der Umgang mit Ressourcen stellt eine globale und epochale Herausforderung für unsere Gesellschaft dar. Um solche Herausforderungen bewältigen zu können, müssen Menschen auf politischer, industrieller und besonders auch individueller Ebene Verantwortung übernehmen. Der Chemieunterricht bietet dabei einen Rahmen, um die Urteils- und Handlungskompetenz junger Menschen im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte zu fördern, Unterrichtsmaterial rund um Themen der Grünen und nachhaltigen Chemie in angemessener Qualität und Komplexität ist jedoch noch rar. Das Ziel dieser Arbeit war es daher, eine Unterrichtsreihe sowie dazu benötigtes Material zur Grünen und nachhaltigen Chemie am Beispiel Bioraffinerie von Holz zu entwickeln. Die Unterrichtsplanung erfolgte anhand des Modells der didaktischen Rekonstruktion, im Zuge dessen eine fachliche Klärung, eine Erhebung von Assoziationen der Lernenden sowie eine didaktische Strukturierung durchgeführt wurde. Die entwickelte Unterrichtsreihe besteht aus sechs Einheiten zu je 45 Minuten und behandelt die Themen Grüne und nachhaltige Chemie, Erdöl- und Bioraffinerie, Holzchemie sowie ausgewählte Themen der organischen Chemie. Damit trägt die Unterrichtsreihe zur Bildung eines Grundstocks an fachlich und fachdidaktisch aufgearbeitetem Material rund um das Thema Grüne und nachhaltige Chemie bei.

Abstract

Fossil fuels, rare earths, water – the use of resources represents a global and epochal challenge for our society. In order to meet such challenges, people have to take responsibility at the political, industrial and especially the individual level. Chemistry lessons offer a framework to promote young people's ability to make judgmental decisions utilizing scientific ideas with regard to sustainability aspects, but teaching material on topics of green and sustainable chemistry of appropriate quality and complexity is still rare. The aim of this work was therefore to develop a series of lessons and the necessary material on green and sustainable chemistry using the example of the biorefinery of wood. Lessons were planned based on the model of educational reconstruction, in the course of which a clarification of the scientific content, an investigation on student's conceptions as well as the design of the learning environment were conducted. The developed series of lessons consists of six units of 45 minutes each and deals with the topics green and sustainable chemistry, petroleum and biorefinery, wood chemistry as well as selected topics of organic chemistry. In this way, the series of lessons contributes to the creation of a basic stock of teaching material on the subject of green and sustainable chemistry with a solid scientific and educational foundation.

7.2 Material zur Erhebung an Schulen

a) Organisationsplan der Durchführung der wissenschaftlichen Erhebung

Die Erhebung soll im April 2023 stattfinden. Pro Jahrgang (11. und 12. Schulstufe) sollen zwei Klassen á ca. 30 Schüler:innen an der Erhebung teilnehmen. Nach Erlaubnis der Direktion wird ein Termin für die Erhebung festgelegt und ungefähr eine Woche vor der Erhebung werden Einverständniserklärungen sowie Informationsschreiben verteilt. Am Tag der Erhebung werden nach einer kurzen Einführung und dem Absammeln der Einverständniserklärungen Erhebungsbögen mit dem zentralen Begriff „Bioraffinerie“ ausgeteilt. Die Teilnehmer:innen notieren ihre Assoziationen zu diesem Begriff auf dem Erhebungsbogen. Nach 5 Minuten werden die Bögen eingesammelt und die Erhebung ist beendet.

b) Abriss der theoretischen Grundlagen für die wissenschaftliche Erhebung

Ziel der Masterarbeit ist die Entwicklung einer Lerngelegenheit für Schüler:innen der Sekundarstufe II. Basierend auf dem Modell der didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 2012) stehen Überlegungen zu fachlichen und fachdidaktischen Inhalten der Lerngelegenheit am Anfang solch einer Entwicklung. Fachliche Grundlagen beinhalten neben Wissen über Grüne und nachhaltige Chemie und die Chemie des Holzes besonders Wissen über Prozesse und Produkte der Bioraffinerie. Zu fachdidaktischen Grundlagen zählt ein fundiertes Wissen über Lernendenvorstellungen der Zielgruppe.

Bis dato sind der Verfasserin keine Quellen bekannt, die Informationen über Vorstellungen, Assoziationen und Vorwissen von Schüler:innen der österreichischen Sekundarstufe II zum Thema Bioraffinerie enthalten. Die Erhebung in Form eines freien Mind-Map-Formats soll die Vorarbeit zum Füllen dieser Lücke leisten. Die Auswertung der Mind-Map erfolgt in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2008). Im nächsten Schritt wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine adressatengerechte Lernumgebung entwickelt.

c) Operationalisierung der Fragestellungen bzw. der zu überprüfenden Arbeitshypothesen

Um die Lerngelegenheit didaktisch sinnvoll strukturieren zu können, ist es notwendig, vorunterrichtliche Vorstellungen der Lernenden zu kennen. Die Mind-Map stellt eine Möglichkeit dar, um den Ausgangspunkt der Lernenden abzubilden. Die Forschungsfrage lautet:

- Welche Assoziationen haben Lernende der Sek. II zum Thema Bioraffinerie?

Es wird angenommen, dass wenig fachliche Grundlagen rund um den Begriff Bioraffinerie bekannt sind. Eine weitere Hypothese ist die Assoziation des Begriffs Bioraffinerie mit Aspekten der Nachhaltigkeit, wie beispielsweise „Bio“ und „grün“. Oder, dass „Raffinerie“ mit „Industrie“ und somit eher negativ assoziiert wird und dadurch ein innerer Widerspruch entsteht.

d) Vorlage des Untersuchungsmaterials

Im Rahmen einer Masterarbeit in Zusammenhang mit dem Projekt SpottingScience entwickeln wir eine Lerngelegenheit rund um das Thema „Bioraffinerie“. Daher interessiert uns, was dir alles zum Begriff „Bioraffinerie“ einfällt. Deine Teilnahme ist freiwillig und anonym. Dauer: 5 min.

Was fällt dir zum Begriff *Bioraffinerie* ein?

Bitte notiere und/oder zeichne alles, was dir in den nächsten fünf Minuten dazu in den Kopf kommt. Es gibt kein Richtig oder Falsch.

Vielen Dank für deine Mitarbeit!



Bioraffinerie

e) Angabe hinsichtlich der Dauer der Untersuchung pro Schüler:in und Klasse sowie Ein- und Ausschlusskriterien der Stichprobe

Dauer der Erhebung:

Um die Erhebung bei möglichst großer Stichprobe ökonomisch und zugleich kurzweilig zu halten, wurde die Methode einer Mind-Map gewählt. Vor der Erhebung findet eine kurze Vorstellung der Verfasserin und der Erhebung statt. Alle Teilnehmer:innen bearbeiten die Aufgabe gleichzeitig.

Dauer der Einführung: 5 Min.

Dauer der Erhebung: 5 Min.

Dauer des Abschlusses: 5 Min.

Dauer des Schulbesuchs in einer Klasse gesamt: 15 Min.

Auswahl der Stichprobe:

An der Erhebung dürfen Schüler:innen teilnehmen, die ...

... im laufenden Schuljahr die 11. oder 12. Schulstufe (7. bzw. 8. Klasse) einer Wiener AHS/BHS besuchen.

... eine Einverständniserklärung einer erziehungsberechtigten Person vorweisen können.

Von der Erhebung werden Schüler:innen ausgeschlossen, die ...

... nicht die beschriebene Schulstufe bzw. Klasse besuchen.

... keine von Erziehungsberechtigten unterschriebene Einverständniserklärung vorweisen können.

... sich am Tag der Erhebung physisch oder psychisch nicht in der Lage fühlen, daran teilzunehmen.

Die Schüler:innen können die Teilnahme an der Erhebung jederzeit und ohne Angabe von Gründen abbrechen.

f) Angaben zur geplanten Auswertungsmethode

Die Auswertung der Mind-Maps wird durch die Verfasserin der Masterarbeit durchgeführt. Angelehnt an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2014) werden zuerst Ein- und Ausschlusskriterien für Beiträge definiert, sodass nur für die Forschung relevante Daten betrachtet werden können. Anschließend werden induktiv (also aus den Daten heraus) Kategorien gebildet. Da im Laufe der Auswertung Kategorien hinzukommen können, wird das Material immer wieder überarbeitet. Ein Teil der Daten wird zum Abgleich von einer weiteren Person kategorisiert. Die Anzahl der Nennungen pro Kategorie wird quantifiziert. Anschließend werden die Nennungen vor dem Hintergrund bekannter Lernendenvorstellungen interpretiert. Die Analyse der Assoziationen der Teilnehmenden dient der Lernpotenzialerhebung (vgl. Duit et al., 2012).

Verwendete Literatur :

- Duit, R., Gropengießer, H., Kattman, U., & Parchmann, I. (2012). The Modell of Educational reconstruction—A framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe: A Retrospective and Prospective* / (S. 13–37). SensePublishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6091-900-8_2
- Mayring, P., & Gläser-Zikuda, M. (Hrsg.). (2008). *Die Praxis der qualitativen Inhaltsanalyse* (2., neu ausgestattete Auflage). Beltz Verlag.
- Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: Theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Social science open access repository. Klagenfurt. Retrieved from <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/39517>.

g) Elternbrief

Information für Erziehungsberechtigte

Für eine Masterarbeit am österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien werden Assoziationen von Schüler:innen erhoben. Dazu werden Schüler:innen der 11. und 12. Schulstufe gesucht. Die Erhebung findet während der Unterrichtszeit statt und dauert ca. 10-15 Minuten. Ziel der Erhebung ist es, Assoziationen der Schüler:innen zu einem Thema aus der grünen und nachhaltigen Chemie zu sammeln, um anschließend eine adressatengerechte Lerngelegenheit zu entwickeln. Außerdem können im Anschluss auch gerne Fragen zu Studium und Universität beantwortet werden.

Die Daten werden in Form einer Mind-Map erhoben. Die Erhebung ist anonym und es werden keine personenbezogenen Daten erfasst!

Ich würde mich sehr über eine rege Teilnahme freuen.

Bei Fragen können Sie sich gerne bei mir melden!

Alexandra Tepla, BEd BSc

Universität Wien Universität Wien

AECC Chemie

alexandra.tepla@univie.ac.at

<https://aeccc.univie.ac.at/>

Univ.-Prof. Anja Lembens Anja

Universität Wien Universität Wien

AECC Chemie

anja.lembens@univie.ac.at

<https://aeccc.univie.ac.at/>

Einverständnis der Erziehungsberechtigten

Hiermit bestätige ich, dass _____ an der Erhebung teilnehmen darf. Ich bin einverstanden, dass die erhobenen Daten anonymisiert ausgewertet und für wissenschaftliche Zwecke genutzt werden.

Ort, Datum

Unterschrift

i) Informationsschreiben an die Lehrperson

Informationsschreiben an die Lehrperson

Sehr geehrte Chemielehrperson!

Ich bin Studentin an der Universität Wien und schließe dieses Semester mein Masterstudium Lehramt Chemie und Bewegung und Sport ab. Dazu verfasse ich eine Masterarbeit mit dem Arbeitstitel „Entwicklung einer (digitalen) Lerngelegenheit zur grünen und nachhaltigen Chemie am Beispiel Bioraffinerie von Holz“ am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens.

Im Sinne einer didaktischen Rekonstruktion ist es für mich wichtig, Assoziationen zu einem Thema aus dem Bereich der grünen und nachhaltigen Chemie zu kennen. Dazu möchte ich eine Erhebung in Form einer Mind-Map bei Schüler:innen und Chemielehrpersonen an Ihrem Schulstandort durchführen. Die Erhebung wird die Schulstufen 11 und 12 betreffen und soll im April/Mai 2023 durchgeführt werden.

Die Erhebung der Daten erfolgt in Form einer Mind-Maps und dauert inkl. Erklärung 10-15 Minuten. Die Erziehungsberechtigten der Schüler:innen werden selbstverständlich mittels eines Elternbriefs über die Erhebung informiert und ihre Zustimmung eingeholt. Insgesamt wird die Teilnahme von jeweils zwei Klassen pro Schulstufe und ihrer jeweiligen Chemielehrperson angestrebt. Die Erhebungsbögen werden anonym auszufüllen sein und die erhobenen Daten werden nur zur Forschung für meine Arbeit verwendet.

Wenn Sie mit Ihrer Klasse an der Erhebung teilnehmen möchten, schreiben Sie bitte eine kurze Nachricht mit dem Namen Ihrer Schule sowie der teilnehmenden Klasse(n) an alexandra.tepla@univie.ac.at. Ich werde Sie umgehend kontaktieren, um Weiteres zu besprechen. Füllen Sie bitte außerdem den unten angefügten Abschnitt aus und geben ihn am Tag der Erhebung bei mir ab.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

Alexandra Tepla, BEd BSc
Universität Wien Universität Wien
AECC Chemie
alexandra.tepla@univie.ac.at
<https://aeccc.univie.ac.at/>

Einverständniserklärung

Ich, _____, nehme mit meiner/n Klasse/n an der Erhebung teil.

E-Mail-Adresse der Lehrperson: _____

Teilnehmende Klasse(n): _____

Datum, Unterschrift

7.3 Unterrichtspläne

Einheit 1: Was ist Grüne und nachhaltige Chemie?

Phase	Dauer	Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Einstieg	10 Min.	Video zur Grünen Chemie Österreich: Beispiele		1. Video der Plattform GC anschauen	Beamer + Endgerät mit Internetzugang
SuS	10 Min.	Nachbereitung des Videos	SuS... ... können den Begriff „Grüne und nachhaltige Chemie“ erklären. ... können zum Video Gedanken formulieren, sortieren, kommunizieren und argumentieren.	1. Einzelaufgabe: Stichwörter sammeln (Was ist bekannt, was neu, was war klar, was hat irritiert und wieso?) 2. Think-Pair-Share: Besprechen der Notizen	
SuS	10 Min.	12 Prinzipien der GC nach Anastas & Warner bzw. 5 Ziele der Plattform	SuS... ... können aus vorgegeben Quellen eigenständig Informationen beschaffen. ... können die 12 Prinzipien der Chemie sinnvoll zu 5 Zielen zusammenfassen. (Wissen strukturieren)	1. Einteilen in Kleingruppen 2. Austeilen des Arbeitsblattes 3. SuS sortieren die 12 Prinzipien zu den 5 Zielen	internetfähige Endgeräte, Arbeitsblatt: Grüne und nachhaltige Chemie Verknüpfung zu SpottingScience
SuS	10 Min.	Präsentation und Diskussion der Einteilung	SuS... ... können ihre Ergebnisse präsentieren. ... können eigene Zuordnungen begründen. ... können Zuordnungen anderer Gruppen diskutieren.	1. Eine Gruppe beginnt und hängt die Prinzipien zu 5 Zielen auf der Tafel/einem Whiteboard auf. 2. Weitere Gruppen folgen und erklären, wieso sie sich für die Zuordnung entschieden haben. 3. Zum Schluss werden einzelne Zuordnungen diskutiert und ein Poster aufgehängt.	

Abschluss	5 Min.	Notwendigkeit der Grünen und nachhaltigen Chemie	SuS... ... können Schlüsse aus der Einheit ziehen. ... können die Relevanz der Grünen Chemie diskutieren.	1. Rückblick: (Wozu) brauchen wir Grüne und nachhaltige Chemie? Konkrete Beispiele?	
-----------	--------	--	---	---	--

Einheit 2: Der Rohstoff Erdöl

Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Entstehung von Erdöl, Einteilung von Kohlenwasserstoffen, Fraktionierte Destillation, Erdölprodukte, Alternativen	SuS können... ... die Entstehung von Erdöl beschreiben. ... aus einer vorgegebenen Quelle Informationen zur Auftrennung von Rohöl entnehmen. ... Stoffe anhand ihres Siedepunktes passenden Fraktionen zuordnen. ... Erdölprodukte im Alltag nennen. ... die Bedeutung von Erdöl(-produkten) für unsere Gesellschaft erläutern.	Selbstlernaufgabe: Schwarzes Gold Entstehung, Zusammensetzung, Förderung, Destillation, Produkte	Arbeitsblatt: Der Rohstoff Erdöl Internetzugang, Mobiles Endgerät

Einheit 3: Funktionelle Gruppen

Phase	Dauer	Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Einstieg	5 Min.	Wiederholung Erdöl		Blitzlicht: Nach kurzer Bedenkzeit soll jede:r Schüler:in in beliebiger Reihenfolge einen Satz sagen, der einen wesentlichen Aspekt der letzten Stunde beleuchtet.	
LP	10 Min.	Einbringen der Definition von Stoffklassen und funkt. Gruppen	SuS... ... können die Begriffe Stoffklasse und funkt. Gruppe erklären. ... können erklären, dass sich Stoffe nach Stoffklassen einteilen lassen.	1. Bis jetzt nur mit Kohlenwasserstoffen beschäftigt, die nur Kohlenstoff- und Wasserstoffatome enthalten → Es gibt aber auch (bei Erdöl) Stoffe, bei denen ein oder mehrere Wasserstoff-Atome durch andere Atome bzw. Atomgruppen ersetzt sind. 2. Definition Stoffklassen und funktionelle Gruppen.	
SuS	15 Min.	Erarbeiten der funkt. Gruppen	SuS... ... können selbstständig relevante Quellen ausfindig machen und Informationen zur vorgegebenen Stoffklasse auswählen. ... können die wichtigsten Stoffklassen und ihre funktionellen Gruppen beschreiben sowie Beispiel dazu nennen.	1. Einteilung der SuS in 8 Gruppen (Alkane/Alkene/Alkine, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Amine, Carbonsäuren, Ester, Nitrile) 2. Recherche zur zugeteilten Gruppe → Ausfüllen eines Arbeitsblatts (funkt. Gruppe, Stoffklasse, Nomenklatur, Beispiele aus Bioraffinerie) 3. Präsentation der Ergebnisse und Ergänzen des Arbeitsblattes um restliche Stoffklassen	Arbeitsblatt „Stoffgruppen-Heftchen“
Abschluss	10 Min.	Festigung der Stoffklassen	SuS... ... können funktionelle Gruppen erkennen. ... können Stoffe den passenden Stoffklassen zuordnen.	Spiel: Welche Stoffklasse? Beispiele aus der Erdölraffinerie! (Essigsäure, Ethanol, Aceton, Ethylenglycol, Dimethylether, Ethylal, Methanol)	Kahoot oder 1,2 oder 3

Einheit 4: Nachwachsende Rohstoffe – Holz

Phase	Dauer	Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Einstieg	10 Min.	Einstieg in nachwachsende Rohstoffe, Definition	SuS... ...aktivieren ihr Vorwissen zu nachwachsenden Rohstoffen ... können nachwachsende und fossile Rohstoffe unterscheiden	Problematisierung Erdöl (Bildersammlung) Alternativen? Nachwachsende Rohstoffe: Welche sind den SuS bekannt? Was wird daraus produziert? → Sammlung	Kärtchen bzw. digital
LP	10 Min.	Bestandteile von Holz	SuS... ... können ihre Zuordnungen fachlich angemessen begründen.	Gemeinsame Besprechung der ersten Aufgabe, Definition nachwachsende Rohstoffe + Beispiele	Tafelbild bzw. PowerPoint-Präsentation
SuS	20 Min.	Holzchemie: Struktur von Lignin, Cellulose und Hemicellulose Eigenschaften von Holz, Holzaufschluss mittels Kraft-Verfahren	SuS... ... können die Bestandteile von Holz (Lignin, Cellulose und Hemicellulose) nennen. ... können die Bestandteile von Holz aus chemischer Perspektive beschreiben. ... können die Eigenschaften der Bestandteile grob auf ihre Struktur zurückführen.	Übungen zu Holzchemie mithilfe des ScienceSpots	Arbeitsblatt: Der Rohstoff Holz
Abschluss	5 Min.			Vergleichen und Besprechen der Aufgaben?	

Einheit 5: Bioraffinerie von Holz

Phase	Dauer	Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Einstieg	10 Min.	Einstieg in das Thema über Vorwissen	SuS... ... aktivieren ihr Vorwissen zu Bioraffinerien	Bioökonomie-Story „Kapitel 2 – Intro – Die Forschung dahinter“ unter https://biooekonomie.pageflow.io/bioraffinerie-entdecken#331151	
LP	5 Min.	Bioraffinerie von Holz: Ausgangsstoffe, Prozesse, Produkte, Zahlen/Daten/Fakten	SuS... ... können Rohstoffe, Zwischenstufen, Grundchemikalien und Produkte der Bioraffinerie nennen. ... können Prozesse in der Bioraffinerie erläutern.	Input: Bioraffinerie (PowerPoint-Folien)	PowerPoint-Präsentation + Beamer
SuS	20 Min.	Kreislaufwirtschaft, Bioraffinerien, Essigsäure, Oxidation primärer Alkohole	SuS... ... können sich selbstständig relevante Informationen zum Thema Bioraffinerie auf SpottingScience beschaffen. ... können Rohstoffe, Zwischenstufen, Grundchemikalien und Produkte der Bioraffinerie nennen. ... können Prozesse in der Bioraffinerie erläutern.	Aufgaben zur Bioraffinerie von Holz, Verlinkung zu SpottingScience	Arbeitsblatt: Manchmal ist der Holzweg der Richtige!
SuS	10 Min.	Anwendung der Prinzipien für GC	SuS... ... können die Prinzipien der Grünen Chemie an einem Beispiel nennen. ... können Veränderungen in Richtung nachhaltigere Chemie vorschlagen.	Methode: Think-Pair-Share (Warum) sind Bioraffinerien „grün“? Hausaufgabe: Material lesen zu Herstellungsverfahren v. Essigsäure. Argumente sammeln und in der nächsten Einheit mitbringen.	SpottingScience, Prinzipien der GC

Einheit 6: Beispiel Essigsäure

Phase	Dauer	Inhalte	Ziele	Ablauf	Material
Einstieg	10 Min.	Einstieg über Geruchsprobe		LP sagt, dass es in dieser Stunde um einen wichtigen industriellen Stoff gehen wird. SuS sollen „erriechen“, um welchen → Essigsäure Evtl. Summenformel geben → Struktur zeichnen lassen	Fläschchen mit Essigessenz
LP	5 Min.	Relevanz von Essigsäure für Alltag und Technik	SuS... ... können die Relevanz von Essigsäure in Naturwissenschaft und Technik einschätzen.	Input: Daten/Zahlen/Fakten zu Essigsäure → Advance Organizer	Advance Organizer (PowerPoint-Folie)
SuS	15 Min.	Vorbereitung auf Podiumsdiskussion: Informationen zu versch. Herstellungsprozessen beschaffen & strukturieren, Argumente formulieren	SuS... ... können aus gegebenen Quellen Informationen entnehmen, einordnen und bewerten. SuS... ... können in einer Gruppe sinnstiftend kommunizieren.	Planspiel: Vorbereitungsphase 1. Einzelaufgabe: Überblick beschaffen. 2. Sammeln der wichtigsten Argumente in Paaren, dann in Kleingruppen	Material zu Herstellungsverfahren
SuS	15 Min.	Podiumsdiskussion zu Herstellungsverfahren von Essigsäure	SuS... ... können Argumente für zu verschiedenen Verfahren aufbauen und entkräften. ... können zu den Herstellungsverfahren von Essigsäure Stellung nehmen. ... können sich aktiv an einer Diskussion rund um Herstellungsverfahren beteiligen.	Planspiel: Diskussionsphase 1. Es wird ein Rat, ein:e Moderator:in und ein:e Schriftführer:in bestimmt 2. Gruppen präsentieren und diskutieren ihre Empfehlungen 3. Rat trifft eine Entscheidung und begründet diese	Evtl. Tafel oder Flipchart zum Sammeln der Argumente

Arbeitsblatt: Grüne und nachhaltige ChemieAufgabe 1: Prinzipien der Grünen Chemie

Öffne die Website: <https://spottingscience.at/gruene-chemie/> und lies dir die Beschreibung der 12 Prinzipien der Grünen Chemie durch. Mache dir gegebenenfalls Notizen!



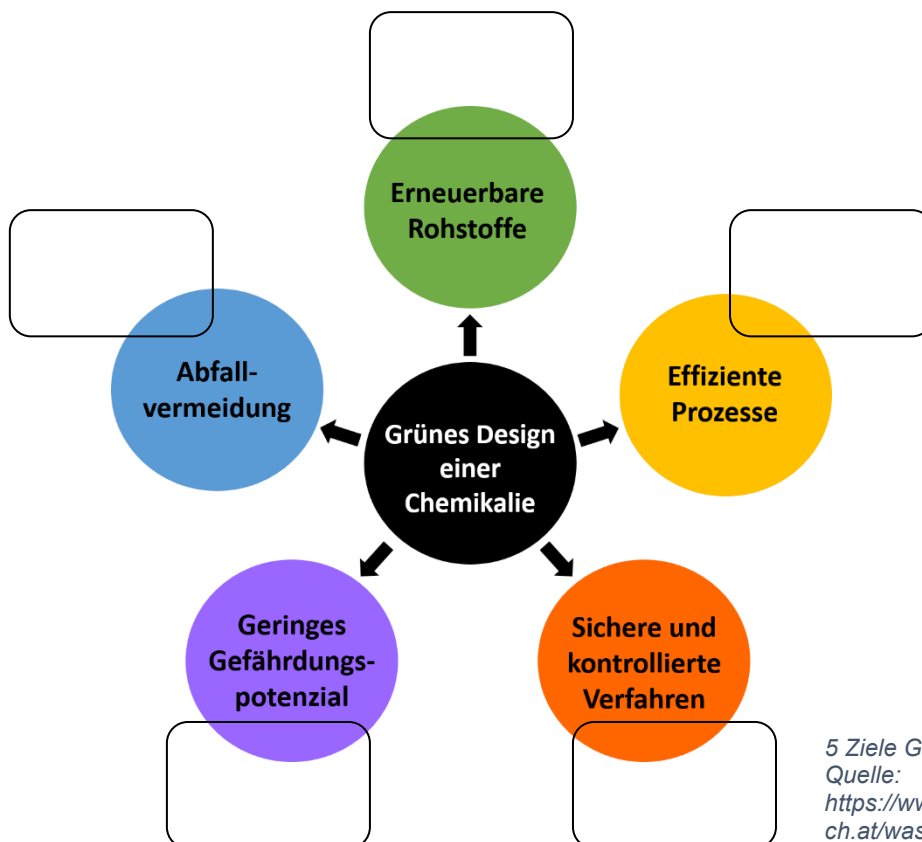
Die 12 Prinzipien der Grünen Chemie (nach Anastas & Warner)	
1. Abfallvermeidung	7. Einsatz erneuerbarer Rohstoffe
2. Maximale Atomökonomie	8. Vermeidung von Zwischenprodukten
3. Design weniger gefährlicher Chemikalien	9. Einsatz von Katalysatoren
4. Design sicherer Chemikalien	10. Design abbaubarer Stoffe
5. Verwendung sicherer Lösungsmittel und Reaktionsbedingungen	11. Echtzeitanalyse zur Vermeidung von Umweltverschmutzung
6. Erhöhung der Energieeffizienz	12. Minimierung des Störfallpotentials

Die 12 Prinzipien nach Anastas und Warner (1998). Quelle:
https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/aktuelles/veranstaltungen/konzeptpapier_gruene_chemie.pdf

Aufgabe 2: Ziele der Grünen und nachhaltigen Chemie

12 Prinzipien sind schon eine ganze Menge. Um eine Übersicht zu bekommen, können diese 12 Prinzipien zu 5 Zielen zugeordnet werden.

Phase 1: Überlegt zu zweit, welche Prinzipien zu welchen Zielen passen. Tragt die Zahlen zum passenden Ziel ein!



5 Ziele Grüner Chemie.
 Quelle:
<https://www.gruenechemieoesterreich.at/was-ist-gruenechemie>

Phase 2: Präsentiert eure Zuordnung euren Mitschüler:innen und schaut, ob ihr euch einigen könnt. Besprecht Unterschiede in euren Zuordnungen! Die Ergebnisse werden auf einem Poster festgehalten.

Arbeitsblatt: Der Rohstoff Erdöl

Erdöl wird umgangssprachlich oft auch „Das schwarze Gold“ genannt. Aber warum ist das so? In der folgenden Einheit gehst du Erdöl auf den Grund!

Aufgabe 1: Wie entsteht Erdöl?

Die Entstehung von Erdöl begann vor rund 150 Mio. Jahren. Bringe die Schritte in die richtige Reihenfolge!

1	Durch die Temperatur und Hitze bilden sich im Faulschlamm Bakterien.
2	Pflanzliche und tierische Überreste (totes organisches Material) sinken auf den Erdboden und bilden aufgrund von Sauerstoffmangel Faulschlamm.
3	Über viele Jahre drücken weitere Schichten auf das Erdölmuttergestein.
4	Diese Bakterien verwandeln den Faulschlamm in eine Mischung verschiedener Kohlenwasserstoffe: Erdöl
5	Sedimente wie Ton und Sand mischen sich unter den Faulschlamm und es bildet sich das Erdölmuttergestein.

Aufgabe 2: Die Zusammensetzung von Rohöl

Erdöl ist ein Stoffgemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen. Einige davon siehst du in der untenstehenden Tabelle. Vervollständige die Tabelle mit den richtigen Schreibweisen der Moleküle!

	Strukturformel	Halbstrukturformel	Skelettformel
Alkane		$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$	
Cycloalkane		$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{CH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{CH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{CH} \end{array}$	
Aromaten			
Naphthensäuren		$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})\text{OH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2 \end{array}$	
Phenole	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$		
Thioalkohole			$\text{H}^3\text{C}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{SH}$

Aufgabe 3: Auftrennung des Stoffgemisches

Du siehst also: Erdöl besteht aus vielen unterschiedlichen Molekülen. Um daraus Produkte zu machen, muss das Stoffgemisch zuerst aufgetrennt werden.

Sieh dir den Ausschnitt von Minute 11:53-14:38 des Films „Multitalent Erdöl“ an. Nutze dafür den folgenden Link oder QR-Code: <https://www.planet-schule.de/schwerpunkt/total-phaenomenal-energie/multitalent-erdoel-film-100.html>



Bearbeite anschließend folgende Aufgaben:

1. Nenne die Bestandteile von Erdöl!

2. Gib Eigenschaften an, anhand derer die Komponenten getrennt werden können!

3. Gib an, wie man den Vorgang der Trennung nennt!

4. Erkläre in eigenen Worten den Ablauf der fraktionierten Destillation! Verwende dabei die Begriffe Siedebereich, Destillation und Fraktion.

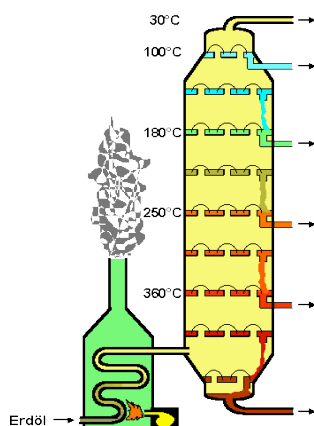
5. Vervollständige die Sätze!

Je länger die Kette des Kohlenwasserstoffs ist, desto _____ ist der Siedebereich des Reinstoffes.

Je kürzer die Kette des Kohlenwasserstoffs ist, desto _____ ist der Siedebereich des Reinstoffes.

6. Ordne die Fraktionen den passenden Siedebereichen zu!

- Gase haben den niedrigsten Siedebereich.
- Der Siedebereich des Mitteldestillats ist zwischen dem von Schwerbenzin und Heizöl.
- Schwerbenzin hat eine größere Kettenlänge als Leichtbenzin.
- Heizöl hat den zweithöchsten Siedepunkt.
- Bitumen hat mit einer Kettenlänge von > 70 Kohlenstoff-Atomen den höchsten Siedepunkt.



Destillationskolonne.

Quelle: <https://www.seilnacht.com/versuche/destill.html>

Aufgabe 4: Erdölprodukte

Hast du schon Mal darüber nachgedacht, wo wir in unserem Alltag überall Produkte aus Erdöl verwenden? Frag doch mal ChatGPT nach Anwendungsbereichen von Erdöl und schreibe fünf große Anwendungsbereiche auf! Findest du ein konkretes Produkt, dass dich überrascht hat?

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

Dieses Produkt hat mich am meisten überrascht:

Aufgabe 5: Und jetzt?

Dir ist wahrscheinlich bekannt, dass die Umweltverschmutzung durch Kunststoffe schwere Folgen für unsere Umwelt hat. Aber wusstest du, dass manche dieser Auswirkungen (z.B. Kohlenstoffdioxidgas-Ausstoß) stark mit ihrer Herstellung aus Erdöl zusammenhängen? Lies in deinem Schulbuch nach und halte fest, welche Auswirkungen Erdölprodukte auf unsere Umwelt haben!

Abschlussaufgabe:

Du hast nun einiges über die Herstellung, Verarbeitung und Verwendung von Erdöl gelernt. Aber wieso wird Erdöl denn nun „schwarzes Gold“ genannt? Stelle auf Basis deiner Erkenntnisse eine Vermutung auf!

Arbeitsblatt: Stoffgruppen-Heftchen (Abbildung)

5 Beispiel mit Namen: Endung: - _____ Funktionelle Gruppe: <u>Carbonsäure</u>	4 Beispiel mit Namen: Endung: - _____ Funktionelle Gruppe: <u>Ketone</u>	3 Beispiel mit Namen: Endung: - _____ Funktionelle Gruppe: <u>Aldehyde</u>	2 Beispiel mit Namen: Endung: - _____ Funktionelle Gruppe: <u>Alkohole</u>
<u>Amine</u> Funktionelle Gruppe: Endung: - _____ Beispiel mit Namen: 6	<u>Ester</u> Funktionelle Gruppe: Endung: - _____ Beispiel mit Namen: 7	<u>Ether</u> Funktionelle Gruppe: Endung: - _____ Beispiel mit Namen: 8	<u>Alkane</u> Merkmale: Bsp.: Endung: - _____ <u>Alkene</u> Merkmale: Bsp.: Endung: - _____ <u>Alkine</u> Merkmale: Bsp.: Endung: - _____ 1

Arbeitsblatt: Der Rohstoff Holz

Bäume besiedeln seit über 300 Mio. Jahren unsere Erde. Mithilfe ihrer starken Wurzeln und festen Rinde schützen sie sich vor Feinden und Umwelteinflüssen. Aber wie entstehen Bäume eigentlich? Und woraus? Und vor allem: Was hat das alles mit Chemie zu tun?

Einstieg: Photosynthese

Erinnere dich an deinen Biologieunterricht zurück – weißt du noch, was bei der Photosynthese passiert? Suche dir eine:n Partner:in und nimm zu den folgenden Aussagen Stellung!

Pflanzen brauchen Licht zum Wachsen, sie brauchen immer Licht.



Die Photosynthese findet in den Blättern statt.



Pflanzen brauchen wie wir Menschen Sauerstoff.



Pflanzen produzieren ihre Nahrung durch interne Prozesse.



Pflanzen nehmen Nahrung ausschließlich über die Wurzel aus dem Boden auf.



Die Endprodukte der Photosynthese sind Sauerstoff und Zucker.

Pflanzen brauchen Licht.



Concept-Cartoon zur Photosynthese.

Quelle:

<https://eduki.com/de/material/318614/concept-cartoon-fotosynthese-einstieg>

Übersetze die Photosynthese-Wortgleichung in eine chemische Reaktionsgleichung!

Tipp: Schreibe zuerst alle bekannten Verbindungen auf und leite daraus die Summenformel der Glucose ab.

Wortgleichung:

6 Kohlenstoffdioxid-Moleküle + 6 Wasser-Moleküle  Glucose-Molekül + 6 Sauerstoff-Moleküle

Chemische Reaktionsgleichung:

Die folgenden Aufgaben sollen dich dabei unterstützen, den Aufbau und Aufschluss von Holz zu verstehen. Alle Informationen zum Lösen der Aufgaben findest du auf dem ScienceSpot „Holzchemie“ unter <https://spottingsscience.at/sciencespot-holzchemie/>.



Aufgabe 1: Die Bestandteile von Holz

1. Nenne die drei Hauptkomponenten von Holz!

2. Welche prozentuellen Anteile nehmen die Komponenten ein? Gib basierend auf den Infos aus dem ScienceSpot eine Schätzung ab!

Aufgabe 2: Cellulose

Die Reaktion von Glucose-Molekülen zu Cellulose-Molekülen ist ein gutes Beispiel für eine *Kondensationsreaktion*. Betrachte die Reaktion im ScienceSpot und bearbeite folgende Aufgaben:

1. Nenne die an der Kondensationsreaktion beteiligten funktionellen Gruppen!

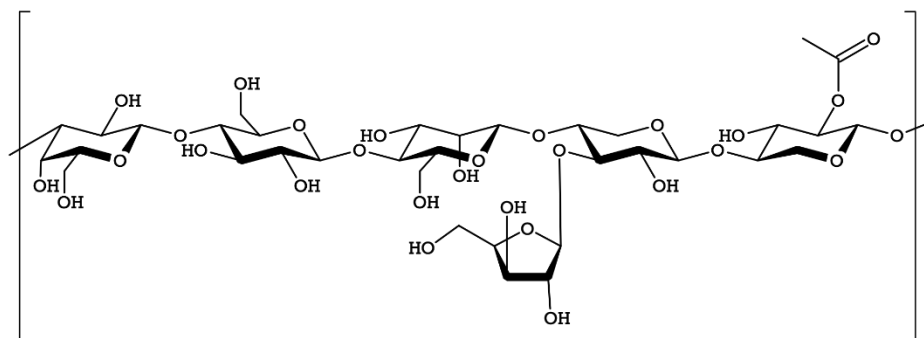
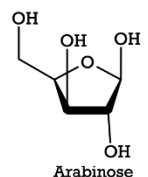
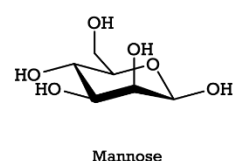
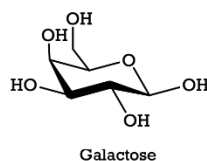
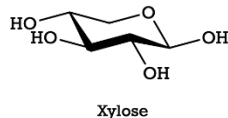
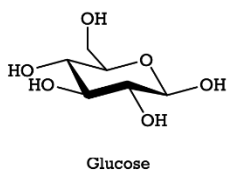
2. Nenne die funktionelle Gruppe, die bei der Reaktion entsteht!

3. Nenne das Molekül, das bei der Reaktion abgespalten wird!

4. Beschreibe in eigenen Worten eine Kondensationsreaktion!

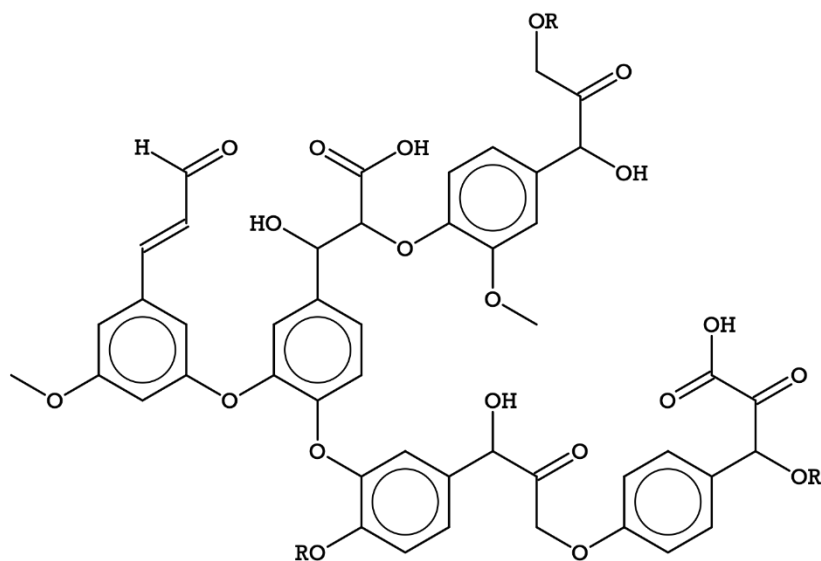
Aufgabe 3: Hemicellulosen

Hemicellulosen können aus unterschiedlichen Zuckern bestehen. Kannst du die einzelnen Zucker-Monomere im Hemicellulose-Molekül finden? Markiere die passenden Paare farblich!



Aufgabe 4: funktionelle Gruppen im Lignin

Hebe die verschiedenen funktionellen Gruppen in unterschiedlichen Farben hervor und beschrifte sie!



Zeichne eine Phenylpropan-Einheit aus dem Lignin-Molekül!

Aufgabe 5: Der Holzaufschluss

Um Komponenten von Holz stofflich nutzen zu können, müssen sie aufgetrennt werden. Der gängige Weg dafür ist der Kraft-Aufschluss. Bringe die Reaktionsschritte in die richtige Reihenfolge und markiere den Schlüsselschritt!

1	Das Sulfid-Ion bildet über einen Ring eine weitere Bindung zum β -Kohlenstoff-Atom aus und ein Phenolat-Ion wird abgespalten.
2	Die Etherbindung am α -Kohlenstoff-Atom wird gelöst.
3	Das Salz Natriumsulfid hydrolysiert zu Natrium-Ionen und Hydrogensulfid-Ionen.
4	Ein Hydrogensulfid-Ion bindet unter Abspaltung eines Wasserstoff-Ions an das α -Kohlenstoff-Atom.
5	Der Ring mit dem Schwefel-Atom wird geöffnet, es bildet sich eine Doppelbindung und das Schwefel-Atom wird frei.

Aufgabe 6: Produkte aus Holzkomponenten

Ordne die Produkte den passenden Holzkomponenten zu!

Viskose, Xylit, Essigreiniger, Vanillin, Taschentücher, 3D-Druck Filament, Glucose, Bio-Polyethylen, Watte, Zementbeimengung, Arboform®-Kunststoffe, Nylon

Cellulose	
Hemicellulosen	
Lignin	

Zusatzaufgabe: Kohlenstoffdioxid-Gas im Holz

Ein Kubikmeter Holz hat eine Masse von 500kg. Davon sind 50% aller Atome Kohlenstoff-Atome. Berechne dir über die Stoffmenge der Kohlenstoff-Atome, wie viel Kohlenstoffdioxid-Gas in einem Kubikmeter Holz gebunden werden kann! Achte dabei auf die richtigen Einheiten!

Tipp: Die Stoffmenge an Kohlenstoffdioxid-Molekülen, die gebunden werden kann, muss gleich groß sein, wie die Stoffmenge der im Holz vorkommenden Kohlenstoff-Atome.

Arbeitsblatt: Manchmal ist der Holzweg der Richtige!

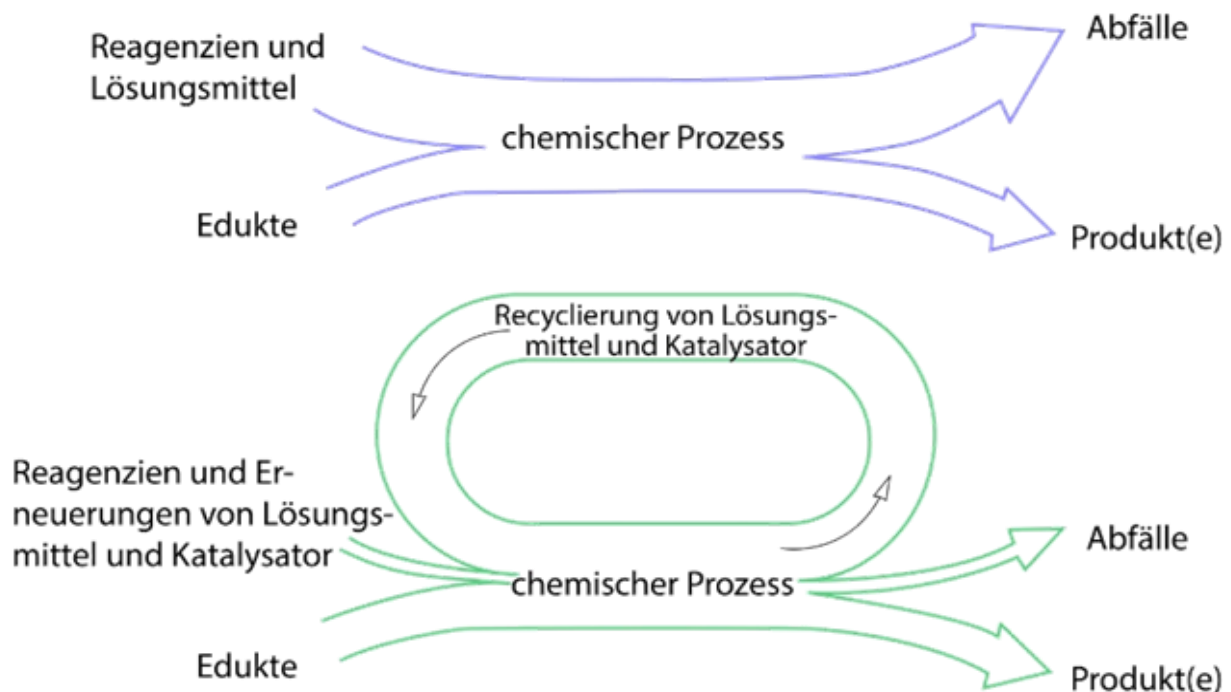
Bearbeitet folgende Aufgaben zu zweit. Alle Informationen, die ihr zum Lösen der Aufgaben benötigt, findet ihr auf dem ScienceSpot „Bioraffinerie“ unter <https://spottingsscience.at/sciencespot-bioraffinerie-von-holz>.



Aufgabe 1: Kreislaufwirtschaft ⌚ 5 Min.

Diskutiert die gegebene Abbildung zu Stoff- und Materialflüssen unter Beachtung folgender Leitfragen!

- Was stellt die Abbildung dar?
- Welche Aspekte der Abbildung scheinen für euch nachvollziehbar?
- Für welche Personen oder Interessensgruppen sind die dargestellten Vorgehensweisen relevant?
- Welche Vorteile und Chancen bieten die jeweiligen Materialflüsse?
- Welche Nachteile und Risiken bieten die jeweiligen Materialflüsse?



Haltet euer Gespräch in Form von Notizen hier fest:

Aufgabe 2: Biomasse

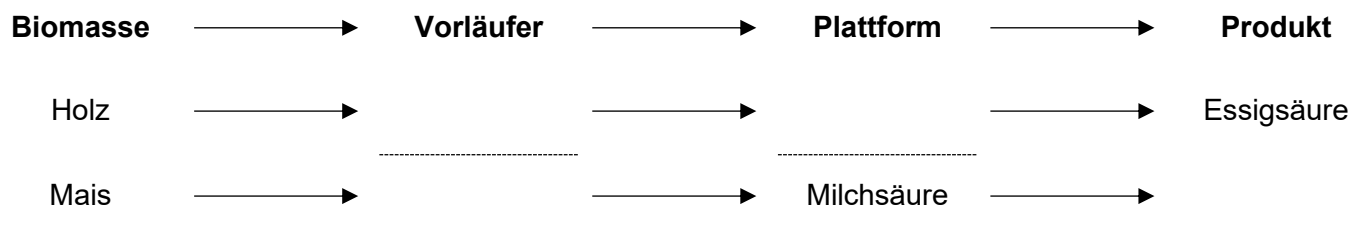
Ordnet die Biomasse der passenden Bioraffinerie zu!

Rapssaat, Holz, Silage, Mais, Sojabohnen, Bagasse, Zuckerrohr, Reis, Sonnenblumenkerne, trockene Gräser, Zuckerrüben, Weizen, Papierabfälle, Baumwollsamensamen, feuchte Gräser, Flachs, Mikroalgen, Stroh

Zucker-Bioraffinerie	
Stärke-Bioraffinerie	
Pflanzenöl-Bioraffinerie	
Algenlipid-Bioraffinerie	
Lignocellulose-Bioraffinerie	
Grüne Bioraffinerie	

Aufgabe 3: Abläufe in Bioraffinerien

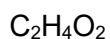
Vervollständigt das Schema!



Aufgabe 4: Das Essigsäure-Molekül

Leitet aus der Summenformel von Essigsäure die Strukturformel ab und zeichnet das Essigsäure-Molekül in der Strukturformelschreibweise! Hebt die funktionelle Gruppe farbig hervor!

Summenformel:

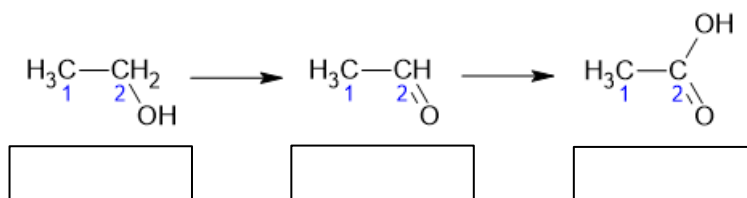


Strukturformel:

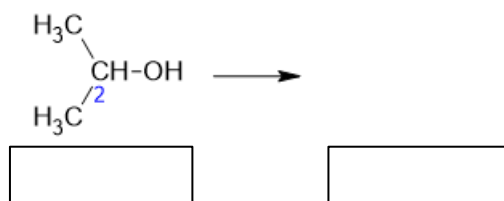
Aufgabe 5: Die Oxidation primärer Alkohole

Lest die Infobox und bearbeitet anschließend die Aufgaben!

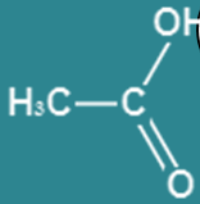
Bei der Sekundärraffination wird zuerst aus der Glucose-Lösung durch Fermentation Ethanol gewonnen. Die weiteren Reaktionen von Ethanol bis Essigsäure folgen einem grundlegenden Reaktionsschema in der organischen Chemie, nämlich der *Oxidation primärer Alkohole*:



1. Hebt die beteiligten funktionellen Gruppen hervor und benennt die Moleküle nach ihren Stoffklassen!
2. Bestimmt die Oxidationszahlen der C2-Atome!
3. Zeigt anhand des Isopropanol-Moleküls, welche Stoffklasse bei der Oxidation eines sekundären Alkohols entsteht!



Essigsäure
 CH_3COOH



PRODUKTE



VERWENDUNG



BEDARF 2021: 17 MIO. TONNEN

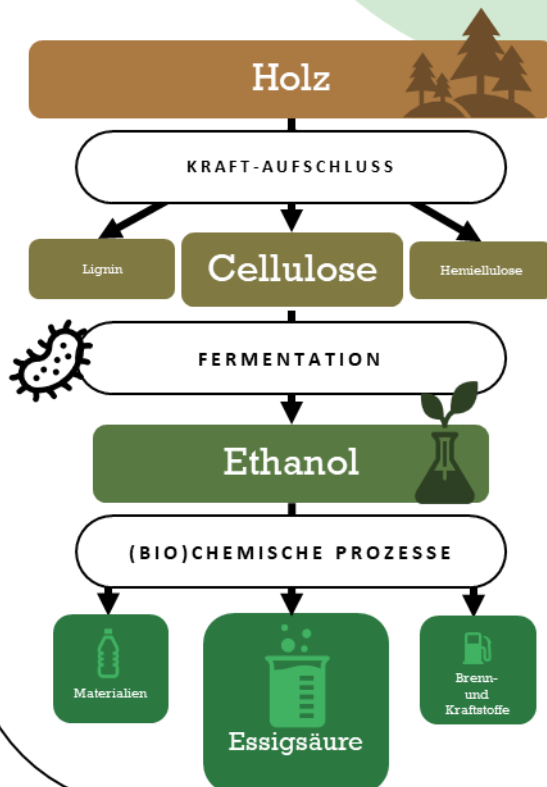


- Klebstoffe, Farben, Lacke
- Kunststoffe, Polymere
- Nahrungsmittel, Getränke
- Chemikalien
- Textilien
- Medizinische Anwendungen
- Andere Nutzung

HERSTELLUNG

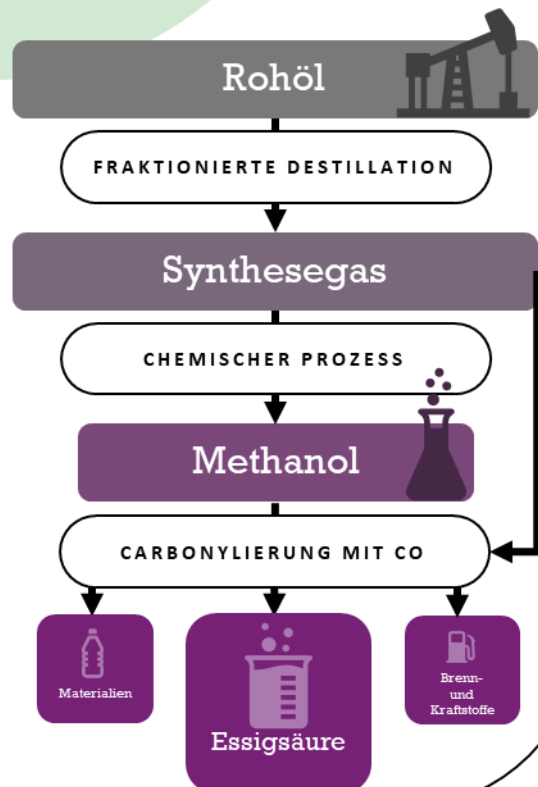
BIORAFFINERIE

Oxidation primärer
Alkohole



ERDÖLRAFFINERIE

Monsanto-Verfahren



Grüne
Chemie

Arbeitsblatt: Essigsäureherstellung

Stell dir folgende Situation vor: In Niederösterreich soll ein neue Bioraffinerie zur Herstellung von Essigsäure aus der Biomasse Pappelholz gebaut werden. Du bist Mitglied einer Kommission, die in ihrem nächsten Treffen eine Entscheidung über das Bioraffineriekonzept und den Herstellungsprozess treffen soll. Zur Vorbereitung hast du Unterlagen erhalten, die dich bei der Meinungsbildung und Entscheidungsfindung unterstützen sollen. Du hast bis zur nächsten Einheit Zeit, um dich für die Diskussion vorzubereiten.

Herstellung von Essigsäure in der Bioraffinerie:

Pappelholz wird in der Bioraffinerie zerkleinert und mithilfe einer verdünnten Säurelösung aufgeschlossen. Dabei fällt ein Stoffstrom für Lignin und einer für Hemicellulosen und Cellulose an. Die Cellulose- und Hemicellulosemoleküle werden enzymatisch hydrolysiert, sodass Glucose- und Xylose-Moleküle vorliegen. In einem weiteren Schritt werden die Einfachzucker mithilfe des Bakteriums *Moorella thermoactica* zu Essigsäure vergoren.

Fragestellung 1: Die bislang gewonnene Essigsäure entspricht bei weitem nicht der erforderlichen Reinheit von 99,8%. Da das Verfahren der Destillation sehr energieaufwändig ist, soll stattdessen eine Flüssig-Flüssig-Extraktion zur Reinigung des Produkts durchgeführt werden. Welches der beiden Verfahren würdest du empfehlen? Lies das Material zu Fragestellung 1 und begründe deine Entscheidung!

Fragestellung 2: Neben dem Stoffstrom für Cellulose und Hemicellulosen fällt auch ein Stoffstrom für Lignin an. Wegen seines hohen Brennwertes wird es in manchen Bioraffinerien vor Ort thermisch verwertet. In anderen Bioraffinerien wird das angefallene Lignin verkauft und in Kohlekraftwerken oder zur Chemikalienproduktion verwendet. Was soll mit dem Lignin passieren? Lies das Material zu Fragestellung 2 und begründe deine Entscheidung!

Bearbeite die Aufgaben zu den Fragestellungen auf den folgenden Seiten und bilde dir bis zur nächsten Einheit eine Meinung!

Fragestellung 1

Die bislang gewonnene Essigsäure entspricht bei weitem nicht der erforderlichen Reinheit von 99,8%. Da das Verfahren der Destillation sehr energieaufwändig ist, soll stattdessen eine Flüssig-Flüssig-Extraktion zur Reinigung des Produkts durchgeführt werden. Welches der beiden Verfahren würdest du empfehlen? **Notiere** dir wichtige Informationen aus dem Text in der Notizbox und **begründe** deine Entscheidung!

Variante 1 (EAX)	Variante 2 (ADX)
Extraktion mit Ethylacetat in Wasser	Extraktion mit Alamin/Diisobutylketon-Lösung (DIBK)
Nach der Fermentation wird eine 5%ige Essigsäure-Lösung in einen Flüssig-Flüssig-Extraktor mit Ethylacetat geleitet. Die Essigsäuremoleküle sind in Ethylacetat besser löslich und liegen daher in der organischen Phase vor. Diese wird von der wässrigen Phase abgetrennt und daraus durch Destillation die Essigsäurelösung gewonnen. Die <i>Destillation</i> ist sehr energieaufwändig, weil die gesamte zu reinigende Lösung verdampft werden muss. Wasser und alle Chemikalien werden vor Ort wiederaufbereitet.	Nach der Fermentation wird eine 5%ige Essigsäure-Lösung in einen Flüssig-Flüssig-Extraktor mit Alamin/ DIBK-Lösung geleitet. Essigsäuremoleküle sind in der Alamin/DIBK-Lösung besser löslich und liegen daher in der organischen Phase vor. Diese wird von der wässrigen Phase abgetrennt und daraus durch Stripping die Essigsäurelösung gewonnen. <i>Stripping</i> ist eine physikalische Trennmethode, die auf Adsorption basiert. Dadurch ist sie weniger energieaufwändig als die Destillation. Wasser und alle Chemikalien werden vor Ort wiederaufbereitet.

Aufgabe 1: **Unterstreiche** die verwendeten Chemikalien im Text und **recherchiere** sie in Hinblick auf ihre Sicherheit für Mensch und Umwelt! Tipp: Zu den meisten Chemikalien gibt es online Sicherheitsdatenblätter (z.B. von Carl Roth oder Merck Millipore). Du kannst auch die GESTIS-Stoffdatenbank dazu nutzen: <https://gestis.dguv.de/>



Zur GESTIS-Stoffdatenbank

Aufgabe 2: **Recherchiere** den Unterschied zwischen Destillation und Stripping! Nutze dazu dein Schulbuch und Internetquellen. Zwei nützliche Quellen zum Stripping-Verfahren findest du, wenn du die QR-Codes scannst. **Notiere** dir Stichworte in der Notizbox und vergiss nicht, die **Quellen dazu anzugeben!**



Stripping bei chemie.de
Stripping bei wissen.de

Raum für Notizen:

Fragestellung 2

Neben dem Stoffstrom für Cellulose und Hemicellulosen fällt auch ein Stoffstrom für Lignin an. Wegen seines hohen Brennwertes wird es in manchen Bioraffinerien vor Ort thermisch verwertet. In anderen Bioraffinerien wird das angefallene Lignin verkauft und in Kohlekraftwerken oder zur Chemikalienproduktion verwendet. Was soll mit dem Lignin passieren? **Notiere** dir wichtige Informationen aus dem Text in der Notizbox und **begründe** deine Entscheidung!

Option 1 (VO)	Option 2 (LE)
Thermische Verwertung vor Ort	Export von Lignin
Bei diesem Verfahren wird das anfallende Lignin zusammen mit Biogas vor Ort verbrannt. Die Verbrennungswärme wird genutzt, um Wasser zu erhitzen und somit Wasserdampf zu produzieren. Dazu ist ein kostspieliger Druckkessel notwendig. Die Umwandlung von Hitze zu Wasserdampf hat einen Wirkungsgrad von 80%. Der Dampf wird dann durch eine Dampfturbine geleitet, die diese thermische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die Ausbeute ist höher als die für die Produktion benötigte Energie, daher kann ein Teil der Energie in Form von elektrischer Energie in das Stromnetz eingespeist werden.	Bei diesem Verfahren wird das Lignin verkauft. Zum einen kann es in Kohlekraftwerken mit der Kohle zusammen verbrannt werden. Zum anderen kann es zur Herstellung weiterer Chemikalien genutzt werden. Dazu muss es jedoch zuerst in einem Druckkessel getrocknet und dann zur Weiterverarbeitung abtransportiert werden.

Aufgabe 1: **Hebe** die Vor- und Nachteile der beiden Optionen im Text in unterschiedlichen Farben **hervor**!

Aufgabe 2: **Recherchiere**, zu welchen Chemikalien und Produkten Lignin weiterverarbeitet werden kann! Du kannst dazu alle bisherigen Materialien nutzen (z.B. die ScienceSpots) oder die Webseite bioökonomie.de mithilfe des QR-Codes besuchen.



Lignin bei
bioökonomie.de

Notiere dir Stichworte in der Notizbox und vergiss nicht, die **Quellen dazu anzugeben**!

Raum für Notizen:

Die folgende Tabelle gibt dir einen Überblick über die Ressourcen, die bei den vier möglichen Kombinationen benötigt und produziert werden.

Aufgabe 1: Vergleiche die Kombinationen in Hinblick auf Ressourcen- und Energiebedarf und -ertrag. Welche Unterschiede und Ähnlichkeiten fallen dir bei den Kombinationen auf? **Notiere zumindest zwei Beobachtungen** und **stelle Vermutungen** auf, wie diese Ähnlichkeiten/Unterschiede zustande kommen.

	EAX VO	EAX LE	ADX VO	ADX LE
Input				
Biomasse [t]	1,9	1,9	1,9	1,9
Biogas [GJ]	53	58	19	28
Ethylacetat [kg]	5,2	5,2		
Alamin und DIBK [kg]			Je 1,9	Je 1,9
el. Energie [kwh]	0	320	0	300
Output				
Essigsäure [t]	1	1	1	1
Lignin [kg]	0	440	0	440
el. Energie [kwh]	2600	0	860	0
CO ₂ aus Lignin [t]	1,8	0	1,8	0
CO ₂ aus Biogas [t]	2,7	3,2	0,99	1,4

Tabelle in Anlehnung an Budsberg et al. (2020), S.12

Raum für Notizen:

Fazit: Schreibe in das folgende Kästchen deine Empfehlungen zum Bau der Essigsäure-Bioraffinerie und begründe sie mit den Informationen, die du gesammelt hast.

Meine Empfehlung:

7.5 Ausgefülltes Unterrichtsmaterial mit Lösungsvorschlägen

Arbeitsblatt: Grüne und nachhaltige Chemie

Aufgabe 1: Prinzipien der Grünen Chemie

Öffne die Website: <https://spottingscience.at/gruene-chemie/> und lies dir die Beschreibung der 12 Prinzipien der Grünen Chemie durch. Mache dir gegebenenfalls Notizen!



Die 12 Prinzipien der Grünen Chemie (nach Anastas & Warner)	
1. Abfallvermeidung	7. Einsatz erneuerbarer Rohstoffe
2. Maximale Atomökonomie	8. Vermeidung von Zwischenprodukten
3. Design weniger gefährlicher Chemikalien	9. Einsatz von Katalysatoren
4. Design sicherer Chemikalien	10. Design abbaubarer Stoffe
5. Verwendung sicherer Lösungsmittel und Reaktionsbedingungen	11. Echtzeitanalyse zur Vermeidung von Umweltverschmutzung
6. Erhöhung der Energieeffizienz	12. Minimierung des Störfallpotentials

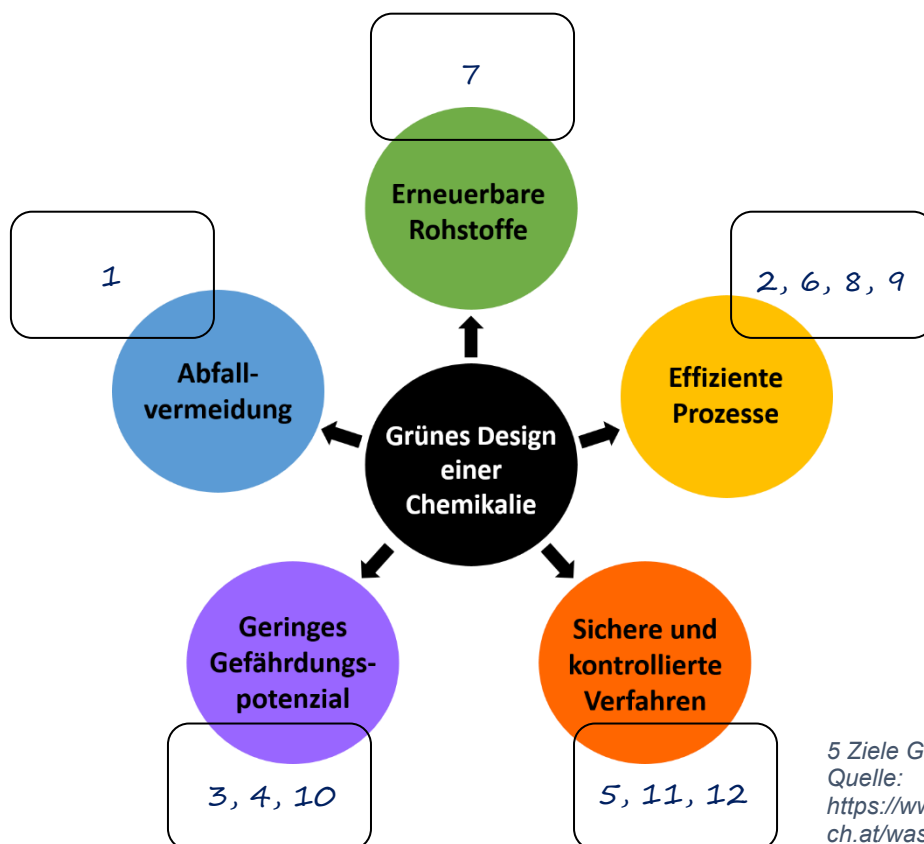
Die 12 Prinzipien nach Anastas und Warner (1998). Quelle:

https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/aktuelles/veranstaltungen/konzeptpapier_gruene_chemie.pdf

Aufgabe 2: Ziele der Grünen und nachhaltigen Chemie

12 Prinzipien sind schon eine ganze Menge. Um eine Übersicht zu bekommen, können diese 12 Prinzipien zu 5 Zielen zugeordnet werden.

Phase 1: Überlegt zu zweit, welche Prinzipien zu welchen Zielen passen. Tragt die Zahlen zum passenden Ziel ein!



Phase 2: Präsentiert eure Zuordnung euren Mitschüler:innen und schaut, ob ihr euch einigen könnt. Besprecht Unterschiede in euren Zuordnungen! Die Ergebnisse werden auf einem Poster festgehalten.

Arbeitsblatt: Der Rohstoff Erdöl

Erdöl wird umgangssprachlich oft auch „Das schwarze Gold“ genannt. Aber warum ist das so? In der folgenden Einheit gehst du Erdöl auf den Grund!

Aufgabe 1: Wie entsteht Erdöl?

Die Entstehung von Erdöl begann vor rund 150 Mio. Jahren. Bringe die Schritte in die richtige Reihenfolge!

1	Durch die Temperatur und Hitze bilden sich im Faulschlamm Bakterien.
2	Pflanzliche und tierische Überreste (totes organisches Material) sinken auf den Erdboden und bilden aufgrund von Sauerstoffmangel Faulschlamm.
3	Über viele Jahre drücken weitere Schichten auf das Erdölmuttergestein.
4	Die Bakterien verwandeln den Faulschlamm im Gestein in eine Mischung verschiedener Kohlenwasserstoffe: Erdöl
5	Sedimente wie Ton und Sand mischen sich unter den Faulschlamm und es bildet sich das Erdölmuttergestein.

Aufgabe 2: Die Zusammensetzung von Rohöl

Erdöl ist ein Stoffgemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen. Einige davon siehst du in der untenstehenden Tabelle. Vervollständige die Tabelle mit den richtigen Schreibweisen der Moleküle!

	Strukturformel	Halbstrukturformel	Skelettformel
Alkane		$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \end{array}$	
Cycloalkane			
Aromaten			
Naphthensäuren			
Phenole			
Thioalkohole		$\text{HS}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{SH}$	

Aufgabe 3: Auftrennung des Stoffgemisches

Du siehst also: Erdöl besteht aus vielen unterschiedlichen Molekülen. Um daraus Produkte zu machen, muss das Stoffgemisch zuerst aufgetrennt werden.

Sieh dir den Ausschnitt von Minute 11:53-14:38 des Films „Multitalent Erdöl“ an. Nutze dafür den folgenden Link oder QR-Code: <https://www.planet-schule.de/schwerpunkt/total-phaenomenal-energie/multitalent-erdoel-film-100.html>



Bearbeite anschließend folgende Aufgaben:

7. Nenne die Hauptbestandteile von Erdöl!

Kohlenwasserstoffe

8. Gib Eigenschaften an, anhand derer die Komponenten getrennt werden können!

Siedebereiche, Kettenlänge

9. Gib an, wie man den Vorgang der Trennung nennt!

Fraktionierte Destillation bzw. Rektifikation

10. Erkläre in eigenen Worten den Ablauf der fraktionierten Destillation! Verwende dabei die Begriffe Siedebereich, Destillation und Fraktion.

Bei der fraktionierten Destillation wird das Erdöl zuerst erhitzt und in die Destillationskolonne eingeleitet. Dort sind Glockenböden in unterschiedlichen Höhen eingebaut, an denen die verschiedenen Komponenten kondensieren. Die unterschiedlichen Komponenten werden dabei nach ihrem Siedebereich getrennt.

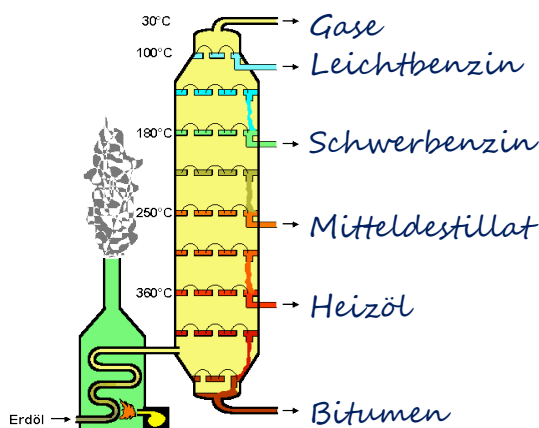
11. Vervollständige die Sätze!

Je länger die Kette des Kohlenwasserstoffs ist, desto höher ist der Siedebereich des Reinstoffes.

Je kürzer die Kette des Kohlenwasserstoffs ist, desto niedriger ist der Siedebereich des Reinstoffes.

12. Ordne die Fraktionen den passenden Siedebereichen zu!

- Gase haben den niedrigsten Siedebereich.
- Der Siedebereich des Mitteldestillats ist zwischen dem von Schwerbenzin und Heizöl.
- Schwerbenzin hat eine größere Kettenlänge als Leichtbenzin.
- Heizöl hat den zweithöchsten Siedepunkt.
- Bitumen hat mit einer Kettenlänge von > 70 Kohlenstoff-Atomen den höchsten Siedepunkt.



Destillationskolonne.

Quelle: <https://www.seilnacht.com/versuche/destill.html>

Aufgabe 4: Erdölprodukte

Hast du schon Mal darüber nachgedacht, wo wir in unserem Alltag überall Produkte aus Erdöl verwenden? Frag doch mal ChatGPT nach Anwendungsbereichen von Erdöl und schreibe fünf große Anwendungsbereiche auf! Findest du ein konkretes Produkt, dass dich überrascht hat?

1. Treibstoffe
2. Kunststoffe
3. Chemikalien
4. Kosmetika
5. Textilien

Dieses Produkt hat mich am meisten überrascht:

Kaugummi

Aufgabe 5: Und jetzt?

Dir ist wahrscheinlich bekannt, dass die Umweltverschmutzung durch Kunststoffe schwere Folgen für unsere Umwelt hat. Aber wusstest du, dass manche dieser Auswirkungen (z.B. Kohlenstoffdioxidgas-Ausstoß) stark mit ihrer Herstellung aus Erdöl zusammenhängen? Lies in deinem Schulbuch nach und halte fest, welche Auswirkungen Erdölprodukte auf unsere Umwelt haben!

Verschiedene Antwortmöglichkeiten zu

- erdölbasierten Kunststoffen + Abbaubarkeit
- CO₂-Fußabdruck von Erdölprodukten,
- Fracking
- Tankerunfälle und Treibstoffe im Meer, ...
- etc.

Abschlussaufgabe:

Du hast nun einiges über die Herstellung, Verarbeitung und Verwendung von Erdöl gelernt. Aber wieso wird Erdöl denn nun „schwarzes Gold“ genannt? Stelle auf Basis deiner Erkenntnisse eine Vermutung auf!

Verschiedene Antwortmöglichkeiten bzgl.

- Seltenheitscharakter
- Assoziationen mit schwarz als Gefahr für Mensch und Umwelt
- ...

Arbeitsblatt: Stoffgruppen-Heftchen (Abbildung)

5 Ethansäure (Essigsäure) Beispiel mit Namen: Endung: -säure Funktionelle Gruppe: Carboxylgruppe Carbonsäure	4 Propanon (Aceton) Beispiel mit Namen: Endung: -on Funktionelle Gruppe: Carbonylgruppe Ketone	3 Ethanal Beispiel mit Namen: Endung: -al Funktionelle Gruppe: Carbonylgruppe Aldehyde	2 Ethanol Beispiel mit Namen: Endung: -ol Funktionelle Gruppe: Hydroxylgruppe Alkohole
6 Amine Funktionelle Gruppe: Aminogruppe Endung: -amin Beispiel mit Namen: Methylamin	7 Ester Funktionelle Gruppe: Estergruppe Endung: -ester Beispiel mit Namen: Ethansäureethylester	8 Ether Funktionelle Gruppe: Ethergruppe Endung: -ether Beispiel mit Namen: Dimethylether	1 Alkane Merkmale: Einfachbindung Endung: -an Bsp.: Butan Alkene Merkmale: Doppelbindung Endung: -en Bsp.: Buten Alkine Merkmale: Dreifachbindung Endung: -in Bsp.: Butin

Arbeitsblatt: Der Rohstoff Holz

Bäume besiedeln seit über 300 Mio. Jahren unsere Erde. Mithilfe ihrer starken Wurzeln und festen Rinde schützen sie sich vor Feinden und Umwelteinflüssen. Aber wie entstehen Bäume eigentlich? Und woraus? Und vor allem: Was hat das alles mit Chemie zu tun?

Einstieg: Photosynthese

Erinnere dich an deinen Biologieunterricht zurück – weißt du noch, was bei der Photosynthese passiert? Suche dir eine:n Partner:in und nimm zu den folgenden Aussagen Stellung!

Pflanzen brauchen Licht zum Wachsen, sie brauchen immer Licht.



Die Photosynthese findet in den Blättern statt.



Pflanzen brauchen wie wir Menschen Sauerstoff.



Pflanzen produzieren ihre Nahrung durch interne Prozesse.



Pflanzen nehmen Nahrung ausschließlich über die Wurzel aus dem Boden auf.



Die Endprodukte der Photosynthese sind Sauerstoff und Zucker.



Pflanzen brauchen Licht.



Concept-Cartoon zur Photosynthese.

Quelle:

<https://eduki.com/de/material/318614/concept-cartoon-fotosynthese-einstieg>

Übersetze die Photosynthese-Wortgleichung in eine chemische Reaktionsgleichung!

Tip: Schreibe zuerst alle bekannten Verbindungen auf und leite daraus die Summenformel der Glucose ab.

Wortgleichung:

6 Kohlenstoffdioxid-Moleküle + 6 Wasser-Moleküle  Glucose-Molekül + 6 Sauerstoff-Moleküle

Chemische Reaktionsgleichung:



Die folgenden Aufgaben sollen dich dabei unterstützen, den Aufbau und Aufschluss von Holz zu verstehen. Alle Informationen zum Lösen der Aufgaben findest du auf dem ScienceSpot „Holzchemie“ unter <https://spottingsscience.at/sciencespot-holzchemie/>.



Aufgabe 1: Die Bestandteile von Holz

3. Nenne die drei Hauptkomponenten von Holz!

Cellulose, Hemicellulosen, Lignin

4. Welche prozentuellen Anteile nehmen die Komponenten ein? Gib basierend auf den Infos aus dem ScienceSpot eine Schätzung ab!

40-50% Cellulose, 20-25% Hemicellulosen, 20-30% Lignin

Aufgabe 2: Cellulose

Die Reaktion von Glucose-Molekülen zu Cellulose-Molekülen ist ein gutes Beispiel für eine *Kondensationsreaktion*. Betrachte die Reaktion im ScienceSpot und bearbeite folgende Aufgaben:

5. Nenne die an der Kondensationsreaktion beteiligten funktionellen Gruppen!

Hydroxygruppe eines Alkohols + Carboxygruppe einer Säure

6. Nenne die Stoffklasse, die bei der Reaktion entsteht!

Es entstehen Ester.

7. Nenne das Molekül, das bei der Reaktion abgespalten wird!

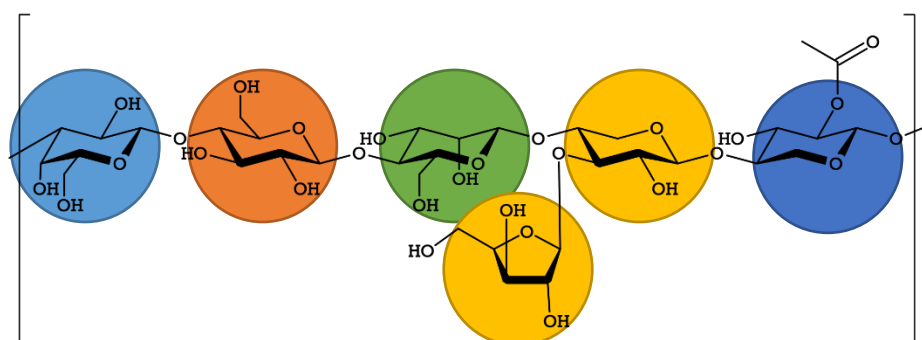
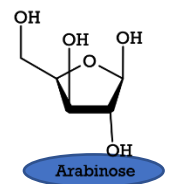
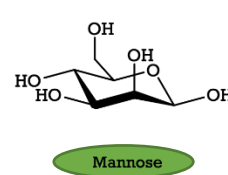
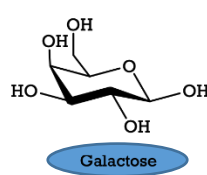
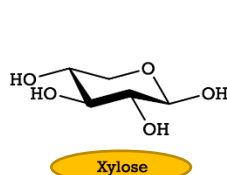
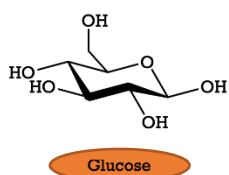
Wasser

8. Beschreibe in eigenen Worten eine Kondensationsreaktion!

Bei einer Kondensationsreaktion reagiert die Carboxygruppe eines Carbonsäure-Moleküls mit der Hydroxygruppe eines Alkohol-Moleküls unter Abspaltung eines kleineren Moleküls (z.B. Wasser-Molekül).

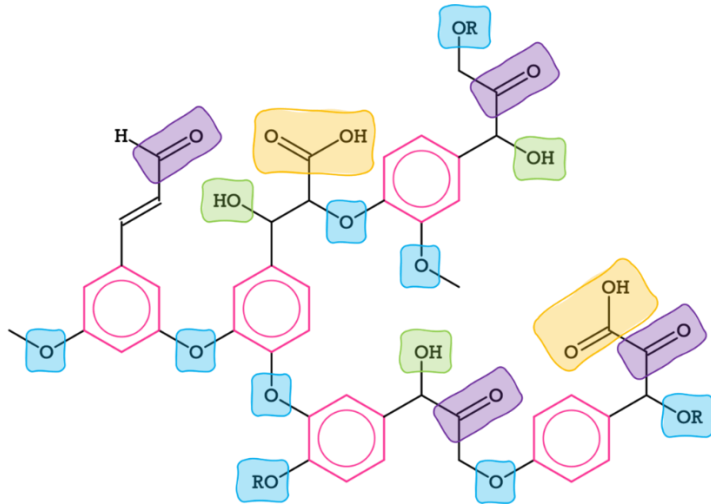
Aufgabe 3: Hemicellulosen

Hemicellulosen können aus unterschiedlichen Zuckern bestehen. Kannst du die einzelnen Zucker-Monomere im Hemicellulose-Molekül finden? Markiere die passenden Paare farblich!

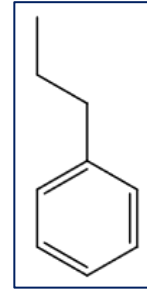


Aufgabe 4: funktionelle Gruppen im Lignin

Hebe die verschiedenen funktionellen Gruppen in unterschiedlichen Farben hervor und beschrifte sie!



Zeichne eine Phenylpropan-Einheit aus dem Lignin-Molekül!



Aufgabe 5: Der Holzaufschluss

Um Komponenten von Holz stofflich nutzen zu können, müssen sie aufgetrennt werden. Der gängige Weg dafür ist der Kraft-Aufschluss. Bringe die Reaktionsschritte in die richtige Reihenfolge und markiere den Schlüsselschritt!

1	Das Sulfid-Ion bildet über einen Ring eine weitere Bindung zum β -Kohlenstoff-Atom aus und ein Phenolat-Ion wird abgespalten.
2	Die Etherbindung am α -Kohlenstoff-Atom wird gelöst.
3	Das Salz Natriumsulfid hydrolysiert zu Natrium-Ionen und Hydrosulfid-Ionen.
4	Ein Hydrosulfid-Ion bindet unter Abspaltung eines Wasserstoff-Ions an das α -Kohlenstoff-Atom.
5	Der Ring mit dem Schwefel-Atom wird geöffnet, es bildet sich eine Doppelbindung und das Schwefel-Atom wird frei.

Aufgabe 6: Produkte aus Holzkomponenten

Ordne die Produkte den passenden Holzkomponenten zu!

Viskose, Xylit, Essigreiniger, Vanillin, Taschentücher, 3D-Druck Filament, Glucose, Bio-Polyethylen, Watte, Zementbeimengung, Arboform®-Kunststoffe, Nylon

Cellulose	Viskose, Taschentücher, Glucose, bio-PE, Watte
Hemicellulosen	Xylit, Essigreiniger, Glucose, bio-PE, Nylon
Lignin	Vanillin, 3D-Druck Filament, Arboform-Kunststoffe, Zementbeimengung

Zusatzaufgabe: Kohlenstoffdioxid-Gas im Holz

Ein Kubikmeter Holz hat eine Masse von 500kg. Davon sind 50% aller Atome Kohlenstoff-Atome. Berechne dir über die Stoffmenge der Kohlenstoff-Atome, wie viel Kohlenstoffdioxid-Gas in einem Kubikmeter Holz gebunden werden kann! Achte dabei auf die richtigen Einheiten!

Tipp: Die Stoffmenge an Kohlenstoffdioxid-Molekülen, die gebunden werden kann, muss gleich groß sein, wie die Stoffmenge der im Holz vorkommenden Kohlenstoff-Atome.

Möglicher Rechenweg:

500kg Holz = 250kg C-Atome pro kg Holz

$$n(C) = \frac{m(C)}{M(C)} = \frac{250\,000\,g}{12\,g/mol} = 20833,33\,mol$$

$$n(C) = n(CO_2)$$

$$m(CO_2) = n(CO_2) \times M(CO_2) = 20833,33\,mol \times \frac{44g}{mol} = 916666g = 916,66\,kg$$

Arbeitsblatt: Manchmal ist der Holzweg der Richtige!

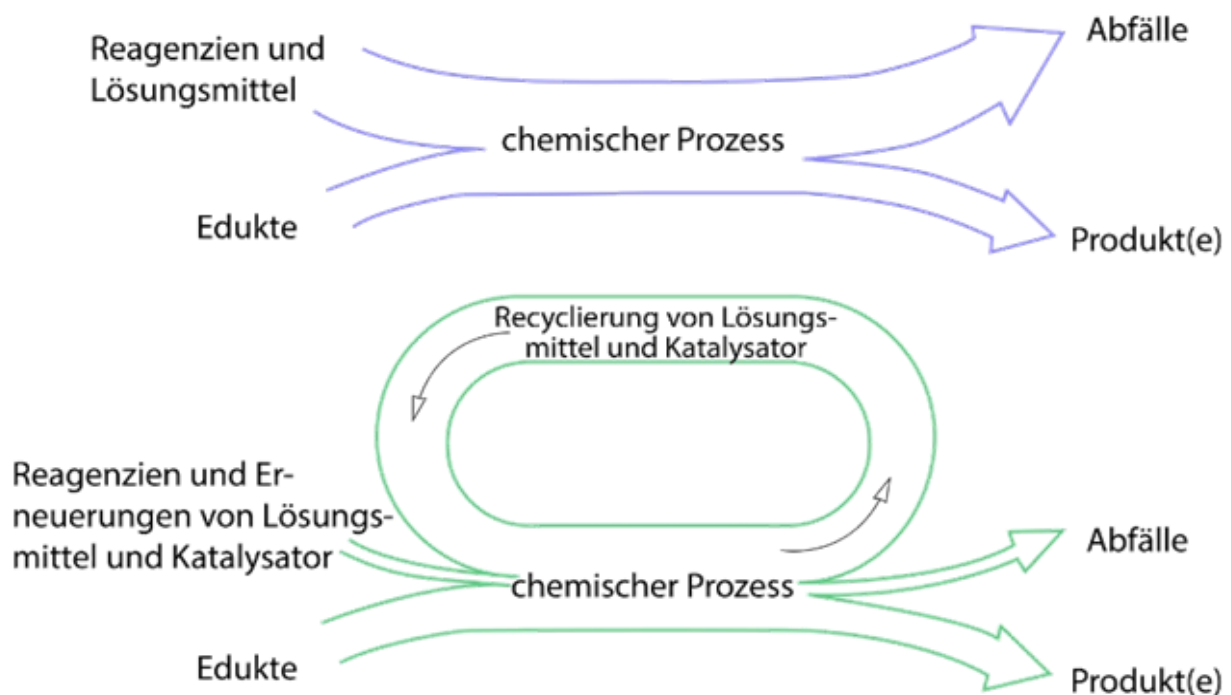
Bearbeitet folgende Aufgaben zu zweit. Alle Informationen, die ihr zum Lösen der Aufgaben benötigt, findet ihr auf dem ScienceSpot „Bioraffinerie“ unter <https://spottingsscience.at/sciencespot-bioraffinerie-von-holz>.



Aufgabe 1: Kreislaufwirtschaft ⌚ 5 Min.

Diskutiert die gegebene Abbildung zu Stoff- und Materialflüssen unter Beachtung folgender Leitfragen!

- Was stellt die Abbildung dar?
- Welche Aspekte der Abbildung scheinen für euch nachvollziehbar?
- Für welche Personen oder Interessensgruppen sind die dargestellten Vorgehensweisen relevant?
- Welche Vorteile und Chancen bieten die jeweiligen Materialflüsse?
- Welche Nachteile und Risiken bieten die jeweiligen Materialflüsse?



Haltet euer Gespräch in Form von Notizen hier fest:

Verschiedene Antwortmöglichkeiten bzgl.

- Umgang mit Lösungsmitteln und Katalysatoren
- Menge an Edukten, Reagenzien, Produkten und Abfällen
- Relevanz für Industrie, wirtschaftliche Faktoren, Kosten für Abfälle
- Nachhaltigkeitsaspekte, fossile vs. Erneuerbare Rohstoffe
- Bedeutung für Konsument:innen
- Etc.

Aufgabe 2: Biomasse

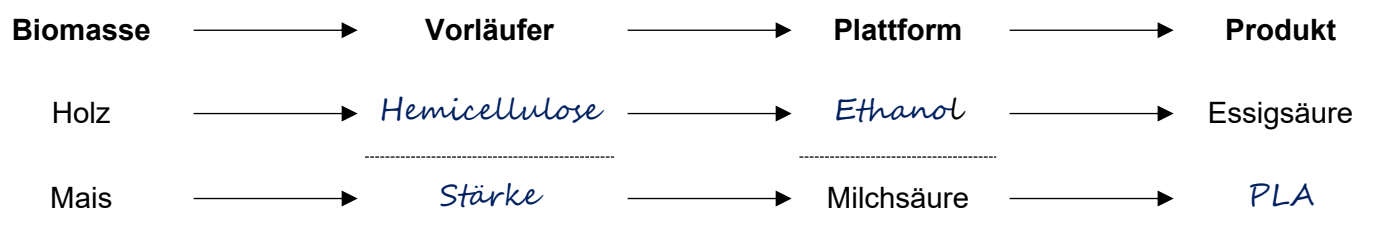
Ordnet die Biomasse der passenden Bioraffinerie zu!

Rapssaat, Holz, Silage, Mais, Sojabohnen, Bagasse, Zuckerrohr, Reis, Sonnenblumenkerne, trockene Gräser, Zuckerrüben, Weizen, Papierabfälle, Baumwollsaamen, feuchte Gräser, Flachs, Mikroalgen, Stroh

Zucker-Bioraffinerie	<i>Zuckerrohr, Zuckerrüben</i>
Stärke-Bioraffinerie	<i>Mais, Reis, Weizen</i>
Pflanzenöl-Bioraffinerie	<i>Rapssaat, Sojabohnen, Sonnenblumenkerne, Baumwollsaamen, Flachs</i>
Algenlipid-Bioraffinerie	<i>Mikroalgen</i>
Lignocellulose-Bioraffinerie	<i>Holz, Papierabfälle, Stroh, Bagasse, trockene Gräser</i>
Grüne Bioraffinerie	<i>Silage, feuchte Gräser</i>

Aufgabe 3: Abläufe in Bioraffinerien

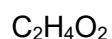
Vervollständigt das Schema!



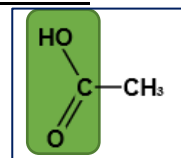
Aufgabe 4: Das Essigsäure-Molekül

Leitet aus der Summenformel von Essigsäure die Strukturformel ab und zeichnet das Essigsäure-Molekül in der Strukturformelschreibweise! Hebt die funktionelle Gruppe farbig hervor!

Summenformel:



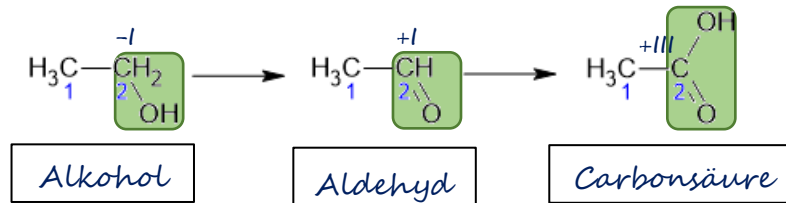
Strukturformel:



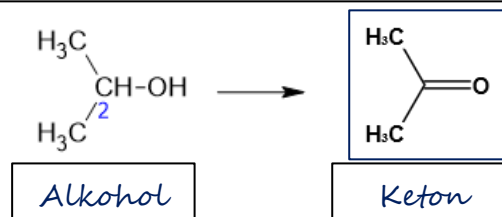
Aufgabe 5: Die Oxidation primärer Alkohole

Lest die Infobox und bearbeitet anschließend die Aufgaben!

Bei der Sekundärraffination wird zuerst aus der Glucose-Lösung durch Fermentation Ethanol gewonnen. Die weiteren Reaktionen von Ethanol bis Essigsäure folgen einem grundlegenden Reaktionsschema in der organischen Chemie, nämlich der *Oxidation primärer Alkohole*:



1. Hebt die beteiligten funktionellen Gruppen hervor und benennt die Moleküle nach ihren Stoffklassen!
2. Bestimmt die Oxidationszahlen der C2-Atome!
3. Zeigt anhand des Isopropanol-Moleküls, welche Stoffklasse bei der Oxidation eines sekundären Alkohols entsteht!



7.6 ScienceSpots

Legende: [Hauptstrang](#), [Verlinkung](#), [Interaktives Element](#), [Abbildung](#)

ScienceSpot 1: Holz

Einleitung

Kraftstoffe, Kunststoffe, Kosmetika, Kerzen und Kaugummi – sie alle sind Folgeprodukte auf Basis von Erdöl und aus unserem Alltag kaum mehr wegzudenken. Die Förderung und Verarbeitung des Multitalents Erdöl ist jedoch nicht ganz unproblematisch: Beispielsweise gelangen immer wieder durch Bohrplattformen oder Schiffsunfälle große Mengen an Erdöl ins Meer und stellen eine Gefahr für Fische, Vögel, Reptilien, Meeressäuger und das empfindliche Ökosystem des Meeres dar. Gleichzeitig ist Erdöl aufgrund seines langen Entstehungsprozesses ein begrenzter Rohstoff, früher oder später werden unsere Erdölvorräte aufgebraucht sein. Um also nicht von diesem fossilen Rohstoff abhängig zu sein, brauchen wir nachhaltigere Alternativen aus nachwachsenden Rohstoffen. An dieser Stelle kommt die Grüne und nachhaltige Chemie ins Spiel. Sie zielt darauf ab, Produkte und Prozesse nachhaltiger und sicherer für Mensch und Natur zu gestalten. Falls du mehr zu Grüner und nachhaltiger Chemie wissen möchtest, findest du [HIER \(Link zur Grünen Chemie\)](#) einen Beitrag dazu. Aber was sind denn nun genau nachwachsende Rohstoffe? Sie stammen aus der Forstwirtschaft, Landwirtschaft oder Fischerei und werden für die Erzeugung von Wärme, Strom oder wichtigen Produkten für Industrie, Medizin und unseren Alltag genutzt. Beim folgenden Spiel kannst du dein Wissen über nachwachsende und nicht-erneuerbare Rohstoffe testen!

[Learning-App: Nachwachsender Rohstoff oder nicht? ALTERNATIV: H5P-Element](#)

Wie du siehst, haben Forschende viele verschiedene Arten an Biomasse zur Auswahl, um daraus nützliche Produkte zu entwickeln. Aus Holz können zum Beispiel weitaus mehr Produkte hergestellt werden als Tischplatten, Papier und Kochlöffel. Auch Kunststoffe, Backzutaten, Reinigungsmittel und Klebstoffe können aus Holz produziert werden. Du fragst dich jetzt bestimmt: Wie ist es möglich, dass ein Rohstoff so vielseitig genutzt werden kann? Dazu müssen wir zuerst einmal verstehen, woraus Holz eigentlich besteht.

Aufbau von Holz

Bäume sind wahre Überlebenskünstler, schon seit über 300 Millionen Jahren besiedeln sie die Erde. Das alles haben sie vor allem ihren starken Wurzeln und der festen Rinde zu verdanken, die sie vor Feinden und Umwelteinflüssen schützen. Betrachten wir den Aufbau von Holz einmal genauer:

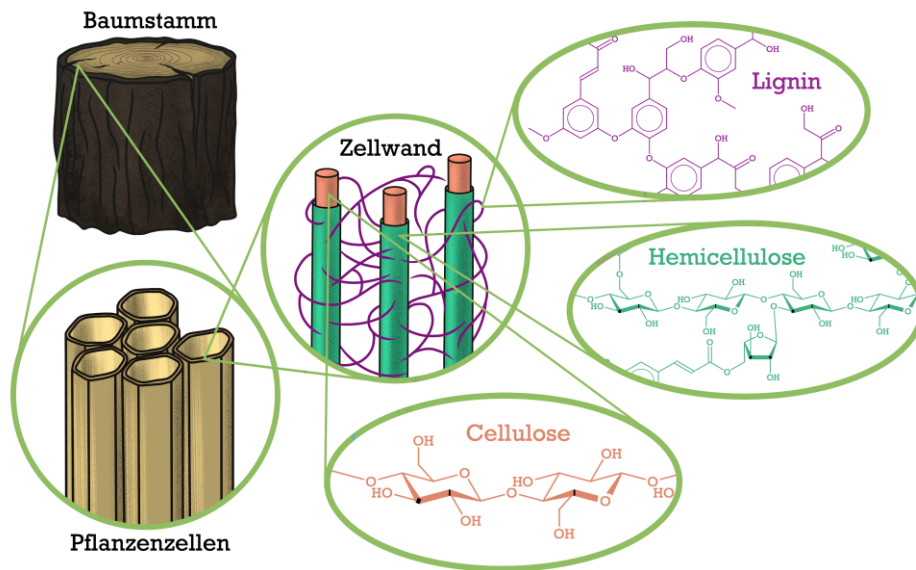


Abbildung der Zellwand von Pflanzenzellen

nachgestellt auf Basis von: https://ethz.ch/content/specialinterest/mavt/process-engineering/transport-processes/de/forschung/green_chemistry.html?batch_name=publications&page=2, letzter Zugriff: 27.06.2023, 21:00 Uhr

Learning App: Kreisdiagramm Anteile <https://learningapps.org/watch?v=p8bj6381a23>,
ALTERNATIV: H5P-Element

Holz besteht also hauptsächlich aus drei Stoffen: Lignin, Cellulose und Hemicellulosen. Mehr Infos zu den einzelnen Bestandteilen findest du hier: [Buttons Cellulose](#), [Hemicellulosen](#), [Lignin](#).

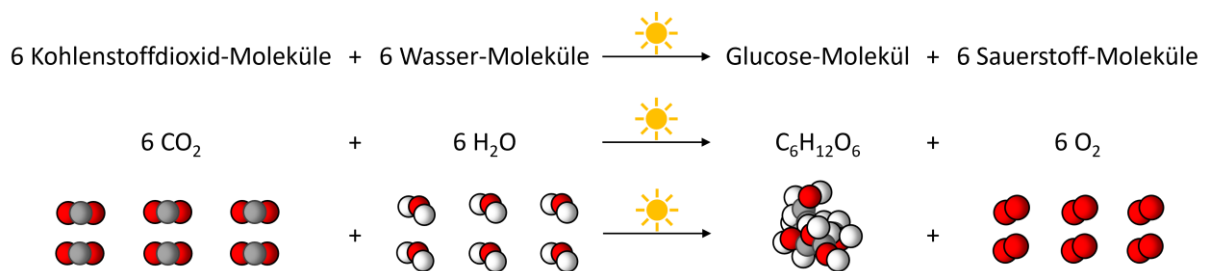
Cellulose	Hemicellulosen	Lignin
-----------	----------------	--------

Um den Rohstoff Holz jedoch auch stofflich nutzen zu können, muss er in seine Bestandteile zerlegt werden. Derzeit werden rund 85% der in Deutschland produzierten Cellulose über das sogenannte Sulfatverfahren gewonnen. Dazu wird das Holz in einem ersten Schritt mechanisch zu Hackschnitzeln verarbeitet. Anschließend wird die Biomasse in Bioraffinerien drei bis sechs Stunden lang bei einem Druck von sieben bis zehn bar mit Natronlauge, Natriumsulfid und Natriumsulfat erhitzt. Dadurch werden die Zellwände des Holzes aufgebrochen. Übrig bleiben Cellulose- und Hemicellulosefasern sowie das Lignin als dunkle, zähe Flüssigkeit („Black Liquor“). Wenn du mehr zum Holzaufschluss erfahren möchtest, klicke [HIER \(Button Holzaufschluss\)](#). Produktionsstätten, in denen aus der Biomasse Holz mithilfe (bio-)chemischer Prozesse Produkte hergestellt werden, nennt man Lignocellulose-Bioraffinerien. Was genau das ist, erfährst du [HIER \(Button zu Station 2\)](#).

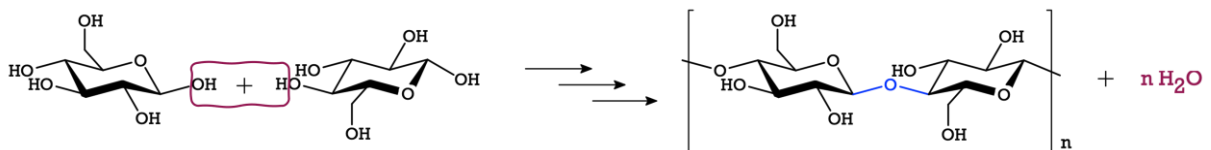
Nebenstränge Station 1

Cellulose

Die Grundbausteine von Cellulose-Molekülen sind Glucose-Moleküle. Glucose wird auch als Traubenzucker bezeichnet und besteht aus einzelnen Zuckermolekülen. Diese Glucose-Moleküle stellen Pflanzen durch den Prozess der Photosynthese selbst her. Das klingt erst einmal einfach, ist aber ein ausgeklügelter Prozess der Natur. Pflanzen nutzen nämlich die Energie der Sonne und machen aus den energiearmen Molekülen Wasser und Kohlenstoffdioxid die energiereichen Moleküle Glucose und Sauerstoff.



Eine Kette von mehreren hundert bis zehntausend Glucose-Molekülen bildet jeweils ein Cellulose-Molekül.



Reaktion von Glucose-Molekülen zu Cellulose-Molekülen

Nun könnte man sich die Frage stellen: Wenn Holz zu 30-45% aus langen Ketten an Zucker-Molekülen besteht, wieso können wir Menschen es nicht essen? Die Antwort liegt im Detail: Die Glucose-Moleküle der Cellulose sind über sogenannte **beta-glycosidische Bindungen** verbunden. Diese können wir schlicht und einfach nicht verdauen, weil uns die dazu nötigen Enzyme im Körper fehlen. Daher scheiden wir sie als Ballaststoffe wieder aus. Verbinden sich die Glucose-Moleküle hingegen mittels **alpha-glycosidischer Bindungen**, können wir das Produkt sehr wohl verdauen: Es handelt sich dabei nämlich um Amylose, einen Bestandteil von Stärke.

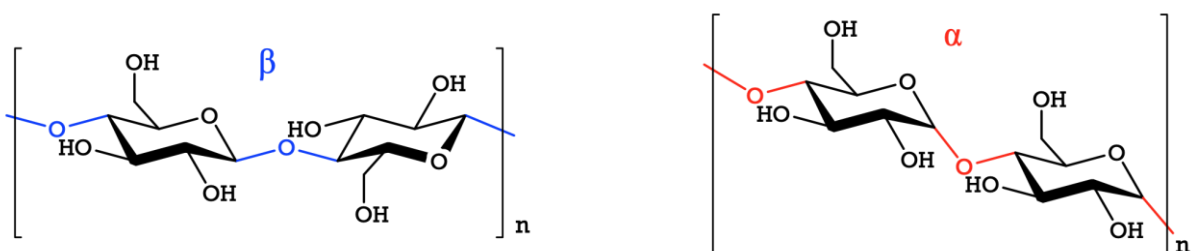
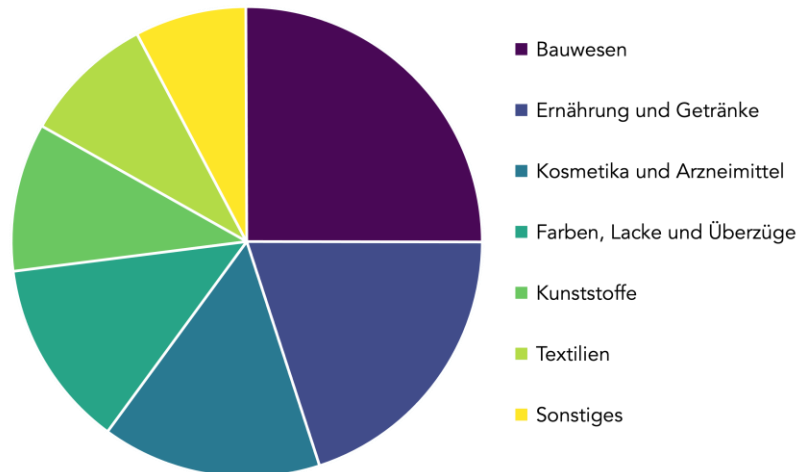


Abbildung: Ausschnitt aus einem Cellulose- und einem Amylose-Molekül (in Stärke)

Celluloseprodukte finden wir in unserem Alltag wie Sand am Meer: Papier, T-Shirts aus Viskose, sogar Essigreiniger kann daraus hergestellt werden. Die folgende Abbildung zeigt die Nutzung von Cellulose im Jahr 2018.

Cellulose und Produkte

Volumen (%), Endverbraucher:innen-Industrie, global, 2018



Wie genau das funktioniert, erfährst du in der Station [„Bioraffinerie von Holz“](#) (Link).

Hemicellulose

Hemicellulose-Moleküle sind, ähnlich wie Cellulose-Moleküle, aus Zucker-Grundeinheiten aufgebaut. Es handelt sich dabei aber nicht ausschließlich um verknüpfte Glucose-Moleküle, sondern um Ketten mit einem uneinheitlichen molekularen Aufbau. Hemicellulose-Moleküle können als Bausteine neben Glucose-Molekülen unter anderem auch Moleküle der Zucker Xylose, Arabinose, Mannose und Galactose enthalten. Auch diese sind miteinander vernetzt. Deshalb spricht man von Hemicellulosen (im Plural).

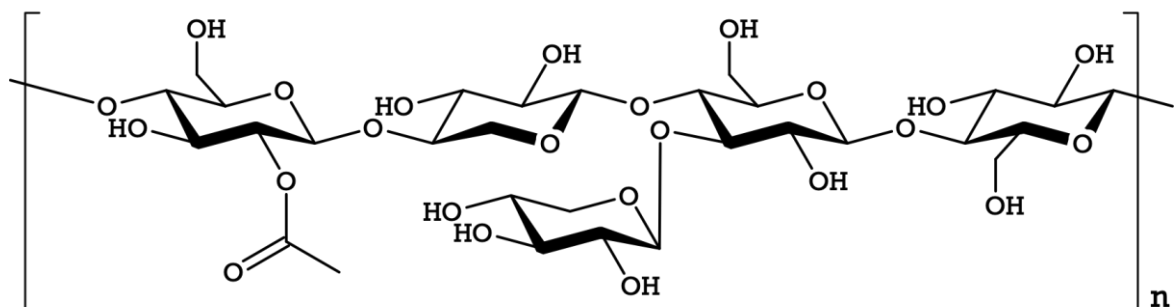


Abbildung: Ausschnitt aus einem Hemicellulose-Molekül

Aufgrund der unterschiedlichen Bausteine können aus Hemicellulose andere Produkte entstehen als aus Cellulose. Ein sehr bekanntes Produkt hast du vielleicht auch schon einmal selbst gegessen: Birkenzucker (Xylit) wird häufig in zuckerfreien Kaugummis als Zuckeraustauschstoff verwendet.

Lignin

Lignin ist der Überbegriff für einen Stoff, der aus einer Vielzahl verschiedener riesiger Molekül-Arten besteht. Der Bau der Lignin-Moleküle unterscheidet sich je nach Pflanzenart und -standort. Außerdem verleiht Lignin Holz seine braune Farbe. Die Funktion von Lignin-Molekülen kann man sich wie eine Art Kleber vorstellen, der die Stränge der Cellulose- und Hemicellulose-Moleküle zusammenhält. Dank Lignin können wir also „auf Holz klopfen“. In reiner Form ist Lignin eine dunkle, zähe Flüssigkeit, die auch als „Black Liquor“ bezeichnet wird.

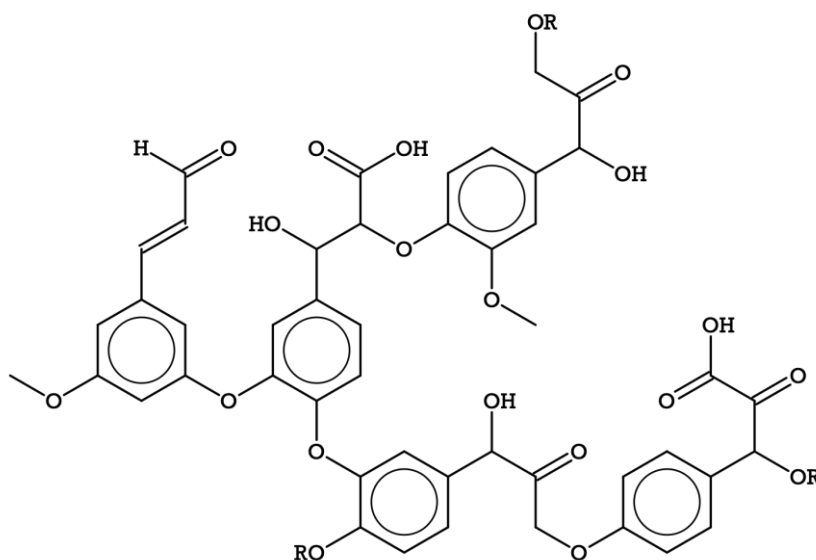


Abbildung: Ausschnitt aus einem Lignin-Molekül

Wenn Holz verarbeitet wird, wird das Lignin wegen seines hohen Brennwertes (25-26 mJ/kg) hauptsächlich verbrannt. Da es bis zu einem Viertel der Holz-Trockenmasse ausmachen kann, wird fleißig daran geforscht, Lignin auch stofflich zu nutzen. So wird der vermeintliche Abfallstoff ganz im Sinne von Prinzip 1 der Grünen und nachhaltigen Chemie „Abfälle vermeiden“ ([Link zu Prinzip 1](#)) ein wertvoller nachwachsender Rohstoff. Aufgrund struktureller Ähnlichkeiten kann aus Lignin beispielsweise Vanillin zum Backen hergestellt werden. Auch Lignin-Akkus und Filament für 3D-Drucker aus Lignin werden aktuell erforscht. Wie das Lignin aus Holz isoliert werden kann, erfährst du hier ([Link Holzaufschluss](#)).

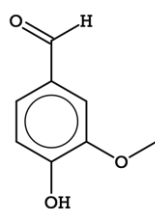


Abbildung: Vanillin-Molekül

Holzaufschluss

Wie du bereits erfahren hast, besteht Holz aus Cellulose, Hemicellulosen und Lignin. Um diese drei Bestandteile jedoch auch stofflich nutzen zu können, müssen sie zuerst voneinander getrennt werden. Der gängige Weg für diese Trennung ist der Kraft-Aufschluss, der bei einer Temperatur von 160-170°C und einem Druck von sieben bis zehn bar abläuft. Ziel des Aufschlusses ist das Aufbrechen der stark vernetzten Lignin-Struktur, um die einzelnen Bestandteile getrennt voneinander zu erhalten.

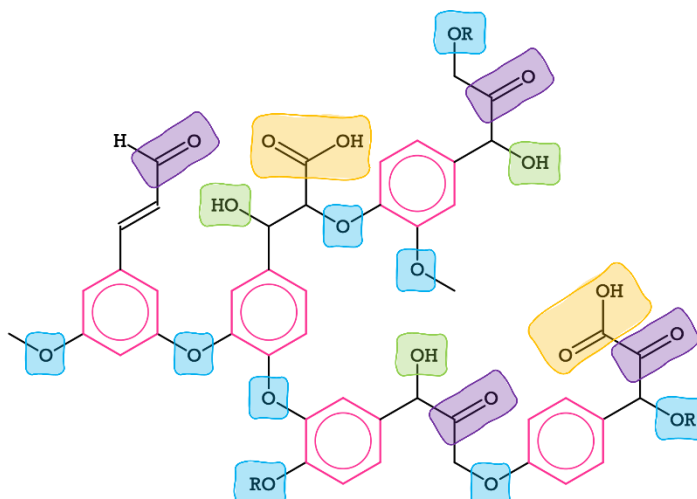


Abbildung: Ausschnitt aus einem Lignin-Molekül mit funktionellen Gruppen

Werfen wir einen genaueren Blick auf den oben dargestellten Ausschnitt der Skelettformel eines Lignin-Moleküls. Dabei erkennen wir einige Bausteine, die in unserem Beispiel mehrfach auftreten – diese bezeichnet man in der Chemie als „funktionelle Gruppen“. Unter diesem Begriff fasst man Atome oder Atomgruppen eines Moleküls zusammen, die die Eigenschaften des Moleküls beeinflussen. Damit beeinflussen funktionelle Gruppen auf der Stoffebene auch die Eigenschaften der resultierenden Stoffe. Dazu zählen unter anderem die **aromatischen Ringe**, die in der Abbildung pink nachgezeichnet wurden. Diese Ringe bestehen aus Kohlenstoffatomen, die alle eine sp^2 -Hybridisierung aufweisen, und damit ein System aus delokalisierten (sich im Ring frei beweglichen) Elektronen ergeben. Zudem sind in der Abbildung **Ether**-, **Hydroxy**-, **Carbonyl**- und **Carboxy**-Gruppen zu erkennen. Diese

vier Gruppen zählen zu den sauerstoffhaltigen funktionellen Gruppen, da sie mindestens ein Sauerstoffatom pro Gruppe enthalten. Als Strukturelemente kann man sogenannte Phenylpropan-Einheiten erkennen:

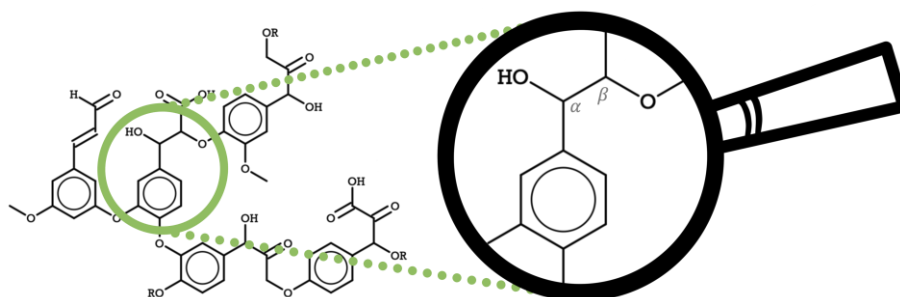
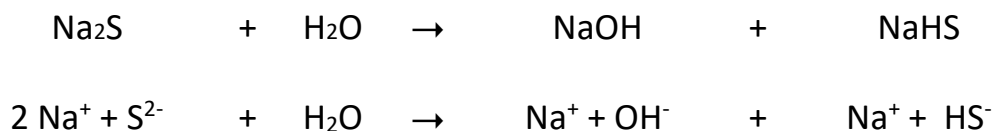


Abbildung: Phenylpropan-Molekül mit Kennzeichnung von alpha- & beta-C-Atomen

Die Phenylpropan-Einheiten (siehe Abbildung) sind durch Etherbindungen verknüpft. Um die Etherbindungen zu lösen, wird beim Kraft-Aufschluss eine Natriumsulfid-Lösung genutzt. Das bedeutet, dass das Salz Natriumsulfid (Na_2S) in Wasser gelöst ist und die enthaltenen Natrium- und Sulfid-Ionen frei in der Lösung vorliegen. Diese Ionen reagieren mit Wassermolekülen und bilden Hydroxid-, Natrium und Hydrogensulfid-Ionen, die ebenfalls frei in der Lösung vorliegen.



Es liegen in der wässrigen Lösung also Natrium-Ionen (Na^+), Hydroxid-Ionen (OH^-), Hydrogensulfid-Ionen (SH^-) und Wassermoleküle (H_2O) vor.

Beim Kraft-Aufschluss binden negativ geladene Hydrogensulfid-Ionen an die alpha-C-Atome der Lignin-Moleküle. Da die Hydrogensulfid-Ionen sehr groß sind und freie Elektronenpaare zur Verfügung haben, binden sie anschließend unter Bildung eines dreigliedrigen Rings auch noch **zusätzlich** an das beta-C-Atom. Dort wird nun die Etherbindung gelöst und Phenolat-Ionen werden frei. Zuletzt bildet sich aufgrund der Abgabe der zuvor gebundenen Sulfid-Ionen zwischen den beiden C-Atomen (alpha und beta) noch eine Doppelbindung aus und Schwefel-Atome werden abgegeben.

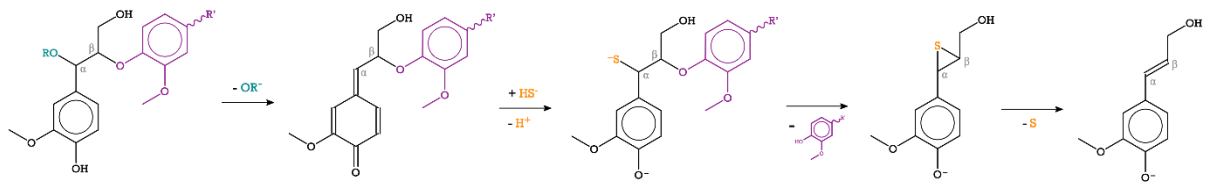
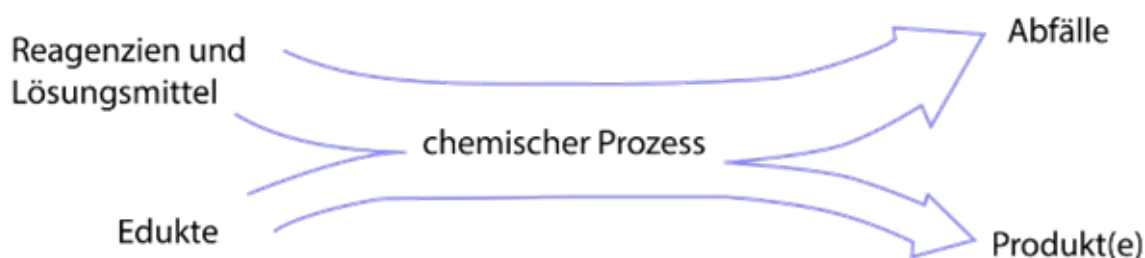


Abbildung: Reaktionen im Kraft-Aufschluss

Diese chemischen Reaktionen führen dazu, dass aus sehr großen, sperrigen und in Wasser unlöslichen Lignin-Molekülen kleinere Bruchstücke gebildet werden. Diese sind besser löslich und können gemeinsam mit den bereits gelösten Hemicellulose-Molekülen mechanisch von der Cellulose getrennt werden. Am Ende bleiben dann die Cellulose-Moleküle und eine sogenannte „Ablauge“ übrig. Die Ablauge beinhaltet alle Bestandteile von Holz außer Cellulose. Die Ablauge wird bisher oft eingedickt und verbrannt – allerdings kann man sie auch stofflich nutzen. Mehr Informationen dazu findest du in der Station [„Bioraffinerie von Holz“](#) (Link).

ScienceSpot 2: Bioraffinerie von Holz

Aktuell durchlaufen viele Produkte einen linearen Stoff- und Materialfluss. Das klingt kompliziert - ist es aber nicht. Betrachten wir beispielsweise Einwegprodukte: Eine Kunststoffgabel wird entwickelt, in einer Produktionsstätte hergestellt, verwendet, entsorgt und zuletzt thermisch verwertet, also verbrannt. Diese Art von Prozess ist aus mehreren Gründen nicht nachhaltig. Erstens werden dabei begrenzt zur Verfügung stehende Rohstoffe verbraucht, wie beispielsweise Erdöl. Somit sind sie zukünftigen Generationen nur in geringeren Mengen oder gar nicht mehr zugänglich. Zweitens gelangt durch die Verbrennung von Erdölprodukten (wie einer Kunststoffgabel) Kohlenstoffdioxid-Gas in die Atmosphäre und trägt dadurch zum Klimawandel bei. Wenn du mehr zum Thema Kunststoffe und Klimawandel wissen möchtest, klicke [HIER](#). ([Link zum Seitenstrang „Klimawandel durch Kunststoffe“](#))



Um also nachhaltiger mit Produkten zu wirtschaften, sind Veränderungen notwendig. Eine davon ist der Wandel von linearen Materialflüssen hin zu zirkulären Materialflüssen. Das Wort „zirkulär“ kommt aus dem Lateinischen (*circulare*) und bedeutet so viel wie *kreisen*. Eine zirkuläre Wirtschaft wird daher auch **Kreislaufwirtschaft** genannt. Die Nutzungsdauer eines Produkts wird dabei durch Wiederverwendung, Reparatur, Recycling und Aufarbeitung verlängert. Kommt ein Produkt schließlich am „Ende“ seiner Nutzung an, wird es mechanisch, physikalisch und chemisch in seine Bestandteile zerlegt und anschließend wieder zu etwas Neuem verarbeitet. Dieses Vorgehen ist ganz im Sinne von Prinzip 1 (Abfallvermeidung) der Grünen Chemie ([Link zu Prinzip 1](#)).

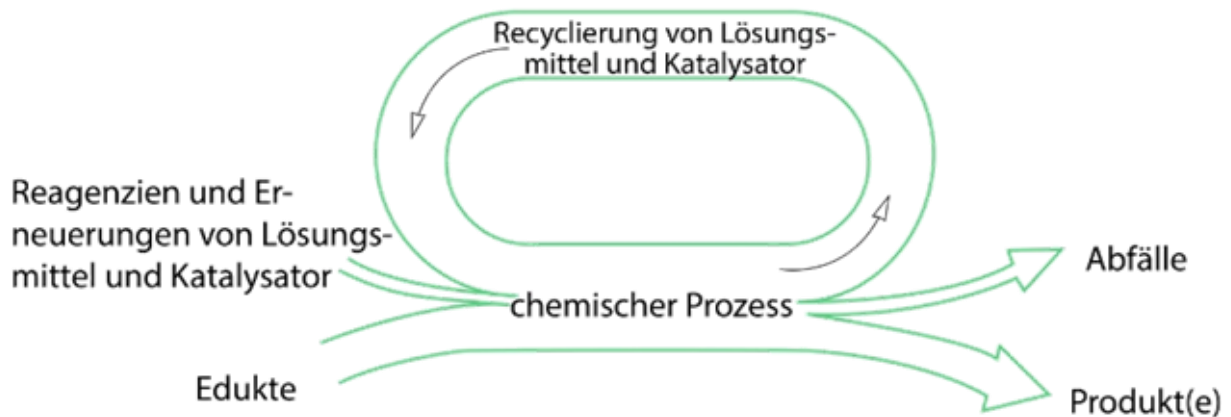


Abbildung Kreislaufwirtschaft

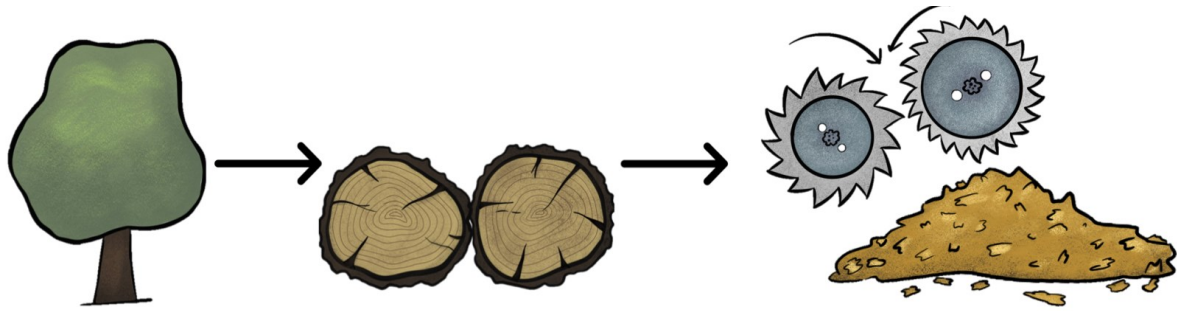
Um Kreislaufwirtschaft in der Industrie zu verankern, werden weltweit und auch in Österreich zunehmend Bioraffinerien gebaut. In Bioraffinerien werden im Gegensatz zu Erdölraffinerien nachwachsende Rohstoffe verarbeitet - das entspricht Prinzip 7 der Grünen Chemie („[Nutzung erneuerbarer Rohstoffe](#)“ [LINK](#)). Die Definition von Bioraffinerien ist etwas sperrig (du findest sie [HIER](#)), daher hier die kompaktere Version: In Bioraffinerien wird Biomasse (Holz, Stroh, ...) möglichst vollständig zu Chemikalien, biogenen Werkstoffen und anderen stofflichen Produkten sowie Brenn- und Kraftstoffen verarbeitet. Das Ziel ist es, nachwachsende Rohstoffe in einem Kreislauf zu behalten, und nicht ausschließlich durch Verbrennung energetisch zu nutzen.

Je nach Biomasse kann unter anderem in Zucker-Bioraffinerien, Stärke-Bioraffinerien, Pflanzenöl-Bioraffinerien, Algenlipid-Bioraffinerien und Lignocellulose-Bioraffinerien unterschieden werden.

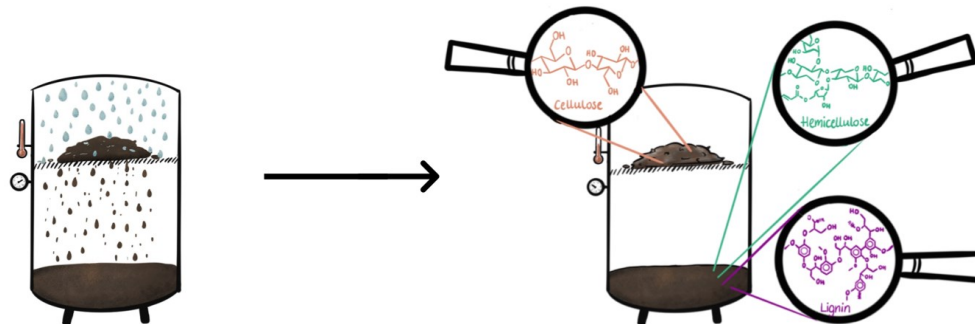
Ordne die Biomasse den Bioraffinerien zu! ([Learning App](#) oder [H5P](#))

Super, jetzt weißt du, dass Holz die Biomasse der Lignocellulose-Bioraffinerie ist! Die Lignocellulose-Raffinerie wollen wir nun genauer unter die Lupe nehmen:

Grundsätzlich können die Abläufe in einer Lignocellulose-Bioraffinerie in zwei Phasen eingeteilt werden: Die Primärraffination und die Sekundärraffination. In der **Primärraffination** wird das Holz zuerst mechanisch zerkleinert und dann in seine Komponenten Cellulose, Hemicellulosen und Lignin zerlegt. Diese Komponenten werden Vorläufer genannt. Wie genau das funktioniert, erfährst du [HIER](#) ([Link zu Nebenstrang „Primärraffination“](#)).



Schritt 1: Mechanische Zerkleinerung von Holz (c) Verena Ortner



Schritt 2: Auftrennung in die Vorläufer Cellulose, Hemicellulosen und Lignin (c) Verena Ortner

Die getrennten Komponenten werden anschließend im Zuge der **Sekundärraffination** zu sogenannten Plattformchemikalien umgewandelt. Manchmal sind diese schon das gewünschte Produkt, meistens werden sie jedoch noch zu anderen Produkten oder Anwendungen weiterverarbeitet. Mehr Informationen zur Sekundärraffination findest du [HIER \(Link zu Nebenstrang Sekundärraffination\)](#).

Abbildung Schritt 3: Vorläufer zu Plattformchemikalien

In dem folgenden Spiel kannst du dein Wissen zu den Phasen von Bioraffinerien testen!

Learning-App Zuordnung Prozess

Ein wichtiges Produkt der chemischen Industrie, welches in Lignocellulose-Bioraffinerien hergestellt werden kann, ist Essigsäure. Diese wird unter anderem in großen Mengen für die Lebensmittel- sowie die chemische Industrie hergestellt. [HIER \(Link Nebenstrang Essigsäure\)](#) werden die Abläufe in einer Bioraffinerie beispielhaft an der Herstellung von Essigsäure aus Holz beschrieben.

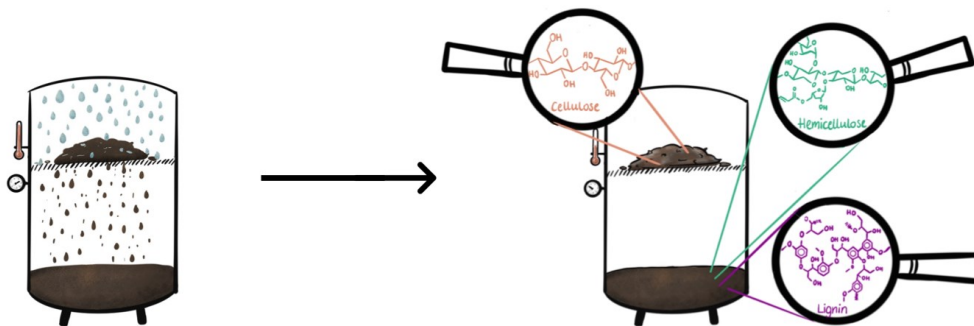
Wenn du mehr über die Biomasse Holz oder Grüne und nachhaltige Chemie wissen möchtest, klicke hier: (Buttons)

[\[Holzchemie\]](#) [\[Grüne Chemie\]](#)

Nebenstränge:

Primärraffination

Der Fachbegriff Primärraffination bezeichnet die Trennung von Holz in seine Komponenten. Dazu wird dieses zuerst mechanisch zerkleinert und dann mithilfe chemischer und physikalischer Prozesse aufgetrennt. Eine Möglichkeit dafür ist der **Kraft-Aufschluss (LINK)**. Allgemein entstehen aus einer Biomasse dann sogenannte Vorläufer. Handelt es sich bei der Biomasse beispielsweise um Holz, dann sind die Vorläufer **Cellulose**, **Hemicellulosen** und **Lignin** (jeweils verlinken).



Sekundärraffination

Die Sekundärraffination beschreibt alle Verarbeitungsschritte nach der Primärraffination. Der erste Schritt der Sekundärraffination ist die Verarbeitung der Vorläufer zu **Plattformchemikalien**, wie beispielsweise Ethanol, Glycerin und Milchsäure. In Bioraffinerien geschieht das meistens mithilfe biochemischer Prozesse wie der Fermentation mit Hilfe von Enzymen. Die entstandenen Plattformchemikalien machen ihrem Namen alle Ehre: Sie bilden eine Plattform zur Herstellung einer Vielzahl an nützlichen Produkten und Anwendungen, die mittels chemischer und biochemischer Prozesse hergestellt werden.

Abbildung Sekundärraffination

Beispiel Essigsäure

Mit einer weltweiten Produktionsmenge von 17 Mio. Tonnen pro Jahr ist Essigsäure eine bedeutende Chemikalie. Sie wird vorwiegend zur Herstellung von Klebstoffen, Farben und Lacken, Kunststoffen und Nahrungsmitteln genutzt. Um diese wichtige Chemikalie herzustellen, gibt es viele Möglichkeiten. Zwei davon stellen wir dir genauer vor.

Das aktuell gängigste Verfahren zur Herstellung von Essigsäure ist der sogenannte Monsanto-Prozess, der in den 60er-Jahren entwickelt wurde. Beim Monsanto-Prozess wird

Methanol an einem Rhodium-Katalysator mit Kohlenstoffmonoxid-Gas zu Essigsäure umgesetzt. Die folgende Abbildung zeigt die Reaktionsgleichung des Monsanto-Prozesses:



Der Prozess findet bei einer Temperatur 150-200°C und einem Druck von 30-60 bar statt. Das klingt vielleicht viel, im Vergleich zu anderen chemischen Verfahren sind das jedoch relativ milde Bedingungen (vgl. Aluminium-Herstellung). Katalytische Reaktionen, hohe Ausbeuten und reine Produkte bei milden Bedingungen – wozu braucht es dann noch andere Verfahren? Mit Blick auf Nachhaltigkeitsaspekte hat der Monsanto-Prozess drei Nachteile:

1. Die Edukte Methanol und Kohlenstoffmonoxid-Gas werden aus **fossilen Rohstoffen** gewonnen. Das Kohlenstoffmonoxid-Gas wird über sogenanntes Steam-Reforming aus Erdgas (hauptsächlich Methan-Gas) gewonnen und anschließend teilweise zu Methanol weiterverarbeitet. Bei diesem Schritt gelangt eine beachtliche Menge Kohlenstoffdioxid-Gas in die Umwelt, sodass dieser Prozess einen sehr hohen CO₂-Fußabdruck hat.
2. Um die Aktivität des Katalysators optimal zu halten und die Bildung von unerwünschten inaktiven Formen zu vermeiden, muss die Reaktion mit einem **Überschuss an Wasser** stattfinden, das bedeutet, dass viel Wasser eingesetzt wird.
3. Als Katalysator wird ein Rhodiumkomplex eingesetzt. Rhodium ist ein sehr seltenes Edelmetall, das nicht direkt in der Natur gefördert werden kann. Es wird als Nebenprodukt beim Abbau von Nickel und Platin vor allem in Südafrika und Russland gewonnen und daher nur in **sehr geringen Mengen** abgebaut.

Mittlerweile gibt es bereits neuere Wege, um Essigsäure nachhaltiger herzustellen – wobei, so neu sind sie ja eigentlich nicht. Bereits die alten Ägypter:innen konnten aus Holz sogenannten Holzeisig herstellen, um ihre Toten einzubalsamieren. Diese Methode wurde bei den Lignocellulose-Bioraffinerien aufgegriffen und weiterentwickelt, sodass immer mehr Unternehmen aus dem nicht-Nahrungsbereich auf Essigsäure aus Holz zurückgreifen.

Essigsäure kann sowohl aus der Hemicellulose- als auch aus der Cellulose-Komponente von Holz gewonnen werden. In Hemicellulosen sind von Grund auf Acetylgruppen vorhanden, welche durch Hydrolyse und eine Flüssig-Flüssig-Extraktion von den übrigen Bestandteilen abgetrennt werden können. Cellulose-Moleküle können in einzelne Glucose-Moleküle zerlegt werden - dies passiert in einer wässrigen Schwefelsäure-Lösung. Die Glucose-Moleküle können in einem Fermentor unter anaeroben Bedingungen zuerst zu Ethanol-Molekülen und dann zu Essigsäure-Molekülen reagieren. Im folgenden Spiel kannst du dein Wissen über den Ablauf in der Bioraffinerie testen:

[Learning-App Bioökonomie Fermentor](#)

Übrigens: Wusstest du, dass sogar die Verpackung für einen Essigsäure-Reiniger aus Holz hergestellt werden kann? Eine wichtige Plattformchemikalie, die in der Lignocellulose-Bioraffinerie anfällt, ist Milchsäure. Daraus kann der biogene Kunststoffe PLA (Polymilchsäure) hergestellt werden. Wenn du mehr über biogene Kunststoffe und Polymilchsäure wissen möchtest, klicke [HIER](#). (Link zu Station „biogene Kunststoffe“)

7.7 Kodierleitfaden zur Erhebung

Codesystem

1 Grüne Chemie
1.1 Grüne Chemie Allgemein
1.2 1. Prevent Waste
1.3 3. Less hazardous chemical synthesis
1.4 10. Design for Degradation
2 Chemie
2.1 Gefährdung
2.2 Chemie
3 Natur, Umwelt & Klima
3.1 Bio
3.2 Nachhaltigkeit
3.3 Natur
3.4 Klima
4 Stoffe
4.1 Öl
4.2 Ausgangsstoffe
4.3 Endstoffe
4.4 Prozess
4.5 Treibstoffe
5 Produktion & Energie
5.1 Produktion/Industrie
5.2 Produktionsstätten
5.3 Energie
6 Wirtschaft
7 Zukunft
8 Gesundheit
9 Begriff Raffinieren
10 subjektive Wertungen
11 weiß nicht
12 nicht zuordenbar + unklar

1 Grüne Chemie

Nur Oberkategorie, keine Zuordnung

1.1 Grüne Chemie Allgemein

Beschreibung: Explizite Nennungen des Begriffs Grüne Chemie; Assoziationen, die eine grüne(re) Chemie implizieren.

Ankerbeispiel: Grüne Chemie; grün

Kodierregel: Wenn ein konkretes Prinzip deutlich erkennbar ist, dann Subkategorie 1.2, 1.3 oder 1.4

1.2 1. Prevent Waste

Beschreibung: Nennungen, deren Wortlaut eindeutig das erste Prinzip wiedergeben. Dieses lautet (deutsche Version): Abfallvermeidung

Ankerbeispiel: Weniger Abfallstoffe

Kodierregel: Wenn keine Reduktion der Abfälle erkennbar ist, dann voraussichtlich Subkategorie 4.2 oder 4.3

1.3 3. Less hazardous chemical synthesis

Beschreibung: Nennungen, deren Wortlaut eindeutig das dritte Prinzip wiedergeben. Dieses lautet (deutsche Version): Durchführung von Synthesen mit weniger gefährlichen Stoffen. Bezug auf ein Veränderung eines Prozesses (z.B. ausgedrückt durch den Komparativ „weniger“).

Ankerbeispiel: Verwendete Chemikalien sollen möglichst wenig schädlich für die Umwelt sein; weniger giftige Stoffe

Kodierregel: Wenn keine Veränderung erkenntlich ist, sondern nur Risiko (z.B. gefährlich), dann Kategorie 2.1

1.4 10. Design for Degradation

Beschreibung: Nennungen, deren Wortlaut eindeutig das erste Prinzip wiedergeben. Dieses lautet (übersetzt): Herstellung biologisch abbaubarer Stoffe

Ankerbeispiel: biologisch abbaubar

Kodierregel:

2 Chemie

Nur Oberkategorie, keine Zuordnung

2.1 Gefährdung

Beschreibung: Nennungen, die Gefährdung aufgrund chemischer Prozesse und Stoffe thematisieren (sowohl positiv als auch negativ)

Ankerbeispiel: CO₂-Belastung; Pestizide; giftige Stoffe; schädliche Stoffe,

Kodierregel:

2.2 Chemie

Beschreibung: Nennungen mit dem Fokus auf Chemie als Lehre von Stoffen und ihren Veränderungen bzw. als Forschungsgebiet

Ankerbeispiel: Chemie; chemisch; CO₂; Experimente; Laborarbeit

Kodierregel:

3 Natur, Umwelt & Klima

Nur Oberkategorie, keine Zuordnung

3.1 Bio

Beschreibung: Nennungen, die den Begriff "Bio" enthalten

Ankerbeispiel: biologische Stoffe; Biologie; Biomasse; Biochemie

Kodierregel:

3.2 Nachhaltigkeit

Beschreibung: Nennungen, die einen Bezug zu Nachhaltigkeitsaspekten haben (Ökologie, Ökonomie und Soziales)

Ankerbeispiel: nachhaltig; Umwelt; nachhaltige Wirtschaft; Umweltschutz; Arbeitsplätze

Kodierregel: Wenn nur Nennung von Dingen aus der Natur und nicht das große Ganze, dann Kategorie 3.3

3.3 Natur

Beschreibung: Nennungen zu Dingen und Prozessen aus der Natur, die keinen Prozess beschreiben.

Ankerbeispiel: Pflanzen; naturfreundlich; Zeichnung einer Sonne

Kodierregel: Wenn ein Prozess in der Natur beschrieben wird, dann 3.2

3.4 Klima

Beschreibung: Nennungen mit eindeutigem Konnex zum Klima; der Begriff muss explizit genannt werden.

Ankerbeispiel: klimaneutral; Klima; gegen die Klimaänderung

Kodierregel: Wenn der Begriff Klima nicht genannt wird, dann voraussichtlich Kategorie 3.2

4 Stoffe

Nur Oberkategorie, keine Zuordnung

4.1 Öl

Beschreibung: Nennungen, die den Begriff Öl enthalten

Ankerbeispiel: Erdöl; Ö raffinerie; irgendwas mit Öl

Kodierregel:

4.2 Ausgangsstoffe

Beschreibung: Nennungen, die im gegebenen Kontext Vermutungen zu Edukten (Rohstoffen) einer Bioraffinerie sein können. Die Verbindung zur Bioraffinerie muss deutlich erkennbar sein. Auch das Nennen des Begriffs Rohstoff fällt in diese Kategorie, weil es eine Stoffumwandlung von Rohstoff zu Produkt impliziert.

Ankerbeispiel: Rohölverarbeitung zu Biokraftstoffen; Abfall wird verarbeitet; Altplastik oder Glas reinigen

Kodierregel: Wenn nur ein Stoff genannt ist, ohne Bezug zu einer Veränderung, dann voraussichtlich Kategorie 4.1 oder 3.3. Als Kontexteinheit gilt ein Erhebungsbogen.

4.3 Endstoffe

Beschreibung: Nennungen, die im gegebenen Kontext Vermutungen zu Produkten (Endstoffen) einer Bioraffinerie sein können. Die Verbindung zur Bioraffinerie muss deutlich erkennbar sein. Auch das

Nennen der Begriffe Produkt, Emissionen und Rauch fällt in diese Kategorie, weil es eine Stoffumwandlung von Rohstoff zu Endstoff impliziert.

Ankerbeispiel: Umwandlung von Holz zu Lignin; Erzeugung von Endprodukten; Abgase, Entstehung von Futter

Kodierregel: Wenn nur ein Stoff genannt ist, ohne Bezug zu einer Veränderung, dann voraussichtlich Kategorie 4.1 oder 3.3. Als Kontexteinheit gilt ein Erhebungsbogen. Wenn bestimmten Endstoffen eine Gefahr zugesprochen wird (z.B. gefährliche chemische Abfälle), dann Kategorie 2.1

4.4 Prozess

Beschreibung: Nennungen, die im gegebenen Kontext Vermutungen zu Abläufen in einer Bioraffinerie sein können bzw. die Bioraffinerie als Prozess beschreiben. Die Verbindung zur Bioraffinerie muss deutlich erkennbar sein.

Ankerbeispiel: Herstellung von Öl; Untersuchungen; Umwandlung; Anwendungsmethode

Kodierregel: Wenn kein Prozess, sondern ein Gebäude genannt wird, dann Kategorie 5.2

4.5 Treibstoffe

Beschreibung: Nennungen, die eine eindeutige Assoziation mit Treibstoffen und/oder Fahrzeugen vermuten lassen.

Ankerbeispiel: Gewinnung von Kraftstoff; "Grüne" Kraftstoffe; Flughafen; Eco- Fuels

Kodierregel: Wenn nur Rohöl genannt wird und keine Verbindung zu Treibstoffen erkenntlich ist, dann Kategorie 4.1 oder 4.2

5 Produktion & Energie

Nur Oberkategorie, keine Zuordnung

5.1 Produktion/Industrie

Beschreibung: Nennungen der Begriffe Produktion und Industrie ohne erkennbare Verbindung zu Produktionsstätten oder Energie.

Ankerbeispiel: eine Industrie, Produktion

Kodierregel: Wenn nur Rohöl genannt wird und keine Verbindung zu Treibstoffen erkenntlich ist, dann Kategorie 4.1 oder 4.2

5.2 Produktionsstätten

Beschreibung: Nennungen, die Vorstellungen über eine Bioraffinerie als Produktionsstätte abbilden. Dies können Geräte, Standorte, bauliche Strukturen, etc. sein.

Ankerbeispiel: Zeichnung einer Fabrik; Schwechat; Industriegebäude; Maschinen

Kodierregel:

5.3 Energie

Beschreibung: Assoziationen rund um den Energiebegriff.

Ankerbeispiel: Energiegewinnung; Bioenergie; Stromausfall; erneuerbare Energiequellen

Kodierregel:

6 Wirtschaft

Beschreibung: Nennungen mit Bezug zu wirtschaftlichen Faktoren.

Ankerbeispiel: Landwirtschaftlich; Fließbandarbeit; Kapitalismus

Kodierregel:

7 Zukunft

Beschreibung: Assoziationen der Bioraffinerie mit Prozessen und Produkten der Zukunft.

Ankerbeispiel: fortschrittlich; Chemie für eine grünere Zukunft; Pläne gestalten für die Zukunft

Kodierregel:

8 Gesundheit

Beschreibung: Positiv konnotierte Assoziationen von Bioraffinerie mit Bezug zu Gesundheit.

Ankerbeispiel: gesund; Bio=gesund; Sauberkeit

Kodierregel:

9 Begriff Raffinieren

Beschreibung: Nennungen, die eine sprachliche oder inhaltliche Herleitung des Begriffs Bioraffinerie implizieren. Dabei werden meist noch weiter Kodierungen bzgl. Rohstoffen, Produkten, Prozessen und Produktionsstätten notwendig sein. Es muss erkennbar sein, dass "geraten" wurde. Außerdem Nennungen rund um den Begriff Raffinieren.

Ankerbeispiel: raffiniert = schlau; Bio-Raffinerie → Kernöl oder so?; Raffinerie

Kodierregel: Mehrfachkategorisierung oftmals notwendig!

10 subjektive Wertungen

Beschreibung: Assoziationen, die persönliche Meinungen und Empfindungen ausdrücken.

Ankerbeispiel: Hässlich in der Landschaft; komplex; kann sicher nicht große Städte mit Strom versorgen

Kodierregel:

11 weiß nicht

Beschreibung: Nennungen, die explizit das Unbekannte des Begriffs Bioraffinerie beschreiben.

Ankerbeispiel: weiß ich nicht?; ???; ja idk man -.-

Kodierregel:

12 nicht zuordenbar + Unklar

Beschreibung: Nennungen, bei denen kein klarer, erkennbarer Bezug zum zentralen Begriff Bioraffinerie erkennbar ist.

Ankerbeispiel: generell Sachwissenschaft; Sedierung; Bauern; Affinität

Kodierregel: