

Kautschuk aus Löwenzahn in der curricularen Innovation

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Pädagogik

vorgelegt von
Mareike Göbel

Eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2017

gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier

Erstgutachter:	Prof. Dr. Martin Gröger
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Michael W. Tausch
Datum der Disputation:	14.03.2018
Prüfer:	Prof. Dr. Martin Gröger (Didaktik der Chemie) Prof. Dr. Michael W. Tausch (Didaktik der Chemie) Prof. Dr. Oliver Schwarz (Didaktik der Physik) Prof. Dr. Ralph Dreher (Technikdidaktik am Berufskolleg)

Zusammenfassung

Der Löwenzahn ist eine weit verbreitete und wohlbekannt, aber auch unterschätzte Pflanze. In neueren Forschungsprojekten untersucht man intensiv die russische Löwenzahnart *Taraxacum kok-saghyz*, die in ihren Wurzeln Kautschuk von hoher Qualität führt. Dort findet sich auch das Reservekohlenhydrat Inulin, welches als Ballaststoff und Zucker- sowie Fettaustauschstoff eingesetzt werden kann. Der aus *Taraxacum kok-saghyz* isolierbare Kautschuk soll zukünftig in der Reifenherstellung und Automobilindustrie Anwendung finden; für das Inulin interessiert sich vor allem die Lebensmittelindustrie.

Aktualität, Relevanz und Bedeutung dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Zukunft machen die Thematik auch als Unterrichtsinhalt für den Chemieunterricht interessant. In diesem Sinne wird das Thema im Rahmen dieser Arbeit nach dem Ansatz der curricularen Innovationsforschung für den Chemieunterricht aufbereitet.

Dazu wurden zunächst Experimente entwickelt, mit denen es Lernenden möglich ist, Kautschuk und Inulin selbstständig aus den Wurzeln des russischen Löwenzahns zu gewinnen und die Produkte im Experiment sowie mit modernen Analysemethoden nachzuweisen. Davon ausgehend wurden Unterrichtsmaterialien entwickelt, die aktuellen fachdidaktischen Herausforderungen wie einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, Relevanz und Gesellschaftsbezug sowie Einbezug von NOS (*nature of science*) gerecht werden.

Zur Sicherung der Durchführbarkeit und schulischen Eignung wurden die entwickelten Experimente und Unterrichtsmaterialien im Rahmen von Projekttagen mit Oberstufenkursen erprobt. Dabei wurde auch eine Erhebung zum aktuellen Interesse der teilnehmenden Lernenden an Tätigkeiten im und Inhalten des Projektes durchgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die experimentelle Beschäftigung mit Kautschuk den Lernenden Freude bereitet und ihr aktuelles Interesse weckt.

Abstract

Dandelion is a widespread and well known but also rather underestimated plant. In current research projects, the Russian species of dandelion *Taraxacum kok-saghyz* is investigated. The plant contains high-quality rubber in its roots and also the carbohydrate inulin, which is not only a dietary fibre but can also be used as a substitute for fat and sugar. In the future, it is planned to use the isolated rubber from *Taraxacum kok-saghyz* for tyre production and in the car industry; the inulin is of special interest for the food industry.

Topicality, relevance and significance of these research and development projects also make the topic interesting for chemistry lessons in school. With this in mind, the topic is edited following the approach of curricular innovation research for chemistry classes.

For this purpose, experiments were developed to enable students to extract rubber and inulin independently and subsequently detect the products in experiments and by using modern methods of analysis. On that basis, teaching materials and a concept for chemistry classes were developed that meet the requirements of recently discussed challenges in chemistry didactics such as an education for sustainable development (ESD), relevance, societal dimension and *nature of science* (NOS).

The feasibility and practicability of the developed experiments and teaching materials were tested with students of grade 10 to 13 (“Oberstufe”). A survey to evaluate the actual interest of the participants in activities and contents of the projects was made. The results indicate that experimenting with rubber gives the students pleasure and arouses their actual interest.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Curriculare Innovationsforschung und Aufbau der Arbeit.....	4
3 Theoretische Grundlagen – Kautschuk und Inulin.....	8
3.1 Kautschuk	8
3.1.1 Begriffsklärung	8
3.1.2 Chemische Betrachtung: Struktur und Eigenschaften.....	9
3.1.3 Historischer Abriss – von der Entdeckung des Rohstoffs bis zum „Kautschukboom“	13
3.1.4 Überblick über Kautschuk produzierende Pflanzen.....	15
3.1.4 Die Kautschukbiosynthese in <i>Hevea brasiliensis</i>	21
3.1.5 Historische Entwicklung des Forschungsverlaufs zur Entschlüsselung der Kautschukformel	23
3.1.5.1 Die Achtringhypothese von Carl Dietrich Harries	24
3.1.5.2 Der Weg zum Makromolekül mit Hermann Staudinger.....	28
3.2 Der russische Löwenzahn <i>Taraxacum kok-saghyz</i>	30
3.2.1 Morphologische Grundlagen.....	30
3.2.1.1 Blätter, Blüten und Samen.....	30
3.2.1.2 Die Wurzeln, der Ort der Kautschukspeicherung.....	33
3.2.2 Geographische Verbreitung und Vegetationsphasen	37
3.2.3 Düngung und Züchtung.....	38
3.2.4 Biosynthese des Kautschuks in <i>Taraxacum kok-saghyz</i>	41
3.2.4.1 Ablauf der Synthese.....	41
3.2.4.2 An der Biosynthese beteiligte Enzyme.....	44
3.2.5 Historische Betrachtung der <i>T. kok-saghyz</i> -Forschung.....	46
3.2.5.1 Suche und Auffinden von <i>T. kok-saghyz</i>	48
3.2.5.2 Forschung zu <i>Taraxacum kok-saghyz</i> im „Dritten Reich“	51
3.2.5.3 Anbau in besetzten Gebieten im Osten.....	56
3.2.5.4 Pflanzenzüchtung in Rajsko bei Auschwitz	59
3.3 Inulin	68
3.3.1 Chemische Betrachtung: Struktur und Eigenschaften	68
3.3.2 Biosynthese des Inulins in <i>Taraxacum kok-saghyz</i>	68
3.3.3 Großtechnische Gewinnung und Verwendung von Inulin.....	73
4 Eigene experimentelle Untersuchungen	77
4.1 Entwicklung von Schülerexperimenten zu Kautschuk aus Löwenzahn	78

4.1.1	Gewinnung von Kautschuk aus <i>getrockneten</i> Löwenzahnwurzeln.....	81
4.1.1.1	Erster Kontakt mit Kautschuk	81
4.1.1.2	Gewinnung von Kautschuk durch Mörsern	81
4.1.1.3	Gewinnung von Kautschuk durch Dichtentrennung in der Zentrifuge	83
4.1.1.4	Gewinnung von Kautschuk durch Lösen in Petroleumbenzin	85
4.1.1.5	Gewinnung von Kautschuk durch Lösen des Wurzelgewebes mit Natronlauge.....	87
4.1.1.6	Gewinnung von Kautschuk über mikrobiologischen Aufschluss.....	89
4.1.2	Gewinnung von Kautschuk aus <i>frischen</i> Löwenzahnwurzeln	91
4.1.2.1	Extraktion von Latexmilch mit Extraktionspuffer.....	91
4.1.2.2	Koagulation von Latexmilch in Essigsäure	92
4.1.3	Analyse des gewonnenen Materials	95
4.1.3.1	Nachweis der Doppelbindungen mit Brom	95
4.1.3.2	Baeyer-Probe für Doppelbindungen in <i>T. kok-saghyz</i> -Kautschuk	96
4.1.3.3	Aufreinigung des gewonnenen Kautschuks.....	98
4.1.3.4	Pyrolyse und Farbnachweis nach Burchfield	99
4.1.3.5	IR-Spektroskopie der Pyrolyseflüssigkeit	102
4.1.3.6	Färbung der Milchröhren mit Sudan III oder Sudanschwarz B.....	104
4.1.4	Weiterverarbeitung des gewonnenen Materials	107
4.1.4.1	Vulkanisation einer Probe aus Löwenzahnkautschuk	107
4.2	Entwicklung von Schülerexperimenten zu Inulin aus Löwenzahn.....	110
4.2.1	Gewinnung von Inulin aus Löwenzahnwurzeln.....	110
4.2.1.1	Isolierung von Inulin durch ausschließlichen Einsatz von Ethanol.....	110
4.2.1.2	Isolierung von Inulin durch Ausfällen von Nichtzuckerstoffen mit Calcium-Ionen und Einsatz von Ethanol.....	113
4.2.1.3	Extraktion von Inulin mit heißer Calciumnitrat-Lösung und Einsatz von Ethanol	116
4.2.1.4	Vergleich der Isolierungsmethoden	118
4.2.2	Analyse des gewonnenen Inulins	119
4.2.2.1	Bestimmung des Zersetzungsbereiches	120
4.2.2.1	Seliwanow-Reaktion zum Nachweis von Fructose	121
4.2.2.2	Saure Hydrolyse des gewonnenen Inulins.....	123
4.2.2.3	Dünnschichtchromatographie des Löwenzahn-Inulins und Inulin-Hydrolysats	124
4.3	Zusammenfassung und Diskussion der Experimente	127

5	Entwicklung und Erprobung von Unterrichtsmodulen	132
5.1	Didaktisch-konzeptionelle Erschließung	133
5.1.1	Thematisierung von Kautschuk in den Lehrplänen	133
5.1.2	Vorhandenes Material zu Kautschuk im Chemieunterricht	135
5.1.2.1	Experimente mit Kautschuk in der fachdidaktischen Literatur	135
5.1.2.2	Kautschuk in Schulbüchern und Unterrichtsmaterialien ..	136
5.1.3	Inulin in den Lehrplänen	137
5.1.4	Vorhandenes Material zu Inulin im Chemieunterricht.....	139
5.1.4.1	Inulin in der fachdidaktischen Literatur	139
5.1.4.2	Inulin in Schulbüchern und Unterrichtsmaterialien	141
5.2	Konzeptionelle Leitlinien.....	143
5.2.1	Förderung von Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) durch Beschäftigung mit Kautschuk aus Löwenzahn	145
5.2.2	Förderung von Wissen über <i>nature of science</i>	148
5.2.3	Förderung von als relevant wahrgenommenen Themen	153
5.2.4	Gestaltung eines gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts	158
5.3	Schlussfolgerungen für den Einsatz im Unterricht	161
5.3.1	Anregungen für die weiterführende Schule	162
5.3.1.1	Chemieunterricht	162
5.3.1.2	Fächerübergreifendes Arbeiten.....	164
5.3.2	Exkurs: Anregungen für die Grundschule.....	165
5.3.3	Beschreibung eines beispielhaften Projekttagess	167
5.4	Evaluation des Projektmoduls.....	172
5.4.1	Das Interessenkonstrukt	173
5.4.2	Beschreibung der Erhebung	175
5.4.3	Ergebnisse der Erhebung.....	177
5.5	Zusammenfassende Diskussion des Moduls und der Erhebung.....	179
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	182
7	Literaturverzeichnis.....	185
Anhang	199
I.	Personenregister und Personenkonstellation.....	199
II.	Fotostrecke für theoretische Versuche.....	202
III.	Fragebogen.....	205
IV.	Beschreibung der Stichprobe und grafische Übersicht über die Ergebnisse	207
V.	Versuchsanleitungen und Arbeitsmaterialien für den Einsatz in Schulen	210
A.	Praktikumsskript für den Einsatz im Schülerlabor.....	210
B.	Weitere Schülerarbeitsmaterialien	222
VI.	Sicherheitsdaten zu den eingesetzten Chemikalien	224

Abkürzungsverzeichnis

BdK	Bevollmächtigter für das Kraftfahrtwesen
BNE	Bildung für nachhaltige Entwicklung
Buna	Butadien-Natrium
CPT	<i>Cis</i> -Prenyltransferasen
DC	Dünnschichtchromatographie
DEGINTU	Gefahrstoffinformationssystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung
DP	Degree of polymerisation
DRIVE4EU	Dandelion Rubber and Inulin Valorization and Exploitation for Europe
EU-PEARLS	EU-based Production and Exploitation of Alternative Rubber and Latex Sources
Fraunhofer IME	Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie
GESTIS	Gefahrstoffinformationssystem
GHS	Globally Harmonised System
HMF	Hydroxymethylfurfural
IPP	Isopentenylpyrophosphat
IR	Infrarot
KWI	Kaiser-Wilhelm-Institut
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik
NMR	Nuclear magnetic resonance
NOS	Nature of Science
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PENRA	The Program of Excellence in Natural Rubber Alternatives
PPO	Polyphenoloxidase
REF	Rubber elongation factor
RISU-NRW	Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in Nordrhein-Westfalen
RNA	Ribonucleic acid
ROSE	The Relevance of Science Education
RTA	Rubber transferase activator
SRPP	Small rubber particle protein
SSR	Sozialistische Sowjetrepublik
TARULIN	Taraxacum koksaghyz als nachhaltige Quelle für die lokale Produktion von Latex, Kautschuk und Inulin

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Regionale Exporte von Naturgummi.....	15
Tabelle 2: Überblick über die Forschung zur Kautschukformel	23
Tabelle 3: Gegenüberstellung von Blättern, Blüten und Samen des russischen und heimischen Löwenzahns	31
Tabelle 4: Übersicht über die beteiligten Enzyme.....	44
Tabelle 5: Die ersten Kautschuk-Arbeitsgemeinschaften	50
Tabelle 6: Das <i>T. kok-saghyz</i> -Netzwerk um 1941	54
Tabelle 7: Aufgabenverteilung zur <i>T. kok-saghyz</i> -Forschung und -Verarbeitung ab 1943	56
Tabelle 8: Anbauflächen, Samen- und Wurzelernte 1943.....	58
Tabelle 9: Organisation der Versuchsstation zu <i>T. kok-saghyz</i>	63
Tabelle 10: Inulingehalt und Kettenlängen ausgewählter Pflanzen	70
Tabelle 11: Ergebnisse der Analyse der getrockneten Wurzeln des selbst angepflanzten russischen Löwenzahns.....	77
Tabelle 12: Zersetzungsgebiete des gewonnenen Inulins.....	120
Tabelle 13: Übersicht über die Inhalte zu Kautschuk und Gummi in ausgewählten Lehrbüchern	137
Tabelle 14: Übersicht über die Inhalte zu Kohlenhydraten und Inulin in ausgewählten Lehrbüchern	142
Tabelle 15: Rahmen für Definition und Auswahl geeigneter Themen für Bildung für nachhaltige Entwicklung nach Barth	146
Tabelle 16: Vier-Säulen-Modell des gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts	159
Tabelle 17: Kriterien für die Themenwahl am Beispiel „Kautschuk aus Löwenzahn“	159
Tabelle 18: Überblick über mögliche Fragestellungen bei der Beschäftigung mit <i>Taraxacum kok-saghyz</i>	162
Tabelle 19: Chemische Basiskonzepte und ihre mögliche Anwendung in der Beschäftigung mit Kautschuk aus Löwenzahn	163
Tabelle 20: Tabellarischer Verlaufsplan über den Projekttag im Science Forum.....	169
Tabelle 21: Übersicht über die erhobenen Variablen	176
Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen für die Komponenten des aktuellen Interesses und die einzelnen Items des Fragebogens.	177
Tabelle 23: Spezifische Färbungen nach Burchfield.....	204
Tabelle 24: Übersicht über die Stichprobe	207
Tabelle 25: Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Items.....	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Curriculare Innovationsforschung	4
Abbildung 2: Überblick über den Aufbau der vorliegenden Arbeit nach dem Konzept der curricularen Innovation	7
Abbildung 3: Strukturformeln von Isopren (links) und <i>cis</i> -1,4-Polyisopren (rechts)	9
Abbildung 4: Modellhafte Darstellung von vulkanisierten Kautschukketten	10
Abbildung 5: Kautschukplantage (<i>Hevea brasiliensis</i>)	17
Abbildung 6: Austretende Latexmilch aus einem Kautschukbaum	17
Abbildung 7: Geräuchertes Stück Kautschuk	18
Abbildung 8: Guayule-Strauch	18
Abbildung 9: Stachellattich (<i>Lactuca serriola</i>)	20
Abbildung 10: Vorschlag der Reaktion von Acetaldehyd und Aceton unter Wasserabspaltung zu Isopren	22
Abbildung 11: Original Kautschukformel nach Pickles	25
Abbildung 12: Strukturformel von Lävulinsäure	26
Abbildung 13: Hypothetisches Modell des Kautschuks nach Harries	26
Abbildung 14: Ozonisation von Kautschuk und von der von Harries vorgeschlagenen cyclischen Struktur	27
Abbildung 15: Partiiell isomerisiertes Kautschukmolekül und darunter das durch Ozonisation entstandene Produkt	28
Abbildung 16: Einjährige Pflanze des <i>T. kok-saghyz</i>	34
Abbildung 17: Keilschnitt aus der Wurzel des russischen Löwenzahns mit den dunkel markierten Milchröhren	35
Abbildung 18: Frische Wurzel des <i>Taraxacum kok-saghyz</i> im zweiten Wachstumsjahr mit koaguliertem Kautschuk in der äußeren Hülle	35
Abbildung 19: Kautschukfäden in einer getrockneten Wurzel des <i>T. kok-saghyz</i>	36
Abbildung 20: Karte des Vorkommens von <i>Taraxacum kok-saghyz</i>	37
Abbildung 21: Färbung der Milchröhren mit Sudan III	42
Abbildung 22: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in den Wurzeln des <i>T.</i> <i>kok-saghyz</i>	42
Abbildung 23: Strukturformeln der allylischen Oligoisopren-diphosphate, Ausgangsstoffe der Kautschuksynthese	43
Abbildung 24: Modell der Kautschuksynthese	46
Abbildung 25: Menge an Forschungsdokumenten zu Löwenzahn in den letzten 250 Jahren	51
Abbildung 26: Überblick über die wichtigsten Faktoren der zeitlichen Entwicklung in der landwirtschaftlichen Versuchsstation Rajsco	60
Abbildung 27: Übersicht über das Interessengebiet Auschwitz mit Markierung in Rajsco	61
Abbildung 28: Eine <i>T. kok-saghyz</i> -Pflanze bei der Bestäubung	64

Abbildung 29: Häftlinge bei der Arbeit auf den Feldern.....	64
Abbildung 30: Versuchsfeld des russischen Löwenzahns in Rajsko bei Auschwitz	65
Abbildung 31: Struktur eines Inulin-Moleküls.....	69
Abbildung 32: Schematische Darstellung der Biosynthese von Inulin	72
Abbildung 33: Keimling des russischen Löwenzahns zwei Wochen nach Aussaat der Samen.....	79
Abbildung 34: Löwenzahn-Pflanze nach etwa zweieinhalb Monaten	79
Abbildung 35: Rosette nach drei bis dreieinhalb Monaten	80
Abbildung 36: Erste Fruchtreife nach bei etwa vier Monate alten Pflanzen.....	80
Abbildung 37: Kautschukfäden in einer getrockneten <i>T. kok-saghyz</i> -Wurzel	81
Abbildung 38: Gewinnung des Kautschuks durch Mörsern.....	82
Abbildung 40: Kautschuk, gewonnen durch Mahlen, Zentrifugieren und anschließendes Mörsern	84
Abbildung 41: Modell eines Bioreaktors zur Herstellung von Löwenzahnpolymeren in einem Schulbuch	85
Abbildung 42: Extraktion von Kautschuk mit Benzin	86
Abbildung 43: Kautschuknetz	88
Abbildung 44: Kautschuk, gewonnen aus mehreren getrockneten Wurzelstücken durch Kochen in Natronlauge	88
Abbildung 45: Kautschuk, gewonnen aus mehreren frischen Wurzelstücken durch Kochen in Natronlauge	88
Abbildung 46: Durch mikrobiologischen Aufschluss aufgeweichtes Wurzelmaterial ..	90
Abbildung 47: Kautschuk, gewonnen durch Fäulnis des Wurzelmaterials sowie Auswaschen und Mörsern	90
Abbildung 48: Dünner Film aus Latexmilch (auf Extraktionspuffer).....	92
Abbildung 49: Wurzelstücke in Essigsäure (links), koagulierter Kautschuk in Essigsäure (rechts als Ausschnittsvergrößerung).....	94
Abbildung 50: Kautschuk, gewonnen aus etwa 18 g frischen Wurzeln.....	94
Abbildung 51: Kautschukprobe aus <i>Taraxacum kok-saghyz</i> , gelöst in Petroleumbenzin und versetzt mit Bromwasser	96
Abbildung 52: Lösung aus Kautschuk in Petroleumbenzin nach Zugabe des Baeyer- Reagenz.....	97
Abbildung 53: Pyrolysegase bei der Pyrolyse des gewonnenen Kautschuks.....	99
Abbildung 54: Färbung der Reagenzlösung nach Einleiten der Pyrolysegase.....	100
Abbildung 55: Möglicher Reaktionsmechanismus zur Burchfield-Reaktion, beispielhaft dargestellt mit Isopren.....	101
Abbildung 56: IR-Spektrum des Pyrolysats aus selbst gewonnenem Löwenzahnkautschuk.....	102
Abbildung 57: IR-Spektrum von Isopren	103
Abbildung 58: IR-Spektrum von Dipenten	103
Abbildung 59: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in <i>Taraxacum kok-saghyz</i> (100-fache Vergrößerung).....	105

Abbildung 60: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in <i>Taraxacum kok-saghyz</i> (400-fache Vergrößerung).....	105
Abbildung 61: Milchröhren in <i>Taraxacum kok-saghyz</i> , gefärbt mit Sudanschwarz B (links 40fache Vergrößerung, rechts 100fache Vergrößerung).....	106
Abbildung 62: Milchröhren in <i>Taraxacum officinale</i> , gefärbt mit Sudanschwarz B-Lösung (100fache Vergrößerung)	107
Abbildung 63: Vulkanisierter Löwenzahnkautschuk	108
Abbildung 64: Vulkanisation von Naturkautschuk	109
Abbildung 65: Inulin aus Löwenzahn, gefällt mit Ethanol	111
Abbildung 66: Weißer Niederschlag nach Zugabe von Ethanol	114
Abbildung 67: Inulin aus Löwenzahn, nach Ausfällen der Salze mit Calciumhydroxid.....	114
Abbildung 68: Hofmeister-Reihe	115
Abbildung 69: Weißer Niederschlag von Inulin nach Zugabe von Ethanol.....	117
Abbildung 70: Inulin aus Löwenzahn, nach Kochen in Calciumnitrat-Lösung und anschließendem Ausfällen mit Ethanol.....	117
Abbildung 71: Vergleich der gewonnenen Produkte	119
Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der Seliwanow-Reaktion.....	122
Abbildung 73: Reaktionsgleichung zur Seliwanow-Reaktion.....	122
Abbildung 74: Ergebnis der Dünnschichtchromatographie mit Löwenzahn-Inulin	125
Abbildung 75: Bildung des violetten Farbstoffs	126
Abbildung 76: Modell zum Verständnis von Relevanz im naturwissenschaftlichen Unterricht	154
Abbildung 77: Concept-Map zur Begriffsklärung von Latex, Kautschuk und Gummi	170
Abbildung 78: Relationale Struktur im Interessenkonstrukt.....	174
Abbildung 79: Versuchsaufbau	202
Abbildung 80: Reagenzlösung	202
Abbildung 81: Erhitzen der Probe	203
Abbildung 82: Versuchsaapparatur nach Abschluss der Pyrolyse.....	203
Abbildung 83: Reagenzlösung nach Einleiten eines Naturkautschuk-Pyrolysats (aus <i>Taraxacum kok-saghyz</i>) und Erhitzen mit Methanol	203
Abbildung 84: Reagenzlösung nach Einleiten eines Naturkautschuk-Pyrolysats (aus <i>Hevea brasiliensis</i>) und Erhitzen mit Methanol	204

1 Einleitung

Herkömmlicherweise wird Naturkautschuk durch Anzapfen des tropischen Kautschukbaumes *Hevea brasiliensis* und Koagulation der aus der Rinde austretenden Milch gewonnen. Der dabei entstehende Feststoff weist einzigartige Eigenschaften auf, die ihn zu einem unersetzlichen Ausgangsmaterial für diverse Gummiprodukte – vom Autoreifen bis zu medizintechnischem Zubehör – machen und die trotz intensiver Forschung bislang auf synthetische Weise nicht nachempfunden werden konnten.

Aufgrund verschiedener Faktoren gerät die Produktion von Naturkautschuk aktuell allerdings mehr und mehr an ihre Grenzen, sodass verstärkt alternative Kautschukquellen in den Fokus der Forschung rücken. Dies liegt zum einen an der immer weiter steigenden Nachfrage nach Kautschuk, besonders auch in Schwellenländern. Der Kautschukbaum gedeiht jedoch nur in den subtropischen Gebieten der Welt im Bereich des sogenannten „Kautschukgürtels“. Eine Plantagenwirtschaft ist nur in Südostasien möglich. Um dem steigenden Bedarf an Naturkautschuk Rechnung zu tragen, werden sogar Regenwaldflächen abgeholzt, damit *Hevea brasiliensis* weiterhin in ausreichendem Maße kultiviert werden kann.

Die Kautschukbaumplantagen werden zum anderen durch Ölpalmen verdrängt, deren Anbau zurzeit lukrativer ist. *Hevea brasiliensis* ist außerdem besonders anfällig gegenüber dem Schlauchpilz *Microcyclus ulei*, der durch Befall der Blätter schon heute dafür sorgt, dass in der Wildheimat des Kautschukbaumes im Bereich des Amazonasbeckens in Südamerika keine Plantagenwirtschaft möglich ist. Sollte dieser Pilz auch in die Gebiete der Plantagenwirtschaft in Südostasien vordringen, ist mit Ernteausfällen in großem Ausmaß zu rechnen.

Einen weiteren Faktor für die Suche nach Alternativen stellen Allergien gegen Naturkautschuk dar. Die Zahl der davon Betroffenen, vor allem im medizinischen Sektor, steigt stetig an, sodass neben synthetischen Varianten auch der Ruf nach natürlichem Ersatz laut wird.

Unter anderem aus diesen Gründen besteht dringender Handlungsbedarf und Forscher¹ weltweit versuchen, alternative Kautschukquellen zu erschließen. Bei dieser Suche konzentriert man sich auf Pflanzen, „die hochmolekularen Naturkautschuk von mehr als 4×10^5 Dalton produzieren, ein schnelles Wachstum und einen hohen Biomasseertrag aufweisen sowie im großen Maßstab kultivierbar sind“ (Fischer et al. 2017, S. 325).

Der weit verbreitete Löwenzahn ist eine dieser Pflanzen. Er kommt in verschiedenen Arten vor, von denen die russische Spezies *Taraxacum kok-saghyz* Kautschuk in interessanter Menge führt. Seine Wildheimat befindet sich in den Höhenlagen Kasachstans. Der enthaltene Naturkautschuk ist von hervorragender Qualität, womit die Pflanze eine besonders vielversprechende Alternative zum tropischen Kautschukbaum darstellt. Hinzu kommt, dass diese Löwenzahnart sich durch ein im Vergleich zum Kautschukbaum schnelles Wachstum und die Möglichkeit, ihn in gemäßigten Klimazonen und dort sogar auf Marginalböden, die für die Lebensmittelproduktion nicht in Betracht kommen, zu kultivieren auszeichnet. *Taraxacum kok-saghyz* enthält, bezogen auf seine Trockenmasse, bis zu 15 % allergenfreien Naturkautschuk in den Wurzeln, ein Anteil, der durch gezielte Züchtung noch erhöht werden kann. Zusätzlich weisen die Wurzeln das Reservekohlenhydrat Inulin in Mengen von 20 bis 40 % auf. Dabei handelt es sich um eine Oligofruktose, die aufgrund ihrer Struktur und Eigenschaften als Ballaststoff, Zucker- sowie Fettaustauschstoff für die Lebensmittelproduktion von Interesse ist. Eine weitere Anwendung der Fructosebausteine stellt Hydroxymethylfurfural dar, in das Fructose umgewandelt werden kann und das als Grundlagenchemikalie in der organischen Chemie gilt, beispielsweise für die Synthese alternativer Kunststoffe. So bietet der russische Löwenzahn neben dem Hauptinhaltsstoff Kautschuk mit dem Inulin gleich mehrere interessante Wertschöpfungsmöglichkeiten.

Mit der Entwicklung einer Methode zur Extraktion der Rohstoffe und der Herstellung eines Reifen-Prototyps aus Löwenzahnkautschuk ist Forschern bereits ein wichtiger Schritt in der Erschließung eines besonders dringenden Forschungsgebietes gelungen.

¹ Im Folgenden schließt die Verwendung des generischen Maskulinums sowohl die feminine als auch die maskuline Form ein. Diese Vereinfachung dient lediglich dem Zweck der besseren Lesbarkeit der Arbeit. Die weibliche Form wird stets mitgedacht.

Aktualität, Relevanz und Bedeutung dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Zukunft machen die Thematik der Kautschukgewinnung aus Löwenzahn auch als Unterrichtsinhalt für den Chemieunterricht und benachbarte MINT-Fächer² interessant. In diesem Sinne wird das Thema im Rahmen dieser Arbeit nach dem Ansatz der curricularen Innovationsforschung für den Chemieunterricht aufbereitet.

Neben der Betrachtung der Thematik aus fachdidaktischer Perspektive besteht ein Hauptteil der Arbeit darin, Experimente zur Auseinandersetzung mit dem russischen Löwenzahn für schulische Gegebenheiten zu entwickeln. Die beiden Rohstoffe Kautschuk und Inulin werden chemisch betrachtet, ihre Synthese biochemisch erklärt und die Pflanze unter biologischen Gesichtspunkten beschrieben. Die Geschichte der Forschung am russischen Löwenzahn wird nachgezeichnet. Es wird außerdem gezeigt, dass die Beschäftigung mit *Taraxacum kok-saghyz* nicht nur aufgrund der Aktualität des Themas in der fachwissenschaftlichen Forschung und der Industrie interessant für Schüler sein kann, sondern dass die Auseinandersetzung mit diesem Thema auch Beiträge zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung, zum Verständnis von *nature of science* und zur Erhöhung des Gesellschaftsbezuges im Chemieunterricht leisten kann.

² Unter den MINT-Fächern werden im Allgemeinen die Unterrichtsfächer Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik zusammengefasst.

2 Curriculare Innovationsforschung und Aufbau der Arbeit

Methodisch lässt sich die vorliegende Arbeit im Bereich der curricularen Innovationsforschung verorten, einem Ansatz, der von M. Tausch und seiner Arbeitsgruppe an der Bergischen Universität Wuppertal formuliert und entwickelt worden ist (vgl. Tausch 2004; Banerji 2012; Krees 2009).

Unter der curricularen Innovation versteht man das Bemühen um „die inhaltliche und methodische Erneuerung und Anpassung der Lehre an den heutigen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse, zukunftsrelevanter Fragestellungen und gesellschaftlicher Lebensformen in unserer technischen Zivilisation“ (Parchmann et al. 2017, S. 162; vgl. Tausch 2004, S. 18). Als langfristiges Ziel wird im Optimalfall die Verankerung eines neuen Themenbereichs aus der Chemie in die Kerncurricula angesehen.

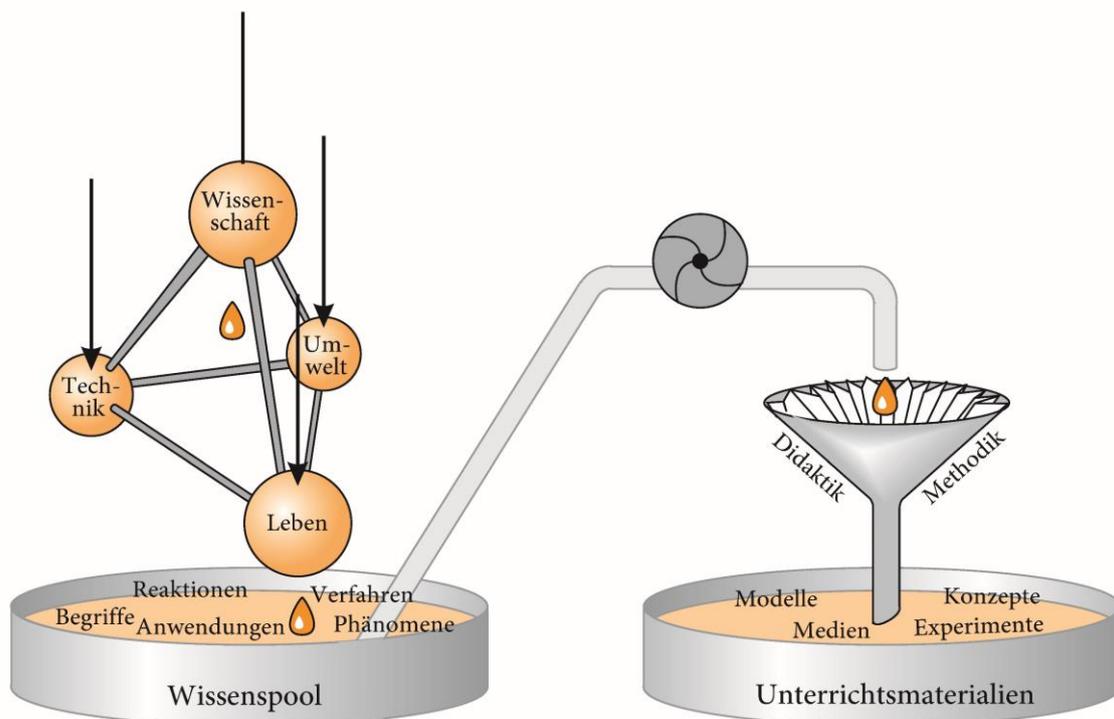


Abbildung 1: Curriculare Innovationsforschung (vgl. Tausch 2009, S. 35)

Der Prozess der curricularen Innovationsforschung vollzieht sich in mehreren Schritten (siehe Abbildung 1). Zuerst werden aus den alltäglichen Bereichen „Wissenschaft“, „Technik“, „Umwelt“ und „Leben“ Begriffe, Phänomene, Verfahren oder neue Anwendungen und Reaktionen gesucht und bestimmt, die „mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Einzug in die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler finden werden“ (Banerji 2012, S. 1). Diese Elemente bereichern „zunächst den Wissenspool der Chemiedidaktik, können aber so noch nicht im Unterricht eingesetzt werden“ können (Tausch 2008, S. 72).

Anschließend werden aus dem Wissenspool Themenbereiche ausgewählt, die „durch den Filter der Didaktik und Methodik für den Unterrichtsgebrauch aufbereitet“ werden (Tausch 2008, S. 72). Damit ist unter anderem die Entwicklung geeigneter Experimente, Materialien, Konzepte und Medien für den Chemieunterricht gemeint, aber auch die didaktische Reduktion (evtl. Rekonstruktion) des fachlichen Hintergrundes (vgl. Banerji 2012, S. 77). Für die Entwicklung der Unterrichtsmodule bietet sich eine Kooperation von Fachwissenschaft und Fachdidaktik an (vgl. Reiners und Tausch 2009, S. 31).

Als Voraussetzung für die zu erstellenden Unterrichtsmaterialien fordert Tausch, dass diese „wissenschaftlich konsistent“ und „didaktisch prägnant“ sein müssen. Unter „wissenschaftlich konsistent“ versteht er dabei, dass die Materialien mit dem aktuellen Erkenntnisstand der Fachwissenschaft Chemie vereinbar sein sollen. Mit „didaktisch prägnant“ ist die Passung auf die wesentlichen Merkmale der Bildungsstandards gemeint (Tausch 2004, S. 18).

In diesem Sinne beschreibt Banerji in seiner Dissertation folgende Anforderungen an didaktisch prägnante Experimente:

- a) Das Experiment zeigt eindeutig das Phänomen, welches zum didaktisch intendierten Lernziel führt und weist möglichst wenige Nebenphänomene auf, die vom Hauptphänomen ablenken könnten.
- b) Das Experiment ist adressatengerecht, d.h. von Schülern der entsprechenden Jahrgangsstufe oder aber zumindest von Chemielehrern selbst durchführbar.
- c) Das Experiment erfüllt die Sicherheitsanforderungen für den Einsatz an Schulen.
- d) Das Experiment ist mit schulüblichen Mitteln, geringer finanzieller Belastung („lowcost“) und mit vertretbar zeitlichem Aufwand im Chemieunterricht einsetzbar. (Banerji 2012, S. 39)

Voraussetzung für die für den Unterricht auszuwählenden Themen ist zudem nicht nur, dass sie aktuelle Entwicklungen aus Wissenschaft und Technik in die Schule tragen, sondern auch, dass die Themen geeignet sein sollten, „sowohl die Grundlagen der Chemie, als auch interdisziplinäre Brücken zu anderen Fächern zu vermitteln“ (Tausch 2004, S. 19).

Als Anforderungen an Didaktiker, die Innovationen für den Unterricht entwickeln möchten, benennt Tausch „einerseits tiefgehende fachwissenschaftlich orientierte Forschung und andererseits exzellente didaktische und methodische Kompetenzen“ (Tausch 2009, S. 35). Lehrer, die Innovationen in den Chemieunterricht tragen wollen, haben die Aufgabe, die entwickelten Materialien (damit sind sowohl Experimente als auch Modelle u.a. gemeint) auf die jeweilige Lerngruppe anzupassen (vgl. Banerji 2012, S. 77). Daher ist es wichtig, dass die Lehrperson sowohl versiert in der chemischen Fachsystematik ist, über Wissen zu aktueller Forschung als auch unterrichtspraktische Erfahrung verfügt (vgl. Tausch 2000, S. 180, 2004, S. 18).

Nach erfolgter Ausarbeitung werden die entwickelten Module, Materialien und Medien mit Lerngruppen „an der Uni und/oder an der Schule getestet und evaluiert, in der Lehrerfortbildung präsentiert und diskutiert sowie in fachdidaktischen Zeitschriften publiziert“ (Tausch 2009, S. 35).

Die vorliegende Arbeit ist in Anlehnung an die soeben geschilderten Anforderungen und Leitlinien der curricularen Innovationsforschung aufgebaut (vgl. Abbildung 2).

In Kapitel 3 werden zur Erschließung dieses zukunftssträchtigen Inhaltes aus Technik und Wissenschaft zunächst die theoretischen Grundlagen zu Kautschuk im Allgemeinen, zum russischen Löwenzahn und seiner Geschichte sowie zu Inulin dargelegt. Dies entspricht der von Tausch beschriebenen „Extraktion“ von Begriffen und innovativen Anwendungen (vgl. Tausch 2008, S. 72; Parchmann et al. 2017, S. 162).

Daran anschließend erfolgt die Vorstellung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Experimente (Kapitel 4).

Kapitel 5 stellt den unterrichtspraktischen Teil der Arbeit dar, in dem die Themen aus didaktischer und methodischer Perspektive betrachtet werden. Zunächst werden die beiden Themenfelder Kautschuk und Inulin didaktisch-konzeptionell erschlossen. Neben der Präsentation des entwickelten Moduls und der Materialien für einen Projekttag (für Oberstufenschüler) oder für die Anwendung in Schülerlaboren werden weitere Anregungen für die Implementation des Themas in den Chemieunterricht gegeben. Weiterhin werden die Erprobung und Evaluation des Moduls mit Lerngruppen vorgestellt und diskutiert.

Kapitel 6 rundet die Arbeit mit einem Fazit und Ausblick auf mögliche anschließende Arbeitsperspektiven ab.

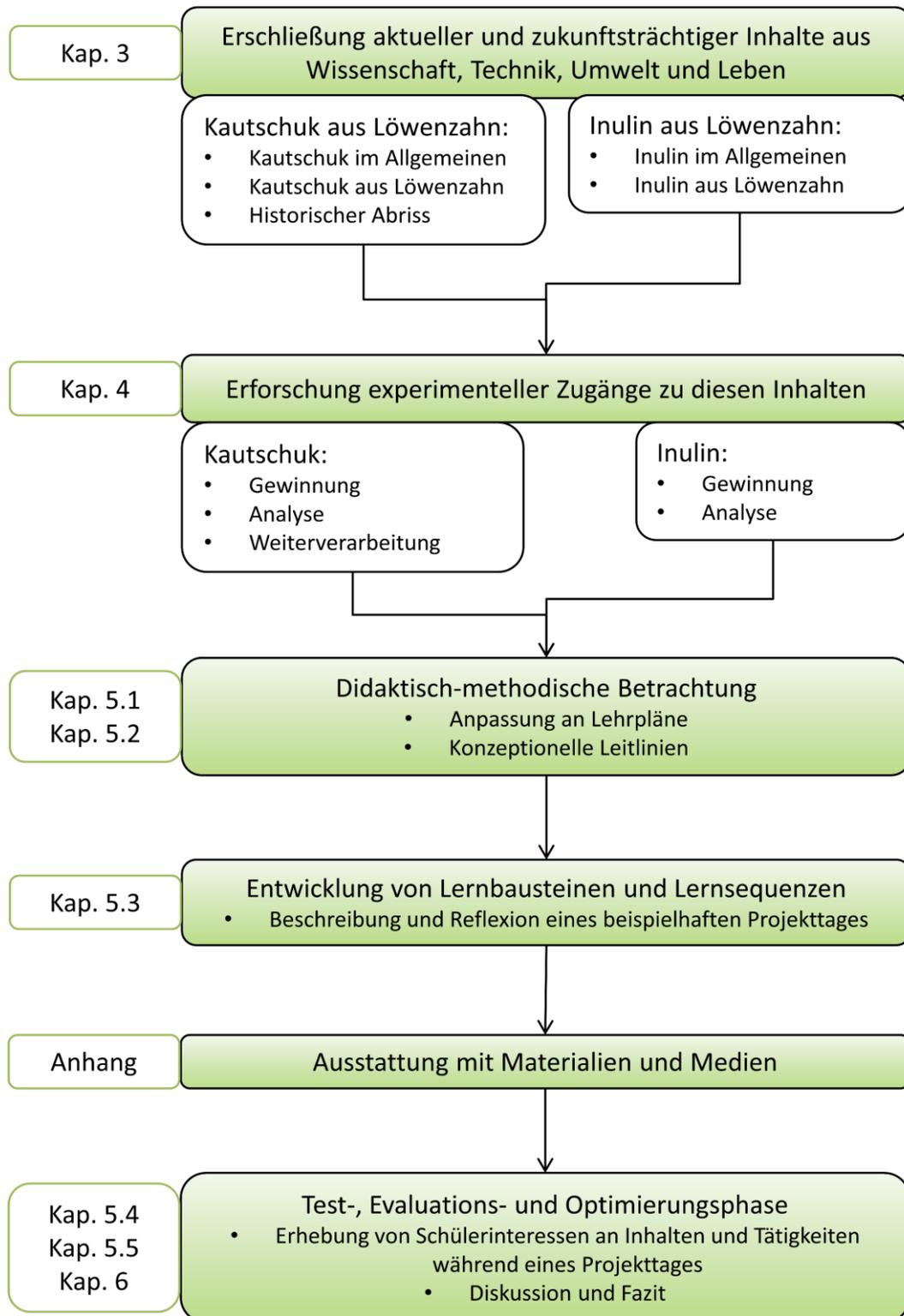


Abbildung 2: Überblick über den Aufbau der vorliegenden Arbeit nach dem Konzept der curricularen Innovation

3 Theoretische Grundlagen – Kautschuk und Inulin

3.1 Kautschuk

Kautschuk ist ein wertvoller Rohstoff, der in etwa 40.000 Produkten des täglichen Lebens – vom Autoreifen bis zum Babyschnuller – Anwendung findet. Trotz des täglichen Kontakts mit Kautschuk ist vielen Menschen nicht bewusst, welche Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten der Stoff bietet und welche chemischen Grundlagen diese bedingen.

3.1.1 Begriffsklärung

In der Alltagssprache werden die Begriffe „Kautschuk“, „Latex“ und „Gummi“ in der Regel synonym verwendet. Da sie jedoch in der Fachsprache etwas Unterschiedliches meinen, ist es wichtig, sie zu definieren und voneinander abzugrenzen.

Er wird in speziellen Kanälen (Milchröhren, auch Laticiferen genannt) von rund 10 % aller Blütenpflanzenarten produziert.

Unter Latex (auch Latexmilch) versteht man den Milchsaft verschiedener Pflanzen, eine milchige Suspension und Emulsion von Partikeln in wässriger Lösung. Latex enthält neben Kautschukpartikeln eine Vielzahl von Verbindungen in unterschiedlichen Zusammensetzungen, wie Zucker, Stärke, Eiweiß, Öle und andere, die in der Flüssigkeit vorliegen und für ihre milchige Beschaffenheit verantwortlich sind (vgl. Weiler und Nover 2008, S. 113). Die in der Latexmilch enthaltenen Kautschukpartikel bestehen aus langen, verknäuelten Ketten von bis zu 30.000 Isopren-Monomeren (siehe auch Kapitel 3.1.2) und koagulieren unter Zugabe von Essig- oder Ameisensäure zu einem makroskopisch sichtbaren Feststoff, dem Kautschuk.

Während mit Kautschuk dementsprechend der Rohstoff gemeint ist, der sich aus der Latexmilch gewinnen lässt, versteht man unter Gummi das fertige Produkt, das entweder aus Kautschuk oder aus Latexmilch durch Zugabe von Schwefel, Füllstoffen und weiteren Vulkanisationschemikalien und durch Vulkanisation hergestellt wird.

3.1.2 Chemische Betrachtung: Struktur und Eigenschaften

Chemisch betrachtet besteht Kautschuk aus *cis*-1,4-Polyisopren mit einem fast 100 %igen *cis*-Anteil. Im Kautschuk des Kautschukbaumes *Hevea brasiliensis* wurden zwei *trans*-Einheiten pro Kautschukmolekül nachgewiesen, die exakte Struktur ist aber noch immer nicht ganz aufgeklärt (vgl. Tanaka und Sakdapipanich 2001, S. 5; Puskas et al. 2014, S. 36). Grundbaustein des Polymers ist Isopren (2-Methyl-1,3-butadien) (siehe Abb. 2). Schon 1927 beschreibt Hermann Staudinger Kautschuk als ein Polymer aus 100 bis 1000 Isoprenmolekülen (vgl. Staudinger 1969, S. 169). Heute ist bekannt, dass der Polymerisationsgrad in Naturkautschuk sogar zwischen 8.000 und 30.000 beträgt (vgl. Römpps Chemie-Lexikon 1975, S. 1738). Das mittlere Molekulargewicht beträgt etwa $2 \cdot 10^6$ g/mol (vgl. Röthemeyer und Sommer 2013, S. 71).

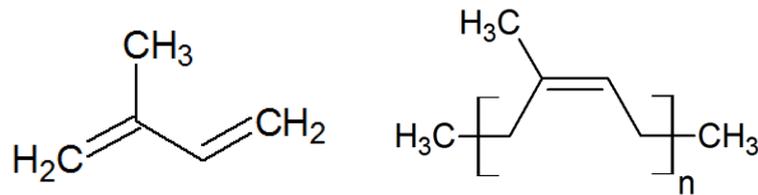


Abbildung 3: Strukturformeln von Isopren (links) und *cis*-1,4-Polyisopren (rechts)

Laut DIN 53 501 bezeichnet man Kautschuk als ein

unvernetztes, aber vernetzbares (vulkanisierbares) Polymer mit gummielastischen Eigenschaften bei Raumtemperatur und in gewissen Grenzen in anschließenden Temperaturbereichen. Bei höherer Temperatur und/oder dem Einfluß deformierender Kräfte zeigt Kautschuk zunehmend viskoses Fließen, so daß er unter geeigneten Bedingungen formgebend verarbeitet werden kann. Kautschuk ist ein Ausgangsprodukt für die Herstellung von Elastomeren (Gummi). (Baumann und Ismeier 1998, S. 28)

Polyisoprene mit *trans*-Konfiguration nennt man Guttapercha. Dabei handelt es sich um einen härteren Rohstoff als Kautschuk, der jedoch ab einer Temperatur von etwa 50 °C knetbar wird. Guttapercha wird kommerziell aus dem tropischen Guttaperchabaum (*Palauquium gutta*) gewonnen. Der Rohstoff kommt unter anderem in der Zahnmedizin für Wurzelfüllungen zum Einsatz.

Bezüglich der Eigenschaften von Naturkautschuk ist festzuhalten, dass er sich verformen lässt und anschließend nicht vollständig wieder in seine ursprüngliche Form zurückkehrt. Diese Eigenschaft wird als Viskoelastizität bezeichnet. Weiterhin ist die Fähigkeit zur Dehnungskristallisation zu nennen. Diese ist auf den stereoregulären Aufbau zurückzu-

führen und bewirkt eine Selbstverstärkung. Durch die Abnahme der Entropie bei der Dehnung kommt es zu einem Temperaturanstieg des Kautschuks (vgl. Röthemeyer und Sommer 2013, S. 69–70). In der Kälte kommt es ebenfalls zur Kristallisation, wodurch Kautschuk bei Lagerung in der Kälte bei etwa 3-4 °C hart und spröde wird. In der Wärme ab ca. 145 °C wird er klebrig, bei 170-180 °C zerfließt er (Römpp Lexikon Chemie 2017a).

Aufgrund der hohen Molmasse ist Kautschuk nur durch Kraftaufwand plastisch verformbar. Durch die gezielte Spaltung der Polymerketten, auch Mastikation genannt, wird die Viskosität des Kautschuks reduziert und er erhält plastische Eigenschaften (vgl. Röthemeyer und Sommer 2013, S. 72ff.)

Für die Weiterverarbeitung des Kautschuks zu Gummi werden dem Rohstoff Schwefel (oder schwefel spendende Verbindungen) und eine Reihe weiterer Chemikalien (Mastikationschemikalien, Vulkanisationsbeschleuniger, Füllstoffe und Weichmacher) zugeführt. Durch Erhitzen bildet der Schwefel Brücken zwischen Doppelbindungen des Polyisoprens aus (vgl. Abbildung 4), woraus ein elastischeres und gleichzeitig formstabileres, beständigeres Produkt resultiert. Diesen Vorgang nennt man Vulkanisation. Aus Latex hergestellte Gummiprodukte wie Luftballons, Handschuhe oder Kondome werden durch Eintauchen der entsprechenden Formen in eine Latex-Vulkanisationsmischung und anschließende Vulkanisation gewonnen. Produkte wie Autoreifen oder auch Schuhsohlen werden produziert, indem die Vulkanisationschemikalien mit Kautschuk verknetet, in Form gebracht und vulkanisiert werden. Je nach Menge der Schwefelbeimischung erhält man nach dem Vulkanisationsprozess unterschiedlich hartes Gummi.

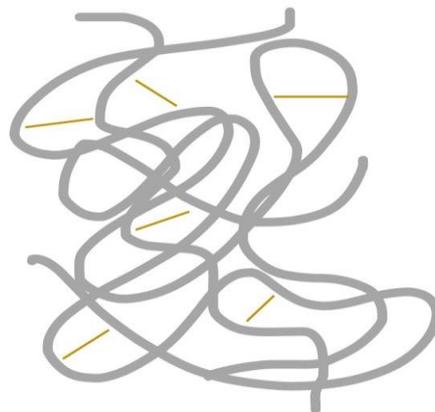


Abbildung 4: Modellhafte Darstellung von vulkanisierten Kautschukketten; die Striche zwischen den Ketten stellen die Schwefelbrücken dar

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften von Naturkautschuk-Vulkanisaten aufgeführt:

- Selbstverstärkung durch Dehnungskristallisation,
- hohe Reißfestigkeit [...], hohe Dehnung, hoher Weiterreißwiderstand,
- niedrige bleibende Verformung, geringes Fließen,
- hohe Elastizität [...], niedriger Verlustfaktor, niedrige Wärmeentwicklung
- gutes Kälteverhalten, schlechte Wärmebeständigkeit,
- schlechte Witterungs-, UV- und Ozonbeständigkeit,
- geringe Wasserquellung,
- nicht beständig gegen Kohlenwasserstoffe, Mineralöle und Fette (Röthemeyer und Sommer 2013, S. 79)

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Herstellungsweise und den unterschiedlichen Eigenschaften wird bei Kautschuk eine Unterscheidung in Natur- bzw. Synthetikautschuk vorgenommen. Bezüglich ihrer Eigenschaften und Vor- resp. Nachteile ergänzen sich die beiden Rohstoffe sehr gut. So beschreiben z.B. Kloppenburg et al. (2009), dass Naturkautschuk aufgrund seiner problematischen Eigenschaften bei Kontakt mit Ozon oder Ölen für Hochleistungsprodukte oft nicht ausreicht (S. 393–394), sodass Synthetikautschuk zum Einsatz kommt. An anderen Stellen wird darauf hingewiesen, dass die positiven Eigenschaften des Naturkautschuks (z.B. seine Beständigkeit gegenüber hoher Belastung) heute und auch in Zukunft nicht mit synthetischen Materialien erreicht werden können (vgl. Wortmann et al. 2013, S. 301; Continental Reifen Deutschland GmbH 2016). Aufgrund dessen werden heutzutage immer noch etwa 40 % des weltweiten Kautschukbedarfs aus natürlichen Quellen gewonnen (vgl. van Beilen und Poirier 2007, S. 218). Statt Naturkautschuk aber möglichst vollständig durch die synthetische Variante ersetzen zu wollen, wie es während der Weltkriege zur Zeit von Importblockaden von Naturkautschuk geplant wurde, geht es heutzutage darum, beide Varianten passgenau in Kombination einzusetzen, um Produkte zu entwickeln, die mit ihren Eigenschaften den Anforderungen zu 100 % entsprechen.

Da Synthetikautschuken wirtschaftlich für die Industrie und lebenspraktisch im Alltag eine bedeutende Rolle zukommt, sollen ihre Geschichte und der Zusammenhang mit Naturkautschuk an dieser Stelle erläutert werden.

Die Geschichte des industriell nutzbaren Synthetikgumms beginnt Anfang des 20. Jahrhunderts. 1909 erhält der Chemiker Fritz Hofmann³ ein Patent auf die Herstellung des ersten synthetischen Gummis. Aus Isopren wird durch allmähliches Erhitzen in geschlossenen Behältern eine gummiartige Masse gewonnen (vgl. Hofmann 1909). Zur Zeit des Ersten Weltkriegs, als Naturgummi knapp ist, weicht man auf diesen neuen „Methylgummi“ aus und nutzt ihn vor allem beim Bau von U-Booten. Da die Eigenschaften des Naturgummis denen des Synthetikgummis allerdings noch überlegen sind, wird die Forschung nach Ende des Krieges zunächst wieder eingestellt. Mit der Synthese des Gummis „Buna“ (Butadien-Natrium, mit Natrium als Katalysator in der Synthese) im Jahr 1929 gelingt Chemikern der IG Farben-Werke, zu denen auch Bayer gehörte, der Durchbruch in der Synthetikgummiindustrie (vgl. Kloppenburg et al. 2009, S. 397). In den Folgemonaten und -jahren werden Zusatzstoffe und Variationen mit veränderten Eigenschaften entwickelt. Bis heute wächst die Produktpalette an synthetischen Gummis stetig.

Rohstoff für die Herstellung von Synthetikgummi ist Erdöl. Durch Destillation gewinnt man Naphtha, eine relativ leichte Fraktion vorwiegend im Bereich C5 und C6. Diese wird meist mit Acetylen (aus Erdgas) zur Reaktion gebracht und die gewünschten Monomere zur Polymerisation entstehen. Dabei handelt es sich u.a. um Butadien, Styrol oder Isopren, die anschließend zu den gewünschten Gummis polymerisiert werden (vgl. Handelsblatt GmbH 2009, S. 7; Streck et al. 1992).

Einer der bedeutendsten und am meisten hergestellten Gummis heutzutage ist Styrol-Butadien-Gummi (SBR). Er wird über die Copolymerisation von Styrol und Butadien synthetisiert und findet aufgrund seiner besseren Witterungsbeständigkeit als Naturgummi vor allem in der Reifenproduktion bei der Herstellung von Laufflächen Anwendung (vgl. Kloppenburg et al. 2009, S. 396).

Ein weiterer synthetisch hergestellter Gummi ist Polychloropren-Gummi (CR). Das Monomer 2-Chlor-1,3-Butadien (Chloropren) wird während des Polymerisationsprozesses sowohl zu (*Z*)-, als auch zu (*E*)-Isomeren umgewandelt. Polychloropren-Gummi ist chemisch beständig und robust gegenüber Witterungseinflüssen, Ozon und Alterung. Er wird unter anderem in Klebstoffen und in Taucheranzügen (in Deutschland unter dem

³ Fritz Hofmann (1866-1956) war ein deutscher Chemiker und Apotheker. Er war unter anderem bei Bayer (damals Elberfelder Farbenfabriken, vorm. Friedr. Bayer & Co.) tätig.

Markennamen Neopren bekannt) verwendet (Römpp Lexikon Chemie 2017b; Kloppenburg et al. 2009, S. 396).

Neben den beiden vorgestellten synthetischen Kautschuken existiert noch eine Vielzahl weiterer Alternativen, die genau auf die Anforderungen des gewünschten Produktes abgestimmt werden können.

3.1.3 Historischer Abriss – von der Entdeckung des Rohstoffs bis zum „Kautschukboom“

Bekannt ist Kautschuk schon seit mehreren Tausend Jahren. Erste Hinweise auf den Rohstoff stammen von Christoph Kolumbus, der beschreibt, dass die Ureinwohner Haitis mit elastischen Bällen spielten, die besser sprangen als die Bälle in Europa zu dieser Zeit (vgl. Botsch 1992, S. 17). Dennoch entwickelte sich in Europa erst ab etwa Mitte des 18. Jahrhunderts ein gesteigertes Interesse an Kautschuk. Der französische Mathematiker Charles Marie de la Condamine (1701-1774), der zwischen 1735 und 1745 Südamerika bereiste, um es zu kartieren und weitere Kenntnisse zu sammeln, berichtete über den Kautschukbaum und über wasserundurchlässige Gegenstände, die die Einwohner aus dessen Harz herstellten und schickte Proben des Materials nach Paris. Das von ihm genutzte Wort „caoutchouc“ geht vermutlich auf „ca-hu-chu“ in der Sprache der Amazonas-Indiander zurück und bedeutet so viel wie „weinender Baum“ (vgl. Giersch und Kubisch 1995, S. 36–37). Das deutsche Wort „Kautschuk“ leitet sich demzufolge aus dem Französischen ab.

1770 wurde in England das erste praktische Produkt aus Kautschuk vorgestellt: der Radiergummi („rubber“ von „(to) rub off“). In den folgenden Jahren und Jahrzehnten wurden diverse Produkte aus Kautschuk auf den Markt gebracht, die jedoch in der Wärme noch weich und klebrig und in der Kälte hart und brüchig wurden.

Mit der Erfindung der Vulkanisation 1839 durch Charles Goodyear⁴ (die er 1844 zum Patent anmeldete) eröffnete sich ein weiteres großes Feld für Kautschukprodukte, die durch die Verknüpfung der Isoprenketten durch Schwefelbrücken viel temperaturstabiler

⁴ Charles Nelson Goodyear (1800-1860) war ein US-amerikanischer Erfinder, der sich, wie viele andere Entwickler seiner Zeit, mit Kautschuk auseinandersetzte. Laut Überlieferung war es ein Zufall, dass Goodyear 1839 den Prozess der Vulkanisation entdeckte, weil er eine Schwefel-Kautschuk-Mischung über Nacht im Ofen ließ oder ihm die Mischung auf eine heiße Herdplatte fiel (vgl. z.B. Braun 2013, S. 104).

und haltbarer wurden. Die ersten Luft- und Vollgummireifen wurden hergestellt. Die Entdeckung der Vulkanisation hatte einen enormen und weltweiten Anstieg der Nachfrage von Naturkautschuk zufolge; die Regenwälder im Amazonas-Gebiet wurden rasant erschlossen und die indigene Bevölkerung zum Sammeln des Rohstoffs in den Regenwäldern gezwungen, um mehr Kautschuk zu gewinnen. Die Zeit von Mitte des 19. Jahrhunderts bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts wird daher auch als die Zeit des Kautschukbooms bezeichnet.

In dieser Zeit, bis Kautschuk ab etwa 1910 aus eigens dafür angelegten Plantagen aus Südostasien nach Europa importiert werden konnte, wurde nicht nur in Südamerika aus dem Kautschukbaum mit allen Mitteln Kautschuk gesammelt⁵, sondern auch in Afrika, dort jedoch aus einer dort heimischen Schlingpflanze (eine genauere Beschreibung dieser Schlingpflanze findet sich in Teilkapitel 3.1.4). Von dieser Entwicklung waren besonders die Einheimischen im Kongo betroffen, die von der Kolonialmacht Belgien unter grausamen Bedingungen zur Ernte von Kautschuk gezwungen wurden (vgl. Hochschild 2000). Um den steigenden Kautschukbedarf zu befriedigen, wurden ganze Dörfer zur Arbeit an den Kautschukpflanzen zwangsverpflichtet (vgl. Kollmer 2008, S. 41). Sie mussten immer größere Mengen des Rohstoffs beschaffen, sodass sie immer tiefer in den Regenwald vordringen mussten, um Kautschukranken zu finden. Zu geringe Ernten wurden grauenerregend bestraft und die Bauern wurden schwer misshandelt. Zu den gängigen Bestrafungen gehörte unter anderem das Abtrennen von Händen z.T. von Angehörigen, um die Bauern zum Erbringen höherer Ausbeuten zu zwingen⁶. In einem Dokumentarfilm von Peter Bate werden diese Grausamkeiten aufgearbeitet und die geschichtlichen Hintergründe und Zusammenhänge dieser Zeit, die auch die Zeit des „Kongogräuels“ genannt wird, genauer beschrieben (vgl. Bate 2004).

⁵ Im Amazonasgebiet wurde die Kautschukproduktion durch Schuldknechtschaft und Zwangsarbeit gesteigert, und Großhändler verschifften den Rohstoff weiter nach Nordamerika und Europa. Um ihre Ziele zu erreichen, wurden unter anderem auch Eisenbahnstrecken gebaut, um aus Gebieten, die per Schiff nicht gut zu erreichen waren, den Kautschuk besser abtransportieren zu können. Die Preise des Kautschuks stiegen so stark an, dass er zeitweise sogar mit Silber aufgewogen wurde (vgl. Miedaner 2017, S. 215).

⁶ Um sicherzustellen, dass die Soldaten der „Force Publique“ (der belgischen Kolonialarmee) ihre Patronen nicht auf der Jagd verbrauchten oder sie für Aufstände zurückbehielten, wurden sie gezwungen, über ihre abgeschossenen Patronen Rechenschaft abzulegen. Dazu mussten sie ihren Vorgesetzten für jede Kugel die abgetrennte Hand des Getöteten vorlegen. So ist zu erklären, dass nicht selten Hände von Lebenden abgehackt wurden, um verschossene Munition zu erklären.

Die folgende Tabelle zeigt die Verlagerung des Kautschukmonopols von Südamerika nach Südostasien in nur wenigen Jahrzehnten. Dies ist auf den Aufbau von großen Kautschukplantagen in den dortigen Regionen zurückzuführen (vgl. Abschnitt zu *Hevea brasiliensis* in Kapitel 3.1.4 – Überblick über Kautschuk produzierende Pflanzen). Ebenfalls wird der Beitrag des afrikanischen Kautschuks zur weltweiten Naturkautschukproduktion vor Beginn der Plantagenwirtschaft in Südostasien deutlich.

Tabelle 1: Regionale Exporte von Naturgummi (in Tonnen) (vgl. Giersch und Kubisch 1995, S. 43)

	1900	1910	1920
Südostasien	834	11 261	309 873
Nord- und Südamerika	28 229	63 861	30 973
Afrika	15 774	20 454	6 493
GESAMTSUMME	44 837	95 576	347 339

3.1.4 Überblick über Kautschuk produzierende Pflanzen

Weltweit sind mittlerweile über 2000 Pflanzenarten bekannt, die Naturkautschuk produzieren. Aber nur wenige unter ihnen synthetisieren ihn in ausreichender Menge und Qualität, sodass es sich lohnt, daraus den Kautschuk zu gewinnen. Neben dem russischen Löwenzahn *Taraxacum kok-saghyz*⁷, auf dem in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk liegt, zählen zu diesen Pflanzen u.a. der tropische Kautschukbaum (*Hevea brasiliensis*), der mexikanische Strauch Guayule (*Parthenium argentatum*), eine afrikanische wildwachsende Kautschukranke (der Gattung *Landolphia*, meist *Landolphia owariensis*) und möglicherweise der Stachelnattich (*Lactuca serriola*). Diese sollen im Folgenden (hinsichtlich ihrer Besonderheiten und Geschichte) kurz vorgestellt werden. Der russische Löwenzahn wird im folgenden Kapitel 3.2 detailliert beschrieben.

Die wohl bekannteste Kautschuk führende Pflanze ist der tropische Kautschukbaum *Hevea brasiliensis* aus der Familie der Wolfsmilchgewächse (*Euphorbiaceae*). Der weltweite Bedarf an Naturkautschuk wird zurzeit fast ausschließlich aus diesem Baum gedeckt. Er wird etwa 30-40 m hoch und ist ursprünglich in den Regenwäldern des Amazonas-Gebietes beheimatet. Im Zuge des Kautschukbooms schmuggelte der Brite Henry Wickham 1876 trotz eines Exportverbotes mehrere Tausend *Hevea*-Samen, teilweise

⁷ Man findet ebenfalls die Schreibweisen *T. koksaghyz*, *kok-sagys* oder *kog-sagyz*.

wird sogar von 70.000 Samen berichtet, zunächst von Brasilien nach London, wo Setzlinge gezüchtet und ein Jahr später in verschiedene britische Kolonien verschifft wurden. Die Mehrheit der Setzlinge war für eine Plantagenwirtschaft in Burma, dem heutigen Myanmar bestimmt, jedoch gediehen die Pflanzen auf den Plantagen in Malaysia (damals Britisch-Malaya) am besten, obwohl dort nur acht Setzlinge lebend ankamen (vgl. Seidel 2012, S. 455). Diese Pflanzen legten den Grundstein für die Kautschuk-Plantagenwirtschaft in Südostasien (und so auch für die Weiterentwicklung der gesamten Kautschukindustrie).

Der Grund, dass eine Kautschuk-Plantagenwirtschaft in Süd- und Mittelamerika nicht möglich war und auch heute noch immer nicht ist, liegt in einem mikroskopisch kleinen Pilz. Dieser Schlauchpilz (*Microcyclus ulei*) dringt mit seinen Schläuchen in die Blätter des Kautschukbaumes ein und sorgt in der Zeit des Blattaustriebs (der sogenannten Blattausschüttelung) dafür, dass binnen weniger Wochen alle jungen Blätter abfallen, sofern sie nicht rechtzeitig ausgewachsen sind (vgl. Hoppenhaus 2013). Dieser Schlauchpilz sorgte schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts dafür, dass Investoren wie z.B. Henry Ford oder die Reifenhersteller Goodyear und Michelin ihre Pläne von einer Kautschuk-Plantagenwirtschaft wieder verwerfen mussten. Alle Plantagen, die in Süd- und Mittelamerika eingerichtet wurden, mussten wenige Jahre später wieder geschlossen werden, da sich der Pilz aufgrund der genetischen Einheitlichkeit der Bäume und der engen Bepflanzung rasend schnell verbreitete. Da die Sporen des Pilzes allein die Kautschukbäume befallen, ist die Gefahr einer Vermehrung im Urwald, wo die Bäume ursprünglich herkommen und in größerer Entfernung voneinander wachsen, sehr gering (vgl. Miedaner 2017).

Wie andere Pflanzen auch nutzt der Kautschukbaum seine Möglichkeit zur Selbstverteidigung. Gibt es einen Angriff von Schadstofforganismen, setzt der Baum giftige Blausäure frei. Beim Schlauchpilz bewirkt diese Freisetzung der Blausäure jedoch nicht, dass dieser abstirbt, sondern das Gegenteil: *Microcyclus ulei* nutzt die Blausäure für seinen Stoffwechsel, gewinnt daraus Energie und wächst sogar schneller (vgl. Miedaner 2017, S. 227). Die Züchtung resistenter Pflanzen ist schwierig und zeitintensiv. Da der Pilz sehr anpassungsfähig ist, konnte immer wieder beobachtet werden, dass er die Resistenzen von Neuzüchtungen gebrochen hat (vgl. Miedaner 2017, S. 230).

Würde sich der Schlauchpilz auch nach Südostasien ausbreiten, stände aufgrund der dortigen Plantagenwirtschaft womöglich eine wirtschaftliche Katastrophe bevor und der

weltweite Bedarf an Naturkautschuk könnte nicht gedeckt werden. Die Gefahr, dass ein paar Pilzsporen z.B. unter Schuhsohlen hängen bleiben und von Südamerika den Weg nach Asien finden, steigt bei der Menge des Luftverkehrs von Tag zu Tag (vgl. Miedaner 2017, S. 231).

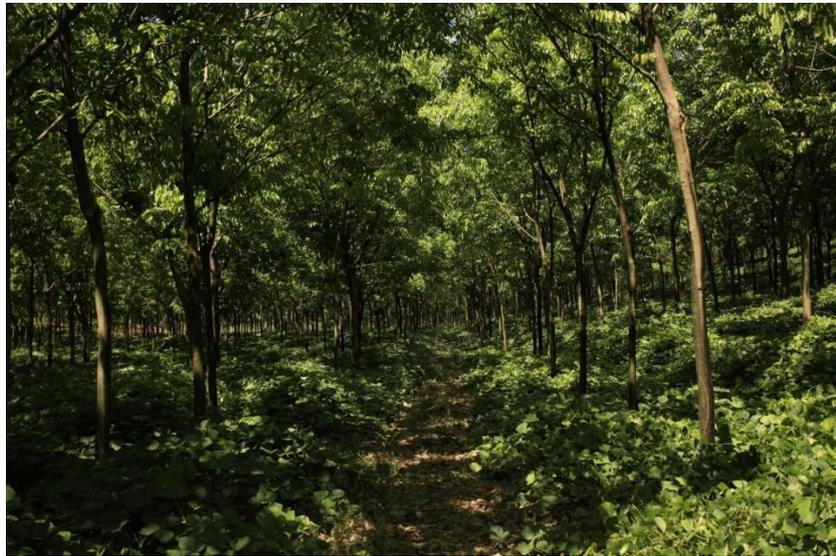


Abbildung 5: Kautschukplantage (*Hevea brasiliensis*)

Hevea brasiliensis enthält in seinem Milchsaft (Latex) etwa 30-40 % Kautschuk. Dieser wird seit Jahrhunderten auf die gleiche Art und Weise gewonnen: Die Rinde des Stammes wird einmal senkrecht und mehrfach schräg eingeritzt (Grätenschnitt), die austretende milchige Flüssigkeit wird in Schalen gesammelt.



Abbildung 6: Austretende Latexmilch aus einem Kautschukbaum

Früher wurde die gewonnene Latexmilch durch Erhitzen und Räuchern über dem Feuer zur Koagulation gebracht und haltbar gemacht. Heutzutage erreicht man die Koagulation durch Zugabe von Ameisen- oder Essigsäure. Anschließend wird der ausgefallene Feststoff zu Fellen gewalzt, ebenfalls durch Räuchern haltbar gemacht und für den Transport z.B. nach Europa und für die dortige Weiterverarbeitung zu Ballen gepresst.



Abbildung 7: Geräuchertes Stück Kautschuk

Die Guayule (*Parthenium argentatum*) ist ein mehrjähriger buschiger Strauch aus der Familie der Korbblütler (*Asteraceae*) von etwa 60-70 cm Höhe. Beheimatet ist sie in ariden und semiariden Gebieten der USA wie in Texas oder New Mexico und im Norden Mexikos. In den Parenchymzellen der Stängel, Wurzeln und Blätter produziert und sammelt die Pflanze durchschnittlich 6 % Kautschuk, der durch Mahlen des Pflanzenmaterials und anschließendes Auswaschen des Rohstoffs gewonnen werden kann (vgl. van Beilen und Poirier 2007).



Abbildung 8: Guayule-Strauch (Foto: Clarence A. Rechenthin, USDA-NRCS PLANTS Database)

In den USA nahm die Guayule zur Zeit des Zweiten Weltkriegs wegen Importschwierigkeiten von *Hevea*-Kautschuk einen besonderen Platz ein. Um dem Kautschukdefizit zu begegnen, wurde bis Kriegsende Guayule auf mehreren Tausend Hektar angebaut und etwa 1400 t Kautschuk daraus gewonnen (vgl. Cornish und Siler 1996, S. 328). In den Jahren nach Kriegsende wurden die Plantagen aufgegeben, da *Hevea*-Kautschuk wieder erhältlich war.

Gegenwärtig wird Guayule in den USA wieder intensiver beforscht und kultiviert, da weltweit mehr und mehr Personen unter Latexallergien leiden, welche durch den Einsatz von Produkten aus Guayule-Latex verhindert werden können (vgl. Siler und Cornish 1994; Hamilton und Cornish 2010). Die Firma Yulex Corporation stellt bereits seit einigen Jahren allergenfreien Latex aus Guayule her, aus dem medizinische Produkte hergestellt werden können (vgl. van Beilen und Poirier 2007, S. 222). Im Jahr 2015 präsentierte der Reifenhersteller Bridgestone einen ersten PKW-Reifen mit Kautschuk aus Guayule (vgl. Bridgestone 2015). Auch in Europa nimmt das Interesse an Guayule zu. In Frankreich beschäftigt sich beispielsweise das Forschungszentrum CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) in Montpellier (in etwa vergleichbar mit dem deutschen Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsfor- schung) mit dem Anbau von Guayule in ariden Gebieten Europas und erforscht Kautschukgehalt und -qualität. Es war Teil des internationalen Forschungsprojektes EU-PEARLS (EU-based Production and Exploitation of Alternative Rubber and Latex Sources), das im Jahr 2012 auslief und in dem man sich neben Guayule auch mit dem russischen Löwenzahn *Taraxacum kok-saghyz* beschäftigte (vgl. Mooibroek und van Beilen 2011).

Der Stachellattich (*Lactuca serriola*) oder Kompasslattich gehört, ebenso wie der Löwenzahn und die Guayule, zur Familie der Korbblütler und wurde bereits in mehreren Veröffentlichungen als eine mögliche alternative Kulturpflanze für Naturkautschuk vorgestellt (vgl. Abbildung 9) (vgl. Bushman et al. 2006; Venkatachalam et al. 2013; Bell et al. 2015). In seinem Stängel und den Blättern konnten Forscher 5-10 % Kautschuk nachweisen (vgl. Bell et al. 2015). Dieser enthält ein hohes durchschnittliches Molekulargewicht

von über $1 \cdot 10^6$ g/mol, was auf eine hohe Qualität des Kautschuks hinweist (vgl. Bushman et al. 2006, S. 2592).⁸



Abbildung 9: Stachellattich (*Lactuca serriola*)

Auf dem afrikanischen Kontinent findet man ebenfalls Kautschuk führende Pflanzen. Zwischen 1888 und 1908, während des „Kautschukbooms“, wurde im Kongo-Freistaat, der sich zu dieser Zeit im Privatbesitz des Belgischen Königs Leopold II befand, eine systematische Ausplünderung des Landes an Kautschuk betrieben (siehe oben). Da der Rohstoff in dieser Zeit bereits sehr gefragt war, aber noch keine großen Kautschukplantagen in Südostasien existierten, die den Bedarf hätten decken können, waren belgische Firmen an einer maximalen Ausbeute des Kautschuks interessiert. Wichtigster Kautschuklieferant im Kongo war eine tropische Schlingpflanze der Gattung *Landolphia* (wahrscheinlich *Landolphia owariensis*), die einen Durchmesser von bis zu 30 cm und eine Länge von 70-100 m erreicht. In den Baumkronen „verzweigt sie sich und windet

⁸ Da der Stachellattich als möglicher alternativer Kautschuklieferant in der Diskussion steht und die Pflanze ebenfalls in den gemäßigten Breiten heimisch ist, wurden im Rahmen der Entwicklung von Experimenten auch Bestrebungen durchgeführt, Latex und Kautschuk aus Lattich zu gewinnen. Dazu wurde der Stängel des Lattichs angeritzt und der austretende Milchsafte aufgefangen (vgl. Bell et al. 2015, S. 594). Dieser wies jedoch keinerlei latexähnliche oder klebrige Eigenschaften auf und ließ sich auch nicht zu einer kautschukähnlichen Masse koagulieren.

sich nicht selten über Dutzende von Metern durch die oberen Hauptäste von fünf oder sechs weiteren Bäumen“ (Hochschild 2000, S. 230). Wie bei *Hevea brasiliensis* wird der Kautschuk hier ebenfalls in Form einer milchig-weißen Latexmilch durch Anritzen der Ranke mit einem Messer gewonnen. IR- und ¹H NMR-Spektroskopien haben gezeigt, dass es sich um *cis*-1,4-Polyisopren-Kautschuk handelt (vgl. Nwadinigwe 1981).

3.1.4 Die Kautschukbiosynthese in *Hevea brasiliensis*

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigen sich Wissenschaftler mit der Aufklärung der Kautschukbildung in kautschukführenden Pflanzen. Dabei wurde aufgrund seiner Monopolstellung hauptsächlich der tropische Kautschukträger *Hevea brasiliensis* untersucht. Der historischen Entwicklung dieses Forschungszweiges folgend wird hier zunächst auf die ersten Forschungsjahre zur Kautschukbiosynthese in *Hevea brasiliensis* eingegangen und der aktuelle Wissensstand dargelegt.

In ersten Forschungsprojekten von Anfang des vergangenen Jahrhunderts wird angenommen, dass ein Zucker als Ausgangsstoff für die Kautschukbildung gesehen werden kann (vgl. Harries 1919; Ditmar 1912). Laut Fitting⁹ ist das primäre Aufbaumolekül des Kautschuks Glukose. Fitting nimmt weiterhin an, dass der kautschukhaltige Milchsafte nicht nur in den Blättern, sondern vor allem auch im Stamm von *Hevea brasiliensis* gebildet wird (vgl. Fitting 1909, S. 11).

Einige Jahre später, 1919, vertritt Carl Dietrich Harries¹⁰ die These, dass die Synthese der Kautschukmoleküle aus Pentosen über Pentadienylreste verlaufen könnte:

Es ist eine verbreitete Annahme, daß die Kohlehydrate in der Pflanze die Quelle für alle anderen chemischen Produkte in ihr sind. Dieselbe hat durch den Nachweis, daß die Kautschukarten vielfache (sic!) des Pentadienylrestes [...] sind, eine gewisse Stütze erfahren, da die Kohlehydrate vielfache Anhydride der Monosaccharide sind. Die Zucker, wahrscheinlich vorwiegend die Pentosen, werden reduziert zu dem Pentadienylrest und dieser kondensiert sich in statu nascendi zum Komplex (C₁₀H₁₆)_x. (Harries 1919, S. 235)

Aschan¹¹, ein finnischer Chemiker, stellt 1929 einen neuen Vorschlag für den Gang der Biosynthese vor (vgl. Aschan 1929). Er vermutet, dass „Isopren als Grundsubstanz für

⁹ Johannes (Hans) Fitting (1877–1970) war ein deutscher Botaniker.

¹⁰ Carl Dietrich Harries (1866–1923) war ein deutscher Chemiker, der sich in seinen Forschungsarbeiten intensiv mit Kautschuk und Ozon auseinandersetzte.

¹¹ Ossian Aschan (1860–1939) war ein finnischer Chemiker und Politiker.

die terpenartigen Naturerzeugnisse [...] durch eine aldolartige Kondensation von Acetaldehyd mit Aceton in jeder Pflanze entsteht und die Bildung dieser terpenartigen Körper vermittelt“ (Aschan 1929, S. 127).

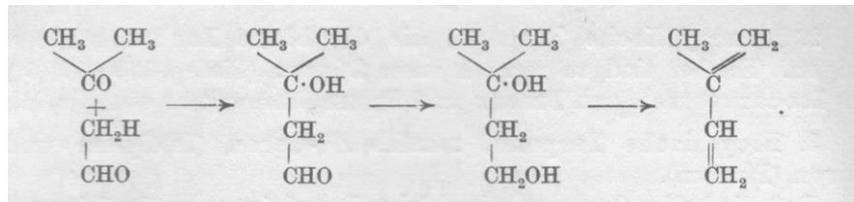


Abbildung 10: Vorschlag der Reaktion von Acetaldehyd und Aceton unter Wasserabspaltung zu Isopren (Aschan 1929, S. 128)

In Bezug auf die spätere Bildung von Kautschuk und dessen Formel stellt sich Aschan drei Schritte vor: Zunächst findet eine rein chemische Kondensation zu einem „einfachsten Kautschukmolekül“ statt. In der darauffolgenden Polymerisation bilden sich aus den einfachsten Kautschukmolekülen sogenannte „Komplexmoleküle“. Der letzte Schritt ist durch eine sehr langsame Anlagerung, vergleichbar mit Adhäsion und Adsorption, charakterisiert und stellt daher im Gegensatz zu den beiden ersten Schritten einen rein physikalischen Vorgang dar (vgl. Aschan 1929, S. 334–335).

Wiederum einige Jahre später, 1937, präsentiert Otto Ambros¹² seine Forschung an *Hevea brasiliensis*. Seiner Meinung nach findet eine natürliche Polymerisation des Isoprens in den Pflanzenzellen statt, die durch Einwirkung eines Enzymsystems eingeleitet und katalysiert wird (vgl. Ambros 1937, S. 4). Dabei schließt er sich zusätzlich der Vorstellung Harries an, dass Pentosen diesen Weg ermöglichen.

In den 1950er und 1960er Jahren wurde der Reaktionsweg der Kautschukbiosynthese in *Hevea brasiliensis* erschlossen. Man fand heraus, dass die Synthese des Kautschuks nur in den Milchgefäßen des Baumes stattfindet. Isopentenylpyrophosphat (IPP), ein Grundbaustein der Terpene, wird durch eine Reaktion mit der terminalen Diphosphat-Gruppe in bestehenden Kautschuk eingegliedert (vgl. Ohya und Koyama 2001, S. 81).

Es ist festzuhalten, dass alle Kautschuk produzierenden Pflanzen den Rohstoff im Wesentlichen auf die gleiche Art und Weise produzieren (vgl. Cornish und Xie 2012, S. 64).

¹² Otto Ambros (1901–1990) war ein deutscher Chemiker und Mitglied in der NSDAP. Beschäftigt bei der I.G. Farben war er verantwortlich für die Kautschuksynthese, sowie für chemische Kampfstoffe. Nach Ende des Krieges wurde er als Kriegsverbrecher verurteilt.

Da der Löwenzahn im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, werden die Schritte der Kautschukbiosynthese in Teilkapitel 3.2.4 auf den Löwenzahn bezogen detailliert beschrieben.

3.1.5 Historische Entwicklung des Forschungsverlaufs zur Entschlüsselung der Kautschukformel

Im Folgenden soll der Forschungsverlauf zur Entschlüsselung der Kautschukformel kurz skizziert werden, um einen Überblick über dieses lange umstrittene Forschungsgebiet zu geben und die Schwierigkeiten bei der Erschließung der Kautschuk-Strukturformel darzustellen.

Bisher haben sich unter anderem Scharf und Braun in diversen Publikationen mit Forschung, Entwicklung und Kontroversen zur Kautschukformel beschäftigt (vgl. z.B. Scharf 1977, 1985, 1993, 2015; Braun 2012; Braun und Jenkins 2016). Scharf (1977) schlägt sogar Möglichkeiten zur Behandlung des Themas in der gymnasialen Oberstufe mit expliziter Reflexion über die Natur der Naturwissenschaften vor.

Aus der Übersicht (vgl. Tabelle 2) werden im Folgenden einige zentrale Schritte vorgestellt, um einen genauen Überblick zu geben und eine Grundlage für die Entwicklung von Unterrichtsprojekten zur historischen Genese der Entdeckung der Strukturformel zu schaffen.

Tabelle 2: Überblick über die Forschung zur Kautschukformel (vgl. u.a. Giersch und Kubisch 1995, S. 371ff.; Scharf 1985, S. 176-177)

Jahr	Beteiligte Person(en) und Institutionen	Entwicklung der Forschung
1826	M. Faraday	Elementaranalyse von gereinigtem Kautschuk ohne Angabe einer exakten Summenformel
1860	C. H. G. Williams	Identifizierung der Summenformel C_5H_8 nach Pyrolyse. Benennung des Stoffes: „Isopren“
1897	W. Euler	Synthese von Isopren. Klärung der Formel 2-Methyl-1,3-butadien
1900	C. Weber	Vorschlag für Konstitution von Kautschuk: „hochaggregierte Molekülkomplexe“, Formelhypothese: „Polyisopren“ für langkettige Moleküle
1905	C. D. Harries	Formelvorschlag für Strukturformel: 1,5-Dimethylcyclooctadien als zentraler Molekülbaustein

1910	C. D. Harries (in D) W. H. Perkin Jr./Matthews (in GB)	Bekanntwerden der katalytischen Wirkung von Natrium. Polymerisationstechnik
1906/1910	S. S. Pickles	Formelvorschlag, der der heutigen Formel sehr nahe kommt. Vorschlag einer langen, zu einem Ring geformten Kette
1912	BASF	Herstellung erster Reifen aus Buna
1914	C. D. Harries	Widerlegung der Achtringhypothese, Vorstellung von Ringstruktur bleibt
1924	H. Staudinger/J. Fritschi	Einführung des Makromolekül-Begriffs. Annahme, dass sich Hunderte von Isoprenmolekülen zu großen Kautschuk- molekülen zusammenbilden
20er und 30er Jahre	K. H. Meyer/H. Mark	Micell-Hypothese: Grundbausteine sind nicht durch Haupt- valenzen verbunden, sondern Ringe, die sich parallel asso- ziieren
1928		Röntgenstrukturanalyse: Sicherung der Konfiguration <i>cis</i> - 1,4-Polyisopren
1956	Amerikanische Forscher- gruppen	Stereospezifische Polymerisation zu <i>cis</i> -1,4-Polyisopren möglich

3.1.5.1 Die Achtringhypothese von Carl Dietrich Harries

An der Strukturaufklärung von Kautschuk und einer gezielten Synthese arbeiten Wissenschaftler verschiedener Länder mehr als ein Jahrhundert lang, bis es ihnen 1956 schließlich gelingt, *cis*-1,4-Polyisopren durch stereospezifische Polymerisation herzustellen.

In relativ kurzen Zeitabständen werden Anfang des 20. Jahrhunderts unterschiedliche Vorschläge für den Grundbaustein des Makromoleküls Kautschuk präsentiert. In diesem Zusammenhang sind hauptsächlich die Namen Harries, Pickles und Staudinger zu nennen.

Im Jahr 1826 veröffentlicht Faraday erste Ergebnisse zur Elementaranalyse von Kautschuk und ermittelt Kohlenstoff und Wasserstoff als die einzigen Elemente der Verbindung. Bezogen auf das Gewicht erhält er Werte, die einem Verhältnis von durchschnittlich etwa 87 % Kohlenstoff und 13 % Wasserstoff entsprechen (vgl. Faraday 1826, S. 23). Damit kommt er den heute nachgewiesenen Werten sehr nahe: In Isopren liegt ein Verhältnis von 88,15 % Kohlenstoff zu 11,85 % Wasserstoff vor (vgl. Scharf 1993, S. 214). Einige Jahre später, 1860, werden die genauen Werte nach der Methode der Trockendestillation (Pyrolyse) von Greville Williams¹³ identifiziert. Diese entsprechen der

¹³ Charles Hanson Greville Williams (1829–1910) war ein britischer Chemiker.

heute bekannte Summenformel C_5H_8 . Williams gibt der Substanz den Namen Isopren (vgl. Williams 1860, S. 254).

Im Jahr 1906 stellt der Brite Samuel Shrowder Pickles¹⁴ im Rahmen eines Vortrags und wenige Jahre später in einer Abhandlung eine Kautschukformel vor, die der bis heute gültigen Formel sehr nahekommt. Er schlägt vor, dass sich die C_5H_8 -Bausteine zu langen Ketten der folgenden Struktur zusammenfügen (vgl. Pickles 1910, S. 1088):

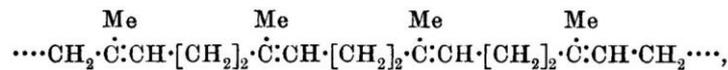


Abbildung 11: Original Kautschukformel nach Pickles (Pickles 1910, S. 1088)

Weiterhin vermutet Pickles, „dass die Zahl der Isopreneinheiten [...] in unterschiedlichen Kautschuksorten verschieden und daher auch deren Eigenschaften unterschiedlich sein können“ (Braun und Jenkins 2016, S. 3). Dies kann möglicherweise als der erste Hinweis auf Zusammenhänge zwischen Molekülgröße und Eigenschaften eines Polymers gesehen werden (vgl. Braun und Jenkins 2016, S. 3). Einzig die Tatsache, dass Pickles die These vertritt, dass die Kettenenden zu großen Ringen verknüpft sind, unterscheidet seine Strukturformel von der heutigen.

Ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts weist Carl Dietrich Harries¹⁵ die Doppelbindungen des Isoprens, das bereits weithin als Grundbestandteil von Kautschuk anerkannt wird, durch oxidative Zersetzung von Kautschuk mithilfe von Ozon nach. Im weiteren Verlauf der Reaktion beobachtet er die Bildung von Lävulinaldehyd und Lävulinsäure (vgl. Abbildung 12).

¹⁴ Samuel Shrowder Pickles (1878–1962) war ein britischer Chemiker. Nach dem Studium der Chemie war er zunächst an verschiedenen Universitäten auf dem Gebiet der Terpene und ätherischen Öle tätig bevor er sich während einer langen Industrietätigkeit vor allem mit Kautschukverarbeitung und Eigenschaften von Kautschukprodukten befasste (vgl. Braun und Jenkins 2016, S. 4).

¹⁵ Carl Dietrich Harries (1866–1923) war ein deutscher Chemiker. Hauptsächlich erforschte er die Struktur des Kautschuks und die Einwirkungen des Ozons auf denselben. Von 1904 an leitete er als Nachfolger von Ludwig Claisen das Chemische Institut an der Universität Kiel, bis er 1916 Aufsichtsratsmitglied bei Siemens & Halske wurde.

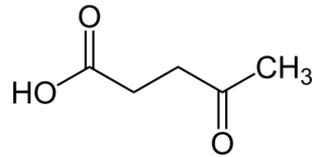


Abbildung 12: Strukturformel von Lävulinsäure

Daraus folgert er:

Wenn sich nun allein Lävulinaldehyd bei der Spaltung des Kautschukozonides mit Wasser bildet, so muss der Kautschuk-Kohlenwasserstoff aus einem Kohlenstoffring bestehen und nicht, wie bisher angenommen wurde, aus einer offenen Kohlenstoff-Kette. Dies ist principiell das wichtigste Ergebnis der vorliegenden Untersuchung. [...] Darnach würde sich das chemisch reagierende Molekül überraschend einfach gestalten und einer bisher nicht in der Natur beobachteten Körperklasse angehören, nämlich der Gruppe der hydrirten Achtringe, indem es sich als 1.5-Dimethyl-cyclooctadien-(1.5) darstellt. (Harries 1905, S. 1196)

Die folgende Abbildung zeigt Harries' Vorschlag für ein Kautschukmolekül und seine Vorstellung, wie die einzelnen Moleküle dieser als „Achtringhypothese“ benannten Theorie untereinander wechselwirken und verbunden sind. Für ihn kommt die Polymerie durch die „lose Addition der einzelnen Dimethylcyclooctadien-Moleküle zu Stande“ (Harries 1905, S. 1196).



Abbildung 13: Hypothetisches Modell des Kautschuks nach Harries (Braun 2012, S. 317)

Neben dem von Harries postulierten Achtring kann jedoch auch ein offenkettiges Polyisopren bei der Ozonisierung in Lävulinaldehyd umgewandelt werden, sodass Harries' Rückschluss nicht zwingend ist. Die folgende Darstellung verdeutlicht, dass sowohl die offenkettige als auch die ringförmige Struktur zum gefundenen Ozonisationsprodukt Lävulinaldehyd führen (vgl. Scharf 2015).

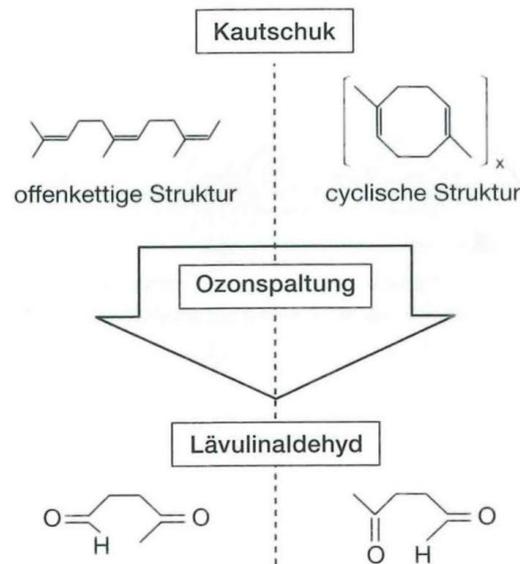


Abbildung 14: Ozonisation von Kautschuk und von der von Harries vorgeschlagenen cyclischen Struktur (Scharf 2015, S. 13)

Trotz Kritik u.a. von Pickles verteidigt Harries seine Formel jedoch zunächst unter Verweis auf Richard Willstätter¹⁶, der ebenfalls Cyclooctadien aus dem Pseudopelletierin¹⁷ isolieren konnte, was ihm große Bekanntheit einbrachte und ringförmige Moleküle wie das Cyclooctadien in den Fokus der Wissenschaft rückte. Harries schreibt: „Eine weitere Stütze für diese Strukturformel wurde dadurch erbracht, daß das von Willstätter aus dem Pseudopelletierin abgebaute Cyclooctadien [...] sich außerordentlich leicht polymerisierte“ (Harries 1911, S. 223).

1914 widerruft Harries seine Achtring-Hypothese nach einem „Entscheidungsexperiment“ (Scharf 2015, S. 11–12). Durch Addition von Chlorwasserstoff an Kautschuk und anschließende Eliminierung desselben bilden sich partiell isomerisierte Produkte, die bei einer Ozonisierung zu Polyketonen keine Rückschlüsse auf eine vorherige Achtringstruktur zulassen. Zu diesen Stoffen zählen beispielsweise das Undekatrion oder das in Abbildung 15 unten abgebildete Pentadekatetron (vgl. Harries 1919, S. 229).

¹⁶ Richard Willstätter (1872–1942) war ein deutscher Chemiker, der vor allem auf dem Gebiet der organischen Chemie große Arbeit leistete. 1915 wurde ihm der Nobelpreis für Chemie verliehen.

¹⁷ Pseudopelletierin (C₉H₁₅NO), eine bicyclische, heterocyclische Verbindung, kommt in der Natur in der Granatwurzelnrinde vor. Sie diente Willstätter als Grundstoff für die Synthese von Cyclooctatetraen.

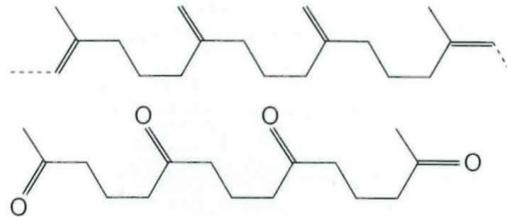


Abbildung 15: Partiiell isomerisiertes Kautschukmolekül und darunter das durch Ozonisation entstandene Produkt (2,6,10,14-Pentadekantetron) (vgl. Scharf 2015, S. 14)

An der Idee einer cyclischen Grundform des Kautschuks hält Harries jedoch weiterhin fest und korrigiert seine Formelhypothese zu einer Ringform mit einer höheren Ringgliedzahl als zuvor genannt. „Nach dem Auftreten des Pentadekatetrans kann kein Ring von 8 und 12 Kohlenstoffatomen mehr in Erwägung gezogen werden. Auch ein solcher von 16 ist unwahrscheinlich. Mindestens liegt ein Ring vor von 20 Kohlenstoffatomen“ (Harries 1919, S. 230).

3.1.5.2 Der Weg zum Makromolekül mit Hermann Staudinger

Um die Strukturformel von Kautschuk endgültig zu sichern, streben Forscher Anfang der 20er Jahre eine Hydrierung des Kautschuks an. Dieser gesättigte „Hydrokautschuk“ sollte sich im Hochvakuum destillieren lassen und sein Aufbau so beweisbar werden (vgl. Requardt 2017, S. 162). Jakob Fritsch, Doktorand von Hermann Staudinger¹⁸ gelingt diese Hydrierung des Kautschuks bei hohem Druck, Temperaturen von etwa 270 °C und der Verwendung eines Platin- oder Palladium-Katalysators (vgl. Staudinger und Fritsch 1922; Pummerer und Burkard 1922). Bei der Pyrolyse des Hydrokautschuks erhält Staudinger Spaltprodukte der Konstitution $(C_5H_{10})_x$. Als höchstsiedende Fraktion kann er Produkte nachweisen, die bis zu zehn Isopreneinheiten enthalten. Dies sieht er als Beweis, dass der Hydrokautschuk, und demzufolge auch der Kautschuk selbst, ein sehr großes Molekulgewicht besitzen muss (Staudinger und Fritsch 1922, S. 793; Fritsch).

Auf Basis dieser Erkenntnisse definiert Staudinger 1924 einen neuen Begriff für Kolloide Stoffe, den Makromolekülbegriff:

¹⁸ Hermann Staudinger (1881–1965) war ein deutscher Chemiker auf dem Gebiet der makromolekularen Chemie. Er gilt als Begründer der Polymerchemie, da er zeigen konnte, dass makromolekulare Stoffe aus mehreren Tausend Bausteinen zusammengesetzt sind. 1953 erhielt er den Nobelpreis für Chemie für seine Entdeckungen in diesem Bereich.

Diese Beobachtungen führen zu der Auffassung, daß der Kautschuk ein sehr hochmolekulares Äthylen-Derivat ist, bei dem sich eine große Zahl, vielleicht 100 und mehr Moleküle Isopren gleichartig chemisch gebunden haben. [...] Es ist aber wichtig, den Molekülbegriff hier anzuwenden, trotzdem er sehr stark von dem bei dem molekular-dispersen System gebrauchten abweicht; denn wenn wir die Kolloidteilchen als Moleküle des Kautschuks bezeichnen, so soll damit ausgedrückt werden, daß die einzelnen Isoprenreste, die das Kolloidteilchen aufbauen, durch normale chemische Bindungen zusammengehalten werden; und daß wir im strukturchemischen Sinn es mit sehr langen Kohlenstoffketten zu tun haben. Die Polymerisation des Isoprens zu diesen langen Ketten geht nach dieser Auffassung so lange vor sich, bis ein genügend großes, wenig reaktionsfähiges, also ein stark abgesättigtes Molekül, das Kolloidteilchen, sich gebildet hat. [...] Für solche Kolloidteilchen, bei denen das Molekül mit den Primärteilchen identisch ist, bei dem also die einzelnen Atome des Kolloidmoleküls durch normale Valenzbetätigung gebunden sind, schlagen wir zum Unterschied die Bezeichnung Makromolekül vor. Derart konstituierte Kolloidteilchen, die entsprechend der Bindefähigkeit des Kohlenstoffs, vor allem in der organischen Chemie und in der organischen Natur auftreten, bilden die eigentlichen kolloiden Stoffe. (Staudinger 1924, S. 1206)

Diese Theorie von „Makromolekülen“ wurde in der wissenschaftlichen Welt nicht sofort angenommen. Staudinger selbst berichtet in seinen *Arbeitserinnerungen*, dass seine Mitarbeiter und er zu Beginn mit ihrer Theorie alleine dastanden. Über ein Gespräch mit Heinrich Wieland¹⁹ schreibt er Folgendes:

So gab mir auch Kollege H. Wieland bei einem Gespräch Ende der zwanziger Jahre folgenden freundschaftlichen Rat: „Lieber Herr Kollege, lassen Sie doch die Vorstellung mit den großen Molekülen, organische Moleküle mit einem Molekulargewicht über 5000 gibt es nicht. Reinigen Sie Ihre Produkte, wie z.B. den Kautschuk, dann werden diese kristallisieren und sich als niedermolekulare Stoffe erweisen!“ (Staudinger 1961, S. 79)

Zwischen Staudinger und den beiden Chemikern der IG Farbenindustrie (später BASF) Kurt H. Meyer und Hermann Mark entfacht ebenfalls eine Kontroverse über die Struktur und Bindung der Polymere. Die beiden Letzteren halten zunächst noch an der Micellartheorie nach Nägele fest, die etwa dem „Bild eines Mauerwerks mit Steinen und Mörtel“ entspricht (Scharf 1993, S. 221). Die Diskussion geht sogar so weit, dass Staudinger eine Vortragseinladung an Mark widerruft, da dieser den Theorien Staudingers zu wenig Beachtung schenke und zu wenig zitiere (vgl. Staudinger 1932). Erst in der zweiten Hälfte der 1930er Jahre schließen sich auch Meyer und Mark der Auffassung Staudingers an und die Makromolekül-Formel wird weitgehend anerkannt, da mit der Entdeckung der Röntgenstrukturanalyse die Konfiguration von Naturkautschuk als *cis*-1,4-Polyisopren endgültig gesichert werden kann.

Im Jahre 1956 gelingt die erste stereoselektive Polymerisation von Isopren zum *cis*-1,4-Polyisopren (vgl. Horne et al. 1956; Stavely 1956). Diese Synthese markiert das Ende der bis dahin 130-jährigen Forschungsarbeit um die Kautschukformel.

¹⁹ Heinrich Otto Wieland (1877-1957) war ein deutscher Chemiker und Nobelpreisträger.

3.2 Der russische Löwenzahn *Taraxacum kok-saghyz*

In diesem Kapitel sollen Aufbau, Entwicklung und Verbreitung des in dieser Arbeit im Vordergrund stehenden Löwenzahns dargestellt werden.

3.2.1 Morphologische Grundlagen

Der russische Löwenzahn, *Taraxacum kok-saghyz*, gehört zur Familie der Korbblütler (*Asteraceae*) und ist eine kautschukenthaltende Pflanze, die einen diploiden Chromosomensatz ($2n=16$) enthält.

Eine erste Beschreibung des *Taraxacum kok-saghyz* wurde 1933 von seinem Entdecker L. E. Rodin²⁰ vorgenommen. In einem Artikel in der Zeitschrift *Acta Instituti Botanici Academiae Scientiarum USSR* beschreibt er neben dem Fundort der Pflanze Aussehen und Größe aller Pflanzenteile (vgl. Rodin 1933).

3.2.1.1 Blätter, Blüten und Samen

In seinem umfangreichen Werk *Wertvolle Kautschukpflanzen des gemässigten Klimas* (1951) stellt Max Ulmann diverse Kautschuk führende Pflanzen vor. Besonderer Wert wird dem russischen Löwenzahn *Taraxacum kok-saghyz* und seinen nahe verwandten Arten *T. tau-saghyz* und *T. krim-saghyz* beigemessen; Morphologie, Physiologie, Anbau und Züchtung, Analyse und technische Gewinnung des Kautschuks aus der Pflanze werden ausführlich beschreiben. In einer Vielzahl aktueller Publikationen wird ebenfalls auf das Buch verwiesen, weshalb es als Grundlagenwerk bei der Arbeit mit dem russischen Löwenzahn angesehen werden kann.

Die folgende Tabelle zeigt Blätter, Blütenköpfe sowie Samen des russischen im Vergleich zum heimischen Löwenzahn (*Taraxacum officinale*) und veranschaulicht so die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale.

²⁰ Über den Namensgeber dieser Löwenzahnart ist wenig bekannt. Leonid Efimovič Rodin (Леонид ЕФИМОВИЧ РОДИН) (1907-1990) war Geobotaniker. Er studierte an der staatlichen Universität Sankt Petersburg und war seit Beginn der 30er Jahre bis zu seinem Tod Mitglied des dortigen botanischen Instituts. 1933 veröffentlichte er erstmals eine Beschreibung des während seiner Expedition aufgefundenen *T. kok-saghyz*. Nach einem Vertreter des Botanischen Instituts in Sankt Petersburg, der einen Artikel zum Gedenken an Rodin verfasst hat, gilt er als ein bedeutender Geobotaniker und Entdecker (vgl. Hannibal 2007).

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Blättern, Blüten und Samen des russischen und heimischen Löwenzahns

<i>Taraxacum kok-saghyz</i>	<i>Taraxacum officinale</i>
	
	
	

Taraxacum kok-saghyz bildet, ebenso wie der heimische Löwenzahn, mit seinen Blättern eine am Boden aufliegende Rosette aus zumeist 20-25 Blättern. Diese haben jedoch eine grün-gräuliche, fleischige Gestalt. Im Allgemeinen sind sie kleiner als die des gewöhnlichen Löwenzahns und haben an ihren Rändern keine scharfen Zähnchen, sondern können glattrandig oder aber mehr oder weniger gespalten sein.

In der Regel bildet der wildwachsende russische Löwenzahn erst im zweiten Wachstumsjahr eine Vielzahl von Blüten aus. Sie sind hellgelb und ihre Stiele ragen über den Radius der Rosette hinaus. Die Größe der Blütenkörbchen beträgt im blühenden Zustand zwischen 1,5 und 2 cm. Charakteristisch für die Unterscheidung vom gewöhnlichen Löwenzahn ist die Form der Blätter, die die Blütenkörbchen umhüllen. Die äußeren Hüllblätter

sind eiförmig-dreieckig, die inneren langgestreckt-lanzettartig. Beide enden sie in charakteristischen Verdickungen, die auch als Höcker bezeichnet werden (vgl. Ulmann 1951, S. 87; Kirschner et al. 2013, 2013, S. 462). Der heimische Löwenzahn verfügt dagegen nicht über solche Höcker in den Hüllblättern.

Auch die Samen des russischen Löwenzahns unterscheiden sich von denen der heimischen Sorte. Wie der in unserer Region bekannte Löwenzahn bildet *T. kok-saghyz* Achänen (Nussfrüchte) aus, die zusammen mit dem Pappus (Flugapparat) die Verbreitungseinheit bilden. Die Achänen erreichen eine Länge von 2-3 mm (vgl. Ulmann 1951; Kirschner et al. 2013). Sie haben eine gräuliche bis braune Farbe und – anders als beim heimischen Löwenzahn – charakteristische scharfe Dornen am oberen Ende, die nach unten hin stumpfer werden oder sogar ganz fehlen (vgl. Ulmann 1951, S. 87). Ob diese Dornen oder Häkchen eine besondere Funktion erfüllen, ist nicht bekannt. Möglicherweise sorgen sie dafür, dass sich der Samen leichter auf einer Oberfläche festhält.

Als Mitte des letzten Jahrzehnts die Forschung an *T. kok-saghyz* wieder aufgenommen wurde, arbeitete man zunächst fälschlicherweise mit *T. brevicorniculatum*, einer Art, die (weltweit) das Keimplasma des *T. kok-saghyz* verunreinigt hatte (vgl. Kirschner et al. 2013). Es wird vermutet, dass diese Verunreinigungen bereits in den ersten Sammlungen zur Zeit vor und während des Zweiten Weltkriegs zustande kamen, als auch Nicht-Spezialisten mit der Sammlung von Keimplasma betraut wurden, die neben *T. kok-saghyz* auch Samen sympatrischer Pflanzen (also Pflanzen einer dem *T. kok-saghyz* sehr ähnlich sehenden Art, die im selben geographischen Gebiet wachsen) sammelten. Durch intensiven Austausch von Samen zwischen den Keimplasma-Banken und durch starke Vermehrung der Samen konnten sich die Kontaminationen ausbreiten und waren demzufolge in beinahe allen Kulturpflanzenbanken zu finden (vgl. Kirschner et al. 2013, S. 469). *T. brevicorniculatum* enthält in seinen Wurzeln nur etwa ein Fünftel der Kautschukmenge einer kautschukreichen Pflanze von *T. kok-saghyz* (vgl. van Dijk et al. 2010, S. 218). Nachdem der Fehler aufgeklärt worden war, wurde 2008 im Rahmen einer Expedition neues Saatmaterial von *T. kok-saghyz* in Zentralasien und im Kaukasus-Gebiet gesammelt, um es für die Forschung zur Verfügung zu stellen und es zu konservieren (vgl. Hellier 2011).

Neben einer Differenzierung über die Chromosomen-Anzahl (*T. brevicorniculatum* $2n=24$, *T. kok-saghyz* $2n=16$) oder über die Bestimmung des Kautschukgehaltes, ist eine Unterscheidung auch auf einem einfacheren Weg über äußere Merkmale möglich. So sind die Blätter des *T. kok-saghyz* fleischig und grau-grün bis blau-grün, während die Blätter

des *T. brevicorniculatum* keinen fleischigen Charakter aufweisen und eher eine helle bis blassgrüne Farbe besitzen. Wie der heimische Löwenzahn besitzt auch *T. brevicorniculatum* keine oder nur sehr kleine Hörner in den äußeren Hüllblättern der Blütenkörbchen, was eine eindeutige Unterscheidung zu *T. kok-saghyz* möglich macht. Nicht zuletzt unterscheiden sich *T. brevicorniculatum* und *T. kok-saghyz* in der Art und Weise ihrer Fortpflanzung. Während sich *T. brevicorniculatum* asexuell vermehrt und somit Klone produziert, ist *T. kok-saghyz* selbst-inkompatibel und pflanzt sich geschlechtlich fort (vgl. Kirschner et al. 2013, S. 462). Aufgrund dessen findet er sich wahrscheinlich in einem weiteren geographischen Bereich (vgl. Kirschner et al. 2013, S. 463). In der fachwissenschaftlichen Literatur wurde *T. brevicorniculatum* aufgrund des Problems in den Keimplasma-Banken bis 2010 noch als *T. kok-saghyz* benannt, mittlerweile wird jedoch eine Unterscheidung vorgenommen (vgl. Mooibroek und van Beilen 2011; Post et al. 2012; Hillebrand et al. 2012; Kirschner et al. 2013).²¹

3.2.1.2 Die Wurzeln, der Ort der Kautschukspeicherung

Im Gegensatz zum gewöhnlichen Löwenzahn hat die russische Löwenzahnart keine einzelne Pfahlwurzel, sondern eine Hauptwurzel mit mehreren feineren und verzweigten Wurzeln, in denen der Kautschuk gebildet und gespeichert wird (vgl. Kapitel 3.2.4 zur Kautschukbiosynthese).

²¹ Pflanzen des russischen Löwenzahns, die 2015 und 2016 an der Universität Siegen in Form von Samen ausgepflanzt wurden, ließen sich durch optische Analyse eindeutig als *Taraxacum kok-saghyz* identifizieren. Jan Kirschner, Taxonom an der Universität Prùhonice in der Nähe von Prag, der bereits mehrere Artikel zur Taxonomie von *Taraxacum*-Arten publiziert hat, konnte diese Identifikation mithilfe von Fotos bestätigen.



Abbildung 16: Einjährige Pflanze des *T. kok-saghyz*

Ulmann beschreibt den Aufbau der Wurzeln wie folgt:

Die Wurzel des wildwachsenden Kok-Saghyz ist wenig verzweigt, ihre Dicke beträgt am Wurzelhals 0,7-1,0 cm; die in 20 bis 25 cm Tiefe ausgegrabene und getrocknete Wurzel wiegt im Mittel 1-1,2 g. [...] Der Aufbau der Wurzel ist ein verhältnismäßig einfacher und symmetrischer. Zwischen der äußeren, umschließenden Korkschiicht und den Holzzellen des Marks befinden sich die einzelnen langgestreckten Milchröhren. [...]

Wie [...] festgestellt wurde, beginnt im Frühjahr des zweiten Vegetationsjahres das im Vorjahr gebildete Rindengewebe an der Wurzel abzustorben. [...] Während dieser Vorgänge koaguliert der Milchsaft der absterbenden Milchröhren, feine Kautschukfäden bildend. Diese werden im Laufe der Zeit gleichfalls nach außen gedrängt und bilden im Verein mit anderen abgestorbenen Geweberesten um die neu gewachsene Wurzel eine Hülle [...], [die] den gesamten vorjährigen Kautschuk enthält. [...] Die Gewinnung des letzteren macht jedoch Schwierigkeiten, da die alte Kautschukhülle sehr dünn ist und beim Ausgraben der Wurzeln leicht verlorenght. (Ulmann 1951, S. 88–91)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Skizze eines Keilschnitts einer Löwenzahnwurzel und die darin enthaltenen Milchröhren (Abbildung 17) sowie ein Foto einer frischen Wurzel im zweiten Vegetationsjahr mit der dünnen Hülle aus koaguliertem Kautschuk (Abbildung 18).

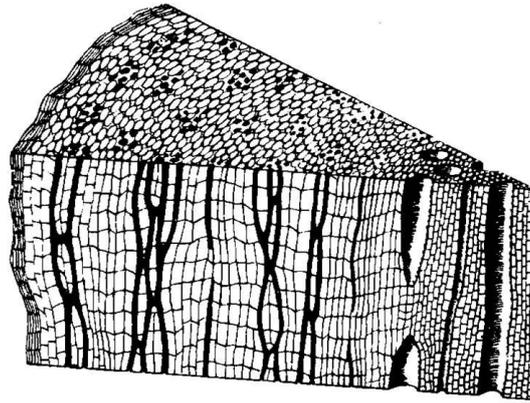


Abbildung 17: Keilschnitt aus der Wurzel des russischen Löwenzahns mit den dunkel markierten Milchröhren (Ulmann 1951, S. 91)



Abbildung 18: Frische Wurzel des *Taraxacum kok-saghyz* im zweiten Wachstumsjahr mit koagulierte Kautschuk in der äußeren Hülle (Kreuzberger et al. 2016, S. 72)

Der Gehalt an Kautschuk ist über die Wurzel nicht gleichmäßig verteilt, sondern unterscheidet sich je nach Abstand vom Wurzelhals. Es lässt sich festhalten, dass der Kautschukgehalt mit Entfernung vom Wurzelhals zunimmt, dass der meiste Kautschuk im Bereich bis ca. 20 cm unterhalb des Wurzelhalses aufzufinden ist (vgl. Ulmann 1951, S. 227, 229). In Nebenwurzeln findet sich daher immer mehr Kautschuk als in der Hauptwurzel. In Gemeinschaft mit Kautschuk treten ebenfalls immer Harze auf, deren Gehalt zwischen 2–5 % betragen kann (vgl. Ulmann 1951, S. 136).

Wird die Wurzel verletzt, findet man den Kautschuk in Form von Latex oder feinen Fäden. Frische einjährige Pflanzen liefern latexhaltige Milch, getrocknete Wurzeln feine Kautschukfäden (vgl. Abbildung 19) und in frischen zweijährigen Wurzeln findet man

sowohl Latexmilch als auch Kautschukfäden, die aus abgestorbenen und nach außen gedrängten Milchröhren gebildet wurden (vgl. Ulmann 1951, S. 91).



Abbildung 19: Kautschukfäden in einer getrockneten Wurzel des *T. kok-saghyz*

Wildpflanzen des *Taraxacum kok-saghyz* enthalten im Durchschnitt zwischen 3 und 5 % Kautschuk, dies zeigten sowohl Studien zu Beginn der Kautschukforschung am russischen Löwenzahn wie auch aktuelle Studien (vgl. Ulmann 1951, S. 135ff.; Arias et al. 2016, S. 320). Weitere in Feldversuchen untersuchte Wildpflanzen wiesen eine Kautschukkonzentration von bis zu 9,1 % der Wurzelrockenmasse auf (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 72).

Bezogen auf die Zeit der Kautschukbildung belegen aktuelle Studien, dass der Kautschukgehalt im zweiten Wachstumsjahr im Vergleich zum Herbst des Vorjahres noch einmal ansteigt (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 75). Auf die Frage, ob es jedoch sinnvoller ist, den Löwenzahn vom industriellen Standpunkt aus gesehen nach einem oder zwei Wachstumsjahren zu ernten, geben die Autoren in ihrem Artikel keine genaue Antwort, da diese Entscheidung von deutlich mehr als nur dem maximalen Kautschuk- und Inulinertag abhängt (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 77).

Durch Inkulturnahme, Selektion und weitere Züchtungsmaßnahmen kann der Kautschukgehalt um ein Vielfaches erhöht werden. Es konnten bereits *T. kok-saghyz*-Pflanzen mit einem Kautschukgehalt von mehr als 30 % der Trockenmasse identifiziert werden (vgl. WWU Münster et al. o. J., S. 49).

3.2.2 Geographische Verbreitung und Vegetationsphasen

Die Wildheimat des *Taraxacum kok-saghyz* liegt in Kasachstan, in den Ausläufern des Tian-Shan-Gebirges in den Gebieten um die Orte Kegen, Sardschass und Tekes. In einer Höhenlage um 1.800–2.100 m über dem Meeresspiegel erstreckt sich das Vorkommen der Löwenzahnart auf einer Fläche von etwa 10.000 km².

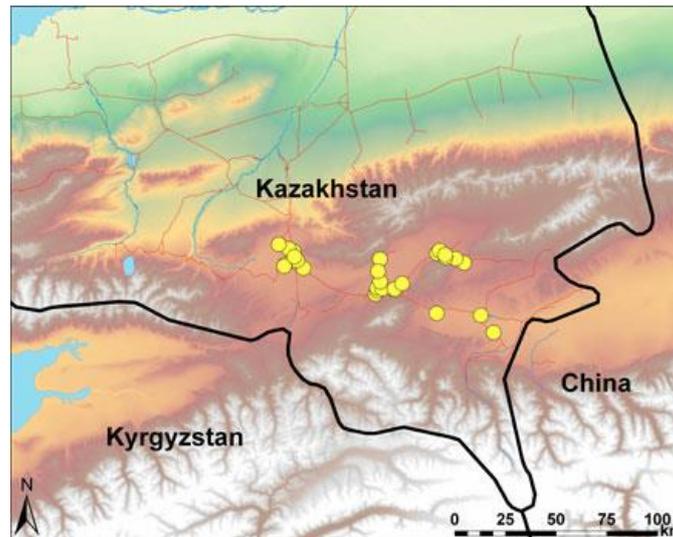


Abbildung 20: Karte des Vorkommens von *Taraxacum kok-saghyz* (die gelben Markierungen beschreiben Fundorte von Wildpflanzen des russischen Löwenzahns im Bereich der Orte Kegen, Sardschass und Tekes) (Kirschner et al. 2013, S. 457)

Die Sommer in der Region sind warm, die Winter kalt, windig und schneereich. Für den Frühling und Sommer sind starke Temperaturschwankungen typisch, tagsüber liegen die Temperaturen zwischen 30 und 50 °C, in den Nächten fallen sie um den Gefrierpunkt. Charakteristisch ist ebenfalls eine hohe Luftfeuchtigkeit (vgl. Ulmann 1951, S. 48–49). Expeditionen in die Region im östlichen Kasachstan haben gezeigt, dass *T. kok-saghyz* dort auch noch heute, trotz starker Sammlung von Pflanzen und Samen in der Zeit zwischen 1930 und 1950, relativ verbreitet ist (vgl. Kirschner et al. 2013, S. 470).

Im Laufe der Zeit lassen sich bei *Taraxacum kok-saghyz* verschiedene Entwicklungsstadien beobachten. Wildwachsende Pflanzen des *T. kok-saghyz* werden in der Regel vier bis fünf Jahre alt, es wurden aber auch bis zu sieben Jahre alte Pflanzen angetroffen. Im ersten Wachstumsjahr entwickeln sich die Pflanzen in der Regel verhältnismäßig schwach und langsam. Es wurde festgestellt, dass Samen des wildwachsenden *T. kok-saghyz* langsam und ungleichmäßig keimen (vgl. Ulmann 1951, S. 114). Meist kommen die Pflanzen erst im zweiten Jahr zur Blüte.

Das zweite Vegetationsjahr ist durch die volle Reife der Pflanzen charakterisiert. In der Wildheimat des *Taraxacum kok-saghyz* kommt dieser Anfang Juni zur Vollblüte, Anfang Juli ist dann die Fruchtreife erreicht. Im Anschluss, Mitte August, beginnen die Blätter des Löwenzahns zu welken und fallen ab. Die Pflanzen unterbrechen ihre Vegetation und gehen in eine Ruheperiode von zwei bis drei Wochen über. In verschiedenen Kulturversuchen Ende der 30er und Anfang der 40er Jahre in der UdSSR wurde festgestellt, dass allgemeine Trockenheit Einfluss auf den Eintritt der Ruheperiode nimmt. Möglicherweise hat das Eintreten des Ruhezustandes nichts mit der Reife der Pflanze zu tun, sondern ist eine Folge von ungünstigen Umweltbedingungen (vgl. Ulmann 1951, S. 283–284). Nach dem Ruhestadium setzt die Vegetationsphase erneut ein und dauert bis zum Beginn des Winters an. Unter günstigen Vegetationsbedingungen kann es dann in der zweiten Sommerhälfte zu einer erneuten Blüte kommen (vgl. Ulmann 1951, S. 50, 1951, S. 136).

Aussaaten, die 2015 sowie 2016 an der Universität Siegen durchgeführt und protokolliert wurden, bestätigen die Beobachtungen, dass *Taraxacum kok-saghyz* in der ersten Zeit nur sehr langsam wächst. Auch wenn sich bei einer Aussaat Ende Februar bzw. Anfang März schon nach wenigen Tagen erste Blättchen bildeten, dauerte es ca. zweieinhalb Monate, bis diese 3-5 cm groß waren und einen weiteren Monat (bis Anfang/Mitte Juni) bis die Pflanzen zur Blüte kamen. Ein Eintreten in die Ruheperiode war wie in der Literatur beschrieben zu beobachten, allerdings setzte nur bei wenigen Pflanzen eine erneute Vegetation im Spätsommer ein. Es ist jedoch ebenfalls möglich, dass die Vegetation erst im Frühling des Folgejahres wieder einsetzt (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 70). Für die Pflanzen, die nicht im selben Jahr der Aussaat für Experimente geerntet wurden, konnte diese Angaben bestätigt werden.

3.2.3 Düngung und Züchtung

Schon kurz nach dem Auffinden des russischen Löwenzahns wurde in der Sowjetunion mit verschiedenen Anbauversuchen begonnen. Dabei ist die richtige Düngung als grundlegend für ein gutes Wachstum der ober- und unterirdischen Pflanzenteile zu betrachten.

Was die Bodenbeschaffenheit betrifft, lässt sich zunächst festhalten, dass eine hohe Bodenfeuchtigkeit wichtig für eine gute Keimung, für die Wurzelbildung und das Reifen der Samen ist. Es wird zusammengefasst, dass man das reichste Vorkommen von *T. kok-*

saghyz auf leichten, lehmigen, humusreichen Wiesenböden findet (vgl. Ulmann 1951, S. 49–50; Whaley und Bowen 1947, S. 34).

An aktuellen Projekten zur Etablierung des russischen Löwenzahns als heimische Kulturpflanze beteiligte Wissenschaftler führen als Vorteil an, dass *Taraxacum kok-saghyz* auf Marginalböden angebaut werden kann, die sich zur Kultivierung der meisten Nutzpflanzen nicht eignen (vgl. Schulze Gronover und Prüfer 2010). In der Literatur aus den 40er und 50er Jahren ist man sich jedoch einig, dass der Boden reichhaltig sein muss, um einen hohen Ertrag an Wurzeln und an Kautschuk zu erhalten (vgl. Ulmann 1951; Whaley und Bowen 1947). Whaley und Bowen bekräftigen: „the soil must be rich in organic matter, in nitrogen and in phosphoric acid” (1947, S. 18).

Ulmann fasst 1951 den Einfluss verschiedener mineralischer Dünger auf Wurzelmasse und Kautschukgehalt in den Wurzeln zusammen. Während die Kontrollpflanzung mit normalem NPK-Dünger (Dünger, der die Kernnährelemente Stickstoff, Phosphat und Kalium enthält) gedüngt wurde und lediglich etwa 1,87 % Kautschuk hervorbrachte, war beim Einsatz von einer Dünger-Zusammensetzung von N2PK, das heißt bei einer Erhöhung des Phosphat-Gehaltes, eine Steigerung des Kautschukertrages auf 3,5 % zu messen (vgl. Ulmann 1951, S. 185). In den Forschungsbeobachtungen wird ebenfalls zusammengefasst, dass eine geringere Menge an Kalium den Kautschukgehalt positiv beeinflusst.

In neueren Forschungsarbeiten zu *Taraxacum brevicorniculatum* von Munt et al. (2012) wird das N:P-Verhältnis bestätigt. Ein Verhältnis zwischen 1:2 und 1:4 kann den Kautschukgehalt erhöhen. Ein Dünger, der ergänzend Calcium und Magnesium enthält, erhöht den Studien zufolge die Wurzelbiomasse (Munt et al. 2012, S. 291). Um die Ausbildung von Wurzelmasse, Verbesserung von Wurzelmorphologie und Kautschukgehalt weiter zu unterstützen, ist ein enger Pflanzabstand zuträglich. Wenn in Abständen von fünf bis zehn Zentimetern gepflanzt wird, weisen die Wurzeln weniger Seitenwurzeln auf (vgl. Munt et al. 2012, S. 292). Dies ist ein Zuchtziel, das in der Löwenzahnforschung aktuell von Bedeutung ist. Ein weiteres aktuelles Ziel stellt die Züchtung von herbizidresistenten

Linien des russischen Löwenzahns sowie die Entwicklung von Strategien zur Unkrautbekämpfung dar. Mit diesem Teilbereich der Forschung befassen sich vor allem Wissenschaftler des Julius-Kühn-Instituts²².

Durch Kreuzung mit *T. officinale* sollen Hybride gezüchtet werden, die sowohl einen hohen Kautschukgehalt von bis zu 20 % aufweisen, als auch eine einzelne Pfahlwurzel ausbilden (vgl. van Beilen und Poirier 2007, S. 227). Diese Hybride könnten einfacher mechanisiert geerntet und verarbeitet werden, z.B. mit einer modifizierten Erntemaschine für Chicorée-Wurzeln oder für Kartoffeln.

Als problematisch bei der Gewinnung des Latex aus Löwenzahnwurzeln erweist sich zurzeit die Tatsache, dass sich der Latex schon während der Ernte verfärbt, zu Kautschuk koaguliert und dann fest am pflanzlichen Gewebe haftet. So wird es schwieriger, den Kautschuk von der restlichen Biomasse abzutrennen. Für diese Eigenschaft des Löwenzahns sind Polyphenoloxidasen (kurz: PPO) verantwortlich, die die Oxidation von *o*-Diphenolen zu *o*-Chinonen enzymatisch katalysieren. Chinone kommen häufig in Farbstoffen vor und sorgen für die Braunfärbung des Latex bei Verletzung der Löwenzahnwurzel. Es wird weiterhin vermutet, dass Polyphenoloxidasen durch die Kontrolle der Koagulation des Kautschuks eine Schlüsselrolle beim Schutz der Pflanze vor z.B. Fressfeinden spielen (vgl. Wahler et al. 2009, S. 335).

Durch RNA-Interferenz (auch RNA-Silencing genannt) konnte der Zusammenhang zwischen PPO-Aktivität und Latex-Koagulation nachgewiesen werden: Die Polyphenoloxidase wurde durch den Einsatz von Tropolon²³ fast vollständig inhibiert (vgl. Wahler et al. 2009, S. 342). Aus den Pflanzen, in denen PPO ausgeschaltet war, konnte das Vier- bis Fünffache an Latex verglichen mit Kontrollpflanzen gewonnen werden (vgl. Wahler et al. 2009, S. 339).

Ein aktuelles Forschungsinteresse liegt darin, auch durch traditionelle Züchtung wie Mutagenese und Selektion das Enzym Polyphenoloxidase auszuschalten, sodass die Schnittstelle, aus der die Latexmilch herauslaufen soll, nicht mehr verklebt und so ein sogenannter „blutender Löwenzahn“ entsteht.

²² Das Julius-Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen ist eine Forschungseinrichtung, die sich mit der nachhaltigen Erzeugung und Nutzung von Kulturpflanzen als Nahrungsgrundlage beschäftigt.

²³ Tropolon (2-Hydroxy-2,4,6-cycloheptatrien-1-on) ist ein PPO-Inhibitor.

Die beschriebenen Forschungsansätze zielen letztlich darauf, die Kautschukernte pro Jahr und Hektar zu maximieren. In Deutschland wurde in Feldversuchen bereits ein Ertrag von etwa 500 kg/ha erreicht, der noch auf 1000 kg Kautschuk pro Hektar und Jahr gesteigert werden soll (vgl. Burger 2014). Katrina Cornish von der Ohio State University, die sich gemeinsam mit ihrem Team auf die alternativen Kautschukquellen Guayule und den russischen Löwenzahn fokussiert hat, beschreibt, dass *T. kok-saghyz* beim Anbau in Ohio sogar das Potenzial habe, etwa 2000 kg/ha Kautschuk zu liefern (vgl. Cornish 2016, S. 851). Zum Vergleich: ein Hektar einer *Hevea brasiliensis*-Plantage liefert pro Jahr auch etwa 2000 kg Kautschuk (vgl. Röthemeyer und Sommer 2013, S. 48).

3.2.4 Biosynthese des Kautschuks in *Taraxacum kok-saghyz*

3.2.4.1 Ablauf der Synthese

Dieses Teilkapitel gibt einen Überblick über aktuelle Forschungsarbeiten zur Kautschuk-synthese im Löwenzahn. Dabei wird sowohl auf den russischen Löwenzahn *Taraxacum kok-saghyz* wie auch auf *Taraxacum brevicorniculatum*, einen nahen Verwandten, verwiesen. Da angenommen wird, dass die Kautschukbiosynthese der beiden Spezies sehr ähnlich oder sogar auf die gleiche Weise abläuft, und da die Forscher zunächst fälschlicherweise annahmen, mit *T. kok-saghyz* zu arbeiten, obwohl ihnen eigentlich *T. brevicorniculatum* zur Verfügung gestellt worden war, werden die beiden Arten und ihre Abkürzungen (*Tk*, *Tb*) in diesem Abschnitt synonym verwendet (vgl. auch Teilkapitel 3.2.1 zu den Unterschieden zwischen den beiden Spezies).

Forscher der Universität Münster und des Fraunhofer-Institutes IME arbeiten seit mehreren Jahren im Projekt „TARULIN“ (Russischer Löwenzahn (*Taraxacum kok-saghyz*) als nachhaltige Quelle für Latex, Kautschuk und Inulin) an der Aufklärung der Kautschuk-biosynthese im Löwenzahn. Es ist ihnen bereits gelungen, Schlüsselproteine der Synthese zu identifizieren und ihre Aufgaben zu charakterisieren.²⁴

²⁴ Daneben existieren weitere Forschungsprojekte nicht nur in Deutschland, sondern auch europa- und weltweit. Im Projekt „RUBIN“ (Industrialisierung von Kautschuk aus Löwenzahn), an dem neben den oben genannten Projektpartnern auch der Reifenhersteller Continental beteiligt ist, wurde bereits ein Testreifen hergestellt. Daneben läuft aktuell auch ein weiteres Forschungsprojekt mit dem Namen „DRIVE4EU“ (Dandelion Rubber and Inulin Valorization and Exploitation for Europe, Folgeprojekt des EU-PEARLS-Projekts), in das Institutionen aus verschiedenen europäischen Ländern, unter anderem aus den Niederlanden, Tschechien und Deutschland, aber auch aus Kasachstan eingebunden sind.

Mittlerweile weiß man, dass der Kautschuk in *Taraxacum kok-saghyz* in speziellen Latex ausscheidenden Zellen, den Milchröhren, gebildet wird (vgl. Schmidt et al. 2010a, S. 282). Bei Milchröhren handelt es sich um ein vernetztes Gefäßsystem, das den gesamten Pflanzenkörper durchzieht. Man unterscheidet zwischen gegliederten und ungegliederten Milchröhren. Gegliederte Milchröhren entstehen durch Verschmelzung und Auflösung der trennenden Querwände mehrerer Zellen und „treten in Querrichtung unter Ausbildung von Anastomosen²⁵ miteinander in Verbindung, sodaß sie, einem Netzwerk gleich, den gesamten Pflanzenkörper durchziehen“ (Weiler und Nover 2008, S. 116). Ungegliederte Milchröhren hingegen wachsen mit der ganzen Pflanze parallel zu ihren Längsachsen unter Kernteilung mit und können den Pflanzenkörper „als langgestreckte und unverzweigte Schläuche“, die mehrere Meter lang werden können, durchziehen (Weiler und Nover 2008, S. 113). Bei *Taraxacum kok-saghyz* handelt es sich um eine Pflanze mit gegliederten Milchröhren.

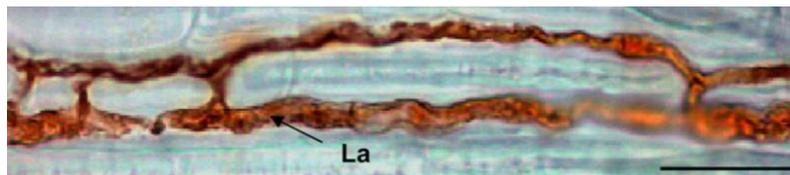


Abbildung 21: Färbung der Milchröhren mit Sudan III (Wahler et al. 2009, S. 338) (La = Laticiferen)

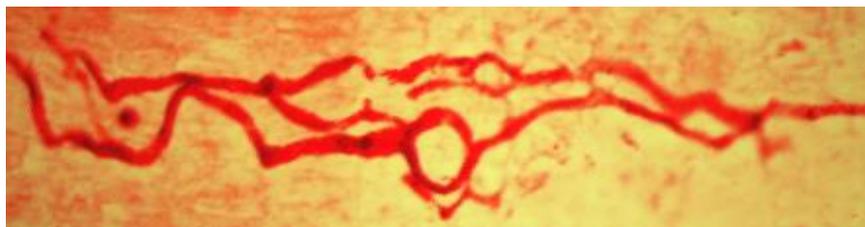


Abbildung 22: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in den Wurzeln des *T. kok-saghyz*

Obwohl es Unterschiede zwischen den verschiedenen Kautschuk produzierenden Pflanzen gibt, sind die grundlegenden Mechanismen der Kautschuksynthese ähnlich, und die beteiligten Enzyme vergleichbar (vgl. Post et al. 2012, S. 1407). Es konnte gezeigt werden, dass die Kautschukpartikel aus *Taraxacum kok-saghyz* den gleichen Aufbau wie

Außerhalb von Europa existiert das Projekt „PENRA“ (The Program of Excellence in Natural Rubber Alternatives), das von der Universität Ohio koordiniert wird und an dem sich unter anderem die Reifenhersteller Bridgestone und Goodyear beteiligen.

²⁵ Unter Anastomosen versteht man Querverbindungen zwischen Gefäßsträngen.

Kautschukpartikel aus anderen Pflanzen aufweisen (vgl. Schulze Gronover et al. 2011, S. 83).

Die einzelnen Schritte der Kautschukbildung werden im Folgenden detaillierter erläutert.

Konkret findet die Kautschuksynthese am endoplasmatischen Retikulum der Pflanze statt. Ausgangsstoffe für die Bildung von Polyisoprenen stellen die beiden Isomere mit fünf Kohlenstoffatomen Isopentylpyrophosphat (im Folgenden: **IPP**) und Dimethylallylpyrophosphat (im Folgenden: **DMAPP**) dar. IPP wird (vermutlich) über den Mevalonatweg gebildet²⁶ und lässt sich mithilfe einer Isomerase in DMAPP umwandeln. In einer Kondensationsreaktion von IPP und DMAPP unter Abspaltung von Diphosphat (vgl. Puskas et al. 2006, S. 537) entsteht nun Geranylpyrophosphat (**GPP**, C=10). Weitere Additionen von IPP bilden zunächst Farnesylpyrophosphat (**FPP**, C=15) und anschließend Geranylgeranylpyrophosphat (**GGPP**). Die Strukturformeln der Substrate zeigt die unten stehende Abbildung.

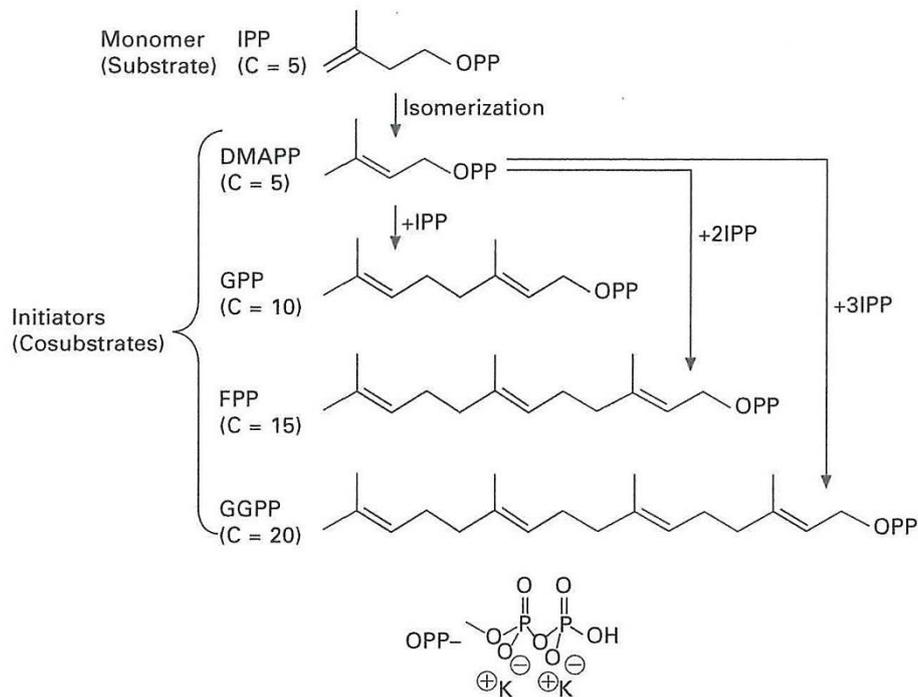


Abbildung 23: Strukturformeln der allylischen Oligoisopren-diphosphate, Ausgangsstoffe der Kautschuksynthese (Puskas et al. 2014, S. 44)

²⁶ Der Mevalonatweg ist ein Stoffwechselweg zur Biosynthese von Isoprenoiden in dem in sechs Schritten IPP und DMAPP gebildet werden.

Die Kondensationsreaktion des IPP erfolgt durch eine resonanzstabilisierte Ionisierung im ersten Schritt, an der anschließend die Doppelbindung des IPP-Monomers angreifen können (vgl. Puskas et al. 2006, S. 540). Durch Kondensation mit IPP-Molekülen wird das Molekül größer und nähert sich der Größe eines Kautschukmoleküls immer weiter an. Um die Pyrophosphat-Gruppe an das aktive Zentrum der beteiligten Enzyme zu binden, ist ein kationischer Aktivator nötig. Diese Funktion übernehmen in der Regel Magnesium-Ionen (vgl. Cornish 2014, S. 6).

3.2.4.2 An der Biosynthese beteiligte Enzyme

Die Bildung der Kautschukmoleküle wird durch spezielle Enzyme, die unterschiedliche Funktionen haben, katalysiert. Im Rahmen der Forschung zur Industrialisierung des russischen Löwenzahns ist die Identifikation der an der Kautschuksynthese beteiligten Enzyme besonders wichtig, um deren Mechanismus und Wirken aufzuklären, die Synthese durch Genforschung zu beeinflussen und später durch gezielte Züchtung den Kautschukgehalt zu erhöhen.

Einige der wichtigsten an der Kautschuksynthese in *T. kok-saghyz* beteiligten Enzyme werden im Folgenden vorgestellt und ihre Funktionen genauer beschrieben.

Tabelle 4: Übersicht über die beteiligten Enzyme

Enzym	Abkürzung	Bekannte Varianten
<i>cis</i> -Prenyltransferase	CPT	CPT1-3
rubber transferase activator	RTA	-
small rubber particle protein	SRPP	SRPP1-5
rubber elongation factor	REF	-

Es ist festzuhalten, dass nicht nur ein einzelnes Enzym die Kautschukbildung in der Pflanze bestimmt, sondern dass es sich um ein Zusammenspiel mehrerer Proteine handelt.

Die wohl wichtigsten Enzyme sind die *cis*-Prenyltransferasen (CPT). CPTs befinden sich an der Oberfläche der Kautschukpartikel und sind für den Transfer von IPP zu längeren Prenylgruppen, d.h. für das Kettenwachstum verantwortlich (vgl. Schmidt et al. 2010b, S. 2). Bisher wurden drei unterschiedliche CPTs identifiziert und als CPT1-3 bezeichnet (vgl. Schmidt et al. 2010b, S. 6). Je nach vorliegendem CPT entstehen kürzere (C15), mittlere (C50–C55) und längere (C70–C120) Polyisopren-Ketten (vgl. Post et al. 2012,

S. 1407). Auch wenn man zeigen konnte, dass eine partielle Blockierung der CPTs einen direkten Einfluss auf die Menge des gebildeten langkettigen Polyisoprens hat (Post et al. 2012, S. 1412), ist die unterschiedliche Größe der Kautschukmoleküle nicht nur auf unterschiedliche CPTs zurückführbar (vgl. Schulze Gronover et al. 2011, S. 83).

Der **RTA** (rubber transferase activator) aktiviert die CPTs. Es konnte nachgewiesen werden, dass kein *cis*-Polyisopren gebildet wird, wenn das RTA-Protein ausgeschaltet ist (vgl. Epping et al. 2015, S. 1). In ihrem Aufsatz fassen Epping, van Deenen, Schulze Gronover, Twyman und andere zusammen, dass RTA eine Schlüsselrolle unter den genannten Enzymen einnimmt, indem es eine Verbindung zwischen CPT und dem Kautschukpartikel herstellt und weil es den gesamten Komplex stabilisiert und so eine effiziente Synthese und Akkumulation des Kautschuks ermöglicht (vgl. Epping et al. 2015, S. 6). In Abbildung 24 kann der Zusammenhang zwischen CPT und RTA nachvollzogen werden.

Forscher der Universität Münster haben weiterhin fünf **SRPPs** (small rubber particle proteins) entdeckt. Sie waren in der Lage zu zeigen, dass SRPPs die Kautschukbiosynthese insofern vereinfachen, als dass sie die Stabilität der Kautschukpartikel erhöhen und auf diese Weise verhindern, dass sie agglomerieren (vgl. Laibach et al. 2015, S. 616; Hillebrand et al. 2012, S. 2). In einer in den USA durchgeführten Studie wurde eines der Enzyme genauer untersucht. Bei Über-Ausbildung dieses Proteins in den Wurzeln der Pflanze ließ sich ebenfalls ein Anstieg des Kautschukgehalts feststellen. Inhibierung des Enzyms bewirkte nicht nur einen Verlust in der Kautschukmenge, sondern zusätzlich ein geringeres Molekulargewicht (vgl. Collins-Silva et al. 2012, S. 49). Daraus lässt sich schließen, dass nicht allein CPTs für die Produktion von langkettigem *cis*-Polyisopren verantwortlich sind, sondern dass auch SRPPs dafür vonnöten sind. Es ist weiterhin wahrscheinlich, dass SRPPs die Kautschukbiosynthese indirekt beeinflussen, indem sie stabilisierend auf Kautschukpartikel oder auf CPTs wirken (vgl. Collins-Silva et al. 2012, S. 52).

Es wird vermutet, dass der **REF** (rubber elongation factor) ein Gerüst darstellt, um andere Proteine (wie z.B. CPT) zu unterstützen. Er befindet sich auf der Oberfläche der Kautschukpartikel. Auch wenn das Protein die Stabilisierung der Kautschukpartikel unterstützt, scheint in Pflanzen mit ausgeschaltetem REF diese Funktion durch SRPP kompensiert zu werden (vgl. Laibach et al. 2015, S. 616). Der REF findet sich sowohl in der

wässrigen Phase des Latex, als auch in der Kautschuk-Phase (vgl. Laibach et al. 2015, S. 617).

In weiteren Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe in Münster konnte ebenfalls gezeigt werden, dass, wenn die Kautschuksynthese gebremst wird, mehr IPP in der Pflanze vorhanden ist, welches für andere isoprenoide Reaktionswege zur Verfügung steht. So enthalten Linien mit inhibierten CPT-Proteinen bis zu 20 % mehr Inulin als beispielsweise Wildpflanzen (vgl. Post et al. 2012, S. 1411).

Das nachfolgende Modell (vgl. Abbildung 24) verdeutlicht diese Struktur und die Wirkungsweise der verschiedenen beteiligten Enzyme. Mit „supporting proteins“ sind REF und SRPPs gemeint. Die Einschicht-Membran aus Phospholipiden stabilisiert die hydrophoben Kautschuk-Partikel, die sich in deren Inneren sammeln (vgl. Puskas et al. 2006, S. 537).

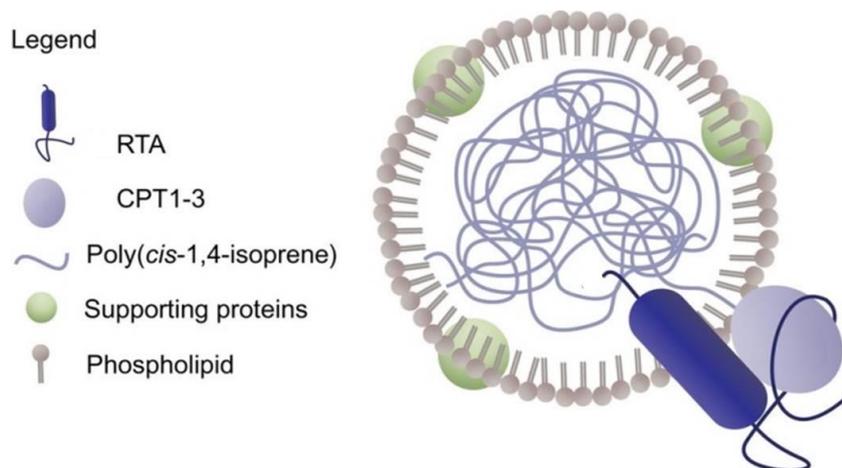


Abbildung 24: Modell der Kautschuksynthese (vgl. Epping et al. 2015, S. 8)

3.2.5 Historische Betrachtung der *T. kok-saghyz*-Forschung

Neben der Kautschukgewinnung aus *Hevea brasiliensis* gab es immer auch Bestrebungen, weitere, industriell nutzbare kautschukführende Pflanzen zu finden und als Nutzpflanzen zu kultivieren. Die Geschichte der Forschung zu *Taraxacum kok-saghyz* nimmt aufgrund der Verbindung zur Zeit des Nationalsozialismus in Deutschland in dieser Arbeit einen besonderen Stellenwert ein und wird im Folgenden dargestellt.

Die Geschichte der Kautschukgewinnung aus heimischen Pflanzen lässt sich zeitlich in drei größere Teilabschnitte gliedern.

- 1) Ende des 19. Jahrhunderts wurde in gemäßigten Klimazonen mit der Erforschung alternativer Kautschukquellen begonnen. Als *T. kok-saghyz* 1931 entdeckt wurde, entwickelte sich schnell ein großes Forschungsinteresse und auch in Deutschland begann man ab 1938 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung²⁷ die Pflanze zu erforschen. Diesem Zeitabschnitt sind die Teilkapitel 3.2.5.1 „Suche und Auffinden von *T. kok-saghyz*“ und 3.2.5.2 „Forschung zu *Taraxacum kok-saghyz* im ‚Dritten Reich‘“ gewidmet.
- 2) Als die Erforschung der Anbaubedingungen des russischen Löwenzahns 1941 weit genug fortgeschritten war, begann man, die Pflanze großflächig in den von Deutschland besetzten Gebieten im Osten anzupflanzen. Bis 1943 wurde der Anbau erweitert. Im Kapitel 3.2.5.3 „Anbau in besetzten Gebieten im Osten“ werden dieses Vorhaben sowie Gründe für sein Scheitern erläutert.
- 3) Bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges wurde in Rajsko, einem Nebenlager des Konzentrationslagers Auschwitz, Züchtungsversuche und weitere Forschungen an *T. kok-saghyz* betrieben. KZ-Häftlinge wurden als Zwangsarbeiter eingesetzt. Im Teilkapitel 3.2.5.4 „Pflanzenzüchtung in Rajsko bei Auschwitz“ werden die Arbeit und die Lebensbedingungen der Häftlinge in Rajsko während der letzten beiden Kriegsjahre beschrieben.

Die teilweise Koinzidenz der im Folgenden beschriebenen Ereignisse und die Verwobenheit der Akteure und ihrer Handlungen machen es schwer, die Zusammenhänge zu durchdringen. Zum besseren Verständnis sind daher im Anhang der Arbeit (Teil I) ein Personenregister sowie eine Concept-Map zur Vernetzung der Akteure zusammengestellt. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten wichtigsten Sekundärquellen, in denen sich mit der historischen Entwicklung der Forschung an *Taraxacum kok-saghyz* beschäftigt wird, kurz vorgestellt.

Susanne Heim, eine deutsche Politikwissenschaftlerin und Historikerin ist sicherlich als die wichtigste Autorin für Quellen zu diesem Thema zu bezeichnen. Sie beschäftigt sich

²⁷ Das Kaiser-Wilhelm-Institut (kurz: KWI) für Züchtungsforschung gehörte zur Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, der heutigen Max-Planck-Gesellschaft. Das Institut für Züchtungsforschung wurde 1929 im brandenburgischen Müncheberg vom Pflanzengenetiker und Züchtungsforscher Erwin Baur gegründet. Dort wurde unter anderem mit Röntgenstrahlung und chemischen Substanzen wie Colchizin versucht, das Erbgut der Pflanzen zu verändern, um sie widerstandsfähiger zu machen und ihren Kautschukgehalt zu steuern (vgl. Heim und Kaulen 2010, S. 352).

in ihren Publikationen (2002–2004) unter anderem mit Nationalsozialismus und Holocaust und ist Spezialistin auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Forschung in der Zeit von 1933 bis 1945. Dabei greift sie neben Primärquellen aus dem Bundesarchiv in Berlin nicht nur auf von ihr selbst geführte, sondern auch auf von anderen geführte Interviews sowie auf Befragungen in Zeugenaussagen zurück.

Als weitere Bezugsquelle wurde die Diplomarbeit von Alexander Schlichter „Forschung im ‚Dritten Reich‘ – *Taraxacum kok-sagyz*. Ein Fallbeispiel“ herangezogen. Bei seiner Arbeit handelt es sich um eine wissenschaftshistorische Arbeit, in der er den Aufbau und Fall des deutschen Forschungsverbundes um *T. kok-saghyz* beschreibt und dabei eine Vielzahl von Originalquellen aus dem Bundesarchiv in Berlin einfließen lässt.

Nicht zuletzt ist John Cornwell, ein britischer Historiker, zu nennen. Er beschäftigt sich in seiner Publikation „Forschen für den Führer. Deutsche Naturwissenschaftler und der zweite Weltkrieg“ mit der Rolle wichtiger Wissenschaftler unter Hitler. Dabei wird auch ein kurzer Blick auf die Forschung an *Taraxacum kok-saghyz* unter der SS geworfen.

Um die Lebensumstände der Häftlinge in Rajsko zu skizzieren, werden im vorliegenden Kapitel ebenfalls Fotografien und Originalzitate eingebracht. In einem Heft des Bildungswerks Stanisław Hantz sind wichtige Zitate einiger ehemaligen Häftlinge, Bilder und weitere grundlegende Informationen zusammengetragen. Weitere Fotos stammen aus der Broschüre des Auschwitz-Leugners Thies Christophersen, sowie aus einem Bildband des Staatlichen Museums Auschwitz.

3.2.5.1 Suche und Auffinden von *T. kok-saghyz*

Schon Ende des 19. Jahrhunderts kam außerhalb der Anbaugelände tropischer Kautschukträger in mehreren Industrieländern erstmals das Bestreben auf, einheimische Pflanzen auf einen möglichen Kautschukgehalt zu untersuchen, um von der Einfuhr von *Hevea*-Kautschuk unabhängig zu werden. Die „Ersatzstoffforschung“ zur Behebung des Rohstoffmangels bei Lieferengpässen und Ressourcenkonflikten (vor allem in den Weltkriegen) wurde zu einem großen Thema.

In den USA ist hier besonders die Guayule (*Parthenium argentatum* Gray), eine vor allem in Mexiko zu findende Strauchpflanze, zu nennen, aus der bereits 1902 in einer Fabrik in Nordmexiko Kautschuk gewonnen wurde (Ulmann 1951, S. 8). In der ehemaligen UdSSR bemühte man sich zunächst, ausländische Kautschukträger wie *Hevea brasiliensis* oder Guayule zu kultivieren, was jedoch fehlschlug. Daher veranlasste die Regierung

der ehemaligen Sowjetunion einige Jahre nach dem Ersten Weltkrieg, am 17. Januar 1931, „eine Durchsicht der gesamten Flora der Union auf Kautschuk führende Pflanzen“ (Ulmann 1951, S. 17–21). In einer Vielzahl von Expeditionen wurden in der Folge zahlreiche Pflanzen sichergestellt, aus denen eine Isolierung von Kautschuk möglich schien. „Schon das erste Jahr ließ erkennen, daß die einheimische Pflanzenwelt in bezug (sic!) auf technische Verwertbarkeit noch wenig durchforscht war, und daß zahlreiche Kautschuk- und Guttaperchaträger im Gebiet der UdSSR heimisch sind“ (Ulmann 1951, S. 17–21).

Auf einer Expedition nach Kasachstan, geleitet von L. E. Rodin, wurde 1931 der Kautschukträger *Taraxacum kok-saghyz* Rodin „in den Tälern des Tjan-Schaner Hügellandes (Bezirk Kegen)“ gefunden (Ulmann 1951, 47), der dann wie üblich nach dem Entdecker benannt wurde. „Die von den Bewohnern des Gebietes des Vorkommens dieser *Taraxacum*-art in Kasachstan stammende Bezeichnung [...] Kok-sagis lautet in wörtlicher Übersetzung ‚Grünes Kaumittel‘. Die Wurzel der Pflanze wurde als ‚Kaugummi‘ verwandt“ (Ulmann 1951, S. 47). Neben dem russischen Löwenzahn sind auch andere kautschukführende Pflanzen ähnlicher Morphologie betrachtet worden, *Taraxacum hybernum* (Krim-saghyz), *Scorzonera tau-saghyz* (Tau-Saghyz) und *Scorzonera acanthoclada* (Teke-Saghyz). Die *T. kok-saghyz*-Spezies konnte sich gegenüber den anderen Arten aus verschiedenen Gründen durchsetzen: Sie zeigte sich unter anderem widerstandsfähiger gegenüber Schädlingen und Frost. Weiterhin ließen sich ihre Wurzeln nach kürzerer Zeit verarbeiten als die der anderen Pflanzenarten. Daher „wurden sogleich 2,3 t Samen abgeerntet und ein großer Teil desselben im gleichen Jahr ausgesät“ (Ulmann 1951, 25).

Für den Anbau waren mittlere Gebiete der Ukraine, der südliche Teil des Nordkavkasus, Baschkortostan, Kirgistan und Gebiete in Kasachstan vorgesehen. „[B]is Anfang 1934 [war bereits] eine Fläche von etwa 2000 ha besetzt worden“ (Ulmann 1951, S. 35). 1935 bauten bereits 165 Kolchosen, landwirtschaftliche Großbetriebe mit genossenschaftlicher Organisation, *T. kok-saghyz* an. Schon die Aussaat versprach ihnen hohe Einnahmen von bis zu 30.000 Rubel pro Hektar (vgl. Ulmann 1951, S. 34ff.).

Die folgende Tabelle fasst Lage und Größe der ersten Kautschukplantagen mit *Taraxacum kok-saghyz* zusammen.

Tabelle 5: Die ersten Kautschuk-Arbeitsgemeinschaften (vgl. Ulmann 1951, 34)

Lage	In 1935 bearbeitete Fläche in ha	Angebaute Pflanzen
Kasachische Sozialistische Sowjetrepublik (SSR)	573	<i>T. tau-saghyz</i> , <i>T. kok-saghyz</i>
Osnowa (Kasachische SSR)	165	<i>T. kok-saghyz</i> , <i>T. tau-saghyz</i>
Turkestan (Kasachische SSR)	501	<i>T. tau-saghyz</i> , <i>T. kok-saghyz</i>
Burnoje (Kasachische SSR)	242	<i>T. tau-saghyz</i> , <i>T. kok-saghyz</i>
Sokologornoje, Gebiet Dnjepropetrowsk (Ukrainische SSR)	266	<i>T. tau-saghyz</i> , <i>T. kok-saghyz</i> , Seidenpflanze
Tarasowka bei Millerowo (Asowo-Schwarzmeergebiet)	298	<i>T. tau-saghyz</i> , <i>T. kok-saghyz</i>
Maikop (Asowo-Schwarzmeergebiet)	232	<i>T. kok-saghyz</i> , <i>Eucommia</i>
Teplo-Ogarewo (Moskauer Gebiet)	129	<i>T. kok-saghyz</i>
Gorschetschnoje (Kursker Gebiet)	374	<i>T. kok-saghyz</i> , <i>T. tau-saghyz</i>

International stieg in den darauffolgenden Jahren (ab ca. 1935) die Zahl an Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen über Löwenzahn stark an. Dieser Anstieg ist auf das Interesse der Industrie an Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn in Ländern wie z.B. Russland, Deutschland und den USA zurückzuführen. Nach dem Krieg ging dieses Interesse zurück, da Tropenkautschuk wieder einfach und billiger zu erhalten war. Abbildung 25 von Martinez et al. spiegelt die Menge an internationalen Forschungsdokumenten zu Löwenzahn wider. Die Autoren haben in ihrem Artikel Literatur gesichtet, nach Publikationsdatum und -jahr geordnet und in Themenbereiche klassifiziert. Dabei ist der Anstieg der Forschungsdokumente in den 30er bis 50er Jahren auf das Interesse der Industrie an Kautschuk aus den Wurzeln der russischen Löwenzahnarten zurückzuführen. Der zweite, stärkere Anstieg an Forschungsliteratur, beginnend in den 80er Jahren, liegt unter anderem an der Entdeckung des medizinischen Potenzials der Pflanze, die das pharmazeutische Interesse angefacht hat (vgl. Martinez et al. 2015, S. 246).

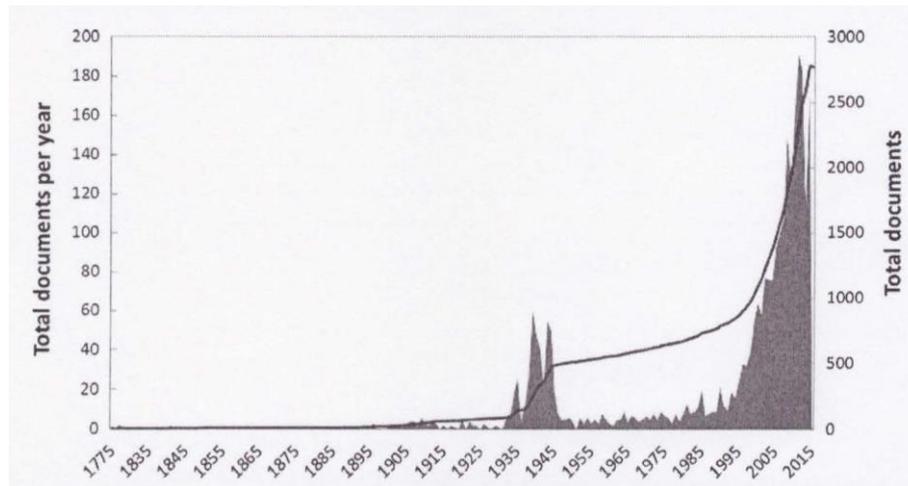


Abbildung 25: Menge an Forschungsdokumenten zu Löwenzahn in den letzten 250 Jahren (Martinez et al. 2015, S. 246)

3.2.5.2 Forschung zu *Taraxacum kok-saghyz* im „Dritten Reich“

Auch in anderen Ländern in Europa und den USA entwickelte sich das Bestreben, unabhängig von der Einfuhr Kautschuks tropischen Ursprungs zu werden und heimische Kautschukträger anzubauen. In Deutschland wurde

[s]chon einige Jahre vor dem zweiten Weltkrieg [...] mit Anbauversuchen von Kok-Saghyz begonnen. Während des Krieges sind diese Versuche in größerem Umfange weitergeführt worden, die auch schließlich stellenweise bis zur kleintechnischen Gewinnung von Kautschuk führten. Aber auch auf dem Balkan und in den nordischen Staaten wurden Versuchskulturen von Kok-Saghyz angelegt. (Ulmann 1951, S. 6)

Das 1928 gegründete Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung in Müncheberg östlich von Berlin und sein Direktor Wilhelm Rudorf boten die dazu notwendigen Voraussetzungen wie Versuchsfelder, Laboratorien und finanzielle Unterstützung.

Die Forschungsbestrebungen zu *Taraxacum kok-saghyz* in Deutschland sollen im Folgenden detaillierter dargelegt werden.

1936 legte Hitler seinen „Vierjahresplan“ vor, der vorsah, Deutschland innerhalb von vier Jahren wirtschaftlich und militärisch kriegsfähig zu machen. Dies bedeutete, dass eine intensive Autarkiepolitik betrieben wurde und die wissenschaftliche Arbeit neu strukturiert wurde. Um diese Umstrukturierung vorzunehmen, wurden demokratische Strukturen in Forschungseinrichtungen aufgelöst, indem Senate oder Fakultäten ihrer Befugnisse enthoben wurden. Gemäß dem „Führerprinzip“ wurde der Rektor einer Hochschule bzw. der Präsident einer Forschungsgesellschaft zum „Führer“ ernannt und erhielt weitreichende Entscheidungsgewalten (Schlichter 1999, S. 32).

„Die Forschung wurde durch die Klassifikation als ‚kriegswichtig‘ und den damit verbundenen Zugang zu Forschungsgeldern auf bestimmte Fragen gelenkt. Die Wissenschaftler paßten ihre Fragestellungen entsprechend an“ (Heim 2002, S. 176). Dass die von der Politik gewünschte Autarkiebestrebung bereits in den Köpfen der Wissenschaftler verankert war, verdeutlicht der Züchtungsforscher Böhme (1941, S. 323): „unabhängig für den Ernstfall macht uns immer nur die Erzeugung im eigenen Lande!“. Diese Tatsachen zeigen deutlich, wie eng Wissenschaft und Politik miteinander verwoben waren. „Die Inanspruchnahme der Züchtungsforschung für die Ziele der Ostpolitik ist [...] ein gutes Beispiel. Denn wie soll etwa im Fall des Kok-saghyz-Projektes eine Grenze zwischen wissenschaftlichen und verbrecherischen Praktiken gezogen werden?“ (Wieland 2002, S. 56).

Man bemühte sich, dem steigenden Kautschukbedarf auf unterschiedliche Weise Rechnung zu tragen. Die IG Farben forschte intensiv an der Optimierung der Buna-Synthese²⁸; weiterhin traten die Inkulturnahme und Züchtung des 1931 entdeckten *kok-saghyz*-Löwenzahns in den Vordergrund.

Vor allem der SS unter deren Reichsführer Himmler war daran gelegen, Saatgut und Informationen über den Löwenzahn auf geheimem Weg zu beschaffen: „Ein Spezialkommando, bestehend aus zwei SS-Brigadeführern²⁹, wurde im September 1941 in die Sowjetunion geschickt und brachte von dort ‚viele Zentner Saatgut‘, ‚zahlreiche russische Spezialisten‘ sowie einschlägige Literatur über die kriegswirtschaftlich wichtige Kok-Saghyz-Pflanze mit“ (Heim 2004, S. 267). Zu diesen Spezialisten zählte unter anderem der Agronom Nikitin, der seitdem mit den Deutschen kollaborierte. Der SS-Brigadeführer Kudriawtzow hatte ihn auf seiner ersten Reise ausfindig gemacht und nach Deutschland „mitgebracht“. Nikitin „hatte die Namen weiterer russischer Experten genannt und sich

²⁸ Die IG Farbenindustrie war das größte Chemieunternehmen weltweit und bestand aus mehreren einzelnen Betrieben. Während des Zweiten Weltkriegs ließ die Firma in Monowitz bei Auschwitz eine der weltweit größten Buna-Fabriken errichten und setzte dazu eine große Menge Zwangsarbeiter und KZ-Häftlinge ein.

²⁹ Bei den beiden Männern handelte es sich um Walter Brück und Georg Kudriawtzow. Letzterer sprach fließend Russisch, da er in St. Petersburg geboren wurde. Er reiste auch in den Folgejahren mehrere Male in die besetzte Sowjetunion und wurde dabei teilweise von Joachim Caesar (Leiter der landwirtschaftlichen Versuchsstationen in Auschwitz) begleitet (vgl. Heim 2003, 135).

gemeinsam mit Kudriawtzow auf die Suche nach ihnen begeben. Die sowjetischen Spezialisten sollten die ‚in Rußland anzutreffenden Anbaustellen [...] betreuen‘ oder aber in das ‚Anbaugebiet Auschwitz‘ gebracht werden“ (Heim 2003, S. 142).

Da die SS Funde wie Samen, Literatur und Spezialisten unbedingt allein für sich beanspruchen wollte, wurden Ressourcen an der Wehrmacht vorbei geschleust. Für *Taraxacum kok-saghyz* wurde in diesem Zusammenhang der Tarnname „Pflanze 4711“ verwendet (Heim 2003, S. 135).

Fast zeitgleich, ebenfalls im September 1941, reiste auch Richard Werner Böhme, Leiter der Abteilung „Spezialkulturen“ am KWI für Züchtungsforschung in die besetzten Gebiete in der Ukraine, um „an Ort und Stelle den Kok-Saghyz-Anbau in Augenschein zu nehmen“ (Heim 2003, S. 136). Er besichtigte unter anderem eine Kautschukfabrik in Uman, die schon ein Jahr später Kautschuk aus *kok-saghyz* nach Deutschland schickte (Heim 2003, S. 138). Eine erste Lieferung mit Samen, unter anderem von *Taraxacum kok-saghyz*, war bereits 1938 aus einer landwirtschaftlichen Versuchsstation im polnischen Puławy nach Müncheberg geschickt worden, woraufhin erste kleine Anbauversuche begonnen worden waren (Schlichter 1999, S. 39–40). Nach seiner Rückkehr aus der Ukraine weitete Böhme die Züchtungsversuche in Müncheberg aus und baute eine „Schälzentrifuge sowie Apparate zur Prüfung des Kautschukgehaltes der Pflanzen“ (Heim 2003, 137-138). „1941 erstreckte sich der Versuchsanbau von Kok-saghyz bereits auf 4 Hektar. Der Großteil dieser Arbeiten wurde im ‚Roten Luch‘ durchgeführt, einem in der Nähe von Müncheberg gelegenen Provinzialgut, das ideale Bedingungen für den Kok-saghyz-Anbau bot“ (Wieland 2002, S. 52). Aufgrund des Kautschukprojekts erhielt das KWI in Müncheberg stärkere finanzielle Unterstützung, sodass allein dem Projekt 1943 ein größerer Etat zur Verfügung stand als einige Jahre zuvor noch dem gesamten Institut (Flitner 1995, S. 92).

Im Rahmen von Umsiedlungsaktionen, organisiert von der Volksdeutschen Mittelstelle (VoMi³⁰), kamen auch einige „Ostarbeiter“, sowie mehrere Dutzend slowenische Zwangsarbeiter, die nicht „germanisiert“ werden konnten, aus einem VoMi-Camp ins Rote Luch und arbeiteten auf den dortigen Feldern (Strebel und Wagner 2009, S. 54–55).

³⁰ Im Rahmen der Umsiedlungsaktion „Heim ins Reich“ war die VoMi zwischen 1939 und 1940 für Transport und Unterbringung der außerhalb des Deutschen Reiches lebenden „Volksdeutschen“ zuständig, die teilweise jahrhundertlang in Osteuropa gelebt hatten und während des Krieges aus Auslandsgebieten in annektierte Grenzgebiete im Osten umgesiedelt wurden.

Mit „Ostarbeitern“ waren nichtdeutsche Osteuropäer gemeint, die für das Deutsche Reich arbeiteten oder zur Zwangsarbeit gezwungen wurden, um den kriegsbedingten Mangel an deutschen Arbeitskräften auszugleichen.

Die Tatsache, dass neben der Buna-Forschung nun auch der Pflanzenkautschuk intensiver studiert wurde, sorgte zunächst für Konkurrenz zwischen den beteiligten Institutionen und Forschungseinrichtungen. Ende 1941 hatte sich jedoch ein Forschungsverbund (Pflanzenkautschuk Forschungs- und Anbaugesellschaft mbH) „mit zahlreichen Vertretern aus Wissenschaft, verarbeitender Industrie, Behörden und Endverbrauchern, darunter zwei Kaiser-Wilhelm-Institute“ gebildet (Heim 2003, S. 195). In Tabelle 6 sind die Mitglieder der Forschungsgemeinschaft zusammengestellt. „Ein wirklicher Forschungsboom setzte [allerdings] erst 1941 ein, als die herkömmliche Versorgung mit Naturkautschuk prekär wurde und die Vorräte zur Neige gingen“ (Heim 2003, S. 194) (vgl. auch Abbildung 25), denn „Hitler zog mit Gummivorräten für nur zwei Monate in den Krieg“ (Cornwell 2004, S. 420).

Tabelle 6: Das *T. kok-saghyz*-Netzwerk um 1941 (vgl. Heim 2003, 131-152)

Vertreter aus Forschung und Industrie	Vertreter aus politischen Institutionen
KWI für Züchtungsforschung Wilhelm Rudorf (Direktor) Richard Werner Böhme (Abteilungsleiter „Spezialkulturen“)	SS bzw. deren Wirtschaftsverwaltungshauptamt (WVHA) Heinrich Himmler (Reichsführer SS) Joachim Caesar (SS-Sturmbannführer)
KWI für Chemie Kurt Hess (Abteilungsleiter)	Reichsnährstand Vierteljahresplanbehörde
Verschiedene Hochschulen und Forschungseinrichtungen ³¹	Generalbevollmächtigter für das Kraftfahrtwesen (BdK)
Continental Volkswagenwerk und seine Eignerin DAF (Deutsche Arbeitsfont)	Generalbevollmächtigter für die chemische Erzeugung Reichsministerium für Ernährung und Landwirtschaft Reichsminister für Bewaffnung und Munition (teilweise) Wehrmacht

³¹ Schlichter nennt in seiner Arbeit Vertreter aus der Landesforschungsanstalt Pulawy, aus dem Institut für Vererbungs- und Züchtungsforschung Berlin, aus der Gauforschungsanstalt für Pflanzenphysiologie Posen, aus der Forstwirtschaftlichen Hochschule Eberswalde, aus der Technischen Hochschule Dresden und aus dem Botanischen Garten Berlin (vgl. Schlichter 1999).

Da Vertreter aus unterschiedlichen Institutionen und Firmen zu *Taraxacum kok-saghyz* forschten, hatten sich verschiedene Methoden zur Gewinnung von Kautschuk ergeben. Schlichter stellt in seiner Diplomarbeit mehrere wichtige Verfahren vor:

Hess [...] ging von verrotteten Pflanzenwurzeln aus. Ziel war es, durch Volumenreduktion ein transportfähiges Konzentrat zu gewinnen. 900 kg Frischwurzeln mit 70 Prozent Wassergehalt ergaben durch Verrottung etwa 360 kg Wurzelmaterial. Das verrottete Material wurde mit Hilfe von Walztennen gepreßt und man erhielt etwa 28 kg Konzentrat mit einem Wassergehalt von 10 Prozent. Der Rohkautschuk wurde anschließend mit Hilfe einer Kugelmühle und Natronlauge aus dem Konzentrat herausgelöst. Der Kautschukverlust bei diesem Verfahren betrug 10 Prozent.

Das im Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung entwickelte Verfahren arbeitete mit frischen Wurzeln und war angelehnt an russische Arbeiten. Die Wurzeln wurden mit einer Schlagkreuzmühle zerkleinert und der Kautschuk in einer Schälzentrifuge abgetrennt. Vorher wurden die Wurzeln noch in Natronlauge gekocht.

Bei den Continental Gummi-Werken verkochte man durch Transport verrottete Wurzeln bei 10 atü mit Natronlauge (ähnlicher Vorgang wie bei der Regenerierung von Altgummi). Der Rohkautschuk wurde durch einen anschließenden Waschvorgang von den übrigen Bestandteilen abgetrennt. Die Firma Rost³² löste den Kautschuk mit organischen Lösungsmitteln aus den Wurzeln heraus. (Schlichter 1999, S. 42)

Nach Überprüfung der erhaltenen Qualität galt das Müncheberger Verfahren des KWI gegenüber den anderen Arbeitsweisen als überlegen. Ob der gewonnene Kautschuk auch zur Produktion von Reifen oder anderen Gummiprodukten verarbeitet wurde oder ob er lediglich zu Forschungszwecken verwendet wurde, lässt sich aus der Literatur nicht eindeutig entnehmen. Bekannt ist jedoch, dass die Continental-Werke den Löwenzahn-Kautschuk „bei der Produktion von Schläuchen, Gurten und Reifen [...] testen“ sollten (Heim 2003, S. 138).

In einem Rückblick über die Entwicklung des Reifenkonzerns Continental von 1871 bis 1971 wird in einer Anmerkung weiterhin darauf hingewiesen, dass bei Kriegsende „im Werk Limmer noch ein größerer Bestand dieser Wurzeln auf seine Verarbeitung“ wartete (Schmidt 1971, S. 194). Über das Continental-Werk Limmer bei Hannover ist bekannt, dass es in seiner unmittelbaren Nähe ein Frauen-Konzentrationslager gab. Die dort von Mitte 1944 bis April 1945 inhaftierten Frauen arbeiteten in der Herstellung von Gasmasken für die Zivilbevölkerung (vgl. Fröbe et al. 1985). Ob tatsächlich auch Kautschuk aus den Löwenzahnwurzeln zur Herstellung der Gasmasken verwendet wurde, lässt sich aus der verfügbaren Literatur nicht entnehmen.

Um eine Aufgabenverteilung unter den an der Löwenzahnforschung beteiligten Institutionen zu vereinbaren, fand im Juni 1943 auf Veranlassung des Reichsführers SS Himmler

³² Gemeint sind die H. Rost & Co. Guttapercha- und Gummiwarenfabriken mit Sitz in Hamburg-Harburg, die 1848 gegründet wurden.

eine Arbeitstagung statt, an der Vertreter verschiedenster Forschungseinrichtungen, Ministerien und SS-Institutionen teilnahmen. Auch aus den Versuchsanstalten Auschwitz (Weinmann, Caesar, Schattenberg, Kudriawtzow) und Puławy reisten Experten an.

Wilhelm Rudolf (Direktor des KWI für Züchtungsforschung) stellte ein Arbeitsprogramm mit Aufgabengebieten und ihren Verantwortlichen zur Züchtung von *Taraxacum kok-saghyz* vor. Demnach

sollte Kurt Hess vom KWI für Chemie [für alle Fragen der Kautschukchemie und -technologie] zuständig sein, für die züchterische Grundlagenforschung Rudolf in Zusammenarbeit mit Böhme; die Koordination der praktischen Züchtung wurde Joachim Caesar übertragen, und für Anbaufragen sollte Friedrich Christiansen-Weniger³³ verantwortlich sein, dem dafür die landwirtschaftliche Versuchsstation Puławy zur Verfügung stünde“ (Heim 2003, S. 150–151).

„Etwa einen Monat später verfügte Himmler eine etwas andere Aufgabenverteilung. Demnach sollten in der Dienststelle des Sonderbeauftragten für Pflanzenkautschuk Rittmeister Wackerbarth [...] als Repräsentant des BdK, für die Bereiche Großanbau und Versuchswesen verantwortlich sein, für Züchtung Caesar, und für die chemische Forschung waren Hess und Lafferentz³⁴ vorgesehen. Ferner bestimmte Himmler, die an der Großverarbeitung beteiligten Betriebe seien in der Ost-Gesellschaft zusammengeschlossen. (Heim 2003, S. 151)

Die letztendliche Arbeitsteilung ist in folgender Tabelle noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 7: Aufgabenverteilung zur *T. kok-saghyz*-Forschung und -Verarbeitung ab 1943 (vgl. auch Schlichter 1999, 18)

Arbeitsgebiet	Leitung
Großanbau und Versuchswesen	Rittmeister v. Wackerbarth, <i>Bevollmächtigter für das Kraftfahrtwesen</i>
Züchtung	Joachim Caesar, <i>Landwirtschaftliche Versuchsstation</i>
Forschung	Kurt Hess, <i>Institut für Pflanzenkautschuk</i>
Großverarbeitung	Erich Mayr, <i>Ostgesellschaft für Pflanzenkautschuk</i>

3.2.5.3 Anbau in besetzten Gebieten im Osten

Himmler, der Anfang Juli 1943 zum „Sonderbeauftragten für Pflanzenkautschuk“ ernannt wurde, erreichte, dass „sämtliche in Frage kommenden Stellen“ – der BdK, die Deutsche Arbeitsfront, das Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung und die chemische Industrie – sich seiner Führung unterstellten“ (Heim 2003, S. 144). Von diesem

³³ Friedrich Christiansen-Weniger (1897-1989) war ein deutscher Agrarexperte und Angehöriger des Kreisauer Kreises, einer bürgerlichen Widerstandsgruppe.

³⁴ Bodo Lafferentz (1897-1975), Leiter des Volkswagenwerks und Repräsentant der Deutschen Arbeitsfront.

Zeitpunkt an wurde die Kautschukforschung unter Himmler zentral koordiniert. Er beauftragte seinen „Stabsführer“, Hans Stahl, der fließend russisch sprach, in die besetzten Gebiete zu reisen, um dort Möglichkeiten des *T. kok-saghyz*-Anbaus zu erkunden, Anpflanzung und Weiterverarbeitung zu überwachen und Bericht darüber zu erstatten (Heim 2003, S. 152). Der russische Löwenzahn wurde in den besetzten Gebieten von den dort ansässigen Landwirten angebaut, allerdings nur mit geringem bis mäßigem Erfolg. „Da Kok Saghys [...] auf unzähligen kleinen, weit voneinander entfernt liegenden Feldern angebaut wurde, konnten die deutschen Landwirtschaftsführer, die jeweils für ausgedehnte Bezirke zuständig waren, gar nicht alle Anbaubetriebe besuchen, die sie zu beaufsichtigen hatten“ (Heim 2003, S. 153). Hinzu kommt, dass in den genannten Gebieten häufig aufständische Freiheitskämpfer anzutreffen waren, die sowohl das Leben der Landwirtschaftsführer als auch das des landwirtschaftlichen Personals gefährdeten (Heim 2003, S. 152). „Da der Kok-saghyz-Anbau äußerst arbeitsintensiv war, verfügte Himmler, daß in den russischen Partisanengebieten Frauen und Kinder gefangen genommen, in Lager gesperrt und zum Einsatz auf den Kok-saghyz-Feldern gezwungen werden sollten“ (Heim 2002, S. 170). Nicht zuletzt war der Anbau der Pflanzen bei den Bauern unbeliebt, da er viel Fingerspitzengefühl erforderte. Man fand „unkrautüberwucherte Felder, überforderte Landwirtschaftsführer, mangelhaft qualifizierte Agronomen und ‚unmotivierte‘ Arbeitskräfte“ (Heim 2004, S. 291). Konkrete Hinweise auf Sabotage werden nicht beschrieben. „Um die Bereitschaft zum Kok-saghyz-Anbau zu fördern, wurde in der Ukraine und den anderen Anbaugebieten ein Prämiensystem eingeführt. Für Samen und Wurzeln erhielt der Anbauer Gutschriften, die er gegen Zigaretten, Schnaps oder Zucker eintauschen konnte“ (Schlichter 1999, S. 23).

Auch Kinderarbeit war nicht unüblich (und war es auch zuvor unter sowjetischer Herrschaft ebenfalls nicht gewesen). Dies lag nicht ausschließlich im „allgemeinen Arbeitskräftemangel begründet, sondern auch darin, daß die Pflanzen besonders empfindlich sind und Kindern und Frauen mehr Geschicklichkeit für die kleinteilige Arbeit der Saaternte zugeschrieben wurde“ (Heim 2003, S. 156). Sogar ganze Schulen sollten Löwenzahn-Felder bestellen (Heim 2003, S. 154). Im Jahr 1943 wurde eine Fläche von nur 40.000 Hektar mit *Taraxacum kok-saghyz* bebaut und „gerade einmal 130 Tonnen Kautschuk hergestellt“ (Schlichter 1999, S. 61), deutlich weniger als die ursprünglich geplanten 10.000 Tonnen (Schlichter 1999, S. 14). Über die Verwendung und Weiterverarbeitung dieser Kautschukmenge ist in der Literatur nichts bekannt.

Die Hauptanbauflächen für *T. kok-saghyz* in den besetzten Gebieten lagen 1943 in der Ukraine, im Warthegau, in Smolensk, in Danzig-Westpreußen und im Generalgouvernement. In Tabelle 8 werden die Anbauggebiete, ihr Umfang und die entsprechenden Mengen an Wurzeln und Samen in den Bereichen wiedergegeben.

Tabelle 8: Anbauflächen, Samen- und Wurzelernte 1943 (vgl. Schlichter 1999, 19; 21)

	Bereich	Durchgeführter Anbau (in ha)	Wurzelernte (in Tonnen)	Samenernte (in Tonnen)
I	Warthegau	4.470	600	21,4
	Danzig-Westpreußen	1.017		
	Südostpreussen	170		
	Generalgouvernement Nord	2.100		
II	Generalgouvernement Süd	2.900	45	0,3
III	Ukraine	23.386	76	10,9
IV	Mitte, Smolensk, Orel	4.225	20	0,03
	gesamt	38.268	731	32,63

„Im Spätherbst 1943 waren die Anbauggebiete für Kok-Saghyz in den besetzten Gebieten aufgrund der militärischen Ereignisse schließlich stark geschrumpft“ (Heim 2004, S. 275), sodass Himmler nach Ausweichmöglichkeiten und neuen Anbauflächen für die Löwenzahn-Kultivierung suchte. Das Baltikum sollte unter anderem den Verlust der süd-russischen Gebiete kompensieren (Heim 2003, S. 160–161). Für den Anbau von *Taraxacum kok-saghyz* in Gebieten in Deutschland wurde von Stahl ebenfalls ein Prämiensystem eingeführt. „[E]rfolgreiche Anbauer [...] sollten mit Urkunden und Geschenken wie zum Beispiel Essgeschirr belohnt werden“ (Schlichter 1999, S. 29).

Der Misserfolg im Anbau trieb auch die wieder aufgeflammete Konkurrenz zwischen Vertretern der Pflanzen- und der Synthesekautschukindustrie voran, welche letztendlich zum Zerfall des Forschungsverbundes führte. Auf der Seite der Chemie-Fraktion standen Kurt Hess, die Firma Continental und die Deutsche Arbeitsfront, die der Meinung waren, dass sich mit geringerem Aufwand und weniger Arbeitskräften größere Mengen Buna herstellen ließen (vgl. Heim 2003, S. 166). Auf der anderen Seite, der Agrar-Fraktion, standen Rudolf, Böhme und Caesar, die die Probleme bei Anbau und Ernte von Pflanzenkautschuk als „Anfangsschwierigkeiten“ abtaten.

Hans Kehrl, Generalbevollmächtigter für Rüstungsaufgaben, vertrat den Standpunkt, die Züchtung solle komplett aufgegeben werden, da sie seines Erachtens zu arbeitsintensiv

war. Himmler ließ sich hingegen nicht darauf ein und hielt vehement an seinem Vorhaben, den Löwenzahn industriell zu nutzen, fest. In einem Brief an Kehrl schreibt Himmler:

„Den Befehl, mich um den Anbau des Pflanzenkautschuks anzunehmen, habe ich vom Führer Adolf Hitler erhalten. Dieser allein und kein Ministerialbeamter ist daher in der Lage, mich von diesem Auftrag zu entbinden (...) Aus Ihrem Brief sehe ich außerdem ein typisch enges großkapitalistisches Denken, das offenkundig im Pflanzenkautschuk eine unerwünschte Konkurrenz für die I.G.-Farben-Erfindung des Buna erblickt.“ (Schlichter 1999, S. 26)

Da man auch in anderen Ländern Europas weiterhin an der Erforschung heimischer Kautschukträger festhielt, gab es für Himmler ebenfalls keinen Grund, die Löwenzahn-Forschung aufzugeben.

[1944] beschäftigten sich bereits zahlreiche europäische Länder mit der Gewinnung von Naturkautschuk, teils in Zusammenarbeit mit Deutschland, teils auf eigene Initiative.

Im Generalkommissariat Lettland wurde Krim-sagys und Tau-sagys angebaut und in Dänemark wurden Forschungen an der Versuchsstation Aarslev durchgeführt. In Schweden wurde Kok-sagys von der Landwirtschaftshochschule Ultuna angebaut, jedoch mit sehr schlechten Ergebnissen. Auch Versuche der schwedischen Fahrradfabrik Monark und Aussaaten in Varberg und Tobo brachten keine verwertbaren Ernten. Da ein generelles Ausfuhrverbot für Kok-sagys Samen bestand, mußte die Königlich-Schwedische Gesandtschaft ein Kaufgesuch für 25 Kilogramm Samen an den Persönlichen Stab Reichsführer SS richten, um die Arbeit zu ermöglichen. (Schlichter 1999, S. 27)

3.2.5.4 Pflanzenzüchtung in Rajsko bei Auschwitz

Die landwirtschaftliche Versuchsstation in Rajsko, etwa drei Kilometer südlich des Lagers Auschwitz I, wurde schon ab 1942 unter der Leitung des SS-Sturmbannführers Joachim Caesar betrieben. Er war zuständig für die Pflanzenzüchtung in den besetzten Teilen der Sowjetunion. „Neben der Station in Auschwitz brachte die SS drei weitere, bereits zu russischer Zeit bestehende Pflanzenzuchtstationen in ihren Besitz, die unter Caesars Leitung Anbauversuche durchführten. Bei den wissenschaftlichen Einrichtungen handelte es sich um die Moorversuchsstation in Kiew, die Station am Botanischen Garten in Kiew und die Station Skadowsk“ (Schlichter 1999, S. 45).

Die folgende Abbildung soll einen Überblick über den Verlauf der Ereignisse in der landwirtschaftlichen Versuchsstation geben.

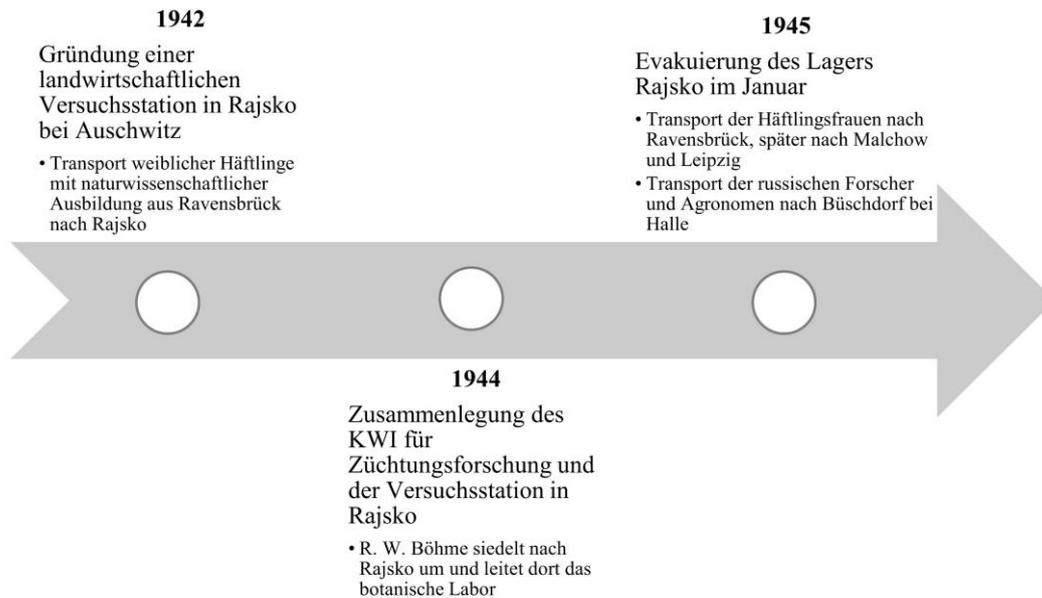


Abbildung 26: Überblick über die wichtigsten Faktoren der zeitlichen Entwicklung in der landwirtschaftlichen Versuchsstation Rajsko

„Auf Anforderung Caesars wurden am 12. Mai 1942 die ersten fünf weiblichen Häftlinge aus dem Konzentrationslager Ravensbrück nach Rajsko überstellt, polnische Naturwissenschaftlerinnen, die [...] zur wissenschaftlichen Bearbeitung der Kautschukpflanzen eingesetzt wurden. Sie bildeten den Kern des Pflanzenzuchtkommandos, wie die Kok-Saghys-Versuchsstation genannt wurde“ (Heim 2003, S. 178)³⁵. „Ausser an Kok-Saghys machte man auch Versuche mit *Taraxacum Tausaghys* und *Taraxacum Krysaghys*, Pflanzen, die zur Familie der Compositae gehören und sich botanisch von Kok-Saghys unterscheiden“ (Zięba 1966, S. 90). Weiterhin wurde in Rajsko auch der Vitamin-C-Gehalt von Gladiolenzwiebeln untersucht und mit Kreuzungen aus Weizen und Roggen experimentiert (Heim 2004, S. 280).

In der ersten Zeit waren die Häftlinge im Stammlager untergebracht und mussten jeden Morgen zu Fuß zur Versuchsstation gehen (vgl. Abbildung 27).

³⁵ Neben der *T. kok-saghyz*-Versuchsstation existierten in Rajsko weitere landwirtschaftliche Betriebe. In der Gärtnerei wurden Blumen gezüchtet, die nach Deutschland exportiert wurden. Ebenfalls war dort ein Versuchslabor des SS-Hygieneinstituts angesiedelt, in dem unter anderem auch Menschenversuche durchgeführt wurden (vgl. Shelley 1991, 265; Bildungswerk Stanislaw Hantz 2015, 77ff.)

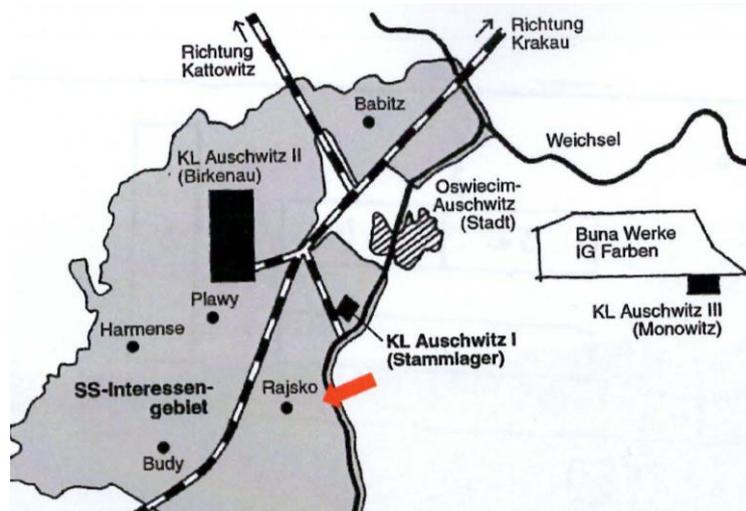


Abbildung 27: Übersicht über das Interessengebiet Auschwitz mit Markierung in Rajsko (Bildungswerk Stanisław Hantz 2015, S. 45)

Nachdem allerdings 1942 eine Typhusepidemie im Lager ausgebrochen war, bei der auch Caesar erkrankte und seine damalige Ehefrau sogar starb, ließ Caesar die Frauen in Rajsko selbst unterbringen, um die hygienischen Bedingungen zu verbessern, da die Häftlinge auch mit deutschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in Kontakt kamen (Heim 2003, S. 184). Daher waren die Lebensbedingungen in Rajsko im Vergleich zum Stammlager deutlich besser. Claudette Kennedy (verwitwete Bloch), eine ehemalige Häftlingsfrau, beschreibt ihren ersten Eindruck von dort folgendermaßen: „When we got there we could not believe our eyes. These women were ‚Haftlinge‘ (prisoners) like ourselves, but clean, in decent clothes and looking almost fit. The food was distributed properly, the Appell was short and there was even a washroom!“ (Shelley 1991, S. 161).

Russische Wissenschaftler, die mit den Deutschen kollaborierten, wie z. B. der Agronom Nikitin³⁶, „lebten nicht als Häftlinge im Lager, sondern, z. T. auch mit ihren Familien, in der Ortschaft Rajsko, in ‚leergewordenen Polenwohnhäusern‘. Sie durften sich jedoch von Auschwitz nicht entfernen“ (Heim 2003, S. 184).

Im Februar 1944 wurde im Rahmen einer Besprechung zwischen Stahl, Caesar, Rudolf und Böhme die Verlegung der Kok-Saghys-Grundlagenforschung aus Müncheberg nach

³⁶ Die ehemalige Häftlingsfrau Eva Tichauer beschreibt in ihren Erinnerungen einen Mann aus Minsk, der für Geld mit den Deutschen kollaboriert und der große Flächen in der Ukraine in Kautschukfelder umwandeln lässt. Mit seiner Familie siedelt er nach Auschwitz über (vgl. Tichauer 1988, S. 102. Ob es sich dabei um den im Text genannten Agronomen handelt, ist unklar.

Auschwitz bzw. in die zum Konzentrationslager gehörende Versuchsstation Rajsko beschlossen (Heim 2004, S. 278). Im Zuge dessen siedelte Böhme 1944 von Müncheberg nach Rajsko um, wo er das botanische Labor leitete. „Böhmes Versetzung nach Auschwitz war [...] keine Reaktion auf die Mißerfolge in der Kok-Saghyz-Forschung, sondern vielmehr eine weitere Forcierung derselben durch die ‚kriegsmäßige Form der Zusammenarbeit‘ zwischen dem KWI und dem Konzentrationslager“ (Heim 2003, 170). Heinrich Vogel³⁷ vom Wirtschaftsverwaltungshauptamt der SS und Vorgesetzter von Caesar äußerte sich 1943 von Böhme enttäuscht. Dieser sei ein sturer und engstirniger Wissenschaftler, „der nicht, wie ursprünglich geplant, gleichberechtigt mit Caesar und Stahl die Pflanzenkautschukforschung organisieren könne, sondern dem ‚eine viel untergeordnetere Rolle zugewiesen‘ werden müsse“ (Heim 2003, 169). Infolgedessen wurde Böhme Caesar unterstellt.

Eine der ersten Häftlingswissenschaftlerinnen in Rajsko war Claudette Bloch (mit ihrer späteren Heirat nahm sie den Namen Kennedy an), eine Diplombiologin. In der ersten Zeit (von 1942-1944) leitete sie das botanische Labor und konnte im Rahmen dieser Funktion helfen, andere Häftlinge, die keine naturwissenschaftliche Ausbildung hatten, in die relative Sicherheit nach Rajsko zu überstellen (vgl. Heim 2003, S. 180). Zu ihnen gehörte auch die angehende Juristin Simone Floersheim. Bloch half ihr, sich als Biologin auszugeben, indem sie vor Böhme, der kein Französisch verstand, übersetzte, was dieser hören wollte (Heim 2004, S. 282–283).

Die Löwenzahn-Versuchsstation bestand aus mehreren Untergruppen, deren Aufgabengebiete im Folgenden aufgeführt sind.

³⁷ Heinrich Vogel (1901-1958) leitete von 1942 bis zum Ende des Krieges das Amt für Land-, Forst- und Fischwirtschaft im Wirtschaftsverwaltungshauptamt (WVHA) der SS.

Tabelle 9: Organisation der Versuchsstation zu *T. kok-saghyz* (vgl. Heim 2003, 180-182)

Zusammensetzung des sog. „Pflanzenzuchtcommandos“	
Chemisches Labor	Analyse von Bodenproben Löseversuche Bestimmung des Kautschukgehaltes in den Wurzeln Bestimmung des Eiweißgehaltes
Treibhaus	Aussaat von Samen Vegetative Vermehrung der Pflanzen Protokollierung von Keimung und Wachstum
Botanisches Labor	Durchführung anatomischer Untersuchungen Herstellung von Pflanzenschnitten (zur Mikroskopie)
Versuchsfelder	Durchführung von Anbauversuchen
Photographisches Atelier und Zeichenatelier	Abbildung der Pflanzen in Fotos oder Zeichnungen, um Veränderungen festzustellen und in den Generationen nachzuweisen
Schneiderei	Überziehen von Holzkästen mit Tüll (um Pflanzen auf Versuchsfeldern zu selektieren und zu isolieren)
Übersetzung	Übersetzung russischer Fachliteratur ins Deutsche

Die auf den Feldern arbeitenden Frauen erhielten ein kleines Fläschchen mit Alkohol, das dazu bestimmt war, den Pinsel, mit dem die Blüten einzeln bestäubt wurden, nach jeder Blüte zu waschen, um unerwünschte Kreuzungen zwischen den Pflanzen zu vermeiden. Das folgende Foto zeigt eine besonders vielversprechende und daher isolierte Pflanze bei der Bestäubung³⁸. Es wurde 1944 heimlich von der Häftlingsfrau Wanda Jakubowska, die im photographischen Atelier arbeitete, aufgenommen und von einem Zivilangestellten (Anton Mencher/Mencer³⁹) aus dem Lager geschmuggelt (Bildungswerk Stanisław Hantz 2015; Schlichter 1999).

³⁸ Heinz Schattenberg, Leiter des Pflanzenzüchtungskommandos (und Stellvertreter Caesars), wählte besonders gut gewachsene Exemplare der Löwenzahnart aus, die mithilfe eines mit Tüll bespannten Holzkasten von den anderen Pflanzen isoliert und manuell bestäubt wurden (vgl. Shelley 1991, 217; Heim 2003, 180-181).

³⁹ Sein genauer Name ist nicht bekannt.



Abbildung 28: Eine *T. kok-saghyz*-Pflanze bei der Bestäubung (Świebocka und Webber 1993, S. 97)



Abbildung 29: Häftlinge bei der Arbeit auf den Feldern (Christophersen 1978, S. 33)



Abbildung 30: Versuchsfeld des russischen Löwenzahns in Rajsko bei Auschwitz (Flitner 1995, S. 91)

In einem der von Lore Shelley⁴⁰ geführten Interviews mit der ehemaligen Häftlingsfrau Jozefa Kiwalowa beschreibt diese unter anderem die verschiedenen Arbeitsschritte, die zur Kultivierung und Protokollierung von *Taraxacum kok-saghyz* beachtet werden mussten. So hatte jede Häftlingsfrau die Aufgabe, sich um 1000 Pflanzen zu kümmern, über ihr Aussehen und Zeitpunkt der Keimung, sowie Fruchtreife Buch zu führen und die Samen zu zählen. Abbildung 29 ist ein Foto aus der Broschüre des Holocaust-Leugners Christophersen. Es zeigt Häftlingsfrauen bei der Arbeit auf den Feldern. Zur Hochsaison, zwischen Oktober und Dezember, arbeiteten die Häftlinge in drei Schichten rund um die Uhr, um die Samen zu selektieren (Shelley 1991, S. 216).

Im Herbst wurden die Wurzeln geerntet, mehrere Wochen getrocknet und anschließend zur Kautschukgewinnung und Analyse bearbeitet.

Anna Zięba, Assistentin am Staatlichen Auschwitz-Museum, beschreibt die Handhabung der Wurzeln zur Extraktion und Bestimmung der Kautschukmenge wie folgt:

Aus jeder Wurzel wurde ein bis 7 cm langer Teil herausgeschnitten, in ein Reagenzglas getan und die Wurzel mit einer Sodalaugel begossen. Die Reagenzgläser wurden in einem Gestell in ein 5-Litergefäß gesetzt, mit Wasser begossen und gekocht, wobei man aufpassen musste, dass kein Wasser in die Reagenzgläser geriet. Die Lauge veranlasste die Vernichtung der Zellulose. Nach dem Kochen goss man den Inhalt der Reagenzgläser in hermetisch verschlossene Ebonitbecher⁴¹, in denen sich Porzellankügelchen befanden. Dreissig hermetisch verschlossene Becher kamen in 30 x 50 cm grosse Kisten. Daraufhin stellte man die Kisten in die Schüttelmaschine, die durch einen elektrischen Motor angetrieben,

⁴⁰ Lore Shelley (1924-2011), selbst eine Häftlingsfrau und Sekretärin in einer politischen Abteilung in Auschwitz, hat in ihrem Buch *Criminal experiments on human beings in Auschwitz and war research laboratories* Aussagen von 20 ehemaligen Häftlingsfrauen zusammengetragen.

⁴¹ Bei Ebonit handelt es sich um einen besonders harten Gummi, gewonnen aus Naturkautschuk und Schwefel. Es wird durch einen sehr hohen Vernetzungsgrad erreicht, welcher wiederum stark ungesättigte Kautschuke und eine prozentual große Menge Schwefel benötigt.

die Kisten in horizontaler Bewegung schüttelte. Nach etwa 1/2 Stunde dieses Schüttelns und der Bewegung der Kugeln, die das vollständige Zermahlen der Zellulose und die Absonderung der Kautschukreste vom Sud zur Folge hatte, goss man den Inhalt der ‚Becher‘ auf ein Sieb und entnahm mit einer Pinzette den reinen Kautschuk. Aus einem ‚Becher‘ erhielt man eine Kautschukkugel von der Grösse eines Fingernagels. Dann legte man den Kautschuk in mit Methylalkohol gefüllte Petrische Schalen, in denen man den Kautschuk spülte. Nach einem einstündigen Einweichen und Spülen legte man die Kügelchen auf ein Uhrglas (ebenfalls mit der Etikett Nummer) und stellte sie zum Trocknen. Jedes getrocknete Kügelchen wurde einzeln auf der analytischen (sic!) Waage gewogen und sein Gewicht aufgeschrieben. (Zięba 1966, S. 89–90)

Neben den Informationen über die Arbeit in der Pflanzenzuchtstation geben die Interviews auch Einblick in das Lagerleben und die Beziehungen der Zwangsarbeiterinnen zu ihren Vorgesetzten und Aufsehern. So beschreiben die ehemaligen Häftlinge zum Beispiel, welche Möglichkeiten zur Sabotage der Forschung sich für sie ergaben. Wanda Ladniewska, eine ehemalige Häftlingsfrau, berichtet, dass diejenigen, die im Bereich Pflanzenzucht arbeiteten, beispielsweise besonders gute Samen verbrannt haben oder die Pflanzen vertauschten, wodurch die Aufzeichnungen unbrauchbar wurden (vgl. Shelley 1991, 242; weiterhin Madeleine Odrů in Shelley 1991, 206). Bei der Bestäubung von Hand wurde, wenn die Häftlinge unbeobachtet waren, der Pinsel nicht nach jeder Blüte ausgewaschen, was ebenfalls als eine Art von Sabotage angesehen werden kann (vgl. Zięba 1966, 93). Die Fläschchen mit dem Alkohol wurden stattdessen beispielsweise für Geburtstage aufgehoben (vgl. Shelley 1991, 217). Weiterhin wurden Nummerierungen von Kautschuk enthaltenden Reagenzgläsern gefälscht oder die Pflanzen mit Chemikalien begossen, damit sie verdarben (vgl. Zięba 1966, 90).

Die „inhaftierten Frauen [verfügten] über einen gewissen Spielraum [...], um kulturelle Aktivitäten zu entfalten und Kontakte zu Häftlingen in anderen Teilen des Lagers aufzunehmen“ (Heim 2003, S. 186). In einem Interview beschreibt die ehemalige Häftlingsfrau Jozefa Kiwalowa zum Beispiel, dass die Frauen in Rajsko die Möglichkeit hatten, ein wenig Weihnachten zu feiern und einander kleine Theaterstücke aufzuführen (Shelley 1991, S. 220).

Auch die Aufseher werden in den Gesprächen und Memoiren genannt. Von ihnen werden vor allem Caesar und Böhme beschrieben. „Die Einschätzungen in Bezug auf Caesars Verhalten weichen [...] erheblich voneinander ab und reichen von der Behauptung, er sei ein ‚Schutzengel‘ und ‚Retter‘ (Maria Ossowski) gewesen, bis hin zu der Ansicht, er habe die Häftlinge lediglich als Arbeitsgerät und nicht als Menschen betrachtet (Stanislawa Slowakiewicz)“ (Heim 2004, S. 288). Über die Sabotage der Forschung wusste Caesar entweder nichts oder wollte es nicht bemerken, „da auch er möglicherweise ein Interesse

daran hatte, das von ihm geleitete Kommando als kriegswichtig zu deklarieren, um nicht eingezogen zu werden“ (Heim 2002, S. 174).

Was Böhme betrifft, sind die Meinungen einheitlicher. Er wusste, dass die Häftlinge keine seriöse Forschung betrieben und war daher misstrauisch ihnen gegenüber. Eine Zwangsarbeiterin, Eva Tichauer, Jüdin aus einer Familie, die nach Marseille floh, beschreibt Böhme als den Schlimmsten der Aufseher, „weil die Häftlinge bei ihm erstmals das Gefühl gehabt hätten, es mit einem Wissenschaftler zu tun zu haben, der wußte, was unsere Arbeit war“ (Heim 2003, S. 192). Weiterhin sagt sie:

„Seine leichten, leisen Schritte zwingen uns, ständig auf der Hut zu sein. Er steht dauernd hinter uns, versucht alles zu kontrollieren und besteht darauf, dass es unsere Pflicht sei, ehrlich zu arbeiten und die volle Produktionskapazität zu erreichen. Er treibt diese perverse Logik auf die Spitze, als er uns erklärt, dass er, wenn er Gefangener der Sowjets wäre, dasselbe täte. Am Vorabend der Räumung des Lagers, als wir ihn an seine Worte erinnern und versprechen, ihn zu retten, wenn er uns bis zur Befreiung durch die Rote Armee in Rajsko läßt, schickt uns dieser Feigling auf den Todesmarsch. Die intelligenten unter den SS-Leuten sind schlimmer als Tiere. Bis zum bitteren Ende planen sie unseren Tod, damit es keine Zeugen gegen sie gibt.“ (Heim 2004, S. 289)⁴²

Das Zurückschicken der Häftlinge ins Stammlager als Disziplinierungsmaßnahme war sowohl für Böhme, als auch für Caesar gang und gäbe.

Am Ende des Krieges arbeiteten rund 150 Häftlinge verschiedener Nationalitäten in der Versuchsstation in Rajsko. Als die Rote Armee immer weiter vorrückte, wurde im Januar 1945 das Untersuchungsmaterial für *T. kok-saghyz* nach Büschdorf bei Halle transportiert, um die Züchtung unter Caesar in Anbindung an die Universität Halle weiterzuführen (Wieland 2004, S. 224).

„Die Frauen des Pflanzenzuchtkommandos wurden – teils per Fußmarsch, teils in Viehwaggons – zunächst nach Ravensbrück, von dort aus ins Nebenlager Malchow und anschließend nach Leipzig gebracht. Aus dem dortigen Lager wurden sie Mitte April auf einen zweiten Todesmarsch geführt, bis 10 Tage später die Rote Armee die Überlebenden befreite“ (Heim 2003, S. 193).

Als nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges Naturkautschuk aus *Hevea brasiliensis* wieder verfügbar war, wurden Züchtung und Forschung an *Taraxacum kok-saghyz* nach und nach aufgegeben. Theodor Roemer, Pflanzenzüchter an der Universität Halle, wurde zwar von der amerikanischen Besatzung darum gebeten, das Projekt zur Kautschukgewinnung

⁴² Das Zitat stammt ursprünglich aus dem von Tichauer selbst veröffentlichten Werk *J'étais le numéro 20832 à Auschwitz* (vgl. Tichauer 1988, S. 113–114).

weiterzuführen, lehnte aber mit den Worten „für unser Gebiet und unsere Zeit hat die Kok-saghys-Züchtung keine Bedeutung, wir müssen Kartoffeln, Brot-Getreide, Zucker und Butter produzieren“ ab (Wieland 2002, S. 54). Zwischen 1951 und der Jahrtausendwende wurden keine Forschungsdokumente zu den kautschukführenden Löwenzahnarten veröffentlicht.

3.3 Inulin

Die meisten höheren Pflanzen synthetisieren als Speicher- oder Reservekohlenhydrat Stärke, ein Polysaccharid auf Basis von Glucose-Einheiten. Neben der Stärke existieren auch andere Reservekohlenhydrate in Pflanzen. So synthetisieren beispielsweise die Korbblütler (*Asteraceae*) in ihren unterirdischen Überdauerungsorganen ein langkettiges Fructan, das Inulin, dessen Hauptbestandteil Fructose ist. Der Name „Inulin“ leitet sich von der Pflanze „echter Alant“ (*Inula helenium*) ab, aus dem Inulin 1804 zum ersten Mal isoliert wurde. Über 36.000 Pflanzenarten synthetisieren Inulin. Typische und zum Teil industriell genutzte Vertreter sind Topinambur, Chicorée, Dahlien, Schwarzwurzeln, Artischocken und Löwenzahn.

In ihrer Dissertationsschrift hat Katrin Sommer das Inulin sowie seine Eigenschaften und Einsatzgebiete detailliert beschrieben und sein Potenzial als Unterrichtsgegenstand für den Chemieunterricht an weiterführenden Schulen mit neu entwickelten Experimenten erprobt (vgl. Sommer 2000). Dabei wurde dem Löwenzahn als Inulin speichernde Pflanze jedoch keine gesonderte Beachtung geschenkt. Eine weitere umfangreiche Quelle, unter anderem auch für das Potenzial des Themas für den Chemieunterricht, stellt die Staatsexamensarbeit von Ina Böckler dar (vgl. Böckler 2007).

Da das Inulin in der vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt und seine Eigenschaften, Synthese und Einsatzgebiete in den genannten Arbeiten ausführlich behandelt werden, werden die basalen fachlichen Grundlagen hier nur auf das Wesentliche beschränkt vorgestellt.

3.3.1 Chemische Betrachtung: Struktur und Eigenschaften

Inulin, das aufgrund seiner erstmaligen Isolierung aus Alant auch als Alantstärke bezeichnet wird, gehört zu den Oligo- bzw. Polysacchariden aus der Gruppe der Fructane (auch

Fructosane genannt). Der Name leitet sich von ihrem Hauptbestandteil, der D-Fructose ab.

Es gibt verschiedene Fructane, die sich durch ihr Basismolekül und in der Art der Verknüpfung der Fructosylreste unterscheiden. Beim sogenannten Inulintyp (1-Kestosetyp) besteht das Polysaccharid aus einer terminalen Saccharose-Einheit (ein Molekül α -D-Glucose verbunden über eine α,β -1,2-glycosidische Bindung mit einem Molekül β -D-Fructose) und einer Kette aus β -2,1-verknüpften Fructosyleinheiten (vgl. Heldt und Piechulla 2015, S. 253). Aufgrund der terminalen Glucose-Einheit am reduzierenden Ende des Moleküls wird der Inulintyp als ein Heterofructan mit der allgemeinen Formel GF_n bezeichnet.

Der Inulintyp findet sich hauptsächlich in den unterirdischen Speicherorganen der Korbblütler.

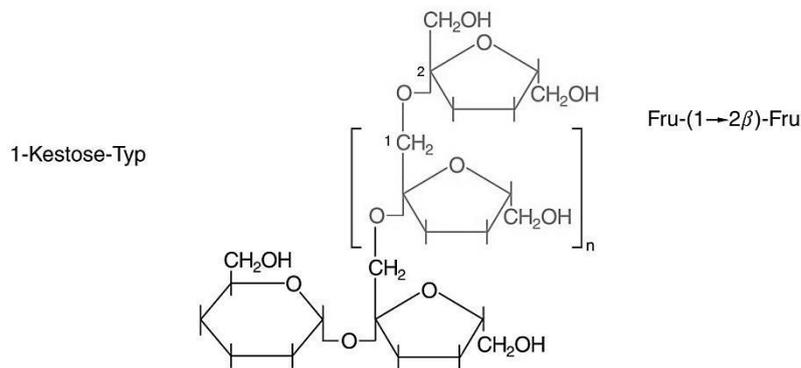


Abbildung 31: Struktur eines Inulin-Moleküls (vgl. Heldt und Piechulla 2015, S. 253)

Ein Inulin-Molekül besteht in der Regel aus bis zu 60 Fructose-Einheiten (vgl. Gesellschaft Deutscher Chemiker 2003, S. 74). Der Polymerisationsgrad hängt dabei unter anderem von der Pflanzenart, vom Vegetationsstadium der Pflanze, von der Lagerzeit sowie den Lagerungsbedingungen ab. In der Pflanze liegt ebenfalls immer ein Polymergebisch unterschiedlich langer Ketten vor, weshalb der Polymerisationsgrad in der Regel als durchschnittlicher Polymerisationsgrad (degree of polymerisation) angegeben wird (abgekürzt: DP_n).

Tabelle 10: Inulingehalt und Kettenlängen ausgewählter Pflanzen (vgl. Franck und Leenheer 2002, S. 455; Arias et al. 2016, S. 320; Kreuzberger et al. 2016, S. 77)

Pflanze	Inulingehalt [%]	Durchschnittlicher Polymerisationsgrad
Chicorée	15-18	10-14
Topinambur	14-18	6-10
Dahlie	10-12	13-20
Russischer Löwenzahn	15-36	10-20 (>15 im ersten Herbst)

Bezüglich des Inulins in den Wurzeln des russischen Löwenzahns *T. kok-saghyz* konnte festgestellt werden, dass es über einen durchschnittlichen Polymerisationsgrad von mehr als 15 verfügt (sowohl im ersten Herbst als auch zum Ende des Blütezeitraumes im zweiten Wachstumsjahr). Da ein hoher Polymerisationsgrad als ein Qualitätskriterium für Inulin angesehen wird und kommerziell erhältliches Inulin einen durchschnittlichen DP von 10-20 aufweist, lässt sich schlussfolgern, dass Inulin aus *Taraxacum kok-saghyz* als eine geeignete Quelle für qualitativ hochwertiges Inulin genutzt werden könnte (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 77).

Die Löslichkeit von Inulin in Wasser ist von seiner Kettenlänge sowie von der Temperatur abhängig. Sie nimmt mit steigender Kettenlänge und fallender Temperatur ab. In organischen Lösungsmitteln wie z.B. Ethanol oder in Ethanol-Wasser-Gemischen ist Inulin nicht löslich (vgl. Meyer et al. 2007, S. 167; Mensink et al. 2015, S. 411).

Im festen Zustand sind zwei Modifikationen von Inulin bekannt, die sich in ihrer Löslichkeit in Wasser unterscheiden. Die α -Form besitzt eine kristalline Struktur und ist in Wasser schwer löslich. Die β -Form hingegen ist amorph und in kaltem Wasser sehr leicht löslich. Sie entsteht beim Ausfällen von Inulin aus wässrigen Lösungen durch Zugabe von Ethanol, kann sich aber bei längerem Stehen wieder in die α -Form umwandeln (vgl. Beck und Praznik 1986, S. 391).

Bezüglich des Temperaturverhaltens von getrocknetem Inulin wird allgemein ein Schmelzbereich von 178-181 °C angegeben. Die Firma Sigma Aldrich gibt für ihr kommerziell erhältliches Inulin-Pulver aus Zichorienwurzeln oder Dahlienknollen einen Schmelzbereich von etwa 158-165 °C an (Sigma-Aldrich). Allerdings ist hier festzuhalten, dass es sich beim Schmelzen um einen irreversiblen Vorgang handelt, dessen Temperaturbereich auch von der Kettenlänge des Polymers abhängt (vgl. Blecker 2003, S.

216)⁴³: Mithilfe von dynamischer Differenzkalorimetrie (differential scanning calorimetry) kann aufgezeigt werden, dass bei einer Inulinprobe mit einem durchschnittlichen Polymerisationsgrad von 20,5 beim Erhitzen in einem Temperaturbereich von etwa 80–100 °C zunächst noch freies Wasser verdunstet, bevor ab 165,1 °C der Schmelzvorgang beginnt und bei 181,2 °C vollständig abgeschlossen ist (vgl. Blecker 2003, S. 214). Dabei handelt es sich beim Schmelzen von Inulin eigentlich nicht um einen Schmelzvorgang, sondern um einen Abbau der Polysaccharid-Ketten. Die bei der Zersetzung entstehenden unterschiedlich langen Bruchstücke können dann in vielschichtigen Reaktionen weiterreagieren (vgl. Trabs 2012, S. 19). Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Inulin immer um ein Polymergemisch handelt, ist es schwierig, einen allgemein gültigen Schmelzpunkt für Inulin einer bestimmten Pflanzenart zu bestimmen.

Inulinlösungen können bei Konzentrationen oberhalb der maximalen Löslichkeit auskristallisieren und ein Gel bilden, das aus einem Netzwerk von Kristalliten⁴⁴ aufgebaut ist (vgl. Meyer et al. 2007, S. 168–169; Mensink et al. 2015, S. 412–413). Aufgrund der Eigenschaft dieser Gele, eine cremige Textur auszubilden und die sensorischen Eigenschaften von Lebensmitteln zu verbessern, werden Inulingele beispielsweise in Joghurt, Brotaufstrich oder Eiscreme eingesetzt. Dabei wirkt sich der Polymerisationsgrad von Inulin nicht nur auf seine Löslichkeit, sondern auch auf seinen Geschmack aus. Aufgrund der Kettenlänge schmeckt Inulin mit einem $DP \leq 7$ (auch Oligofruktose genannt) süßer als langkettiges oder natives Inulin⁴⁵ (vgl. Franck 2002, S288).

3.3.2 Biosynthese des Inulins in *Taraxacum kok-saghyz*

Was den Inulingehalt in *Taraxacum kok-saghyz* betrifft, sind starke Schwankungen zwischen einzelnen Pflanzen festzustellen. Bereits 1951 fasst Ulmann zusammen, dass die Wurzeln des *Taraxacum kok-saghyz* (bezogen auf die Trockenmasse) etwa 30–50 % Inulin enthalten, und der Gehalt vor allem in der Zeit zwischen Juli und August des ersten Vegetationsjahres stark ansteigt (vgl. Ulmann 1951, S. 139).

⁴³ In der Literatur wird dennoch von einer Schmelztemperatur gesprochen.

⁴⁴ Kristallite entstehen, wenn Kristalle am freien Wachstum gehindert werden. Dabei entsteht ein polykristallines Gefüge mit mikroskopisch kleinen Kristallen.

⁴⁵ Inulin, welches noch nicht in unterschiedliche Fraktionen nach seiner Kettenlänge geteilt wurde, wird als natives Inulin bezeichnet.

In einer aktuellen Studie mit Wildpflanzen wurden zwischen 10 und 52 % Inulin in einzelnen Pflanzen nachgewiesen (vgl. Arias et al. 2016, S. 318). Im Durchschnitt enthielten die angepflanzten Test-Populationen Inulingehalte zwischen 20 und 30 % bezogen auf das Wurzeltrockengewicht (vgl. Arias et al. 2016, S. 320). Diese Werte werden in einer zweiten aktuellen Studie bestätigt. Hier konnte gezeigt werden, dass der Inulingehalt im ersten Jahr ab Oktober abnimmt, ein Minimum von etwa 5 % erreicht, und erst im neuen Jahr wieder steigt. Der höchste Inulingehalt mit etwa 30 % konnte im September des zweiten Jahres gemessen werden (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 76).

Um *Taraxacum kok-saghyz* in eine ertragsreiche Nutzpflanze in Hinblick auf Inulin zu verwandeln, ist, ebenso wie bei der Ertragssteigerung in Bezug auf Kautschuk, weitere Züchtungsarbeit nötig. Dabei wird als ein wichtiges Ziel auch die Steigerung des Ertrages an Biomasse genannt (vgl. u.a. Arias et al. 2016, S. 321).

Im Allgemeinen erfolgt die Biosynthese von Inulin in Pflanzen in den Vakuolen der Pflanzenzellen nach einem enzymkatalysierten Mechanismus. Im ersten Schritt wird mithilfe des Enzyms Saccharose-Saccharose-Fructosyltransferase auf das Ausgangsmolekül Saccharose ein Fructoserest einer zweiten Saccharose übertragen. Es entsteht 1-Kestose, ein Trisaccharid. In weiteren Schritten erfolgt die Kettenverlängerung, indem mit Hilfe des Enzyms Fructan-Fructan-Fructosyltransferase weitere Fructosereste angelagert werden (vgl. Heldt und Piechulla 2015, S. 254). Die folgende Abbildung verdeutlicht die Biosynthese.

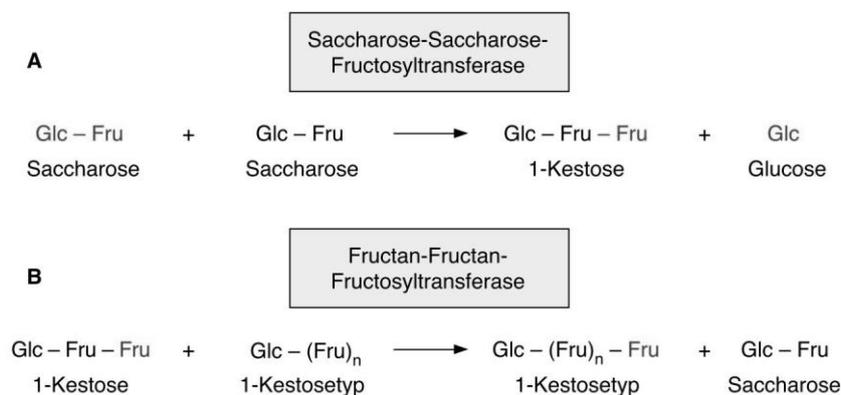


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Biosynthese von Inulin (Heldt und Piechulla 2015, S. 254)

Die Produktion von Fructanen als Speicherkohlenhydrat wird als Anpassungsmechanismus an Regionen des gemäßigten Klimas angesehen. Durch den Abbau von langkettigen

Fructanen in kürzere Bausteine wird einerseits der osmotische Druck in der Zelle erhöht und andererseits der Gefrierpunkt der Vakuole im Cytoplasma erniedrigt. Die Speicherung von Inulin und dessen Depolymerisierung ermöglichen es den Pflanzen damit, längere Kälte- und Trockenperioden zu überstehen und danach wieder neu auszutreiben (vgl. Wilson et al. 2001, S. 150ff.). Das Phänomen der Depolymerisierung des Inulins ist in den Wurzeln des heimischen und des russischen Löwenzahns zu beobachten (vgl. Kreuzberger et al. 2016, S. 76; Wilson et al. 2001, S. 154).

3.3.3 Großtechnische Gewinnung und Verwendung von Inulin

Die großtechnische Gewinnung von Inulin für die Industrie erfolgt hauptsächlich aus den Wurzeln der gemeinen Wegwarte (*Cichorium intybus*), die eigens zur Herstellung von Inulin angebaut wird. Die Wurzeln werden im Herbst geerntet und anschließend in großen Produktionsanlagen gereinigt. Der Extraktionsprozess ähnelt dabei dem der Zuckergewinnung aus Zuckerrüben (vgl. Meyer et al. 2007, S. 158): Nach der Reinigung werden die Pflanzenteile zerkleinert und das Inulin mittels Heißwasserextraktion aus den Pflanzenschnitzeln herausgelöst. Mittels einer Kalk-Kohlendioxid-Behandlung wird der inulinhaltige Saft anschließend gereinigt. Bei der Kalkung wird der Lösung im ersten Schritt Branntkalk zugefügt, um Verunreinigungen wie Proteine, Salze und andere Nichtzuckerstoffe auszufällen. Im zweiten Schritt, der Carbonatation, wird Kohlenstoffdioxid in die Lösung eingeleitet. Dies dient dazu, überschüssiges Calciumhydroxid in Form von Calciumcarbonat auszufällen. Das Carbonat wirkt außerdem als Filtrationshilfsmittel, da es ein Adsorbens für Nichtsaccharosestoffe darstellt. Die Prozesse der Kalkung und Carbonatation werden unterschiedlich häufig durchgeführt, bevor anschließend die noch in der Lösung vorhandenen Farbstoffe mithilfe von Aktivkohle entfernt werden. Im letzten Schritt wird das Inulin mittels Sprühtrocknung als Pulver gewonnen (vgl. van der Poel, Pieter W. et al. 2000, S. 485ff.; Roberfroid 2005b, S. 50).

Aufgrund seiner sensorischen und physiologischen Eigenschaften findet Inulin unter anderem in der Lebensmittelindustrie und in der Medizin Anwendung. Die Verarbeitung zu unterschiedlichen Produkten hängt dabei mit dem Polymerisationsgrad des Inulins zusammen. Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Einsatzgebiete von Inulin gegeben.

Inulin wird im Bereich der so genannten funktionellen Lebensmittel (functional food) eingesetzt, die heutzutage für die Lebensmittelindustrie immer interessanter werden. Dabei handelt es sich um Nahrungsmittel, die mit zusätzlichen Inhaltsstoffen angereichert sind und mit positiven Effekten auf die Gesundheit beworben werden.

Inulin kann beispielweise als **Zuckeraustauschstoff** eingesetzt werden. Da kurzkettige Inuline mit einem durchschnittlichen Polymerisationsgrad ≤ 4 süß schmecken (relative Süße im Vergleich zu Haushaltszucker bis zu 50 %), weisen sie ein ähnliches Süßungsprofil wie Zucker auf (vgl. Meyer et al. 2007, S. 172). Durch den Einsatz von Inulin kann also der Zuckergehalt von Lebensmitteln reduziert werden, ohne auf die Süße gänzlich zu verzichten. Produkte, in denen Inulin als Zuckeraustauschstoff enthalten ist, sind z.B. Kekse und andere Süßwaren.

Neben der Reduzierung des Zuckeranteils ist die Produktion von fettreduzierten Produkten ein weiteres Ziel der Lebensmittelindustrie. **Fettaustauschstoffe** wie Inulin ahmen den Geschmack und die Konsistenz von Fetten nach und haben gleichzeitig weniger verwertbare Kalorien als gewöhnliche Nahrungsfette. Durch die Gelbildung der langkettigen Inuline entstehen Eigenschaften, die denen von Fettkristallen in Ölen ähnlich sind. Die Verwendung solcher Gele sorgt für eine verbesserte Textur und für ein verbessertes Mundgefühl der jeweiligen fettreduzierten Produkte. Eingesetzt werden Inuline und Inulingele (als Fettaustauschstoffe) beispielsweise in fettreduzierten Milch- und Joghurtprodukten, in Backwaren, in Chips oder auch in Diät-Schokolade (vgl. Meyer et al. 2007, S. 175ff.).⁴⁶

Da Inulin anders als andere Kohlenhydrate weitgehend unverdaulich ist, zählt es somit zu den **Ballaststoffen**. Trotz der Süße der kurzkettigen Varianten sind sie ebenfalls für Diabetiker geeignet. Ihr besonders niedriger Kaloriengehalt von etwa 1,5 kcal/g ist auf die β -2,1-glycosidische Verknüpfung zwischen den Fructose-Molekülen (vgl. Niness 1999, S. 1403S) zurückzuführen, denn diese ist gegen die Magensäure beständig und

⁴⁶ Auffallend bei zucker- und fettreduzierten Lebensmitteln ist ihr kaum geringerer physiologischer Brennwert verglichen mit dem „normalen“ Produkt (z.B. 554 kcal vs. 490 kcal in Chips; 435 kcal vs. 416 kcal in Butterkeksen). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Fettreduktion im Gegenzug der Kohlenhydratgehalt erhöht wird, um den Geschmack und weitere sensorische Eigenschaften nicht negativ zu beeinflussen (vgl. Verbraucherzentrale NRW e.V. 2016). Genauso werden bei der Reduktion von Zucker häufig (neben Süßstoffen auch) Austauschstoffe eingesetzt, die zwar einen geringeren physiologischen Brennwert aufweisen, aber dennoch Energielieferanten sind (vgl. Böckler 2007, S. 73).

sorgt dafür, dass Inuline und Fructooligosaccharide unbeschädigt bis in den Dickdarm gelangen (vgl. Meyer et al. 2007, S. 159).

Inulin ist des Weiteren ein **Präbiotikum** (auch: Prebiotikum). Darunter versteht man Ballaststoffe, die durch die Darmflora fermentiert werden und dort die Aktivität von im Darm lebenden Bakterien (Bifidobakterien, *Lactobacillus*) stimulieren (Roberfroid 2005a, S. 16), die wiederum das Immunsystem beeinflussen können. Es wurden außerdem Hinweise gefunden, dass die Fermentation von Inulinen zu einem verminderten pH-Wert im Darmbereich führen kann, wodurch Calcium- und Magnesiumabsorption besser erfolgen und in weiterer Folge ein positiver Effekt auf die Knochendichte beobachtet werden kann (vgl. Meyer et al. 2007, S. 160-161).

Inulin kann auch hydrolysiert werden, um **Fructose und Fructose-Sirup** zu gewinnen. Je höher der Polymerisationsgrad des zugrunde liegenden Inulins, desto größer wird das Verhältnis von Fructose zu Glucose im Sirup. So lassen sich beispielsweise Sirupe mit bis zu 95 % Fructose und 5 % Glucose gewinnen (Klaushofer 1986, S. 93; Kierst 1978, S. 449).

Die Produktion von **Bioethanol** aus Inulin ist in Hinblick auf nachwachsende Rohstoffe ein wichtiges Forschungsgebiet. Bevor jedoch Inulin zu Alkohol vergoren werden kann, ist eine Spaltung des Kohlenhydrats in die Grundbausteine nötig. Die Hydrolyse läuft dabei entweder säurekatalysiert oder auf enzymatischem Weg ab. Bei der enzymatischen Hydrolyse werden Hefen verwendet, die das Enzym Inulinase produzieren und die Spaltprodukte fermentieren können (vgl. Bonciu et al. 2010, S. 29). Die säurekatalysierte hydrolytische Spaltung liefert außer Fructose und Glucose verschiedene Nebenprodukte wie Hydroxymethylfurfural (HMF). HMF entsteht durch protonenkatalysierte Abspaltung von Wasser von Fructose und stellt eine Schlüsselverbindung in der organischen Chemie dar. Es lassen sich unter anderem Produkte für die Bereiche Polymerchemie, für die Pharmazie oder den Pflanzenschutz herstellen (vgl. Kröger 2002, S. 6ff.; Rapp und Daub 1993).⁴⁷

⁴⁷ Heutzutage wird HMF bereits aus Chicorée-Wurzeln in einer Pilotanlage gewonnen. Durch Oxidation wird es in Furandicarbonsäure umgewandelt, die als Ausgangsstoff für Polyethylenfuranoat (PEF) dient, ein vollständig pflanzliches Polymer, das „biobasiertes Pendant zu Polyethylenterephthalat (PET)“ (Bernhardt 2017, S. 550).

In der Medizin findet Inulin ebenfalls Anwendung. Dort kann es eingesetzt werden, um die Entgiftungsleistung der Nieren und damit die Nierenfunktion im Rahmen einer **Nieren-Clearance** zu messen. Dazu wird, vereinfacht dargestellt, dem Patienten eine Inulinlösung intravenös verabreicht. Da Inulin im Blut nicht metabolisiert oder vom Körper selbst synthetisiert wird, filtert es die Niere in einer bestimmten Rate aus dem Blut heraus. Über den Urin lässt sich so die Filtrationsrate der Niere bestimmen (vgl. Mörike und Betz 1997, S. 478).

Die Nutzung inulinhaltiger Pflanzen als **Kaffee-Ersatz** ist bereits seit Jahrhunderten bekannt. Aus den Kohlenhydraten bilden sich während des Röstprozesses unter anderem durch die Maillard-Reaktion Stoffe, die dem Getränk eine Kaffee ähnliche Farbe und den entsprechenden Geschmack geben (vgl. Belitz et al. 2008, S. 981). Vor allem geröstete Zichorienwurzeln, gemischt mit Gerste und Malz, werden als Kaffee-Ersatz zum Beispiel im „Landkaffee“ vertrieben (vgl. Herbst und Sommer 2002, S. 23).

4 Eigene experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und reproduzierbare Experimente mit *Taraxacum kok-saghyz* vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für den Chemieunterricht an Grund- und weiterführenden Schulen bewertet. Dazu werden zunächst Gewinnungsmöglichkeiten für Kautschuk aus getrockneten Wurzeln, dann aus frischen Wurzeln und schließlich Untersuchungsmöglichkeiten für die gewonnenen Produkte aufgezeigt. Ebenso werden Möglichkeiten zur Gewinnung von Inulin aus Löwenzahnwurzeln und daran anschließende Analyseverfahren vorgestellt.

Um eine verlässliche Vorstellung zu erhalten, in welchen Mengen Kautschuk bzw. Inulin in den Wurzeln des selbst angepflanzten russischen Löwenzahns vorliegen, wurde eine analytische Quantifizierung des Kautschuk- und Inulingehaltes sowie des durchschnittlichen Polymerisationsgrades des Inulins bei der Firma *numares BIOTECH* in Auftrag gegeben⁴⁸.

Die Analyse ergab einen durchschnittlichen Kautschukgehalt in einjährigen Wurzeln des *Taraxacum kok-saghyz* von etwa 3 % und einen Gehalt von etwa 37 % Inulin bei einem durchschnittlichen Polymerisationsgrad (DP) von 15.

Tabelle 11: Ergebnisse der Analyse der getrockneten Wurzeln des selbst angepflanzten russischen Löwenzahns

Original Materialbezeichnung	Kautschuk-Gehalt in Probe	Inulin-Gehalt in Probe	Saccharose-Gehalt in Probe	DP
Wurzel 1	3,8 %	34,7 %	5,2 %	17
Wurzel 2	2,1 %	37,2 %	5,4 %	14
Wurzel 3	2,6 %	40,2 %	4,9 %	15

Bei nicht speziell gezüchteten *T. kok-saghyz*-Pflanzen ist ein durchschnittlicher Kautschukgehalt von 3 % üblich. Ein durchschnittlicher Polymerisationsgrad des Inulins von etwa 15 deutet auf qualitativ hochwertiges Inulin hin.

⁴⁸ Die Firma *numares BIOTECH* bietet routinemäßige Analysen pflanzlicher Inhaltsstoffe für die Pflanzenzüchtung und Industrie an.

Um eine Vielzahl von Ansätzen zu erproben und so ein möglichst breites Spektrum an Versuchen entwickeln zu können, wurden verschiedene Verfahren, auf die in älterer Forschungsliteratur sowie in neueren Publikationen zurückgegriffen wird, nachempfunden und an schulische Gegebenheiten angepasst. Gefahrenhinweise und Informationen zum Einsatz der verwendeten Chemikalien finden sich im Anhang (Teil VI), ebenso wie mögliche Arbeitsblätter für den Einsatz im Chemieunterricht, die zum Teil bereits im Rahmen von Projekttagen erprobt wurden (Teil V).

4.1 Entwicklung von Schülerexperimenten zu Kautschuk aus Löwenzahn

Prinzipiell ist eine Gewinnung des Kautschuks sowohl aus frischen, als auch aus getrockneten Wurzeln des Löwenzahns möglich. Es kann zwischen mechanischen, chemischen und biologischen Verfahren unterschieden werden. Zur Gewinnung des Kautschuks auf mechanischem Wege gehören Verfahren wie das Mörsern oder feine Mahlen der getrockneten Wurzeln und das anschließende Trennen über die Dichte. Zu den chemischen Gewinnungsverfahren zählen das Lösen in Benzin (oder anderen unpolaren Lösungsmitteln) sowie das Kochen der Wurzeln in verdünnter Natronlauge. Eine Möglichkeit, den Kautschuk auf biologischem Weg freizulegen besteht darin, die Wurzeln faulen zu lassen. In der Regel werden die Verfahren kombiniert eingesetzt, um die Ausbeute zu maximieren (vgl. Ulmann 1951, S. 476). In den im Folgenden vorgestellten Experimenten kommen zum einen getrocknete Wurzeln des *Taraxacum kok-saghyz*, die freundlicherweise von der Pflanzenzüchtungsfirma *ESKUSA GmbH*⁴⁹ zur Verfügung gestellt wurden, zum anderen frische Wurzeln von selbst angepflanzten *T. kok-saghyz*-Pflanzen⁵⁰ zum Einsatz.

⁴⁹ Nach Angaben des Pflanzenzüchters enthalten die zur Verfügung gestellten getrockneten Wurzeln durchschnittlich etwa 3 % Kautschuk. Für die Bereitstellung des nicht vermehrungsfähigen Wurzelmaterials sowie weiterer Informationen möchten wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken.

⁵⁰ Die Samen wurden über *All Good Things Organic Seeds* (<https://www.plantgoodseed.com/products/russian-dandelion-kazakh-dandelion-rubber-root-taraxacum-kok-saghyz-seeds>) bezogen. Forscher des Julius Kühn-Instituts, die sich seit einigen Jahren mit der Gefahr der Invasivität des russischen Löwenzahns beschäftigen, konnten der Pflanze diesbezüglich Unbedenklichkeit bescheinigen (vgl. Julius Kühn-Institut 2013; dies wurde auch in einer persönlichen Mitteilung einer Mitarbeiterin des Instituts beschrieben).

Dazu wurde sowohl im Jahr 2015, als auch im Jahr 2016 eine Aussaat vorgenommen. Die Samen wurden Ende Februar bzw. Anfang August in Quelltabletten in einem Fensterbankgewächshaus ausgesät. Schon nach wenigen Tagen waren erste Keimlinge zu erkennen. Nach etwa einem Monat waren die Pflanzen dreiblättrig und 1-3 cm groß, nach zwei Monaten wurden sie in Blumenkästen umgepflanzt und nach drei Monaten hatte sich eine Reihe von Blüten gebildet. Die 5-6 cm großen Blätter zeigten erste deutliche Zacken. Einen weiteren Monat später war die Zeit der Fruchtreife erreicht und die ersten Samen konnten geerntet werden. Nach Beendigung der Fruchtreife fielen die Pflanzen in die in der Literatur beschriebene Sommerruhe und bildeten nur zum Teil im selben Jahr weitere Blätter aus. Die Mehrzahl der Pflanzen keimte im Folgejahr erneut.

Die folgenden Abbildungen skizzieren den Vegetationsverlauf des selbst gezüchteten russischen Löwenzahns.



Abbildung 33: Keimling des russischen Löwenzahns zwei Wochen nach Aussaat der Samen



Abbildung 34: Löwenzahn-Pflanze nach etwa zweieinhalb Monaten



Abbildung 35: Rosette nach drei bis dreieinhalb Monaten. Erste Blütenköpfe haben sich gebildet.



Abbildung 36: Erste Fruchtreife nach bei etwa vier Monate alten Pflanzen

Die zur experimentellen Untersuchung und zur Gewinnung von Latexmilch und Kautschuk notwendigen Wurzeln wurden ab der Zeit der Vollblüte frisch „geerntet“.

Es lässt sich schlussfolgern, dass es möglich ist, den russischen Löwenzahn (auch) im Rahmen eines Schulgartens oder in einem Projektkurs in Blumenkästen anzupflanzen, zu ernten und anschließend damit weiterzuarbeiten.

Eine Bewertung der Experimente zur Extraktion von Kautschuk aus den Löwenzahnwurzeln in Hinblick auf die erhaltene Ausbeute ist wenig sinnvoll. Dies liegt zum einen daran, dass unterschiedliche Herangehensweisen für die Gewinnung des Rohstoffs erprobt werden und dabei die Extraktionsmethode im Vordergrund steht; zum anderen aber auch an der Tatsache, dass die Wurzeln des wildwachsenden *Taraxacum kok-saghyz* von Natur aus nur sehr wenig Kautschuk enthalten. Diesen in den entwickelten Handversuchen zu quantifizieren brächte auch Lernenden keinen besonderen Mehrwert.

4.1.1 Gewinnung von Kautschuk aus *getrockneten* Löwenzahnwurzeln

4.1.1.1 Erster Kontakt mit Kautschuk

Material: eine getrocknete Wurzel des *Taraxacum kok-saghyz*

Durchführung: Das Wurzelstück wird vorsichtig auf etwa 90 ° geknickt. Nach Betrachten der Knickstelle wird vorsichtig an den Enden gezogen.

Auswertung: Durch das Knicken der Wurzel wird der koagulierte Kautschuk in Form von sehr dünnen weißen Fäden sichtbar. Leichte elastische Eigenschaften sind beim vorsichtigen Ziehen an den Enden ebenfalls erkennbar.



Abbildung 37: Kautschukfäden in einer getrockneten *T. kok-saghyz*-Wurzel

Anmerkungen: Dieser einfache Versuch lässt sich ohne großen Aufwand mit Schülern aller Altersstufen durchführen. Dabei wird ebenfalls ersichtlich, dass der Kautschuk eng mit dem umliegenden Wurzelmaterial verbunden und damit eine saubere Auftrennung sehr schwierig sein könnte.

4.1.1.2 Gewinnung von Kautschuk durch Mörsern

Material: zwei sehr dünne getrocknete Löwenzahnwurzeln, Mörser mit Pistill, Pinzette, Porzellanschale, Wasser (zum Auswaschen)

Durchführung: Zwei (oder drei) sehr dünne getrocknete Wurzeln werden im Mörser einige Minuten kräftig gemörsert bis sie „zu Staub zerfallen“. Kleine Kautschukpartikel von etwa 1 mm Größe beginnen dabei zusammen zu haften. Sie werden mit der Pinzette herausgenommen und in die Porzellanschale gelegt. Es wird weiter gemörsert und weitere zusammenhaftende Kautschukpartikel werden herausgenommen. Anschließend werden

die restlichen holzigen Bestandteile aus dem Mörser ausgewaschen, die Kautschukpartikel wieder zurück in den Mörser gelegt und durch weiteres Mörsern zu einem zusammenhängenden Stück bearbeitet.

Beobachtung: Zunächst sieht es so aus, als würde das gesamte Wurzelmaterial zu Staub zerfallen. Nach 3-5-minütigem Mörsern beginnen kleine kugelförmige Partikel mit gummielastischen Eigenschaften im Wurzelstaub zusammenzuhalten. Die Stücke haben eine hellbraune Farbe, da sie von holzigem Staub umgeben sind. Nach dem Auswaschen der Partikel und des Mörsers wird ihre dunkelbraune bis schwarze Farbe sichtbar.



Abbildung 38: Gewinnung des Kautschuks durch Mörsern

Das gewonnene Kautschukstück kann anschließend getrocknet und als kleiner Radiergummi genutzt werden.

Auswertung: Bei diesem Gewinnungsverfahren handelt es sich um ein rein mechanisches. Durch die Bearbeitung im Mörser wird ein Mahlprozess nachgeahmt. Der Kautschuk wird freigelegt und von dem ihn umgebenden Gewebe abgetrennt.

Anmerkungen: Ebenso wie der erste Versuch lässt sich auch dieses Experiment mit Schülern verschiedener Altersstufen durchführen und ist bereits für Grundschüler geeignet, da keine Chemikalien benötigt werden. Allerdings erfordert das Experiment ein gewisses Durchhaltevermögen und Kraft, die Wurzelstücke über längere Zeit zu mörsern, um ein zufriedenstellendes Produkt zu erhalten.

4.1.1.3 Gewinnung von Kautschuk durch Dichtentrennung in der Zentrifuge

Material: Getreidemühle, Heizplatte, Handzentrifuge mit Zentrifugengläsern, großes Becherglas, getrocknete Wurzeln des russischen Löwenzahns, Wasser, feinmaschiges Sieb, Pinzette, Mörser mit Pistill

Durchführung: Die Wurzeln werden mithilfe der Getreidemühle zerkleinert. Das grobe dabei entstandene Mehl wird anschließend mit Wasser im Verhältnis 1:10 in einem Becherglas aufgeschlämmt. Das Wasser-Schlamm-Gemisch wird auf Zentrifugengläser verteilt und etwa zehn Minuten lang zentrifugiert. Anschließend wird die Flüssigkeit, an deren Oberfläche sich der Kautschuk aufgrund seiner geringen Dichte gesammelt hat, abgegossen und zur Reinigung erneut zentrifugiert. Der Bodensatz wird mit etwas Wasser aufgeschlämmt und ebenfalls ein weiteres Mal zentrifugiert, um weitere (vorher noch nicht von den Wurzeln abgetrennte) Kautschukpartikel zu gewinnen.

Die Flüssigkeit wird mit den an der Oberfläche schwimmenden Feststoffen durch ein feines Sieb gegossen (Maschenweite: 0,125 mm). Um zu verhindern, dass der Bodensatz ebenfalls in das Sieb gelangt, kann ein passender Stopfen mit Stab (ähnlich eines Pressfilters) auf den Bodensatz gedrückt werden. Im Sieb werden die weißen Kautschukpartikel aufgefangen und in einem Mörser bearbeitet, bis sie zusammenhaften.⁵¹

Beobachtung: Je nach Einstellung der Mühle bildet sich ein mehr oder weniger feines Mehl. Beim Erwärmen in Wasser weichen die Wurzelbestandteile auf und das Wasser färbt sich braun. Nach dem Zentrifugieren schwimmen kleine weiße Kautschukpartikel an der Flüssigkeitsoberfläche, die im Sieb aufgefangen oder mithilfe einer Pinzette eingesammelt werden können. Dies ist auf den Dichteunterschied von Kautschuk verglichen mit Wasser zurückzuführen. Beim Mörsern haften sie zusammen und ergeben ein gräuliches Produkt, das beim Trocknen dunkler wird und nach 1-2 Tagen eine braun-schwarze Färbung hat.

⁵¹ Ideen für den Einsatz von Getreide- oder Kugelmühlen, sowie für den Einsatz einer Zentrifuge zur Abtrennung des Kautschuks bzw. des Aufschwimmens der Kautschukpartikel in wässriger Lösung stammen aus Javorsky (1944); Eskew und Edwards (1946); Ulmann (1951) und Buranov (2009).



Abbildung 39: Kautschuk, gewonnen durch Mahlen, Zentrifugieren und anschließendes Mörsern

Auswertung: Die Möglichkeit zur Gewinnung von Kautschuk durch Zentrifugieren ergibt sich aufgrund der geringen Dichte des Kautschuks. Naturlatex aus *Taraxacum kok-saghyz* hat ein spezifisches Gewicht von etwa 0,97 (vgl. Ulmann 1951, S. 489), die Dichte von (herkömmlichem) Naturkautschuk wird in der Regel mit $0,934 \text{ g cm}^{-3}$ (bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$) angegeben. Wenn die getrockneten Wurzeln nicht ausreichend fein gemahlen werden, gestaltet sich eine Trennung über die Dichte schwierig. Dies liegt daran, dass der Kautschuk dann noch in direkter Verbindung mit dem holzigen Pflanzengewebe vorliegt, welches sich mit Wasser vollsaugt und dann mit den restlichen holzigen Bestandteilen zu Boden sinkt.

Anmerkungen: Eine einfache Handzentrifuge ist für diesen Versuch ebenso gut geeignet wie die elektrische Variante, falls keine elektrische Zentrifuge zur Verfügung steht.

In aktueller Forschungsliteratur (Fischer et al. 2017; Prüfer) sowie auch in einem neueren Schulbuch (vgl. Chemie heute 2015) (vgl. Abbildung 40) wird auf den Einsatz spezieller Kugelmöhlen und Reaktoren in der Industrie zur Separierung des Kautschuks von den übrigen Wurzelbestandteilen verwiesen, mithilfe derer „in einem kurzen Zeitraum die effiziente Reindarstellung des Rohstoffs erfolgen [kann], womit der Gesamtprozess ressourcenschonend, energieeffizient und umweltfreundlich ist“ (Fischer et al. 2017, S. 328)⁵². Im Rahmen der Entwicklung der hier vorgestellten Experimente wurde ebenfalls ein Verfahren zur Gewinnung des Kautschuks mithilfe einer Kugelmühle erprobt, welches jedoch nicht als erfolgreich angesehen werden konnte. Aufgrund der Tatsache, dass

⁵² Aus Gründen der Geheimhaltung des Prozesses war es nicht möglich, detailliertere Informationen dazu zu erhalten.

in Schulen in der Regel keine Kugelmöhlen vorhanden sind und ein entsprechender Reaktor mit einfachen Mitteln nicht nachempfunden werden kann, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

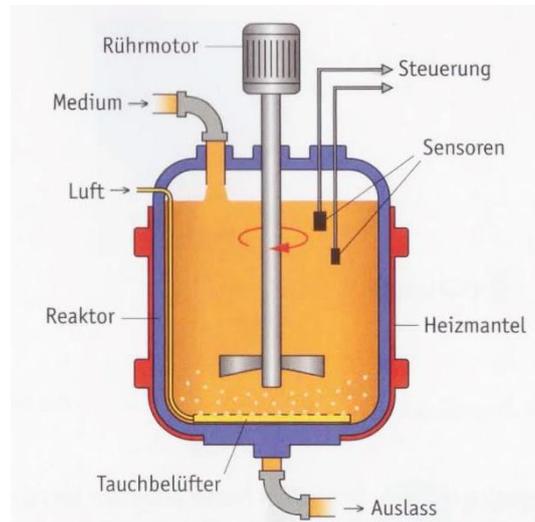


Abbildung 40: Modell eines Bioreaktors zur Herstellung von Löwenzahnpolymeren in einem Schulbuch (Chemie heute 2015, S. 239)

4.1.1.4 Gewinnung von Kautschuk durch Lösen in Petroleumbenzin

Material: Mörser mit Pistill *oder* Gefrierbeutel und Hammer *oder* Getreidemühle *oder* Schere, Apparatur zur Vakuumfiltration, Sieb, Abdampfschale, Becherglas, Glasstab, 1 kleine Handvoll getrocknete Wurzeln, 1 kleiner Löffel Sand, Petroleumbenzin (Siedebereich 40–60 °C) *oder* Heptan

Durchführung: Die getrockneten Wurzeln werden in der Mühle oder mit anderen Hilfsmitteln wie Schere, Hammer, Mörser oder Getreidemühle zerkleinert. Im Mörser werden die Wurzelstücke und ein Löffel Sand mit Petroleumbenzin überschichtet. Mit dem Pistill wird die Mischung noch einmal kräftig bearbeitet und anschließend 2-3 Minuten stehen gelassen. Zur Abtrennung des Kautschuks wird die Flüssigkeit durch ein feinmaschiges Sieb gegossen oder mithilfe der Wasserstrahlpumpe über einen Büchnertrichter abgenutscht. Die Rückstände im Filter sowie im Mörser werden mit etwas Benzin ausgewa-

schen. Das Filtrat wird in eine Abdampfschale überführt und zum Abdampfen des Lösungsmittels im Abzug 30-40 Minuten lang stehen gelassen. Der Rückstand im Filter aus Wurzelresten und Sand wird verworfen.⁵³

Beobachtung: Das ursprünglich farblose Benzin färbt sich gelblich und trübt sich leicht. Nach dem Abdampfen des Lösemittels in einer Abdampfschale bleibt ein gelbbrauner elastischer Film zurück. Dieser lässt sich mit einer Pinzette vorsichtig abziehen. Durch Mörsern erhält man ein zusammenhängendes Stück Kautschuk.



Abbildung 41: Extraktion von Kautschuk mit Benzin

Auswertung: Kautschuk lässt sich zu großen Teilen in Petroleumbenzin bzw. Heptan lösen. Der Sand sorgt durch die Körnung für eine größere Oberfläche des Wurzelmaterials und somit für ein verbessertes Herauslösen des Kautschuks. Es kann sinnvoller sein, die Wurzel-Sand-Benzinmischung durch ein feines Sieb zu gießen als sie zu filtrieren, da bei der letztgenannten Methode der Kautschuk den Trichter sowie den Filter verkleben kann.

Bei einer eingesetzten Menge getrockneter Wurzeln von 7 g wurden 0,19 g Produkt erhalten, das neben Kautschuk wahrscheinlich noch einige Verunreinigungen (und Harze) enthält. Die Masse des Produkts entspricht einem Anteil von 2,7 %. Bei einem durchschnittlichen Kautschukgehalt von etwa 3 % in den Wurzeln des russischen Löwenzahns, ist das Ergebnis durchaus positiv einzuschätzen.

Anmerkungen: Es ist zu beobachten, dass die Kautschukprobe nach einer Lagerungszeit von mehreren Monaten klebrig wird. Dies könnte auf die Viskoelastizität von Kautschuk und auf die oxidativen Einflüsse der Umwelt zurückzuführen sein.

⁵³ Dieses Experiment lehnt sich an in Ulmann (1951) beschriebene Extraktionsmethoden an und wurde für schulische Gegebenheiten modifiziert.

Das Experiment kann im Rahmen einer einzelnen Chemiestunde vorbereitet werden und bis zum nächsten Mal zum Abdampfen stehen gelassen werden. Aufgrund der leichten Flüchtigkeit des Benzins sollte der Versuch unter dem Abzug durchgeführt werden.

4.1.1.5 Gewinnung von Kautschuk durch Lösen des Wurzelgewebes mit Natronlauge

Material: Wasserbad, Heiz- und Rührplatte, Rührfisch, Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Petrischale, Löffel, Pinzette, evtl. Handschuhe, kleines Becherglas, getrocknetes Wurzelmaterial (1 Stück à 3-5 cm pro Reagenzglas), Natronlauge (3 %ig), heißes Wasser

Durchführung: In ein Reagenzglas wird ein etwa 3-5 cm langes Wurzelstück gegeben. Dieses wird mit etwa 3 %iger Natronlauge übergossen und eine Stunde lang im Wasserbad gekocht (Rührfisch ins Wasserbad geben, um Siedeverzug zu vermeiden). Die Natronlauge muss die Wurzelstücke bedecken. Die Wurzel wird mit der Pinzette entnommen und auf einer Glasunterlage mit einem Löffel vorsichtig gerieben (auseinandergezogen). Dabei ist darauf zu achten, dass man das elastische Netz nicht zerstört (zerreißt) und dass man die letzten hölzernen Teile sowie den Zentralzylinder entfernt. Anschließend wird das Wurzelstück mithilfe der Pinzette vorsichtig in heißem Wasser ausgewaschen und danach erneut in der Petrischale ausgebreitet. Erst nach gründlichem Auswaschen kann das Produkt auch mit bloßen Händen angefasst und auf elastische Eigenschaften geprüft werden.⁵⁴

Beobachtung: Während des Kochens färbt sich die Natronlauge (im Reagenzglas) langsam dunkelbraun und trübt sich leicht. Es ist leichte Schaumbildung zu beobachten. Nach dem Kochen und vorsichtigen Auswaschen hat sich der Großteil des Wurzelgewebes abgelöst und es bleibt ein weißlich-beiges Material von netzartiger Struktur und elastischen Eigenschaften zurück. Durch abwechselndes Mörsern und Trocknen lässt sich eine zusammenhängende Masse gewinnen.

⁵⁴ Das hier entwickelte Vorgehen baut auf Methoden, die in Ulmann (1951) beschrieben werden, auf.

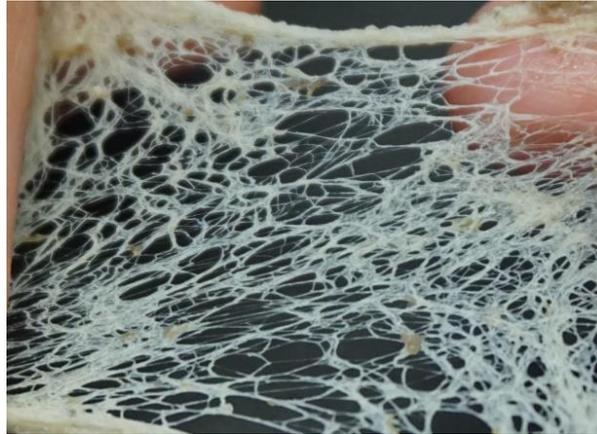


Abbildung 42: Kautschuknetz⁵⁵



Abbildung 43: Kautschuk, gewonnen aus mehreren getrockneten Wurzelstücken durch Kochen in Natronlauge



Abbildung 44: Kautschuk, gewonnen aus mehreren frischen Wurzelstücken durch Kochen in Natronlauge

Auswertung: Das Kochen der Wurzeln in Natronlauge greift die Faserstruktur des Löwenzahns an.

⁵⁵ Ein Video des Kautschuknetzes ist unter <https://1drv.ms/v/s!Au1RB0Et7YOOgQZMGih7QGxp7LEu> abrufbar (Video: Mareike Göbel).

Die Hydroxidionen der Natronlauge schließen das lignifizierte Holz teilweise auf; ein Prozess, der auch in der Papierherstellung genutzt wird. Dabei werden die Etherbindungen des Lignins hydrolytisch gespalten. Auch die Cellulose (Polysaccharide) wird durch die Lauge gespalten (Gruber o. J.). Die Literatur zeigt ebenfalls, dass „bei der Laugenkochung etwa 78,5 % der Wurzelsubstanzen in Lösung“ gehen (Ulmann 1951, S. 476). Es konnte nachgewiesen werden, dass durch das einstündige Kochen in Natronlauge etwa 50 % des ursprünglich in den Wurzeln vorhandenen Lignins gelöst wird. „Die Abtrennung der restlichen Substanzen [...] vom Kautschuk muß in mechanischen Folgeoperationen erfolgen“ (Ulmann 1951, S. 476).

Auch die in der Wurzel vorhandenen Harze werden von der Lauge herausgelöst und gehen in Seifen über. Die Reaktion erfolgt z. B. nach $C_{19}H_{29}COOH + NaOH \rightarrow C_{19}H_{29}COONa + H_2O$ (vgl. Römpps Chemie-Lexikon 1975, S. 1419). Der koagulierte Kautschuk bleibt in den Milchröhren zurück.

Anmerkungen: Dieser Versuch lässt sich mit trockenen ebenso wie mit frischen Wurzeln durchführen. Statt des Reibens auf einer Petrischale (Glasunterlage) kann die Abtrennung der restlichen hölzernen Bestandteile vom Kautschuk ebenfalls durch Mörsern und wiederholtes Auswaschen gelingen.

In der Literatur wird eine weitere Möglichkeit beschrieben, in der das Wurzelmaterial nach dem Kochen zur vollständigen Abtrennung der holzigen Gewebereste eine Stunde auf einer Schüttelmaschine geschüttelt und anschließend filtriert wird (vgl. Ulmann 1951, S. 413–414). Diese Methode eignet sich für den schulischen Chemieunterricht jedoch insofern nicht, als dass in der Regel keine Schüttelmaschine zur Verfügung steht und dieser Schritt viel Zeit in Anspruch nimmt. Beim Reiben des Wurzelmaterials oder beim Mörsern können die Lernenden hingegen selbst aktiv werden.

4.1.1.6 Gewinnung von Kautschuk über mikrobiologischen Aufschluss

Material: Glas oder Plastikschale mit Deckel, etwas Wasser, einige getrocknete Wurzeln

Durchführung: Einige getrocknete Wurzeln werden in einem verschließbaren Behältnis einige Millimeter hoch mit Wasser benetzt. Der Ansatz wird etwa eine Woche lang bei Raumtemperatur stehen gelassen. Wenn die Wurzeln verfault sind, werden sie gemörsert,

sodass der Kautschuk zusammenhaftet. Restliche holzige Wurzelbestandteile werden immer wieder mit Wasser ausgewaschen. Anschließend wird der Kautschuk getrocknet und noch einmal kräftig zusammengemörsert.⁵⁶

Beobachtung: Nach einigen Tagen bildet sich Schimmel und das Wurzelmaterial weicht auf, ähnlich wie beim Kochen mit Natronlauge. Durch Mörsern lässt sich eine zusammenhängende Masse gewinnen.



Abbildung 45: Durch mikrobiologischen Aufschluss aufgeweichtes Wurzelmaterial



Abbildung 46: Kautschuk, gewonnen durch Fäulnis des Wurzelmaterials sowie Auswaschen und Mörsern

Auswertung: Die entstehenden Fäulnispilze lockern das Wurzelgewebe auf und legen den Kautschuk frei.

Ulmann (1951) beschreibt, dass man im Anschluss an den mikrobiologischen Aufschluss ein faseriges Kautschukprodukt erhält. Wenn das Wurzelmaterial durch vorherige

⁵⁶ Dieses Verfahren baut auf Beschreibungen in Ulmann (1951) auf.

Dampfbehandlung aufgelockert würde, würde für den Fäulnisprozess weniger Zeit benötigt. Der Kautschuk sei gegenüber oxidativen Einflüssen empfindlicher (Ulmann 1951, S. 478-479). Weiterhin ist bei der Beurteilung der Eignung des Versuches zu bedenken, dass nach dem Faulen der Wurzeln kein Inulin mehr gewonnen werden kann.

Anmerkungen: Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine einfache Methode, die ohne größere Investitionen oder Apparaturen durchgeführt werden kann. Aufgrund der Schimmelbildung ist das Experiment für die Schule jedoch eher ungeeignet, da die Schüler nicht in Kontakt mit den Schimmelsporen kommen dürfen.

4.1.2 Gewinnung von Kautschuk aus *frischen* Löwenzahnwurzeln

4.1.2.1 Extraktion von Latexmilch mit Extraktionspuffer

Material: etwa 30 g frische *T. kok-saghyz*-Löwenzahnwurzeln, 200 mL Extraktionspuffer (0,1 % Na₂SO₃/0,2 % NH₃), scharfes Messer *oder* Skalpell *oder* Rasierklinge, Pürierstab und passendes Plastikgefäß, Büchnertrichter aus Glas mit Gummiring, Vakuumschlauch, Saugflasche, Spatel, Zentrifuge, Zentrifugengläser, Eisbad, Waage, Pipette, Becherglas, evtl. Schnappdeckelglas

Durchführung: Ein Extraktionspuffer auf Wasserbasis wird mit 0,1 % Natriumsulfit (Na₂SO₃) und 0,2 % Ammoniak (NH₃) angesetzt und im Eisbad gekühlt (0,2 g Na₂SO₃ und 0,4 g NH₃ in 199,4 g destilliertem Wasser). Das Wurzelmaterial wird mit einer scharfen Klinge vorsichtig klein geschnitten, mit 100 mL des Extraktionspuffers versetzt und 30 Sekunden lang püriert. Die Lösung wird dekantiert und aufbewahrt. Der Wurzelbrei wird mit dem restlichen Extraktionspuffer versetzt, erneut püriert und wieder dekantiert. Zusätzlich wird der Bodensatz abgenutscht, um möglichst den gesamten Extraktionspuffer zurückzugewinnen. Das Filtrat sowie die dekantierte Lösung werden zehn Minuten lang zentrifugiert. Mögliche Ablagerungen an der Oberfläche werden mit einer Pipette isoliert oder vorsichtig abgegossen.⁵⁷

Beobachtung: Nach dem Zentrifugieren können dünne weiße Schlieren auf der Oberfläche festgestellt werden. Diese werden abpipettiert und zur Aufbewahrung in ein Schnappdeckelglas überführt. Dort bildet sich nach einigem Stehenlassen ein deutlich sichtbarer

⁵⁷ Dieses Experiment wurde in Anlehnung an eine Extraktionsvorschrift von Buranov und Elmuradov (2010) erprobt und an schulische Gegebenheiten angepasst.

weißer Film an der Oberfläche der Flüssigkeit. Im Büchnertrichter befinden sich weiße Partikel zwischen dem pürierten Wurzelmaterial, die mit einer Pinzette gesammelt werden können.



Abbildung 47: Dünner Film aus Latexmilch (auf Extraktionspuffer)

Auswertung: Beim Zerkleinern der Wurzelstücke mit dem Pürierstab wird das Wurzelgewebe zerstört. Die Natriumsulfit-Ammoniak-Lösung hat einen pH-Wert im Basischen und sorgt somit dafür, dass der Großteil des Kautschuks in Form von Latex vorliegt. Aufgrund seiner geringeren Dichte sammelt sich der Latex beim Zentrifugieren an der Oberfläche und kann dort vorsichtig abpipettiert werden. Durch den Kontakt mit Luftsauerstoff kann nicht verhindert werden, dass ein kleiner Teil des Kautschuks koaguliert, der sich anschließend im Büchnertrichter findet.

Anmerkungen: Bei diesem Experiment konnten nur geringe Mengen an Latexmilch gewonnen werden. Sofern eine Handzentrifuge zum Experimentieren vorhanden ist, lässt sich dieses Verfahren in der Schule jedoch durchführen.

4.1.2.2 Koagulation von Latexmilch in Essigsäure

Material: etwa 20 g frisches Wurzelmaterial, Petrischale, Einwegpipette, Pinzette oder Spatel, scharfes Messer *oder* Rasierklinge, Mörser mit Pistill, Waage, Zentrifuge, Zentrifugengläser, Becherglas, Uhrglas, Behälter mit Wasser, Essigsäure (25 %ig), Eisessig

Durchführung: Die Pflanze wird gründlich gewaschen und für mindestens 24 Stunden in kaltem Wasser eingelegt. Um den Kautschuk aus der Latexmilch zu gewinnen, werden die Schnitte mit einem scharfen Messer auf einem Uhrglas so angelegt, dass die Wurzelstücke eine Länge von etwa 0,5 cm haben. Es wird kurz gewartet und mit einer Pinzette

oder einem Spatel vorsichtig etwas Druck auf die Wurzel ausgeübt, um möglichst viel Latexmilch austreten zu lassen. Bevor die Wurzelteile in eine Petrischale mit verdünnter Essigsäure (25 %) gegeben werden, wird die aus den Schnittflächen austretende Latexmilch vorsichtig mit einem Spatel abgeschabt und ebenfalls in die Essigsäure überführt. Mögliche Rückstände auf dem Uhrglas werden mit etwas Essigsäure in die Petrischale gespült.

In der Essigsäure koagulierte weiße Partikel werden mit einer Pinzette aufgenommen und im Mörser gesammelt. Die Wurzelstücke werden aus der Essigsäure wieder herausgenommen und auf möglichen weiteren Kautschuk an den Schnittflächen geprüft, der dann ebenfalls eingesammelt wird. Die Essigsäure wird mit einigen Tropfen Eisessig versetzt, auf die Zentrifugengläser verteilt und 15 Minuten lang zentrifugiert. Anschließend werden mögliche Kautschukpartikel von der Oberfläche in den Mörser überführt und zusammen mit den bereits gesammelten Kautschukpartikeln zu einem zusammenhängenden Produkt gemörsert. Das Produkt wird mit destilliertem Wasser gewaschen.

Beobachtung: Beim ersten Schnitt in die Wurzel sieht man eine weiße Flüssigkeit aus dem Wurzelinneren austreten. Ein weißer Tropfen bildet sich auf der Schnittfläche. Weitere Schnitte in die gleiche Wurzel bringen etwas weniger Milch hervor. In der essigsaurigen Lösung werden die Tropfen zu kleinen festen weißen Partikeln. Sehr oft haften die Tropfen beim Überführen in die Essigsäure noch an der Wurzelfläche und lösen sich in der Säure kaum oder nur sehr schwer ab. Auch kräftiges Rühren verändert das Anhaften nicht, sodass die meisten Wurzelschnitzel mithilfe von Messer und Pinzette nachbearbeitet werden müssen. (Weiße Partikel werden von der Schnittfläche abgeschabt.) Es entstehen weiße Partikel an der Flüssigkeitsoberfläche, die mit einer Pinzette abgenommen und in einem Mörser verbunden werden können. Man erhält ein weißliches bis gräuliches Produkt mit gummielastischen Eigenschaften. Nach einigen Tagen verfärbt sich das Produkt und nimmt eine graue bis schwarze Farbe an.



Abbildung 48: Wurzelstücke in Essigsäure (links), koagulierter Kautschuk in Essigsäure (rechts als Ausschnittsvergrößerung)



Abbildung 49: Kautschuk, gewonnen aus etwa 18 g frischen Wurzeln

Auswertung: Durch die Schnittbreite von 0,5 cm soll ein ideales Verhältnis zwischen Turgor⁵⁸ und Länge des Wurzelabschnitts erreicht werden. Bei zu kurzen Wurzelabschnitten geht der Turgor durch die Zerstörung zu vieler Zellen verloren, während bei zu langen Wurzelabschnitten nicht genug Druck vorhanden ist, um die Latexmilch aus der Mitte bis zum Schnittende zu drücken.

Die Latexmilch sollte nach dem Anschneiden für kurze Zeit austreten können bevor die Wurzelabschnitte in die Essigsäure gegeben werden. Dadurch bleiben geringere Mengen Latexmilch in den Milchröhren zurück und die Ausbeute kann erhöht werden. Durch den durch das Einlegen in Wasser aufgebauten Turgor tritt die Latexmilch in stärker verdünnt und größeren Mengen aus als wenn die Wurzeln nicht in Wasser eingelegt worden sind.

⁵⁸ Unter Turgor (Turgordruck) versteht man den Druck des Pflanzensaftes auf die Zellwände. Je nach vorhandenem Druck nimmt die Zelle mehr oder weniger Wasser auf, um ein Gleichgewicht herzustellen. Durch die aufgrund des Turgors entstehende Gewebespannung wird die Pflanze stabilisiert.

Beim anschließenden Kontakt mit Essigsäure koaguliert die Milch und der Kautschuk wird sichtbar.

Anmerkungen: Trotz Zugabe von konzentrierter Essigsäure und anschließendem Zentrifugieren konnte kein weiterer Kautschuk koaguliert bzw. gewonnen werden, sodass diese Schritte in einer Experimentieranleitung für Schüler entfallen können. Um möglichst viel Latexmilch aus frischen Löwenzahnwurzeln zu gewinnen, ist es ratsam, diese vor dem Anschneiden mindestens 24 Stunden lang in kaltem Wasser einzulegen. Dadurch steigt der Turgor (Turgordruck) in den Pflanzenzellen und die Latexmilch kann besser „herausgepresst“ werden.

4.1.3 Analyse des gewonnenen Materials

Im Folgenden werden mehrere Nachweis- und Analysemöglichkeiten für die gewonnenen Produkte vorgestellt. Dazu gehört unter anderem der Nachweis der im Kautschuk vorliegenden Doppelbindungen, aber auch die Analyse IR-spektroskopischer Daten eines Kautschuk-Pyrolysats. Es wurden Verfahren ausgewählt, die für die Lernenden gut nachvollziehbar und in der Schule durchführbar sind bzw. die so oder so ähnlich auch in der Wissenschaft zur Stoffanalyse eingesetzt werden.

4.1.3.1 Nachweis der Doppelbindungen mit Brom

Material: Reagenzgläser, Pipette, Reagenzglasständer, Handschuhe, Kautschukprobe, Stopfen, Bromid-Bromat-Lösung (0,25 g NaBrO₃ und 2,5 g NaBr in 100 mL dest. Wasser), konz. Schwefelsäure

Durchführung: Zur Herstellung von elementarem Brom werden etwa 5 mL der Bromid-Bromat-Lösung mit 2 Tropfen Schwefelsäure versetzt.

In ein Reagenzglas wird eine kleine Kautschukprobe gegeben und 3 mL Bromwasser mit der Pipette hinzugefügt (Handschuhe!). Das Reagenzglas wird mit einem Stopfen verschlossen und geschüttelt. Liegt die zu untersuchende Probe in Lösung vor, werden zu 2 mL der Probe langsam etwas Bromwasser mit der Pipette zugetropft, das Reagenzglas verschlossen und geschüttelt.

Beobachtung: Nach kurzer Zeit tritt eine vollständige Entfärbung der zuvor gelb-bräunlichen Lösung ein.



Abbildung 50: Kautschukprobe aus *Taraxacum kok-saghyz*, gelöst in Petroleumbenzin und versetzt mit Bromwasser

Auswertung: Das Produkt der Bromierung über den Mechanismus der elektrophilen Addition ist ein farbloses Dibromalkan. Die Entfärbung der bräunlichen Lösung zeigt dementsprechend einen positiven Nachweis auf Doppelbindungen an.

Anmerkungen: Der Nachweis von Doppelbindungen mit Brom ist eine typische Nachweisreaktion in der Schule, da der Reaktionsmechanismus nicht zu komplex und damit für die Schüler verständlich ist. Der Mechanismus der elektrophilen Addition ist in den Lehrplänen für Chemie in der gymnasialen Oberstufe der meisten Bundesländer in Grund- und Leistungskurs verankert. Weiterhin ist positiv anzumerken, dass schon nach kurzer Zeit ein Farbumschlag erkennbar ist. Allerdings ist der Umgang mit elementarem Brom nur im Lehrerversuch gestattet, sodass die Schüler nicht selbst aktiv werden können. Ein im Schülerversuch möglicher Nachweis auf Doppelbindungen ist die Baeyer-Probe für Alkene, die im Folgenden mit *T. kok-saghyz*-Kautschuk vorgestellt wird.

4.1.3.2 Baeyer-Probe für Doppelbindungen in *T. kok-saghyz*-Kautschuk

Der Nachweis auf Doppelbindungen durch die Reduktion von Kaliumpermanganat stellt eine einfachere und ungefährlichere Methode als der Nachweis mit Bromwasser dar. Er ist deshalb auch als Schülerversuch durchführbar.

Material: Reagenzglas, zwei Pipetten, Reagenzglasständer, Kautschukprobe, evtl. Benzin oder Toluol als Lösemittel, Kaliumpermanganat-Lösung (0,0001 %ig), Natriumcarbonat-Lösung (0,1 %ig), evtl. Stopfen

Durchführung: In ein Reagenzglas werden jeweils 0,5 g des zu untersuchenden Produktes gegeben und mit der Pipette 2 mL der Kaliumpermanganat-Lösung und 2 mL der Natriumcarbonat-Lösung hinzugefügt. Das Gemisch aus Kaliumpermanganat-Lösung und

Natriumcarbont-Lösung nennt sich Baeyer-Reagenz. Nach Zugabe der Reagenzien wird das Reagenzglas leicht geschwenkt.

Soll das Produkt in gelöster Form auf Doppelbindungen getestet werden, verwendet man jeweils gleiche Volumina an Kautschuk-Lösung, Kaliumpermanganat-Lösung und Natriumcarbonat-Lösung. Da es sich um organische, hydrophobe Lösungsmittel handelt, muss das Gemisch regelmäßig geschwenkt oder leicht geschüttelt werden, um eine Vermischung der beiden Phasen herbeizuführen.

Beobachtung: Die zuvor rosa gefärbte klare Lösung entfärbt sich nach 15-30 Minuten vollständig und es bildet sich ein brauner Niederschlag.

Auswertung: Das im Baeyer-Reagenz enthaltene Kaliumpermanganat ist ein starkes Oxidationsmittel, das über eine elektrophile Addition mit den π -Elektronen von C-C-Doppelbindungen reagieren kann. Es resultiert ein zyklischer Übergangszustand, der dafür verantwortlich ist, dass nach Reaktion mit Wasser die beiden Hydroxygruppen *cis*-ständig angeordnet sind. Als Produkt der Hydrolyse entsteht ein Diol. Das eingesetzte Kaliumpermanganat (Oxidationsstufe VII) wird in einem ersten Schritt zu einem Manganat(V) reduziert und reagiert in einer anschließenden Disproportionierung weiter zu Braunstein (Oxidationsstufe IV), der als Niederschlag ausfällt, und Manganat(VI).

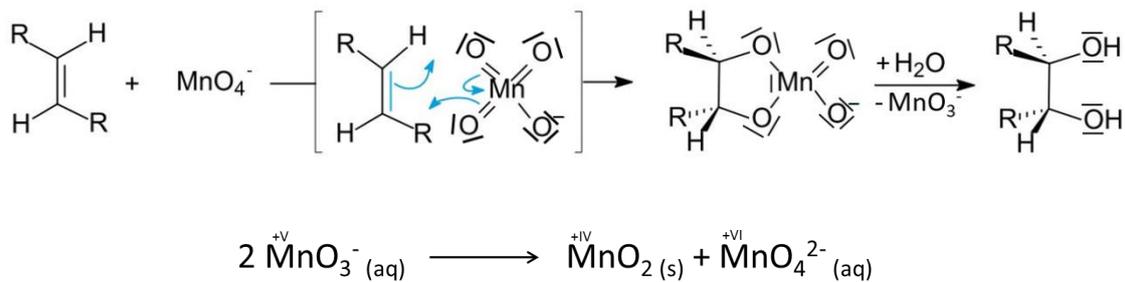


Abbildung 51: Lösung aus Kautschuk in Petroleumbenzin nach Zugabe des Baeyer-Reagenz

Anmerkungen: Aufgrund der relativ ungefährlichen Chemikalien und der schnellen Durchführbarkeit eignet sich der Versuch prinzipiell gut für die Schule. Durch den gut sichtbaren Effekt ist der Versuch für den Unterricht geeignet, um das Vorhandensein von Doppelbindungen sichtbar zu machen und somit strukturelle Eigenschaften von Kautschuk kennenzulernen. Da der Mechanismus der Bildung des vicinalen Diols recht kompliziert ist, bietet es sich hier eher an, das Aufstellen von Redoxgleichungen zu wiederholen. Soll jedoch der Mechanismus zur Addition an Doppelbindungen im Vordergrund stehen, bietet sich eine Diskussion der elektrophilen Addition von Brom eher an.

Bei der Baeyer-Probe sowie auch bei der Bromierung handelt es sich um unspezifische qualitative Nachweise für Doppelbindungen, sodass die Entfärbung der Permanganat- bzw. Brom-Lösung auch auf eventuell vorhandene Fettsäuren zurückzuführen sein kann.

4.1.3.3 Aufreinigung des gewonnenen Kautschuks

Bevor ein spezifischer Kautschuknachweis oder infrarotspektroskopische Untersuchungen am gewonnenen Produkt durchgeführt werden können, sollte die Kautschukprobe gereinigt werden, indem die noch enthaltenen Harze mittels Soxhlet-Extraktion abgetrennt werden.

Material: Soxhlet-Apparatur (Stativ mit Klemmen und Muffen, Hebebühne, Heizhaube, 2-3 Siedesteine, 300 mL Rundkolben, Soxhlet-Aufsatz, Extraktionshülse, Rückflusskühler, 2 Schläuche für Zu- und Abwasser, Schlauchklemmen), Pinzette, Uhrglas Schliff Fett, 150 mL Aceton, Kautschukprobe aus russischem Löwenzahn

Durchführung: Die zu reinigende Kautschukprobe wird mit einer Schere in kleine Stücke geschnitten. Im Soxhlet-Extraktor wird die Kautschukprobe zwei Stunden lang mit Aceton gereinigt. Anschließend wird das Produkt aus der Extraktionshülse genommen und zum Trocknen (Verdampfen des restlichen Acetons) auf ein Uhrglas gelegt.

Beobachtung: Nach einiger Zeit trübt sich das Aceton im Rundkolben. Die Menge der eingesetzten Probe schrumpft und die Stücke kleben leicht aneinander. Nach dem Trocknen hat die Probe eine bräunliche Farbe.

Auswertung: Während des Reinigungsvorgangs werden die neben dem Kautschuk in der Probe vorhandenen Harze, Öle, Wachse und Pflanzensäuren extrahiert (vgl. Ostromow 1981, S. 5; Ulmann 1951, S. 405-406). Dies ist notwendig, um eine möglichst reine Probe in den nachfolgend beschriebenen Experimenten zu analysieren.

4.1.3.4 Pyrolyse und Farbnachweis nach Burchfield

Material: 2 Reagenzgläser, Bunsenbrenner, Stopfen mit Loch, gebogenes Glasrohr, Reagenzglas­klemme, Wasserbad, gereinigte Kautschukprobe, Reagenzlösung (1,0 g *p*-Dimethylaminobenzaldehyd, 0,01 g Hydrochinon, 100 mL Methanol, 5 mL konz. Salzsäure, 10 mL Ethylenglykol), 5 mL Methanol

Durchführung: Die vorbereitete Probe wird in das Reagenzglas eingefüllt und mit einem Bunsenbrenner (blauer Kegel) unter leichtem Bewegen erhitzt, bis Zersetzung eintritt. Das Reagenzglas wird so gehalten, dass die Dämpfe über das gebogene Glasrohr in das zweite Reagenzglas übergehen und sich an den dortigen kühleren Zonen niederschlagen. Wenn die Zersetzungsdämpfe am offenen Ende des Glasrohres austreten, werden sie im zweiten Reagenzglas in etwa 1,5 mL der Reagenzlösung eingeleitet. Es ist darauf zu achten, dass keine teerigen Produkte mit überdestillieren. Nach dem Abkühlen werden der Lösung 5 mL Methanol zugefügt und die Lösung 3 Minuten lang im Wasserbad gekocht.

Beobachtung: Die Kautschukprobe färbt sich schwarz und es steigt weißer Rauch im Reagenzglas auf. An den kühleren Zonen der Apparatur scheiden sich gelb-bräunliche, viskose Tropfen ab. Beim Überdestillieren in die Reagenzlösung läuft das Pyrolysat auf dem Boden der Reagenzlösung als eine kleine, flüssige, rotbraune Kugel zusammen. Die Reagenzlösung färbt sich violett. Beim Erwärmen mit Methanol intensiviert sich diese Färbung.



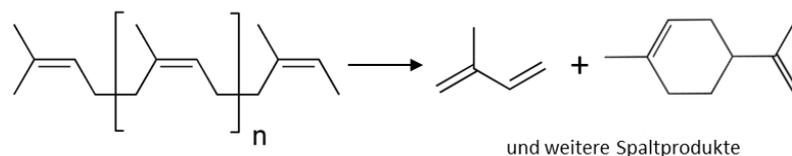
Abbildung 52: Pyrolysegase bei der Pyrolyse des gewonnenen Kautschuks



Abbildung 53: Färbung der Reagenzlösung nach Einleiten der Pyrolysegase

Auswertung: Bei diesem Nachweis handelt es sich um eine Farbreaktion, anhand derer, je nach Kautschukprobe und je nach entstehenden Fragmenten, verschiedene Kautschuktypen identifiziert werden können. Nach H. P. Burchfield ist eine blau-violette Färbung der Reagenzlösung nach Einleiten der Dämpfe und Erwärmen mit Methanol charakteristisch für die Anwesenheit von Naturkautschuk (vgl. Burchfield 1945, S. 807; Ostromow 1981, S. 99). Eine rote Färbung wäre hingegen charakteristisch für Acrylnitril-Butadien-Kautschuk und eine grüne Färbung für Styrol-Butadien-Kautschuk⁵⁹.

Bei der Pyrolyse von Polymeren entstehen sowohl Gase als auch Flüssigkeiten und Feststoffe. Als Produkte liegen vor allem die zugehörigen Monomere und Dimere sowie weitere Kohlenwasserstoffe vor. Analysen haben gezeigt, dass in Naturkautschuk-Pyrolysaten vor allem Isopren, Dipenten und Pentene nachweisbar sind (vgl. Madorsky 1964).



Da der Reaktionsmechanismus unklar ist, wird vermutet, dass sich ein Komplexsalz bildet, welches für die jeweils charakteristische Färbung verantwortlich ist (vgl. Burchfield 1945, S. 807).

⁵⁹ Zur Absicherung dieses Experiments wurde eine Vergleichsprobe mit Kautschuk aus *Hevea brasiliensis* durchgeführt, die zum gleichen Ergebnis führte.

Eine mögliche Reaktion der Bildung des Komplexsalzes könnte über eine säurekatalysierte elektrophile Addition des Aldehyds an das Isopren und anschließende Eliminierung von Wasser und Chlorwasserstoff erfolgen. Aufgrund der hohen Temperaturen während der Pyrolyse und des stark sauren Milieus handelt es sich jedoch lediglich um eine Vermutung.

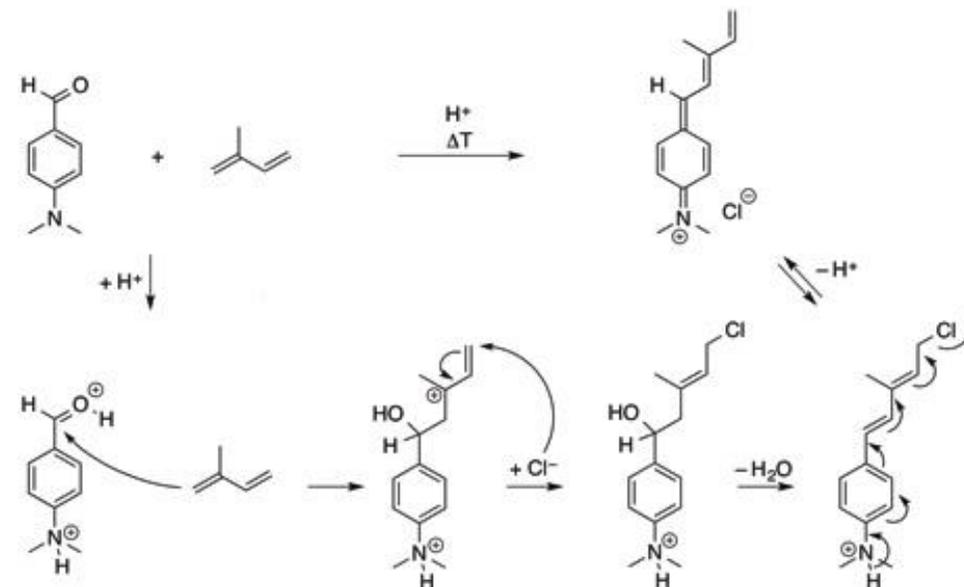


Abbildung 54: Möglicher Reaktionsmechanismus zur Burchfield-Reaktion, beispielhaft dargestellt mit Isopren⁶⁰

Anmerkungen: Aufgrund der Gefährlichkeit der Pyrolyseprodukte (es entsteht unter anderem Isopren, ein als karzinogen (Kat. 1B) eingestufte Stoff) und deren Flüchtigkeit kann dieses Experiment in der Schule nur „beim Arbeiten mit kleinstmöglichen Ansätzen“ und „unter Beachtung der entsprechenden Schutzmaßnahmen“ durchgeführt werden (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2017, S. 25). Das bedeutet, dass unbedingt im Abzug gearbeitet werden muss.

Für schulische Zwecke ist es möglich, die Extraktion der Harze zur Reinigung des Kautschuks zu übergehen, da dies keinen Einfluss auf die Färbung der Reagenzlösung zu nehmen scheint.

⁶⁰ Bei diesem Reaktionsmechanismus handelt es sich lediglich um einen Vorschlag, der bisher wissenschaftlich nicht diskutiert wurde.

4.1.3.5 IR-Spektroskopie der Pyrolyseflüssigkeit

Material: IR-Spektrometer, Küvettenfenster zur Spektroskopie, Reagenzglas, Bunsenbrenner, Pipette, gereinigte Kautschukprobe, Heptan, evtl. feuchtes Tuch zum Kühlen der Reagenzglas-Öffnung

Durchführung: Die Kautschukprobe wird wie bereits beschrieben pyrolysiert. Die kondensierte Pyrolyseflüssigkeit wird mit einer Pipette aufgenommen, auf ein Küvettenfenster aufgebracht und spektroskopiert.

Im Anschluss an die Spektroskopie wird das Küvettenmaterial mit Heptan oder Aceton gereinigt.

Beobachtung: An den kühleren Bereichen des Reagenzglases schlägt sich eine gelbbraunliche Flüssigkeit nieder. Folgendes IR-Spektrum wurde aufgenommen (vgl. Abbildung 55).

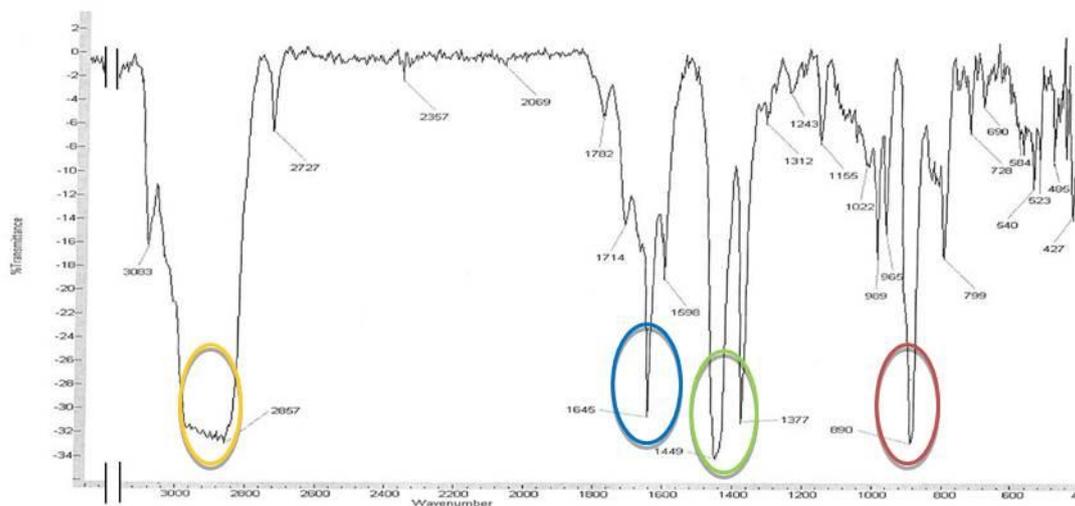


Abbildung 55: IR-Spektrum des Pyrolysats aus selbst gewonnenem Löwenzahnkautschuk (charakteristische Banden sind farblich markiert)

Auswertung: Durch die substanzspezifische Absorption von Infrarotstrahlung können anhand der Banden in aufgenommenen Spektren Substanzen identifiziert und funktionelle Gruppen detektiert werden.

Es bietet sich an, das aufgenommene Spektrum mit den Spektren von Isopren und Dipenten aus der Literatur zu vergleichen. Im Folgenden sind die beiden Spektren abgebildet und charakteristische Banden, die sich auch im aufgenommenen Spektrum des Löwenzahnkautschuk-Pyrolysats finden, farblich markiert.

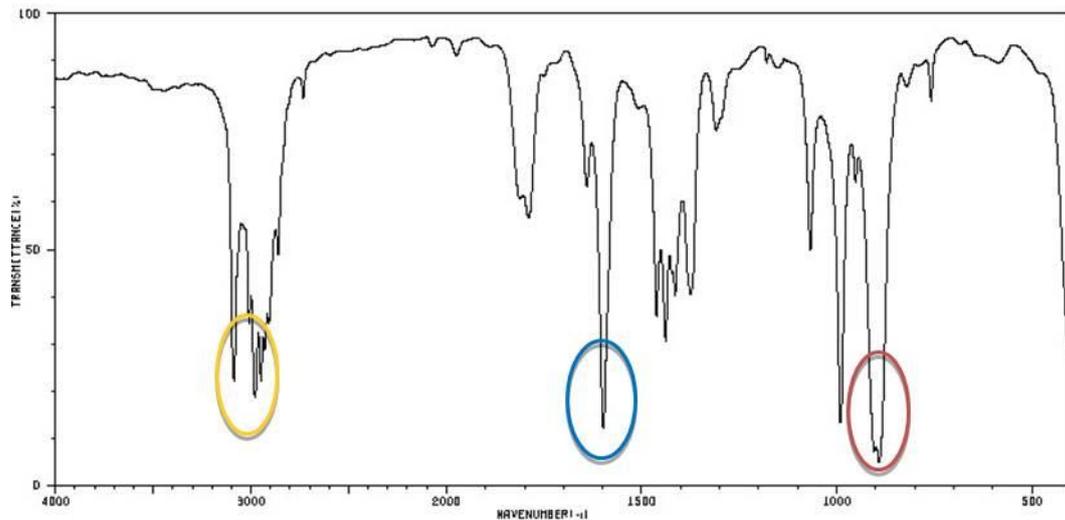


Abbildung 56: IR-Spektrum von Isopren (Spectral Database for Organic Compounds (SDBS))

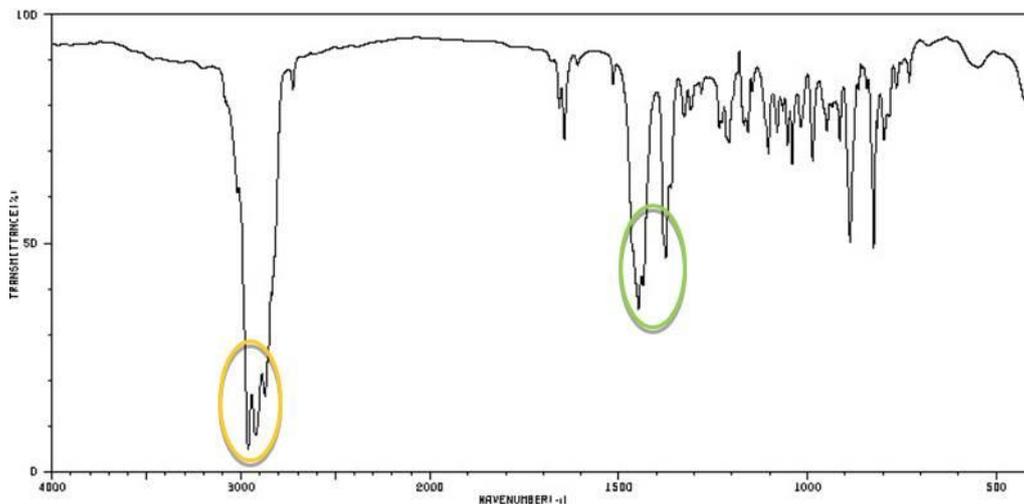


Abbildung 57: IR-Spektrum von Dipenten (Spectral Database for Organic Compounds (SDBS))

Wie man anhand der Spektren erkennen kann, finden sich charakteristische Peaks bei etwa 885 cm^{-1} , bei etwa 1450 cm^{-1} , bei 1645 cm^{-1} und im Bereich von 3000 cm^{-1} . Der Peak bei 1645 cm^{-1} ist charakteristisch für eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung (blaue Markierung). Im Bereich von unter 1500 cm^{-1} spricht man vom Fingerprint-Bereich, der durch die Absorption von Schwingungskopplungen substanzspezifisch ist. Der Peak bei 885 cm^{-1} ist demnach charakteristisch für Naturkautschuk-Pyrolysate (rote Markierung) (vgl. Ostromow 1981, S. 107; De 2002, S. 84; Gross 1974, S. 227). Banden bei etwa 1470 cm^{-1} und 1380 cm^{-1} treten bei fast allen Spektren organischer Substanzen auf und lassen sich auf Deformationsschwingungen in C-H-Bindungen zurückführen ($-\text{CH}_2$ und $-\text{CH}_3$ -Gruppen; grüne Markierung). Auch die breite Bande bei einer Wellenzahl von

etwa 3000 cm^{-1} tritt in den meisten Spektren auf und ist auf CH-Gruppen von ungesättigten Kohlenwasserstoffen zurückzuführen (gelbe Markierung) (vgl. Günzler und Gremlich 2003, S. 169).

Anmerkungen: Eine Möglichkeit, die IR-Spektroskopie von Kautschuk-Pyrolyseprodukten im Unterricht zu thematisieren, ohne dass die Lernenden mit den giftigen Pyrolysedämpfen in Kontakt kommen, besteht darin, die Funktionsweise der Analyse lediglich theoretisch zu thematisieren und anschließend das Spektrum des Löwenzahnkautschuk-Pyrollysats mit verschiedenen Spektren aus der Literatur zu vergleichen. Eine entsprechende Fotostrecke findet sich im Anhang (Teil II).

4.1.3.6 Färbung der Milchröhren mit Sudan III oder Sudanschwarz B

Material: 0,02 g Sudan III, 10 mL Ethanol (90 %ig), 10 mL Glycerin in Formaldehyd : Eisessig : Ethanol (70 %ig) im Verhältnis 5:5:90, in dieser Mischung fixierte Pflanzenprobe, Glycerin, Handmikrotom *oder* Rasierklinge, Heizplatte, Reagenzglasklemme, Objektträger mit Deckgläsern, Bastelkleber, Mikroskop mit bis zu 400-facher Vergrößerung

Durchführung: Zunächst wird die über Nacht fixierte Pflanzenprobe geschnitten. Dazu wird ein etwa 3 mm langes Stück von der Wurzel abgetrennt, welches anschließend mithilfe der Rasierklinge längs in möglichst dünne „Scheiben“ geschnitten wird. Auf einem Objektträger werden der Wurzelprobe bei Raumtemperatur ein Tropfen der Sudan-Lösung hinzugefügt, 3 Minuten gewartet und die Probe anschließend schnell zum Sieden erhitzt. Dies gelingt am besten, indem der Objektträger kurze Zeit auf eine heiße Heizplatte gelegt wird. Anschließend wird ein Tropfen Glycerin auf den Objektträger gegeben, die Probe mit einem Deckgläschen abgedeckt und mit Bastelkleber verklebt. Nun kann die Probe mikroskopiert werden.⁶¹

⁶¹ Die hier vorgestellte Methode wurde nach Au et al. 2009 abgewandelt. Auf sie wird auch in Wahler et al. 2009 verwiesen.

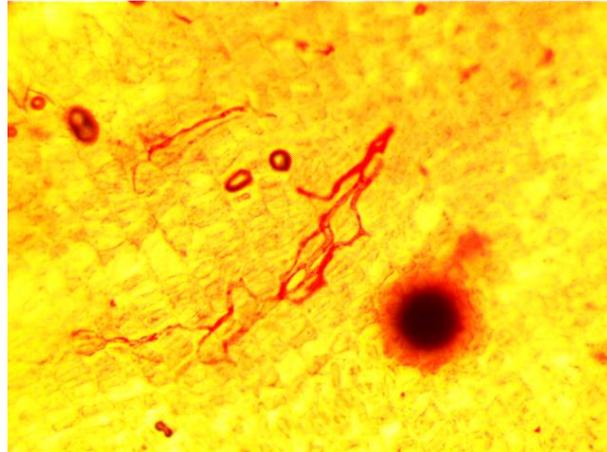


Abbildung 58: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in *Taraxacum kok-saghyz* (100-fache Vergrößerung)

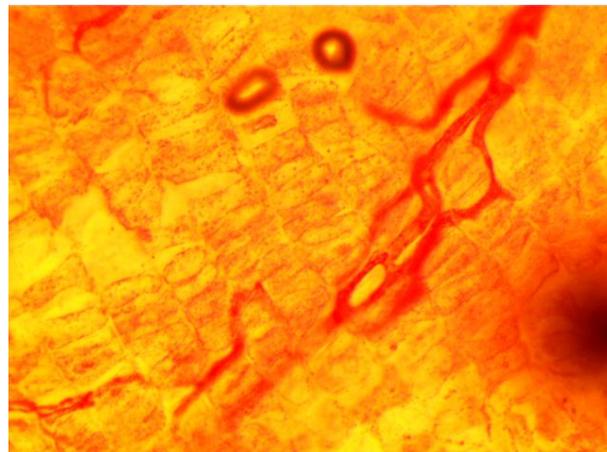


Abbildung 59: Mit Sudan III-Lösung angefärbte Milchröhren in *Taraxacum kok-saghyz* (400-fache Vergrößerung)

Auswertung: Sudan-III-Glycerin-Färbungen werden in der Biologie und Histologie verwendet, um z.B. Fette, Öle und Wachse nachzuweisen. Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen mit Sudan III gefärbte Milchröhren des russischen Löwenzahns. Eine Vernetzung einzelner Röhren untereinander (Anastomosen) ist ebenfalls erkennbar.

Anmerkungen: Sudan III wird üblicherweise verwendet, um Fette nachzuweisen. Die Lipidschicht um die in der Latexmilch vorliegenden Kautschukpartikel wird angefärbt und macht die Milchröhren sichtbar.

Der Einsatz von Sudan III ist der Schule nicht gestattet, da es in karzinogene Amine (wie z.B. das *o*-Toluidin) gespalten werden kann. Die RISU-NRW sieht vor, dass in der Schule

„nur Azofarbstoffe verwendet werden [dürfen] (...), die durch chemische Reduktionsmittel bzw. im Körper durch Darmbakterien und Azoreduktasen der Leber reduktiv in nicht karzinogene Amine gespalten werden“ (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2017, S. 25).

Es wird vorgeschlagen, die Milchröhren statt mit Sudan III mit Paprikaextrakt (aus Paprikapulver oder gehackten Peperoncini in Öl) zu färben, jedoch lässt sich daraus keine intensiv-rote Lösung herstellen, die die Wurzeln anfärben könnte. Dieses Problem kann umgangen werden, indem die Proben von der Lehrkraft vorbereitet und nach der Färbung als Dauerpräparat haltbar gemacht werden, sodass die Schüler beim Mikroskopieren der Probe nicht in Kontakt mit dem Farbstoff kommen können. Im Dunklen aufbewahrt sind die Schnitte mehrere Monate lang haltbar.

Eine weitere Alternative stellt die Färbung der Schnitte mit Sudanschwarz B dar. Dabei handelt es sich ebenfalls um einen Diazofarbstoff, der jedoch nicht als krebserregend eingestuft wird. Probenvorbereitung und Arbeitsablauf können 1:1 übertragen werden.

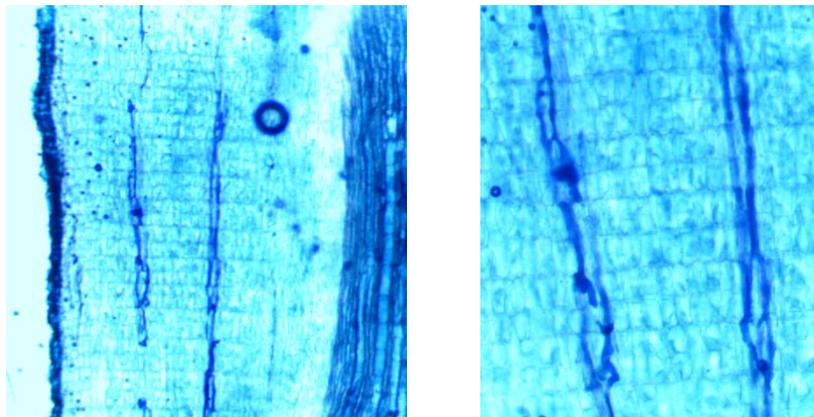


Abbildung 60: Milchröhren in *Taraxacum kok-saghyz*, gefärbt mit Sudanschwarz B (links 40fache Vergrößerung, rechts 100fache Vergrößerung)

Um sicherzustellen, dass sich das Experiment in der Schule durchführen lässt, wurde die Färbemethode zusätzlich mit Wurzelschnitten des heimischen Löwenzahns erprobt. Auch hier lassen sich die Milchröhren, die jedoch keinen Kautschuk tragen, gut sichtbar machen (vgl. Abbildung 61).

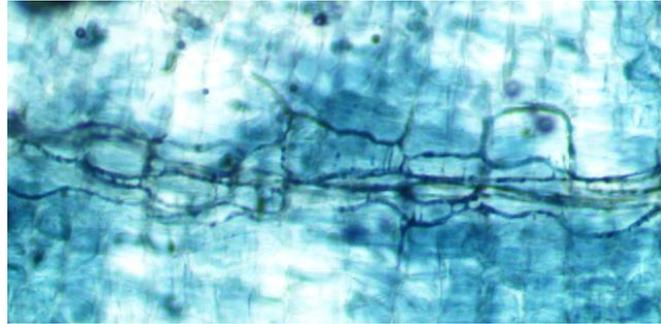


Abbildung 61: Milchröhren in *Taraxacum officinale*, gefärbt mit Sudanschwarz B-Lösung (100fache Vergrößerung)

4.1.4 Weiterverarbeitung des gewonnenen Materials

Neben den verschiedenen Untersuchungsmöglichkeiten für den gewonnenen Löwenzahnkautschuk wird im Folgenden auch ein modellhafter Versuch vorgestellt, wie der Kautschuk zu Gummi weiterverarbeitet und somit auch alterungsbeständiger gemacht werden kann.

4.1.4.1 Vulkanisation einer Probe aus Löwenzahnkautschuk

Material: Mörser mit Pistill, Waage, Wägebepapier, Spatel, Pipette, Tüpfelplatte *oder* kleine Porzellanschale, Kautschukprobe (aus einem der Versuche 4.1.1.2-4.1.1.6), Petrolether (Siedebereich 100-120 °C), Schwefelpulver, Zinkoxid, 1 Tropfen Tensid, Aktivkohle, Vulkanisationsbeschleuniger

(Beispielhafte Angaben bei einer Probe von 0,3 g Kautschuk: 0,045 g Schwefel, 0,0045 g Zinkoxid, 0,03 g Aktivkohle, 0,0075 g Vulkanisationsbeschleuniger)

Durchführung: Um den Kautschuk mit den übrigen Vulkanisationschemikalien vermengen zu können, muss er zunächst in einigen Millilitern Petrolether gelöst werden. Wenn sich eine homogene Lösung gebildet hat, werden in einem Mörser Schwefel, Zinkoxid, Tensid und Ruß gründlich zerrieben und zu einer homogenen Masse verarbeitet. Unter weiterem Mörsern wird die Kautschuk-Petrolether-Mischung zugegeben und im Mörser wiederum zu einer homogenen Masse bearbeitet. Anschließend wird die Mischung mithilfe einer Pipette vorsichtig in eine Abdampfschale oder eine Tüpfelplatte überführt und in einen Abzug gestellt, bis der Petrolether verdunstet ist. Die getrocknete Mischung wird im Trockenschrank bei etwa 130 °C 30 Minuten lang vulkanisiert.

Beobachtung: Nach einem Tag im Petrolether hat sich die eingesetzte Kautschukprobe beinahe vollständig gelöst und die Mischung hat eine hellbraune Färbung angenommen. Beim Mischen mit den Vulkanisationschemikalien bildet sich eine braunschwarz gefärbte Lösung, die nach dem Verdampfen des Lösemittels und der Vulkanisation ein schwarzes, folienartiges Produkt mit leicht gummiartigen Eigenschaften hinterlässt.

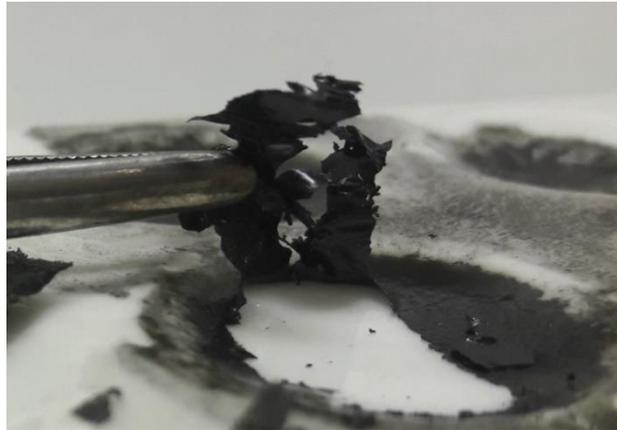


Abbildung 62: Vulkanisierter Löwenzahnkautschuk

Auswertung: In der Industrie werden die Vulkanisationschemikalien durch Mastikation mit dem Kautschuk vermengt. Dies erfordert sehr starke mechanische Kräfte und ist nur maschinell möglich. In diesem Versuch erfolgt daher zunächst ein Lösen des gewonnenen Kautschuks in Petrolether, um die für die Vulkanisation notwendigen Chemikalien besser mit dem Kautschuk mischen zu können.

Während der Vulkanisation werden die relativ frei beweglichen Kautschukmoleküle untereinander vernetzt. Durch Schwefelbrücken werden kovalente Bindungen zwischen den Ketten gebildet. Diese können sich dann nicht mehr völlig frei bewegen, woraus die bekannten gummielastischen Eigenschaften resultieren.

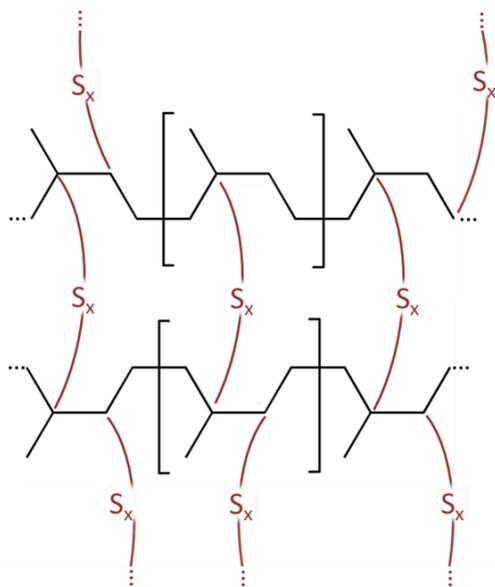


Abbildung 63: Vulkanisation von Naturkautschuk

Anmerkungen: Dieses Experiment ist schwierig, da auch in den Gewinnungsversuchen nur geringe Mengen Kautschuk hergestellt werden. Es muss daher sehr genau gearbeitet werden und Elastizitätsprüfungen mit den gewonnenen Produkten sind bei diesem Ansatz kaum möglich. Weiterhin leidet aufgrund des zusätzlichen Schrittes der Lösung des Kautschuks in Petrolether die Authentizität des Verfahrens, da es unter schulischen Bedingungen und ohne die entsprechenden Gerätschaften nicht möglich ist, die Vulkanisationschemikalien direkt mit dem Kautschuk zu vermengen, die Masse zu mastizieren und anschließend die Vulkanisation durchzuführen.

Um ein generelles Verständnis der Reaktionen während des Vulkanisationsprozesses zu erhalten, kann dieses Experiment einfacher auch mit gekaufter Latexmilch aus *Hevea brasiliensis* durchgeführt werden. Dabei ist zum einen von Vorteil, dass es sich bei Latexmilch um eine wässrige Lösung handelt und demzufolge kein Petrolether eingesetzt werden muss und zum anderen, dass ein größerer Versuchsansatz verwendet werden kann⁶².

⁶² Eine Anleitung für einen solchen Modellversuch findet sich auf den Internetseiten von Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie (<http://www.chemieunterricht.de/dc2/haus/v119.htm>, letzter Abruf: 30.05.2017).

4.2 Entwicklung von Schülerexperimenten zu Inulin aus Löwenzahn

In den Veröffentlichungen von Sommer (und Böckler) findet sich eine Vielzahl von Vorschlägen zu Schülerexperimenten mit Inulin aus verschiedenen Lebensmitteln und Pflanzen. Besonders geeignet erscheinende Experimente wurden zunächst mit gekauften getrockneten Löwenzahnwurzeln (*T. officinale*) nachempfunden und an das Material angepasst. Anschließend wurden die vielversprechendsten Versuche mit getrockneten Wurzeln des *T. kok-saghyz* wiederholt.⁶³

4.2.1 Gewinnung von Inulin aus Löwenzahnwurzeln

Die einfachste Methode zur Gewinnung besteht darin, das Inulin aus den Wurzeln mit siedendem Wasser zu extrahieren und es dann mit Ethanol aus der Lösung auszufällen. Alternativ können vor dem Ausfällen des Inulins mit Ethanol die in der Lösung vorhandenen Pflanzensäuren und Eiweiße durch Zugabe von Calciumhydroxid ausgefällt werden. Diese Methode ist angelehnt an die Verfahren zur Saftreinigung bei der Zuckergewinnung (vgl. Madsen, Rud Frik et al. 2000, S. 494–495). Anstatt die Extraktion mit heißem Wasser durchzuführen, wird in einer dritten Versuchsvorschrift heiße Calciumnitrat-Lösung verwendet (vgl. Metzner 1982, S. 41–42).

In den im Folgenden vorgestellten Experimenten wird Inulin zunächst aus getrockneten Wurzeln des heimischen Löwenzahns (*Taraxacum officinale*) extrahiert, weil dieser in ausreichenden Mengen vorhanden ist.⁶⁴ Ausgewählte Experimente wurden mit Wurzeln des russischen Löwenzahns (*Taraxacum kok-saghyz*) wiederholt. Da die Produkte beinahe identisch sind, wird auf eine explizite Wiederholung der Beschreibung verzichtet.

4.2.1.1 Isolierung von Inulin durch ausschließlichen Einsatz von Ethanol

Material: Bechergläser (250 mL und 600 mL), Löffel, Waage, Heiz- und Rührplatte mit Rührfisch, Küchensieb aus Metall, Büchnertrichter mit Filterpapier, Saugflasche mit

⁶³ Die im Folgenden vorgestellten Experimente wurden im Jahr 2015 im Rahmen einer von der Autorin dieser Dissertation mitbetreuten, nicht veröffentlichten Staatsexamensarbeit an der Universität Siegen entwickelt. Die Arbeit ist im Landesprüfungsamt der Universität Siegen einsehbar.

⁶⁴ Die zur Isolierung des Inulins in den hier vorgestellten Versuchen verwendeten getrockneten Löwenzahnwurzeln wurden im Internet bei *Herbathek Naturheilmittel* (<https://www.herbathek.com/bio-heilkraeuter-tees-gewuerze/einzel-bio-kraeuter/loewenzahnwurzel>, letzter Abruf: 03.05.2017) bestellt.

Gummi-Manschette, Vakuumschlauch, Wasserstrahlpumpe, Kristallisierschale, Kühlschrank, Trockenschrank, Mörser mit Pistill, 20 g gehackte Löwenzahnwurzeln, 150 mL destilliertes Wasser, Ethanol (96 %ig)

Durchführung: 20 g der gehackten Löwenzahnwurzeln werden abgewogen und in ein Becherglas gegeben und mit 150 mL destilliertem Wasser unter ständigem Rühren bis zum Sieden des Wassers erhitzt. Anschließend wird die Löwenzahn-Lösung über einen Büchnertrichter heiß filtriert. Dabei werden die groben Löwenzahnwurzelstückchen mit einem Metallsieb aufgefangen, damit sie den Filter nicht verstopfen. Die Lösung wird in eine große Kristallisierschale oder ein Becherglas gegeben, nach dem Abkühlen mit dem doppelten Volumen an 96 %igem Ethanol versetzt und über Nacht gekühlt. Der entstandene Niederschlag wird über einen Büchnertrichter abgenutscht und etwa 20 Minuten lang bei 80 °C im Trockenschrank getrocknet. Der getrocknete Niederschlag wird in einem Porzellanmörser fein gemahlen.⁶⁵

Beobachtung: Durch das Auskochen der Löwenzahnwurzeln entsteht eine leicht getrübe bräunliche Lösung. Die Wurzelstücke quellen auf. Bei Zugabe der doppelten Menge Ethanol entsteht ein kolloider hellbrauner Niederschlag, der sich über Nacht im Kühlschrank auf dem Boden des Gefäßes absetzt. Beim Filtrieren bleibt ein leicht klebriger, brauner Feststoff auf dem Filterpapier zurück. Das Trocknen im Trockenschrank und anschließende Mahlen im Mörser ergibt ein hellbraunes Pulver mit einer Masse von 0,52 g.



Abbildung 64: Inulin aus Löwenzahn, gefällt mit Ethanol

⁶⁵ Eine ähnliche Versuchsanleitung findet sich bei Sommer (2000, S. 31 ff.), sowie bei Böckler (2007, S. 141 ff.).

Auswertung: Heißes Wasser löst das Inulin aus den Löwenzahnwurzeln heraus. Pflanzensäuren, Eiweiße, Mineralsalze und Farbstoffe sowie andere Verunreinigungen werden ebenfalls extrahiert und liegen in gelöster Form vor, was die bräunliche Färbung der Lösung erklärt. Durch Zugabe von Ethanol im Überschuss fällt das Inulin als weißer feiner Feststoff aus. Dies geschieht aufgrund der stärkeren Wechselwirkungen von Ethanol mit Inulin im Vergleich zu Wasser mit Inulin. Außerdem ist Inulin in Ethanol unlöslich. Inulin bildet in heißem Wasser Wasserstoffbrücken zu den Wassermolekülen, die bei Zugabe von Ethanol in Konkurrenz um die Ausbildung der Wasserstoffbrückenbindungen mit dem Ethanol treten. Durch den Überschuss an Ethanol wird dem Inulin die Hydrathülle entzogen und es fällt aus. Durch die Lagerung über Nacht im Kühlschrank wird dieser Effekt verstärkt.

Durch das Ethanol wird den Eiweißen und Mineralsalzen die Hydrathülle ebenfalls entzogen, wodurch sie mit ausfallen. Die Zugabe von organischen Lösungsmitteln, welche sich mit Wasser unbegrenzt mischen lassen, bewirkt eine Herabsetzung der Polarität der Lösung. Dies führt dazu, dass geladene Proteingruppen aufgrund der verminderten Ausbildung von Wasserstoffbrücken zum Lösungsmittel nicht mehr ausreichend stabilisiert werden, sodass sie ausfallen. Da keine Abtrennung dieser Stoffe in einem vorausgehenden Schritt erfolgt ist, werden sie beim Filtrieren zusammen mit dem Inulin aufgefangen und verunreinigen das Produkt, wodurch dieses im feuchten Zustand leicht klebrig und dunkelbraun ist und nach dem Trocknen eine braune Färbung aufweist. Die Reinheit des Produktes reicht aber für den schulischen Zweck völlig aus, sodass keine weitere Aufreinigung z. B. über Säulenchromatografie erforderlich ist.

Anmerkungen: Eine Isolierung von Inulin in einem Ansatz außerhalb des Labors („Küchen-Ansatz“) zum späteren Probieren des Produkts ist ebenfalls möglich. Dazu werden die Löwenzahnwurzeln mit Küchengeräten verarbeitet und das Filtrat später mit unvergälltem Trinkalkohol versetzt. Dabei fällt etwas Niederschlag aus, der sich jedoch nur schwierig abfiltrieren lässt. Nach Trocknen im Backofen erhält man ein hellbraunes Pulver. Es wurde festgestellt, dass sich ein Ansatz mit getrockneten Wegwartewurzeln leichter filtrieren lässt und auch ein optisch reineres Produkt ergibt.

Gustatorisch lässt sich das gewonnene Pulver als geschmacklos und nicht süß beschreiben. Es hinterlässt einen leicht cremigen Eindruck auf der Zunge. Diese Eigenschaften deuten darauf hin, dass es sich bei dem erhaltenen Produkt um Inulin mit einem relativ hohen durchschnittlichen Polymerisationsgrad handelt.

4.2.1.2 Isolierung von Inulin durch Ausfällen von Nichtzuckerstoffen mit Calcium-Ionen und Einsatz von Ethanol

Material: Bechergläser (250 mL und 600 mL), Löffel, Spatel, Waage, Heiz- und Rührplatte mit Rührfisch, Thermometer, Stativmaterial mit Klemme und Muffe, Küchensieb aus Metall, Büchnertrichter mit Filterpapier, Saugflasche mit Gummi-Manschette, Vakuumschlauch, Wasserstrahlpumpe, Wasserbad, Schale mit Eis, Trockenschrank, Mörser mit Pistill, 20 g gehackte Löwenzahnwurzeln, 150 mL destilliertes Wasser, 2 g Calciumhydroxid, Kohlenstoffdioxid, Universalindikator-Papier, Ethanol (96 %ig)

Durchführung: 20 g der gehackten Löwenzahnwurzeln werden abgewogen und in ein Becherglas gegeben und mit 150 mL destilliertem Wasser unter ständigem Rühren erhitzt, bis die Lösung eine Temperatur von 80 °C erreicht hat. Dann wird die Mischung heiß über einen Büchnertrichter abfiltriert. Die groben Wurzelstückchen werden dabei mit einem Küchensieb aufgefangen. Dem Filtrat werden 2 g Calciumhydroxid zugefügt und es wird dann im Wasserbad so lange erhitzt, bis Koagulation eintritt. Der dabei entstandene Niederschlag wird über einen Büchnertrichter filtriert und das Filtrat durch Einleiten von Kohlenstoffdioxid neutralisiert (Überprüfung des pH-Wertes mit Universalindikator-Papier). Die Lösung wird erneut auf 80 °C erhitzt, bis Calciumcarbonat als weißer Niederschlag ausfällt, der wiederum über einen Büchnertrichter heiß abfiltriert wird.

Nach dem Abkühlen wird das Filtrat so lange mit Ethanol versetzt, bis ein weißer Niederschlag ausfällt. Nach dem Absetzen (etwa 30 Min.) wird er über einen Büchnertrichter abfiltriert (um die Ausbeute zu erhöhen, kann die Lösung über Nacht in den Kühlschrank gestellt werden) und ca. 20 Minuten bei 80 °C im Trockenschrank getrocknet. Abschließend wird der Niederschlag in einem Mörser fein gemahlen.⁶⁶

Beobachtung: Das Filtrat der Heißwasser-Extraktion zeigt eine leicht trübe dunkelbraune Färbung. Die Wurzelstückchen sind aufgequollen. Durch Zugabe des Calcium-hydroxids und anschließendes Erhitzen fällt ein braun-grünlicher Niederschlag aus, der sich auf dem Gefäßboden absetzt und gut über einen Büchnertrichter abfiltriert werden kann. Die Lösung ist danach klar und etwas heller. Beim Einleiten des Kohlenstoffdioxids fällt ein feiner weißer Niederschlag aus, der die Lösung leicht trübt. Beim Erhitzen auf 80 °C bildet sich noch mehr feiner weißer Niederschlag. Nach dem Abfiltrieren über den Büchnertrichter ist die Lösung wieder klar. Durch Zugabe von Ethanol fällt zuerst wenig feiner

⁶⁶ Diese Methode wird in einem Handbuch zur Zuckertechnologie als ein sehr häufig eingesetztes Verfahren beschrieben (vgl. Madsen, Rud Frik et al. 2000).

weißer Niederschlag aus, der nach einer Wartezeit von 30 Minuten deutlich mehr geworden ist. Das Trocknen im Trockenschrank und anschließende Mahlen ergeben ein feines, leicht bräunliches Pulver. Die Ausbeute beträgt 0,7 g.



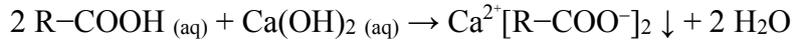
Abbildung 65: Weißer Niederschlag nach Zugabe von Ethanol



Abbildung 66: Inulin aus Löwenzahn, nach Ausfällen der Salze mit Calciumhydroxid

Auswertung: Durch das Auskochen der Wurzeln wird das darin enthaltene Inulin im Lösungsmittel Wasser gelöst, da es in heißem Wasser Wasserstoffbrückenbindungen ausbildet. Andere Pflanzenstoffe, wie Mineralsalze, Pflanzensäuren, Eiweiße und Farbstoffe sowie andere Verunreinigungen werden ebenfalls aus den Wurzeln herausgelöst und liegen in gelöster Form vor, was die bräunliche Färbung der Lösung erklärt. Durch die Zugabe von Calciumhydroxid als unspezifisches Fällungsmittel werden die Pflanzensäuren, andere in der Lösung befindliche Anionen und Kationen sowie Eiweißstoffe und Pektine größtenteils aus der Lösung ausgefällt und können durch Filtration abgetrennt werden.

Die Fällung der in der Lösung befindlichen Pflanzensäuren bzw. deren Anionen (z. B. Malat, Oxalat und Citrat) erfolgt durch das Behandeln mit einer Base. Es handelt sich also um eine einfache Neutralisationsreaktion unter Bildung von Carboxylatsalzen:



Andere in der Lösung befindliche anorganische Anionen, wie beispielsweise Phosphat, werden ebenfalls als Calciumsalze ausgefällt. So entstehen aus anorganischen und organischen Anionen unlösliche und teilweise lösliche Calciumsalze. In Lösung befindliche Magnesium-Ionen werden durch den hohen pH-Wert als unlösliches Magnesium-Hydroxid ausgefällt.

Die Proteinfällung hingegen erfolgt durch chemische Denaturierung der Proteine, zum einen durch die Calcium-Ionen und zum anderen durch den hohen pH-Wert der Lösung. Die Hofmeister-Reihe (vgl. Abbildung 67), die Fällungswirkungen verschiedener Salze auf Proteine beschreibt, zeigt, dass Calcium-Ionen eine chaotrope Wirkung haben, das heißt, dass sie die nicht-kovalenten Wechselwirkungen der Aminosäuren, aus denen Proteine bestehen, vermindern. So wird die Tertiärstruktur der Proteine zerstört, sie denaturieren und fallen aus.

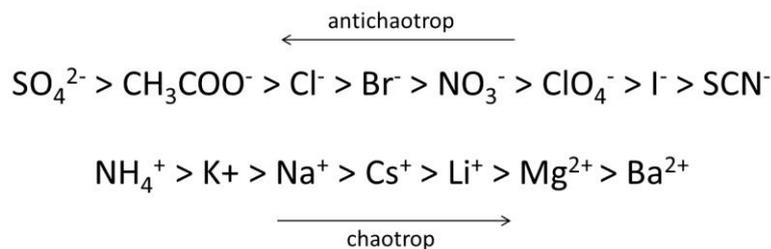
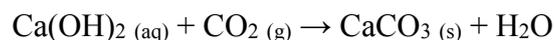


Abbildung 67: Hofmeister-Reihe (hinsichtlich der Stabilisierung hydrophober Wechselwirkungen) (vgl. Gey 2015, S. 166)

Das überschüssige Calciumhydroxid wird durch Einleiten von Kohlenstoffdioxid in Form von unlöslichem Calciumcarbonat ausgefällt:



Da die Löslichkeit von Calciumcarbonat in Anwesenheit von gelöstem Kohlenstoffdioxid im Wasser durch die Bildung von Calciumhydrogencarbonat erhöht wird, ist es wichtig, dass die Lösung nach dem Einleiten von CO_2 auf ca. 80 °C erhitzt wird. Das Gleichgewicht der Umwandlung von Calciumcarbonat in Hydrogencarbonat verschiebt sich bei

Temperaturen über 70 °C auf die des Carbonats, da die Löslichkeit des Kohlenstoffdioxids abnimmt und dieses als Gas aus der Lösung entweicht, wodurch gleichzeitig die Löslichkeit von Calciumcarbonat abnimmt und dieses als Feststoff aus der Lösung ausfällt. Calciumcarbonat dient beim Abfiltrieren als Filtrationshilfsmittel, an dem Nichtzuckerstoffe, wie die noch in der Lösung befindlichen Salze, Pektine und Farbstoffe, haften bleiben und somit ebenfalls aus der Lösung entfernt werden (vgl. Madsen, Rud Frik et al. 2000, S. 494–495).

Wird nun Ethanol zu der Lösung hinzugegeben, fällt Inulin als weißer Feststoff aus. Dies liegt in der Verminderung der Wechselwirkungen mit Wasser begründet und da Ethanol in Konkurrenz mit dem Inulin um die Wasserstoffbrückenbindungen tritt. Da die Farbstoffe in der Lösung nicht vollständig entfernt wurden, weist das getrocknete Inulin noch eine leicht bräunliche Färbung auf.

4.2.1.3 Extraktion von Inulin mit heißer Calciumnitrat-Lösung und Einsatz von Ethanol

Material: Bechergläser (250 mL und 600 mL), Löffel, Waage, Heiz- und Rührplatte mit Rührfisch, Küchensieb aus Metall, Büchnertrichter mit Filterpapier, Saugflasche mit Gummi-Manschette, Vakuumschlauch, Wasserstrahlpumpe, Handzentrifuge, 4 Zentrifugengläser, Messpipette 10 mL, Glasschale mit Eis, Trockenschrank, Mörser mit Pistill, 20 g gehackte getrocknete Löwenzahnwurzeln, 150 mL Calciumnitrat-Lösung (1 %ig), Ethanol (96 %ig)

Durchführung: 20 g Löwenzahnwurzeln werden in 150 mL 1 %iger Calciumnitrat-Lösung unter ständigem Rühren bis zum Sieden erhitzt. Nach ca. 10 Min. wird die Mischung heiß über einen Büchnertrichter filtriert, wobei die gröberen Wurzelstücke mit einem Küchensieb aufgefangen werden. Das Filtrat wird nach dem Abkühlen mit dem gleichen Volumen Ethanol versetzt. Ausfallende Schleime und Mineralsalze werden durch Zentrifugieren und Dekantieren von der Lösung abgetrennt. Der Überstand wird in ein Becherglas überführt und in ein Eisbad gestellt. Es wird so viel Ethanol zugegeben, bis ein feiner weißer Niederschlag ausfällt. Nach einer halben Stunde im Eisbad (um die Ausbeute zu erhöhen, kann die Lösung über Nacht in den Kühlschrank gestellt werden) wird dieser Niederschlag über einen Büchnertrichter abfiltriert und im Trockenschrank bei

80 °C für etwa 20 Min. getrocknet. Abschließend wird der Niederschlag in einem Mörser fein gemahlen.⁶⁷

Beobachtung: Während des Kochens entsteht eine klare hellbraune Lösung. Nach Zugabe des gleichen Volumens Ethanol fällt ein kolloider hellbrauner Niederschlag aus, der sich nicht am Boden des Gefäßes absetzt. Durch Zentrifugieren lassen sich die Schwebstoffe am Boden absetzen und die Lösung wird etwas heller. Bei erneuter Zugabe von Ethanol und sehr niedrigen Temperaturen fällt nun ein feiner weißer Niederschlag aus, der über einen Büchnertrichter abfiltriert werden kann. Das Trocknen im Trockenschrank und anschließendes Mahlen ergeben ein feines bräunlich-weißes Pulver. Die Ausbeute beträgt 0,87 g.



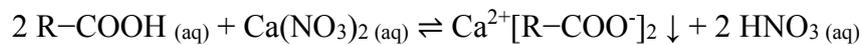
Abbildung 68: Weißer Niederschlag von Inulin nach Zugabe von Ethanol



Abbildung 69: Inulin aus Löwenzahn, nach Kochen in Calciumnitrat-Lösung und anschließendem Ausfällen mit Ethanol

⁶⁷ Diese Methode wird in Metzner (1982, S. 41) beschrieben.

Auswertung: Das Kochen der Wurzeln löst zum einen das Inulin, aber auch andere Pflanzenstoffe wie Proteine und Pflanzensäuren aus den Wurzeln. Diese werden mittels chemischer Denaturierung durch die chaotrope Wirkung der vorhandenen Calcium- und Nitrationen in der Lösung gefällt:



Die denaturierten Proteine werden anschließend, zusammen mit dem groben Pflanzenmaterial und den unlöslichen Salzen, abfiltriert. Das Filtrat ist nun noch durch lösliche Salze und Farbstoffe verunreinigt. Durch Zugabe des gleichen Volumens Ethanol (im ersten Schritt) fallen die bisher noch gelösten Salze und Pektine aus der Lösung aus, da ihnen die Hydrathülle entzogen wird. Nach dem Zentrifugieren und Dekantieren sind also nur noch wenige Verunreinigungen und das Inulin in Lösung. Wird der Lösung nun Ethanol im Überschuss (und in der Kälte) zugefügt, fällt Inulin aufgrund der neu auftretenden Wechselwirkungen mit Ethanol als weißer Feststoff aus. Noch in der Lösung vorhandene Verunreinigungen verleihen dem getrockneten Inulin nach dem Abfiltrieren und Trocknen eine schwach braun-gelbliche Färbung.

4.2.1.4 Vergleich der Isolierungsmethoden

Vergleicht man die Ausbeuten der drei beschriebenen Isolierungsmethoden, lässt sich feststellen, dass beim Einsatz von Calciumnitrat als Lösungsmittel die höchste Ausbeute an Inulin erzielt werden konnte (4,35 %). Auch die der Zuckergewinnung ähnliche Methode, bei der zunächst die Nichtzuckerstoffe durch Calciumhydroxid ausgefällt werden, erbringt eine ähnlich hohe Ausbeute (3,5 %). Im Vergleich dazu ist die Ausbeute beim ausschließlichen Einsatz von Ethanol etwas geringer (2,6 %).

Während gekauftes, industriell gewonnenes Inulin eine reine weiße Farbe aufweist (siehe Abbildung 70, rechtes Bild), ist das Produkt der reinen Wasser-Ethanol-Extraktion eher bräunlich bis gräulich (linkes Bild). Die Produkte der Calciumhydroxid-Vorbehandlung und der Extraktion mit Calciumnitrat-Lösung (mittlere Bilder) wirken aufgrund ihrer gelblich-weißen Farbe optisch reiner als das Inulin aus der Wasser-Ethanol-Methode.



Abbildung 70: Vergleich der gewonnenen Produkte (v.l.n.r.: Wasser-Ethanol (4.2.1.1), Calciumhydroxid-Kohlenstoffdioxid-Ethanol (4.2.1.2), Calciumnitrat-Ethanol (4.2.1.3), gekauftes Inulin)

Es ist nicht möglich, aufgrund der erhaltenen Ausbeuten Rückschlüsse auf den tatsächlichen Inulingehalt in den gekauften getrockneten Löwenzahnwurzeln zu ziehen, da keine Kenntnis darüber vorliegt, wann die Wurzeln geerntet oder wie sie getrocknet wurden⁶⁸, noch, welchen Anteil die Verunreinigungen in den Produkten ausmachen. Es ist ebenfalls eingängig, dass die hier beschriebenen Ausbeuten keine repräsentativen Ergebnisse darstellen, sondern lediglich Anhaltspunkte für in der Schule durchführbare Experimente wiedergeben.

Alle beschriebenen Extraktionsmethoden nehmen relativ viel Zeit in Anspruch. Besonders die der Zuckergewinnung aus Rüben sehr ähnlichen Methoden sind aufwendig, allerdings liefern sie optisch reiner wirkende Produkte. Die zur Isolierung eingesetzten Chemikalien sind für die Schüler als unproblematisch einzuschätzen.

Da Extraktion und Nachweise möglicherweise nicht im regulären Unterricht durchgeführt werden können, bietet sich eine intensivere Beschäftigung im Rahmen einer Projektwoche oder in Kooperation mit einem Ernährungslehre-Kurs an.

4.2.2 Analyse des gewonnenen Inulins

Für die Untersuchung und Analyse der gewonnenen Produkte bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Im Folgenden werden einige gut durchführbare Untersuchungsverfahren vorgestellt. Dazu gehören die Schmelzpunktbestimmung, eine Nachweisreaktion für Ketosen sowie eine dünnschichtchromatographische Untersuchung von Inulin und seiner hydrolysierten Form.

⁶⁸ Informationen zur Veränderung des Inulin-Gehaltes bei der Lagerung der Wurzeln wurden bereits in Kapitel 3.3.2 dargestellt.

4.2.2.1 Bestimmung des Zersetzungsbereiches

Material: analoges Schmelzpunktbestimmungsgerät, Kapillarröhrchen, Inulin-Proben aus Löwenzahn

Durchführung: Das Kapillarröhrchen wird etwa 3 mm hoch mit der zu untersuchenden Inulin-Probe befüllt und in das Schmelzpunktbestimmungsgerät gesteckt. Der Temperaturanstieg pro Minute wird maximiert, bis ca. 140 °C erreicht sind. Dann wird der Temperaturanstieg pro Minute gedrosselt (1-2 °C/Min.), damit die Zersetzungstemperatur genau bestimmt werden kann. Die Probe wird so lange durch die Lupe beobachtet, bis sie vollständig zersetzt ist und der Zersetzungsbereich wird notiert.

Beobachtung: Die Inulin-Probe aus der reinen Wasser-Ethanol-Extraktion beginnt sich bei 169 °C zu zersetzen, was daran zu erkennen ist, dass die Masse des Pulvers zunächst etwas abnimmt und es sich schließlich bräunlich verfärbt. Bei 171 °C ist der Zersetzungsvorgang abgeschlossen und es ist ein brauner Feststoff entstanden. Die anderen Proben zersetzen sich auf die gleiche Weise bei ähnlichen Temperaturen.

Tabelle 12: Zersetzungsbereiche des gewonnenen Inulins

Inulin-Probe	Wasser-Ethanol (4.2.1.1)	Calciumhydroxid-Kohlenstoffdioxid-Ethanol (4.2.1.2)	Calciumnitrat-Ethanol (4.2.1.3)	Gekauftes Inulin ⁶⁹
Zersetzungsbereich	169-171 °C	168-175 °C	164-168 °C	158-165 °C

Auswertung: Anders als bei anderen Feststoffen wird in diesem Fall kein Schmelzpunkt, sondern ein Zersetzungsbereich des Inulins bestimmt. Dieser Zersetzungsbereich, erkennbar an der einsetzenden Bräunung des Inulins, ist jedoch nur schwer zu erkennen, vor allem wenn die Inulin-Probe durch Verunreinigungen ohnehin bräunlich verfärbt ist. Aus diesem Grund sind die beobachteten Zersetzungspunkte lediglich als Tendenzen anzusehen.

Die Zersetzung von Inulin hängt vom durchschnittlichen Polymerisationsgrad und der Kettenlängenverteilung ab. Je größer der Polymerisationsgrad des Inulins, desto höher ist

⁶⁹ Bei diesem Wert handelt es sich um Angaben aus dem Sicherheitsdatenblatt zu Inulin aus Chicorée der Firma Sigma-Aldrich (vgl. Sigma-Aldrich, S. 4). Eine Angabe über den durchschnittlichen Polymerisationsgrad des Inulins findet sich jedoch nicht.

auch sein Zersetzungsbereich. Das Inulin des russischen Löwenzahns hat einen durchschnittlichen Polymerisationsgrad von 20. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich im heimischen Löwenzahn ähnlich verhält. Dies würde für einen niedrigeren Zersetzungspunkt als bei Zichorien- oder Dahlien-Inulin sprechen, die mit einem durchschnittlichen Polymerisationsgrad von 24 einen Zersetzungspunkt von 158-165 °C haben. Da der Zersetzungspunkt jedoch auch von der Kettenlängenverteilung, der Größe der Kristalle und schließlich auch der Reinheit abhängig ist, kann aufgrund dieses Experiments keine Aussage über die Qualität des Inulins getroffen werden. Eine detailliertere Beschreibung des Zersetzungsverhaltens von Inulin findet sich in Teilkapitel 3.3.1 Chemische Betrachtung: Struktur und Eigenschaften.

Anmerkungen: Die Bestimmung des Zersetzungsbereiches des selbst gewonnenen Inulins eignet sich für den Chemieunterricht, um aufzuzeigen, dass es sich bei Inulin um Kohlenhydrate handelt, die ein anderes Schmelzverhalten zeigen als beispielsweise Salze, die einen klar erkennbaren Schmelzpunkt haben.

4.2.2.1 Seliwanow-Reaktion zum Nachweis von Fructose

Material: 4 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Waage, Spatel, Messpipette 1 mL, Pasteurpipette, Heizplatte mit Wasserbad, Stoppuhr, Inulin aus Löwenzahn, gekauftes Inulin, Fructose, Glucose, destilliertes Wasser, Resorcin, konzentrierte Salzsäure

Durchführung: Es werden 1 %ige Lösungen aus dem selbst gewonnenen Löwenzahn-Inulin, dem gekauften Inulin sowie Fructose und Glucose hergestellt. Die Reagenzgläser werden mit je etwa 1 mL der hergestellten Lösungen befüllt. Anschließend werden jeweils einige Körnchen Resorcin und 15 Tropfen konzentrierte Salzsäure zugegeben. Die Reagenzgläser werden nun in ein siedendes Wasserbad gestellt und die Zeit bis zum Eintreten einer Farbreaktion gemessen.

Beobachtung: Alle Lösungen sind sowohl vor als auch nach Zugabe von Resorcin und konzentrierter Salzsäure farblos. Nach ca. 40 Sekunden im Wasserbad färben sich die Lösungen des gekauften Inulins (I), des Löwenzahn-Inulins (LZ-I) und der Fructose (F) leicht rötlich. Nach 2 Min. haben sich diese Lösungen kirschrot gefärbt. Die Glucose-Lösung (G) ist weiterhin farblos. Nach ca. 5 Min. beginnt sich die Glucose-Lösung gelblich zu verfärben und nach 10 Min. hat die Lösung eine gelb-orange Färbung angenommen (vgl. Abbildung 71).



Abbildung 71: Zeitlicher Verlauf der Seliwanow-Reaktion: zu Beginn (links), nach 2 Min. (Mitte) und nach 10 Min. (rechts)

Auswertung: Die Seliwanow-Reaktion⁷⁰ ist ein Nachweis für Kohlenhydrate mit einer Ketogruppe, wie beispielsweise die Fructose. Bei Kohlenhydraten mit einer Aldehydgruppe (wie der Glucose) dauert die Farbreaktion aufgrund der unterschiedlichen Anteile der Furanose-Form (und der langsamen Umwandlung in die jeweils andere Form) deutlich länger, weshalb durch diese Reaktion eine Unterscheidung gut möglich ist⁷¹.

Beim Erhitzen unter sauren Bedingungen werden zunächst die glycosidischen Bindungen des Inulins gespalten, sodass Fructose-Moleküle frei werden. Die Fructose-Moleküle, welche in der Furanose-Form (Fünfring) vorliegen, werden dehydriert, sodass 5-(Hydroxymethyl)furfural (HMF) entsteht. Das unter sauren Bedingungen protonierte HMF ist ein starkes Elektrophil und reagiert nach dem Mechanismus der elektrophilen aromatischen Substitution mit dem Resorcin. Anschließend wird ein weiteres Resorcin-Molekül nach dem gleichen Mechanismus addiert. Durch den anschließenden Ringschluss entsteht unter Abspaltung eines Wassermoleküls ein aromatisches System, welches die rote Färbung verursacht (vgl. Abbildung 72).

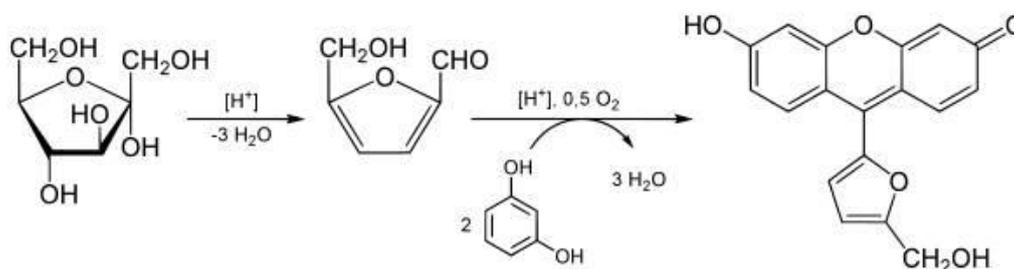


Abbildung 72: Reaktionsgleichung zur Seliwanow-Reaktion

⁷⁰ Es findet sich ebenfalls die Schreibweise „Seliwanoff-Reaktion“.

⁷¹ Diese Farbreaktion auf Fruchtzucker wurde erstmals 1887 vom russischen Chemiker Theodor Seliwanoff (1859-1938) beschrieben (vgl. Seliwanoff 1887).

Anmerkungen: Die Seliwanow-Probe als typisches Experiment zur Unterscheidung von Fructose und Glucose findet sich auch in einigen Schulbüchern für die gymnasiale Oberstufe. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Reaktion können die Lernenden darauf schließen, dass dies an strukturellen Unterschieden zwischen Glucose und Fructose liegt.

Ogleich der Mechanismus der Bildung des roten Farbstoffs kompliziert ist, könnte anhand des Produktes ebenfalls die Delokalisierung der π -Elektronen und die Entstehung von Farbigkeit von organischen Verbindungen wiederholt werden.

Gleichzeitig stellt dieser Versuch einen Nachweis für das Vorhandensein von HMF dar.

4.2.2.2 Saure Hydrolyse des gewonnenen Inulins

Material: Waage, Spatel, Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Messpipette 5 mL, Becherglas, Wasserbad, Inulin aus Löwenzahn, destilliertes Wasser, halbkonzentrierte Salzsäure (w = 18 %), Natriumcarbonat, Universalindikator-Papier

Durchführung: In einem kleinen Becherglas wird eine 1 %ige Lösung des Löwenzahn-Inulins hergestellt. 5 mL der Lösung werden in ein Reagenzglas gegeben, mit 1 mL halbkonzentrierter Salzsäure versetzt und anschließend 5 Minuten lang in ein siedendes Wasserbad gestellt. Nach dem Abkühlen werden der Lösung einige Spatelspitzen Natriumcarbonat zur Neutralisation zugegeben, bis keine Gasbildung mehr zu beobachten ist. Der pH-Wert wird mit Universalindikatorpapier überprüft.

Beobachtung: Die farblose Inulin-Lösung bleibt auch nach Zugabe der Salzsäure farblos und klar. Bei der Zugabe von Natriumcarbonat ist bis zur Neutralisation der Lösung eine leichte Gasbildung zu beobachten. Die Farbe der Lösung ändert sich dabei nicht.

Auswertung: Beim Erhitzen der angesäuerten Inulin-Lösung findet eine protonenkatalysierte Hydrolyse der glycosidischen Bindungen des Inulins statt. Dabei entstehen vor allem Glucose und Fructose, aber auch Oligofructose und Hydroxymethylfurfural, das durch Umlagerung aus Fructose gebildet wird. Ein ausführlicher Mechanismus zur hydrolytischen Spaltung von Inulin findet sich u.a. bei Böckler (2007, S. 110ff.). Bei dem während des Neutralisationsvorgangs auftretenden Gas handelt es sich um Kohlenstoffdioxid, das sich bei der Reaktion des Carbonats mit der Säure bildet.

Anmerkungen: Dieses Experiment stellt eine Grundlage für weiterführende Versuche und Nachweisreaktionen dar.

4.2.2.3 Dünnschichtchromatographie des Löwenzahn-Inulins und Inulin-Hydrolysats

Material: DC-Platten Kieselgel 60 (10 x 5 cm), Lineal, weicher Bleistift, Kapillarröhrchen, Föhn, DC-Kammer, Becherglas 150 mL, Waage, Spatel, Messpipette 20 mL, Zerstäuber für DC, Trockenschrank, Löwenzahn-Inulin, Hydrolysat aus Löwenzahn-Inulin, Fructose, Glucose, destilliertes Wasser, 0,1 g Naphthoresorcin, 50 mL Ethanol (96 %ig), 5 mL konz. Schwefelsäure, 20 mL 2-Butanon, 20 mL Aceton, 12,5 mL Borsäure-Lösung (3 %ig)

Durchführung: Es wird ein Laufmittel aus 2-Butanon, Aceton und Borsäure im Verhältnis 20:20:12,5 hergestellt und in die DC-Kammer gegeben, welche mit einem Deckel verschlossen wird, damit sich eine mit dem Laufmittel gesättigte Atmosphäre in der Kammer entwickeln kann. Für die Herstellung des Sprühreagenzes werden 0,1 g Naphthoresorcin in 50 mL Ethanol gelöst und anschließend 5 mL konz. Schwefelsäure hinzugefügt.

Auf der DC-Platte wird vorsichtig mit einem weichen Bleistift im Abstand von etwa 1 cm vom unteren Rand eine dünne Linie angezeichnet. Auf diese „Startlinie“ werden nun mithilfe der Kapillaren die Substanzproben aufgetragen. Dazu werden jeweils 0,1 %ige Lösungen des Inulins sowie des Inulin-Hydrolysats, Fructose und Glucose hergestellt. Mithilfe der Kapillarröhrchen werden die Lösungen nacheinander auf die DC-Platte aufgetragen (jede Lösung etwa drei Mal, um einen möglichst konzentrierten Substanzfleck zu erhalten). Eventuell muss die Platte zwischendurch mit einem Föhn getrocknet werden, um ein Verlaufen der Substanzflecken zu vermeiden. Bevor die DC-Platte in die Kammer gestellt wird, sollte sie etwa 20 Min. an der Luft trocknen.

Zur Chromatographie wird die DC-Platte in die Kammer gestellt und so lange darin belassen, bis das Laufmittel eine Höhe von etwa 2 cm unterhalb des oberen Plattenendes erreicht hat (etwa 25-30 Min.). Die Platte wird an der Luft getrocknet, mit dem Sprühreagenz gleichmäßig besprüht und anschließend 5 Minuten lang im Trockenschrank bei 120 °C getrocknet.

Beobachtung: Nach dem Besprühen der DC-Platte mit dem Nachweis-Reagenz und Trocknen bei 120 °C im Trockenschrank werden Substanzflecken sichtbar (vgl. Abbildung 73). Es zeigt sich, dass die Glucose (G) die längste Transportstrecke aufweist und durch das Sprühreagenz bläulich gefärbt wurde. Die Fructose (F) bildet einen violetten Substanzfleck leicht unterhalb der Glucose. Das Inulin-Hydrolysat (IH) bildet einen länglichen violetten Substanzfleck, der etwa auf Höhe von dem der Fructose endet. Außerdem

ist ein schwacher Fleck auf der Startlinie zu erkennen, während die Inulin-Probe (I) größtenteils auf dem Startpunkt verblieben ist und nur ein schwacher Substanzfleck ca. 2 cm oberhalb der Startlinie zu erkennen ist.



Abbildung 73: Ergebnis der Dünnschichtchromatographie mit Löwenzahn-Inulin (Foto: Julia Zerbs)
(I=Inulin, IH=Inulin-Hydrolysat, F=Fructose, G=Glucose)

Auswertung: Durch das Besprühen mit schwefelsaurer ethanolischer Naphthoresorcin-Lösung verfärben sich die Substanzflecken auf der DC-Platte nach dem Trocknen violett bis blau. Dies beruht, ähnlich wie auch bei der Seliwanow-Reaktion, auf der Bildung eines Farbstoffs aus Hydroxymethylfurfural (HMF) und Naphthoresorcin. HMF wird unter Säurekatalyse durch Wasserabspaltung aus Hexosen gebildet. Durch elektrophile Substitution entsteht schließlich ein Triarylmethanfarbstoff, der die violette Färbung verursacht (vgl. Abbildung 74).

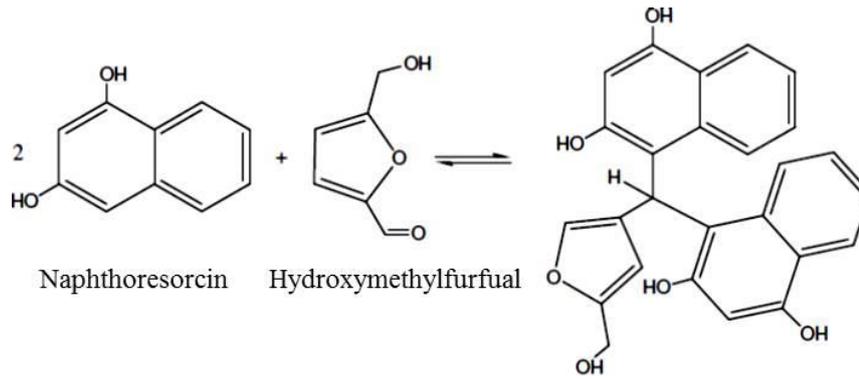


Abbildung 74: Bildung des violetten Farbstoffs (vereinfachte Darstellung) (Böckler 2007, S. 124)

Aufgrund unterschiedlicher Molekülgrößen und unterschiedlicher Wechselwirkungen mit dem Lösungsmittel und der stationären Phase werden die Probensubstanzen mit dem Laufmittel unterschiedlich weit auf der DC-Platte transportiert. Durch das Mitaufragen der Vergleichssubstanzen Fructose (F) und Glucose (G) kann eindeutig bestätigt werden, dass im Inulin-Hydrolysat ein relativ großer Anteil Fructose enthalten sein muss, da etwa auf der Höhe der reinen Fructose auch ein intensiver Substanzfleck des Inulin-Hydrolyсата zu erkennen ist. Ein Substanzfleck auf Höhe der Glucose ist hier nicht zu erkennen. Außerdem scheint das Löwenzahn-Inulin nicht vollständig hydrolysiert worden zu sein, da ein Teil des Hydrolyсата auf der Startlinie verblieben ist und ein zweiter intensiver Substanzfleck unterhalb von dem auf Höhe der Fructose zu erkennen ist. Das unhydrolysierte Inulin verbleibt überwiegend auf der Startlinie, was darauf hindeutet, dass es sich hierbei um ein langkettiges Molekül handelt, welches nicht transportiert wird. Nur einige kurzkettigere Fraktionen bilden einen schwachen Substanzfleck ca. 2 cm oberhalb der Startlinie.

Anmerkungen: Ein Dünnschichtchromatogramm eignet sich gut zum Vergleich verschiedener Substanzen und liefert Hinweise auf ihre Bestandteile. Die Schüler lernen dieses wichtige Analyseverfahren kennen und können herausarbeiten, dass Inulin selbst ein sehr großes Molekül sein muss, da es von der mobilen Phase nicht transportiert wird. Durch die Vergleichsproben Glucose und Fructose können die Schüler schlussfolgern, dass hydrolysiertes Inulin hauptsächlich aus Fructose bestehen muss.

Wenn die Proben für die zu identifizierenden Substanzen hergestellt sind, lässt sich eine Chromatographie innerhalb von 60 oder 90 Minuten durchführen.

Als kritisch ist der Einsatz von Borsäure im Laufmittel einzuschätzen, da es sich bei Borsäure um einen reproduktionstoxischen Stoff der Kategorie 1B handelt. Dies gilt jedoch nur in Gemischen ab Konzentrationen über 5,5 % (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung). Das Laufmittelgemisch sollte daher mit Vorsicht gehandhabt werden.

4.3 Zusammenfassung und Diskussion der Experimente

Es wurde eine Reihe von Experimenten entwickelt und mithilfe verschiedener Schülergruppen auf ihre Praktikabilität hin überprüft. Im Folgenden werden die entwickelten Experimente noch einmal zusammengefasst und anschließend bewertet.

Experimente zu Kautschuk

Die Gewinnung des Rohstoffs Kautschuk aus getrockneten Wurzeln des russischen Löwenzahns konnte auf fünf unterschiedliche Arten gezeigt werden. Auf zwei mechanisch-physikalische Ansätze, zum einen durch Mörsern weniger dünner Wurzeln, zum anderen durch Dichtentrennung in wässriger Suspension gemahlener Wurzeln (Experimente 4.1.1.2 und 4.1.1.3). Weiterhin konnte die Kautschuk-Gewinnung über zwei chemische Ansätze erreicht werden. Dabei wird der Kautschuk entweder mithilfe eines organischen Lösemittels aus zerkleinerten Wurzeln extrahiert und anschließend durch Abdampfen des Lösemittels gewonnen oder das hölzerne Wurzelmaterial wird aufgeweicht und gelöst, sodass das Netz der Milchröhren zurückbleibt (Experimente 4.1.1.4 und 4.1.1.5). Zuletzt wurde ein mikrobiologisches Aufschlussverfahren erprobt, in dem die hölzernen Wurzelbestandteile durch Fäulnispilze aufgelockert und zersetzt werden sodass wiederum das Kautschuknetz zurückbleibt (Experiment 4.1.1.6).

Für die Gewinnung von Kautschuk aus frischen Wurzeln des Löwenzahns wurden ebenfalls zwei mögliche Wege entwickelt: Es ist zum einen die Lösung des hölzernen Wurzelmaterials ebenso wie bei der Arbeit mit getrockneten Wurzeln möglich. Zurück bleibt der Kautschuk in Form eines feinen Netzes (vgl. Experiment 4.1.1.5). Das zweite Extraktionsverfahren besteht im vorsichtigen Anschneiden frischer Wurzelstücke und anschließender Koagulation der austretenden Latexmilch zu Kautschuk mithilfe von Essigsäure (Experiment 4.1.2.2).

Es wurde zusätzlich eine Methode zur Extraktion und Stabilisierung von Latexmilch erprobt. Hier wurde die Latexmilch mithilfe eines Extraktionspuffers aus zerkleinerten Wurzeln gewonnen (Experiment 4.1.2.1).

Positiv lässt sich zusammenfassen, dass die Durchführung aller erprobten Experimente in der Schule erlaubt ist. Vorteilhaft ist weiterhin, dass die Experimente das Potenzial bieten können, ein breites Altersspektrum von Lernenden auf unterschiedlichen intellektuellen Niveaus anzusprechen.

Vor allem die Gewinnung des Kautschuks aus getrockneten Wurzeln über die rein mechanische und die chemischen Vorgehensweisen haben sich als besonders praktikabel erwiesen. Je nach Alter der Lernenden der Zielgruppe bieten sich unterschiedliche Gewinnungsverfahren besonders an: In der Grundschule kann durch das Mörsern dünner getrockneter Wurzeln bereits ein ausreichend gutes Ergebnis erzielt werden, in der Oberstufe können hingegen verschiedene, auch kompliziertere Verfahren (wie die Extraktion mit verschiedenen Lösungsmitteln oder die Abtrennung über die Dichte), gegenübergestellt und ihre Eignung hinsichtlich Qualität und Zeitintensität des Gewinnungsprozesses diskutiert werden.

Als problematisch ist das Experiment zur Gewinnung von Kautschuk über die Koagulation der aus frischen Wurzeln austretenden Latexmilch mittels Essigsäure anzusehen, da hier nur eine geringe Menge Produkt erhalten werden kann. Schüler, die das Verfahren (im Rahmen der Vorab-Erprobung des Projektmoduls) in Kleingruppen erprobten, erzielten noch geringere Produktmengen oder sogar gar kein Produkt.

Zur Analyse und zum Nachweis des selbstständig gewonnenen Kautschuks wurden (im Rahmen dieser Arbeit) Experimente mit unterschiedlicher Spezifität und Komplexität erprobt, die alle, wenn auch z.T. unter höheren Sicherheitsvorkehrungen, in der Schule durchführbar sind. So stellen die unspezifischen Nachweise auf Doppelbindungen einfache und schnell durchführbare Nachweismethoden dar, während die Pyrolyse, der Farbnachweis nach Burchfield und die Auswertung der IR-Spektroskopie aufwendiger, anspruchsvoller, aber auch genauer sind. Vor allem die IR-Spektroskopie verkörpert aktuelle Forschungsmethoden und liefert detaillierte Hinweise auf die Struktur eines unbekanntes Stoffes, was sie für einen innovativen Chemieunterricht sehr wertvoll macht.

Zwei der beschriebenen Experimente zur Gewinnung des Rohstoffs haben sich jedoch als für den Einsatz in der Schule zu gefährlich oder ungeeignet erwiesen. Dabei handelt es

sich zum einen um die Freilegung des Kautschuks mittels eines mikrobiologischen Aufschlusses des getrockneten Wurzelmaterials, wobei Schimmelsporen von den Schülern eingeatmet werden könnten⁷². Zum anderen lässt sich im Rahmen der Extraktion der Latexmilch mithilfe eines Extraktionspuffers trotz großen Aufwandes nur eine sehr geringe Menge Latexmilch gewinnen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurden die Versuchsdurchführungen für diese Experimente nicht weiter überarbeitet und mit Schülergruppen nicht erprobt.

Experimente zu Inulin

Zur Extraktion von Inulin aus getrockneten Löwenzahnwurzeln haben sich drei Methoden als geeignet erwiesen: Das Lösen des Inulins in wässriger Lösung und Ausfällen des Rohstoffs mit Ethanol, die Lösung des Inulins in Calciumcitrat-Lösung und Ausfällen des Rohstoffs mit Ethanol, und das Abtrennen von Nichtzuckerstoffen vor dem Ausfällen mit Ethanol (Experimente 4.2.1.1-4.2.1.3).

Positiv lässt sich vermerken, dass alle (aus der Literatur) bekannten weiterführenden Experimente zu Kohlenhydraten wie die saure Hydrolyse oder die Analyse- und Nachweismethoden auch mit dem gewonnenen Inulin aus Löwenzahnwurzeln ohne Schwierigkeiten durchführbar sind (Experimente 4.2.2.1-4.2.2.3).

Kritisch kann hingegen hervorgehoben werden, dass die Experimente zur Gewinnung in der Regel viel Zeit benötigen und sich auch hier nur recht wenig Produkt herstellen lässt. Es ist ebenfalls beklagenswert, dass eine Gewinnung in einem Küchenansatz (zumindest mit Löwenzahnwurzeln) nicht gelingt, sodass keine Geschmacksprobe (oder Weiterverarbeitung in Lebensmitteln) möglich ist.

Zusammenfassung

Betrachtet man die entwickelten Experimente im Gesamten, so ist besonders positiv anzumerken, dass die hergestellten Produkte angefasst werden dürfen und sie somit auch haptisch erfahrbar gemacht werden. Dies hebt die Themen Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn und das entwickelte Projektmodul vom alltäglichen Chemieunterricht ab, in

⁷² Laut RISU NRW 2017 ist eine Verwendung von Schimmelpilzen im Unterricht in geschlossenen Probenbehältern oder im Abzug möglich. Eine offene Handhabung sollte vermieden werden (vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2017, S. 57).

dem im Anschluss an einen Versuch in der Regel alle benötigten und entstandenen Stoffe entsorgt werden müssen.

Positiv kann ebenfalls vermerkt werden, dass, falls eine IR-Spektroskopie nicht möglich ist oder andere Experimente aufgrund von Sicherheitsbedenken in der Schule nicht durchführbar sind, ihre Funktionsweise bzw. der Ablauf mithilfe von Arbeitsmaterialien und Bildern theoretisch aufgearbeitet werden können.

Auch wenn viele der entwickelten Experimente viel Zeit benötigen, sodass ihre Durchführung in einer einzelnen Unterrichtsstunde kaum möglich sein dürfte. Da jedoch häufig eine längere Wartezeit eingeplant werden muss (wie z.B. beim Ausfällen des Inulins oder beim Abdampfen des Lösemittels nach der Kautschukextraktion), können einige Versuchsansätze auch über mehrere Tage bis zur nächsten Unterrichtsstunde stehen gelassen werden, was wiederum als positiv anzusehen ist.

Neben ihrem beschriebenen Potenzial sind auch einige Kritikpunkte an den Experimenten im Allgemeinen zu nennen.

Die Chemie der Makromoleküle könnte für die Lernenden im ersten Moment sehr komplex und damit unverständlich wirken. Auch lassen sich nicht alle (Nachweis)Reaktionen, wie beispielsweise die Baeyer-Probe auf Doppelbindungen oder die Seliwanow-Probe für Ketosen, mit den Schülern bekannten Mechanismen erklären, sodass dies vom chemischen Verständnis her eine Hürde darstellen kann. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Experimente lässt sich dieses Problem durch die Auswahl von gängigen einfachen Experimenten jedoch umgehen.

Die Besonderheit, dass bei vielen der entwickelten Experimente zur Gewinnung von Kautschuk oder Inulin keine chemische Reaktion im engeren Sinne im Vordergrund steht, sondern dass es das Ziel ist, die Rohstoffe möglichst unverändert aus der Wurzel zu extrahieren, könnte als nachteilig angesehen werden. Dies ermöglicht aber ein Verständnis dafür, wie Schwierigkeiten in der Entwicklung eines technischen Gewinnungsprozesses von der chemischen Seite gelöst werden können und welche Methoden dabei erst einmal erprobt werden und trägt somit zu einem Wissen über Arbeitsweisen in den Naturwissenschaften bei.

Zuletzt bieten die hier vorgestellten Experimente eine große Bandbreite an Komplexität. So verlangen die Versuche zur mechanischen und chemischen Abtrennung des Kautschuks von den übrigen Wurzelbestandteilen kein besonderes experimentelles Geschick

oder chemische Kenntnisse, wie es Schüler von den meisten Experimenten im alltäglichen Chemieunterricht kennen. Dies könnte Demotivation oder Desinteresse bei älteren Lernenden hervorrufen. Die Experimente zum Nachweis und zur Analyse des Kautschuks hingegen erfordern nicht nur genaues Arbeiten von den Schülern, sondern ebenfalls fundiertes fachchemisches Wissen, das wiederum nur von Lernenden der Oberstufe verlangt werden kann. So könnte es schwierig sein, einen angemessenen Grad an Herausforderung zu finden.

5 Entwicklung und Erprobung von Unterrichtsmodulen

In Anlehnung an den Ansatz der curricularen Innovation wurde in den bisherigen Kapiteln der Arbeit zunächst eine fachwissenschaftliche Einordnung des Themas vorgenommen und verschiedene Experimente vorgestellt, die sich zu den Bereichen Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn durchführen lassen. In einem nächsten Schritt müssen das Fachwissen und die Experimente nun didaktisch aufgearbeitet werden, sodass neue Lehr- und Lernmaterialien entstehen können.

In diesem Sinne wird in diesem Kapitel für eine didaktische Standortbestimmung zunächst eine Einordnung in verschiedene Lehrpläne vorgenommen und in der fachdidaktischen Literatur bereits vorhandenes Unterrichtsmaterial vorgestellt (Teilkapitel 5.1).

Davon ausgehend werden in Teilkapitel 5.2 zentrale Anforderungen an einen zeitgemäßen Chemieunterricht erläutert und diese jeweils mit den Chancen, die die Themenbereiche „Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn“ bieten, abgeglichen, um zu diskutieren, inwiefern sich die Themenfelder für den Chemieunterricht eignen.

In Teilkapitel 5.3 werden darauf aufbauend Ideen und Konzepte für einen möglichen Einsatz im Chemieunterricht skizziert und Perspektiven für fächerübergreifenden Unterricht aufgezeigt. In einem Exkurs werden Anregungen für eine Einbettung in den Sachunterricht gegeben. Ein bereits mit Schülern der Oberstufe erprobtes vierstündiges beispielhaftes Projektmodul zur Thematik „Kautschuk aus Löwenzahn“ wird ebenfalls detaillierter vorgestellt.

Im Rahmen dieses Projektmoduls wurde eine Erhebung zum aktuellen Interesse der teilnehmenden Lernenden an Tätigkeiten und Inhalten des Projektes durchgeführt. Diese Studie und die erhaltenen Ergebnisse werden in Teilkapitel 5.4 geschildert.

In einer abschließenden Gesamtschau werden die Überlegungen und Resultate zur konkreten Umsetzung der Thematik präsentiert.

5.1 Didaktisch-konzeptionelle Erschließung

Für eine Erschließung des Themas für den Unterricht ist zunächst die Frage zu klären, inwieweit die Problematik bereits in bisherigen Lehrplänen thematisiert wurde bzw. welche für die unterrichtliche Behandlung erforderlichen Grundlagen den Schülern laut Lehrplan bekannt sein sollten. Zudem ist zu untersuchen, welche fachdidaktischen Publikationen vorhanden sind, ob schon Konzepte für eine Erschließung des Themas (oder Teilen desselben) erarbeitet wurden und ob und gegebenenfalls in welcher Weise es schon in Lehrwerke oder andere Lehr-Lern-Medien wie z.B. Online-Angebote Eingang gefunden hat.

5.1.1 Thematisierung von Kautschuk in den Lehrplänen

Bisher ist die Thematik Kautschuk in keinem der Lehrpläne der deutschen Bundesländer für den Chemieunterricht explizit ausgewiesen. Eine Verortung für jeden einzelnen Lehrplan ist aufgrund der Vielfalt der Curricula wenig sinnvoll. An dieser Stelle soll jedoch beispielhaft eine spezifische Einordnung in den Lehrplan für das Fach Chemie am Lehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen erfolgen, weil die vorliegende Arbeit in diesem Bundesland angefertigt wurde. Eine Übertragung in die Lehrpläne anderer Bundesländer kann bei Bedarf individuell erfolgen. Da mit dem Thema Kautschuk leicht an die Grundlagen der organischen Chemie angeknüpft werden kann, ist dies problemlos möglich, wie später beispielhaft an zwei Lehrplänen anderer Bundesländer aufgezeigt wird.

Im Lehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen für das Fach Chemie ist in der Qualifikationsphase das Inhaltsfeld 4 mit der Bezeichnung „Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe“ vorgesehen, in das sich sowohl Kautschuk als auch Inulin einordnen lassen (vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2014, S. 35ff.). Um die Anschlussfähigkeit an den Lehrplan zu verdeutlichen, werden im Folgenden einige für die Erarbeitung des Themas Kautschuk besonders passende Kompetenzerwartungen aus allen Kompetenzbereichen für Schüler im Grundkurs in Nordrhein-Westfalen wiedergegeben:⁷³

⁷³ Die Beschreibung von Kompetenzen gliedert sich in vier Bereiche. Es wird zwischen dem Umgang mit Fachwissen (UF1-4), der Erkenntnisgewinnung (E1-7), der Kommunikation (K1-4) und der Bewertung (B1-4) unterschieden (vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2014, S. 21ff.).

Die Schülerinnen und Schüler

- erklären Stoffeigenschaften mit zwischenmolekularen Wechselwirkungen (u. a. Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Dipol-Kräfte, Wasserstoffbrücken) (UF3, UF4)
[...]
- formulieren Reaktionsschritte einer elektrophilen Addition und erläutern diese (UF1)
[...]
- erklären den Aufbau von Makromolekülen aus Monomer-Bausteinen [...] (u. a. Polyester, Polyamide) (UF1, UF3)
[...]
- erläutern die Eigenschaften von Polymeren aufgrund der molekularen Strukturen (u. a. Kettenlänge, Vernetzungsgrad) und erklären ihre praktische Verwendung (UF2, UF4)
[...]
- ermitteln Eigenschaften von organischen Werkstoffen und erklären diese anhand der Struktur (u. a. Thermoplaste, Elastomere und Duromere) (E5)
[...]
- recherchieren zur Herstellung, Verwendung und Geschichte ausgewählter organischer Verbindungen und stellen die Ergebnisse adressatengerecht vor (K2, K3)
[...]
- erläutern und bewerten den Einsatz von Erdöl und nachwachsenden Rohstoffen für die Herstellung von Produkten des Alltags und der Technik (B3)
[...]
- diskutieren Wege zur Herstellung ausgewählter Alltagsprodukte (u. a. Kunststoffe) bzw. industrieller Zwischenprodukte aus ökonomischer und ökologischer Perspektive (B1, B2, B3) (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2014, S. 36-38).

Die hier angeführten Kompetenzen lassen sich anhand der erprobten Experimente sowie durch theoretische Erarbeitung des Themas ohne Schwierigkeiten erwerben. Dies wird auch in der Betrachtung der entwickelten Arbeitsmaterialien (Anhang Teil V) sowie in der Vorstellung einer möglichen Unterrichtskonzeption deutlich (Kap. 5.3.1).

Auch in den Lehrplänen anderer Bundesländer lassen sich die Themen Kautschuk und Inulin verorten. Im hessischen Lehrplan findet für die gymnasiale Oberstufe in Chemie lässt im Themenbereich „Chemie der Kohlenwasserstoffverbindungen I: Kohlenwasserstoffverbindungen und funktionelle Gruppen“ die Beschäftigung mit Kautschuk verorten; im Themenbereich „Chemie der Kohlenwasserstoffverbindungen II: Technisch und biologisch wichtige Kohlenwasserstoffverbindungen“ werden Kohlenhydrate als verbindlicher Unterrichtsinhalt genannt (vgl. Hessisches Kultusministerium 2010, S. 35ff.). Als

ein weiteres Beispiel sei der baden-württembergische Lehrplan für das Fach Chemie angeführt. Hier werden in den Inhaltsbereichen „Naturstoffe“ und „Kunststoffe“ Grundlagen für die Beschäftigung mit den Themen Kautschuk und Inulin gelegt, indem Struktur, Vorkommen und Nachweis von Kohlenhydraten sowie z.B. die Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Herstellung von Kunststoffen behandelt werden (vgl. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg 2016, S. 24ff.).

5.1.2 Vorhandenes Material zu Kautschuk im Chemieunterricht

5.1.2.1 Experimente mit Kautschuk in der fachdidaktischen Literatur

Zur experimentellen Gewinnung von Kautschuk aus Pflanzen mit dem Ziel, die Verbindung zwischen Chemie und der Alltagswelt aufzuzeigen und so das Interesse der Lernenden zu wecken, findet sich in der fachdidaktischen Literatur lediglich ein Vorschlag. Volaric und Hagen beschreiben ein neues Experiment, das im Rahmen eines Laborkurses an einem College in den USA erprobt wurde. Hier extrahierten Studenten in einem Einführungs-Laborpraktikum für organische Chemie Kautschuk aus Blättern der gewöhnlichen Seidenpflanze (*Asclepias syriaca*⁷⁴) im Mikro- und Makromaßstab. Im Experiment wurde der Kautschuk durch Mörsern der Blätter, Auswaschen mit Aceton und Extraktion mithilfe von Cyclohexan gewonnen. Zur Prüfung des gewonnenen Produkts wurde ein IR-Spektrum aufgenommen sowie Elastizitätsprüfungen vorgenommen. Im Anschluss an das Projekt wurde ein Feedback der Teilnehmenden erhoben, welches positiv ausfiel (vgl. Volaric und Hagen 2002).

Neben diesem Beispiel existiert eine Reihe von Publikationen, in denen verschiedene Experimente zu Kautschuk unter unterschiedlichen Gesichtspunkten vorgestellt werden. So werden beispielsweise 2010 in einem Zeitschriftenartikel einfache Experimente zur Autoadhäsion von Kautschukklebstoff beschrieben (vgl. Cura 2010, S. 29). In einigen älteren Publikationen mit Experimentiervorschlägen zum Thema Kautschuk finden sich Vorschläge z.B. zur Quellungsmessung verschiedener Kautschukproben, mithilfe derer die Schüler herausarbeiten können, ob es sich bei einer Probe um vernetzten oder unvernetzten Kautschuk handelt (vgl. Kerrutt 1977). Weiterhin werden Möglichkeiten zum Nachempfinden verschiedener, auch historischer Experimente vorgestellt, die es den Schülern

⁷⁴ Die gewöhnliche Seidenpflanze gehört zur Familie der Hundsgiftgewächse. Sie enthält etwa 3 % Kautschuk, was sie in den USA zu einer Versuchspflanze zur Kautschukgewinnung machte (vgl. Volaric und Hagen 2002, S. 91).

ermöglichen, die Strukturformel von Kautschuk selbstständig aufzuklären (vgl. Scharf 1977). Es gibt außerdem Vorschläge für Handversuche zur Elastizität von Kautschuk im Vergleich zu einer Feder und zur Dehnungskristallisation (vgl. Freytag 1998).

5.1.2.2 Kautschuk in Schulbüchern und Unterrichtsmaterialien

Da die Gewinnung von Kautschuk aus dem russischen Löwenzahn noch neu und kaum erprobt ist, finden sich keine Experimentieraufträge zu *Taraxacum kok-saghyz* als Kautschukquelle in Lehrbüchern. Im Allgemeinen finden sich Informationen zum Makromolekül Kautschuk sowie zu seiner Verarbeitung zu Gummi in Chemie-Lehrwerken. Es fällt auf, dass das Thema teilweise lediglich im Rahmen eines Exkurses oder eines kleinen Info-Kastens bearbeitet wird. Einige Bücher widmen dem Weg vom Kautschuk zum Autoreifen im Rahmen der Kunststoffe jedoch auch eine Doppelseite. Hervorzuheben ist das 2015 im Schroedel-Verlag neu erschienene Lehrwerk *Chemie heute SII – Nordrhein-Westfalen Gesamtband*, in dem der Löwenzahn sogar als potenzielle neue Kautschukquelle aufgeführt wird. Dort werden unter anderem ein Modell eines Bioreaktors zur Herstellung von Löwenzahnkautschuk sowie Vorteile des alternativen Kautschuks beschrieben.

Das Buch *Chemie 2000+ Sekundarstufe II*, das im C. C. Buchner-Verlag erscheint, wurde ausgewählt, weil es sich um ein bekanntes Schulbuch handelt, in dem die Autoren aktuellen technischen Neuerungen einen Platz einräumen. Hier wird im Rahmen der Facette „Vom Erdöl zu Anwendungsprodukten“ unter anderem intensiv einer Beschäftigung mit Isobuten und seinen Anwendungsmöglichkeiten nachgegangen. Weiterhin werden verschiedene Kunststoffe mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften vorgestellt, wobei auch auf natürlichen Kautschuk als Rohstoff für die Produktion von Gummi eingegangen wird. So wird ein Einblick in die Vielfalt der Kunststoffe und ihrer Anwendungen gegeben.

Eine stichwortartige Übersicht über die in einigen gängigen Schulbüchern zu findenden Inhalte zu Kautschuk und Gummi gibt Tabelle 13. Dabei wurden die beiden ersten ausgewählt, weil sie besonders jung sind. *Chemie 2000+* wurde betrachtet, da es nach dem Konzept der didaktischen Integration und damit der curricularen Innovation vorgeht und Zusammenhänge aus Alltag, Technik und Umwelt direkt mit der chemischen Fachsystematik verknüpft. Das Schulbuch *Chemie im Kontext*, das zum gleichnamigen Unterrichtskonzept passt, wurde ausgewählt, weil es Kontexte und Basiskonzepte räumlich voneinander trennt und daher einen Gegensatz zu anderen Schulbüchern darstellt.

Tabelle 13: Übersicht über die Inhalte zu Kautschuk und Gummi in ausgewählten Lehrbüchern

Chemie heute SII, Gesamtband Nordrhein-Westfalen (Schroedel, 2015)	Elemente Chemie Oberstufe, Nordrhein-Westfalen (Klett, 2015)	Chemie 2000+ Sekundarstufe II (C.C. Buchner, 2007)	Chemie im Kontext Sekundarstufe II (Cornelsen, 2006)
<ul style="list-style-type: none"> • Gewinnung von Kautschuk aus Latex durch Säurezugabe • Kautschukbaum u. Synthesekautschuk • Struktur • Vulkanisation • Löwenzahn als alternative Quelle • Modellhafter Aufbau von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren 	<ul style="list-style-type: none"> • Definition Elastomere • Modellhafter Aufbau von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewinnung von Kautschuk aus Latex durch Säurezugabe • Kautschukbaum u. Synthesekautschuk • Struktur • Vulkanisation • Modellhafter Aufbau von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewinnung von Kautschuk aus Latex durch Säurezugabe • Kautschukbaum u. Synthesekautschuk • Struktur • Vulkanisation • Modellhafter Aufbau von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren

In Handbüchern zu Experimenten für den Chemieunterricht in Schulen sowie auf einschlägigen Internetseiten mit Experimentier-Vorschlägen finden sich unterschiedliche Experimente mit Kautschuk (natürlich wie synthetisch) und Gummi. Neben Versuchen zur Untersuchung verschiedener Materialien aus unterschiedlichen Kautschuken sind die Koagulation von Kautschuk aus Latexmilch sowie die Vulkanisation zu Gummi als Modellexperimente typische Vorschläge für den Chemieunterricht (vgl. Schwedt 2013, S. 46ff.; Glöckner et al. 1997, S. 79ff.; Blume o.J.).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Informationen zu Kautschuk aus Löwenzahn bisher nicht in Lehrwerke oder andere Lernmedien Einzug gefunden haben. Daher gibt es ein Desiderat für weitere fachdidaktische Forschung in diesem Themenbereich, dem speziell durch curriculare Innovationsforschung nachgekommen werden kann.

5.1.3 Inulin in den Lehrplänen

Ebenso wie das Thema Kautschuk kann auch die Behandlung des Polysaccharids Inulin als Makromolekül dem in der Qualifikationsphase befindlichen Inhaltsfeld 4 „Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe“ des Lehrplans für Nordrhein-Westfalen zugeordnet werden. Bezogen auf den „Umgang mit Fachwissen“ werden im Kernlehrplan des

Landes Nordrhein-Westfalen unter anderem die folgenden Kompetenzerwartungen aufgeführt, die durch die Beschäftigung mit Kohlenhydraten im Allgemeinen und somit auch in der Auseinandersetzung mit Inulin im Speziellen gefördert werden könnten:

Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben den Aufbau der Moleküle (u. a. Strukturisomerie) und die charakteristischen Eigenschaften von Vertretern der Stoffklassen der Alkohole, Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren und Ester und ihre chemischen Reaktionen [...] (UF1, UF3)
[...]
- erklären Stoffeigenschaften mit zwischenmolekularen Wechselwirkungen (u. a. Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Dipol-Kräfte, Wasserstoffbrücken) (UF3, UF4)
[...]
- erklären den Aufbau von Makromolekülen aus Monomer-Bausteinen [...] (UF1, UF3)
[...]
- erläutern die Eigenschaften von Polymeren aufgrund der molekularen Strukturen (u. a. Kettenlänge, Vernetzungsgrad) und erklären ihre praktische Verwendung (UF2, UF4) (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2014, S. 36)

Vergleicht man den Lehrplan Nordrhein-Westfalens hinsichtlich der Verankerung einer Beschäftigung mit Kohlenhydraten (im Allgemeinen) mit den Lehrplänen Baden-Württembergs und Hessens, lässt sich feststellen, dass im Lehrplan des Landes Baden-Württemberg die Beschäftigung mit Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen fest vorgeschrieben ist. Im Intensivkurs ist sogar die Bewertung von Kohlenhydraten aus nachwachsender Rohstoffe aus der Perspektive einer nachhaltigen Entwicklung vorgesehen (vgl. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg 2016, S. 31). Auch im hessischen Lehrplan ist die Beschäftigung mit Kohlenhydraten als technisch und biologisch wichtige Kohlenwasserstoffverbindungen verpflichtend. Neben ihrem Aufbau, der Unterscheidung zwischen Mono-, Di- und Polysacchariden und Nachweismöglichkeiten wird ebenfalls Wert auf ihre optische Aktivität gelegt (vgl. Hessisches Kultusministerium 2010, S. 40ff.).

5.1.4 Vorhandenes Material zu Inulin im Chemieunterricht⁷⁵

5.1.4.1 Inulin in der fachdidaktischen Literatur

In Fachzeitschriften für Chemie und ihre Didaktik gab es in den vergangenen Jahren verschiedene Veröffentlichungen zum Thema „Inulin“ und dessen Gewinnung aus Pflanzen. Da dieses Kohlenhydrat vielen Personen möglicherweise unbekannt ist, wird in der fachdidaktischen Literatur zum einen über das Polysaccharid mit seinen Einsatzgebieten in Lebensmitteln als Ballaststoff sowie Fett- und Zuckeraustauschstoff informiert und zum anderen werden Vorschläge gemacht, wie das Inulin in den Unterricht eingebracht werden kann.

In einem Artikel aus dem Jahr 1982 beschreibt Wolf, wie das Polysaccharid aufgebaut ist und wie es auf einfache Weise durch Auskochen von Artischocken-Schnitzeln, Reinigen über eine Aluminiumoxid-Säule und Ausfällen mit Ethanol gewonnen werden kann. Im Anschluss daran wird vorgeschlagen, die Struktur von Inulin durch einfache Versuche wie die Fehling- und Seliwanow-Probe und eine Chromatographie aufzuklären (vgl. Wolf 1982).

Katrin Sommer schlägt in mehreren Publikationen unterschiedliche Herangehensweisen und Experimente für den Chemieunterricht vor (vgl. Sommer und Pfeiffer 1999; Sommer 2000, 2001; Sommer und Pfeiffer 2001; Herbst und Sommer 2002). Zum einen regt sie an, Lernende zuerst eine Strategie entwickeln zu lassen, wie Inulin aus Pflanzenmaterial isoliert werden kann, um danach durch verschiedene Versuche die Struktur des Polysaccharids aufzuklären. Als Einstieg dient die Aufschrift auf einem Joghurt: „Inulin (Ballaststoff aus der Zichorie)“ und im Verlauf der Unterrichtseinheit wird geklärt, um welchen Stoff es sich bei Inulin handelt, wie es chemisch aufgebaut ist, woraus es gewonnen werden kann und warum es als Ballaststoff wirkt. In einem ersten Schritt sollen die Lernenden dann Versuche zum Löslichkeitsverhalten von Inulin machen und zu dem Schluss kommen, dass sich Inulin in heißem Wasser löst und durch Ethanol wieder ausgefällt werden kann. Basierend auf dem erworbenen Wissen wird anschließend eine Methode zur Isolierung von Inulin aus Pflanzenmaterial entwickelt und diese dann an verschiedenen Pflanzen erprobt. Löwenzahnwurzeln werden den Schülern dabei nicht zur Verfü-

⁷⁵ Teile dieser Analyse wurden unter anderem im Rahmen der Staatsexamensarbeit von Julia Zerbs im Jahr 2015 an der Universität Siegen angefertigt.

gung gestellt; stattdessen können sie zwischen Wegwarte-, Alant- und Silberdistelwurzeln, Dahlien- und Topinambur-Knollen und Artischocken wählen. Durch die Auswahl dieser Pflanzen, die Sommer von den Schülern mithilfe von Bestimmungsbüchern ihrer Pflanzenfamilie zuordnen lässt, sollen sie zu der Erkenntnis gelangen, dass Inulin von Pflanzen aus der Familie der Korbblütler synthetisiert wird. Zu welcher Stoffklasse Inulin gehört und welche Funktion es erfüllt, bleibt bis dahin weiter unbekannt. Die Isolierung von Inulin erfolgt durch den ausschließlichen Einsatz von Ethanol ohne Abtrennung von Verunreinigungen, wodurch „Rohinulin“ gewonnen wird. In weiteren Versuchen isolieren die Schüler Inulin aus einem Joghurt. Da in diesem Fall zuvor Proteine abgetrennt werden müssen, wird dazu eine genaue Anleitung vorgegeben. Nachdem Inulin aus Pflanzen und Lebensmitteln isoliert wurde, ermitteln die Schüler die Struktur von Inulin durch vier verschiedene Versuche (Molisch-Reaktion für die Identifizierung als Kohlenhydrat, Fehling-Probe vor und nach der Hydrolyse, Seliwanow-Reaktion und Chromatographie von Inulin, einem Inulin-Hydrolysat sowie Fructose und Glucose). Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse können die Lernenden zu dem Schluss gelangen, dass es sich bei Inulin um ein Polysaccharid mit dem Grundbaustein Fructose handelt, welches nicht reduzierend wirkt. Anschließend wird die Struktur durch eine Abbildung eines Inulin-Moleküls vollständig aufgeklärt. Mit der abschließenden Frage, warum Inulin als Ballaststoff dient, wird der Bogen zurück zum Lebensmittel am Beginn der Unterrichtseinheit geschlagen (vgl. Sommer 2001; Sommer und Pfeiffer 1999).

Als alternative Herangehensweise schlägt Sommer vor, die Kartoffel, deren Reservekohlenhydrat Stärke den Lernenden bereits bekannt ist, mit der Topinambur-Knolle oder (falls diese nicht verfügbar ist) mit der Dahlien-Knolle zu vergleichen. Es sollen Kohlenhydrat- und Stärke-Nachweise an beiden Knollen durchgeführt werden, mit der Erkenntnis, dass es sich bei dem Speicherkohlenhydrat der Topinambur-Knolle nicht um Stärke, sondern ein anderes Kohlenhydrat handelt. Durch mikroskopische Betrachtung der in der Topinambur-Knolle sichtbar gemachten Kohlenhydrat-Kristalle zeigt sich, dass es sich dabei um Inulin handelt. Anschließend wird „Rohinulin“ aus verschiedenen Pflanzen der Familie der Korbblütler nach einer Schritt für Schritt nachzuvollziehenden Anleitung ohne Abtrennung von Verunreinigungen isoliert. Um sicherzustellen, dass die Lernenden die einzelnen Schritte der Isolierung von Inulin verstanden haben, führen sie im Anschluss separate Versuche zur Löslichkeit von Inulin in Wasser und Ethanol durch. Im letzten Abschnitt der Unterrichtseinheit soll geklärt werden, wofür Inulin aufgrund

seiner Eigenschaften in der Lebensmittelindustrie verwendet wird, nämlich als Fructose-lieferant, als Fettaustauschstoff und als Ballaststoff. Hierfür wird die Seliwanow-Probe durchgeführt und eine Inulin-Creme angerührt, die mit Fett verglichen wird (vgl. Sommer und Pfeiffer 2001).

Für beide Herangehensweisen empfiehlt Sommer, dass die Schülerinnen und Schüler bereits über Grundkenntnisse der organischen Chemie verfügen sollten, vor allem sollte die Einteilung der Kohlenhydrate in Mono-, Di- und Polysaccharide sowie deren Strukturen bekannt sein.

Ein weiterer Ansatz wird von Nickel (2002) beschrieben. Sie schlägt vor, mithilfe von mitgebrachtem Joghurt in eine Unterrichtseinheit zu Oligosacchariden einzusteigen. Weitere Informationen zu den auftauchenden Begriffen sollen die Schüler durch eigenständige Recherche erwerben. Zum Ende der Reihe wird im Anschluss an eine Podiumsdiskussion mit Werbevertretern, Chemikern, Verbrauchern und Verbraucherschützern die selbstständige Herstellung einiger Produkte mit Inulinzusatz vorgeschlagen (vgl. Nickel 2002).

In einer Staatsexamensarbeit zum Thema *Diätetische Lebensmittel* (Böckler 2007) wird Inulin als Beispiel für einen Fettaustauschstoff untersucht. Auch hier wird das Inulin durch ausschließlichen Einsatz von Ethanol ohne Abtrennung von Verunreinigungen gewonnen. Außerdem wird eine einfache Heißwasser-Extraktion mit dem espressokocher beschrieben. Zur strukturellen Aufklärung des Aufbaus eines Inulin-Moleküls werden ebenfalls die bereits von Sommer vorgestellten Versuche vorgeschlagen. Für einen weiteren Einsatz im Unterricht werden „Küchenversuche“ zur Herstellung von inulinhaltigen Lebensmitteln vorgeschlagen.

5.1.4.2 Inulin in Schulbüchern und Unterrichtsmaterialien

Es lässt sich feststellen, dass das Polysaccharid Inulin in der Regel in Schulbüchern für den gymnasialen Oberstufenunterricht (in Nordrhein-Westfalen) nicht näher behandelt oder erwähnt wird. Informationen zum Thema „Kohlenhydrate im Allgemeinen“ sind in den Chemiebüchern hingegen zu finden. Neben Mono- und Disacchariden werden häufig Stärke und Cellulose als Vertreter von Polysacchariden vorgestellt. Dies könnte den Eindruck vermitteln, dass in der Natur nur Polysaccharide auf Glucosebasis existieren. In einigen Lehrwerken wird Inulin jedoch erwähnt (z.B. *Salter's Chemie – Schroedel*, S. 431f., *Chemie Oberstufe Gesamtband – Cornelsen*, S. 377). Allgemeine Versuche zum

Nachweis von Kohlenhydraten finden sich ebenfalls in den Lehrwerken. Neben Fehling-Probe und Hydrolyse von Di- und Polysacchariden wird teilweise auch die Seliwanow-Probe zum Nachweis von Ketosen vorgestellt.

Eine ausführlich ausgearbeitete Unterrichtseinheit von Sommer zum Thema „Inulin – Ballast- und Fettaustauschstoff“ mit einer Vielzahl von Experimenten und Hintergrundinformationen findet sich in den Unterrichtsmaterialien von RAAbits Chemie (vgl. RAAbits Chemie, I/F).

Ein stichwortartiger Überblick über die Lehrbuchinhalte zum Themenfeld Kohlenhydrate, die eine Grundlage für das Verständnis von Inulin darstellen können, wird in Tabelle 14 gegeben. Dabei werden neben den bereits zum Thema Kautschuk untersuchten Lehrwerken für die gymnasiale Oberstufe nun auch zwei gängige Schulbücher des Fachs Ernährungslehre betrachtet. Es finden sich jeweils kurze Informationen zu Inulin im Themenbereich der Zuckeraustauschstoffe und Süßstoffe (vgl. *Grundfragen der Ernährung*) bzw. im Kapitel der Polysaccharide (vgl. *Ernährungswissenschaft*).

Tabelle 14: Übersicht über die Inhalte zu Kohlenhydraten und Inulin in ausgewählten Lehrbüchern

Elemente Chemie Oberstufe, Nordrhein-Westfalen (Klett, 2015)	Chemie heute SII, Gesamtband Nordrhein-Westfalen (Schroedel, 2015)	Chemie im Kontext Sekundarstufe II (Cornelsen, 2006)	Chemie 2000+ Sekundarstufe II (C.C. Buchner, 2007)	Grundfragen der Ernährung, Büchner Handwerk und Technik (2014)	Ernährungswissenschaft, Verlag Europa-Lehrmittel (2015)
<ul style="list-style-type: none"> • Kapitel Kohlenhydrate: Mono-, Di-, Polysaccharide • Glucose u. Fructose • Polysaccharide: Stärke und Cellulose 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Behandlung des Themas Kohlenhydrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Kohlenhydrate: Mono-, Di-, Polysaccharide • Optische Aktivität • Fructose • Stärke, Cellulose, Glykogen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kohlenhydrate: Mono-, Di-, Polysaccharide • Glucose u. Fructose • Polysaccharide: Stärke, Cellulose, Glykogen • Seliwanoff-Probe für Fructose 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuckeraustauschstoffe • Inulin als Zuckerersatz • Inulin als Polysaccharid aus Fructose 	<ul style="list-style-type: none"> • Fructane als Polymere der Fructose • Inulin als Beispiel • Eigenschaften

Es lässt sich feststellen, dass in Chemie-Lehrwerken aktuell kaum auf Inulin als ein aus Fructose-Bausteinen aufgebautes Polysaccharid eingegangen wird. Allgemeine Informationen zu Kohlenhydraten und zum Unterschied zwischen den Monomeren Glucose und Fructose finden sich jedoch in beinahe allen Lehrwerken. Zur Unterscheidung von Mono-

, Di- und Polysacchariden werden in der Regel nur aus Glucose aufgebaute Vertreter genannt.

Diese stichpunktartige Analyse lässt die Schlussfolgerung zu, dass, obwohl Inulin in vielen Chemielehrbüchern nicht explizit beschrieben wird, dennoch Grundlagen für die Beschäftigung mit diesem Polysaccharid, mit seinem strukturellen Aufbau sowie Analysemöglichkeiten in der Schule gegeben sind. Es kann also sinnvoll und hilfreich sein, sich bei Beschäftigung mit dem Löwenzahn als Kautschuklieferant auch mit dem Inhaltsstoff Inulin zu befassen.

5.2 Konzeptionelle Leitlinien

Die Liste der Anforderungen an einen modernen Chemieunterricht ist lang. Sie erstreckt sich von Kompetenzorientierung über individuelle Förderung bis hin zur Berücksichtigung von Schülervorstellungen. Dabei lassen sich bei der Entwicklung von neuen Unterrichtsinhalten unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Im vorliegenden Fall wurde ein besonderes Augenmerk auf Bildung für nachhaltige Entwicklung, Förderung von Wissen über *nature of science*⁷⁶, Erhöhung der Relevanz des Chemieunterrichts sowie Stärkung seiner gesellschaftlichen Ausrichtung gelegt. Dies liegt darin begründet, dass die Themen Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn besonderes Potenzial aufweisen, gerade diesen Aspekten gerecht zu werden. Natürlich werden viele weitere Aspekte bei der konkreten Ausgestaltung mitberücksichtigt, in der Argumentation aber nicht weiter besonders herausgehoben. Aufgrund der Vielzahl an bereits existierenden Unterrichtsvorschlägen und -materialien zu Inulin (siehe Kap. 5.1.4), wird im Folgenden jedoch im Wesentlichen der Fokus auf den Kautschuk gelegt.

Die Relevanz der genannten Aspekte für den Chemieunterricht ist in der Fachdidaktik unbestritten. Daher wird hier keine breite Diskussion vorgenommen, sondern die Bedeutung der Bereiche nur anhand einzelner Aussagen aus verschiedenen Fachdidaktik-Lehrwerken sowie bildungspolitischen Veröffentlichungen schlaglichtartig dokumentiert.

⁷⁶ Unter Wissen über *nature of science* wird ein Nachdenken über das Wesen, die Natur von Naturwissenschaften verstanden. Eine detailliertere Beschreibung damit verbundener Fragestellungen findet sich in Kap. 5.2.2.

Zum einen wird Wissen darüber, „wie naturwissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden [...] als weitaus bildungsrelevanter betrachtet als die reine Vermittlung von Faktenwissen“ (Bader et al. 2002, S. 112). Dies weist auf die Wichtigkeit von Wissen über *nature of science* hin, welches auch zu den Zielen eines kompetenzorientierten Chemieunterrichts gezählt wird (vgl. Reiners 2017, S. 77ff.). Als weiteres wichtiges Bildungsziel werden die Fähigkeiten zuhören und argumentieren zu können sowie eine tolerante Haltung gegenüber anderen Meinungen beschrieben. Schüler sollen in der Lage sein, „Meldungen [...] über chemisch-technische und biochemische Sachverhalte kritisch einzuschätzen“ (Bader et al. 2002, S. 115, einige Hervorhebungen i.O.). Hier wird demnach auf eine größere gesellschaftliche Orientierung des Chemieunterrichts verwiesen. Dem wird unter anderem in einem verstärkt gesellschaftskritischen und problemorientierten Unterricht nachgekommen. Außerdem wird der Forderung nach Bildung für eine nachhaltige Entwicklung eine besondere Bedeutung zugemessen (vgl. Metzger 2010, S. 38; Bader et al. 2002, S. 116). Im nationalen Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung wird das Ziel vorgestellt, BNE langfristig strukturell in der deutschen Bildungslandschaft zu verankern (vgl. Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung 2017, S. 8). Nicht zuletzt wird durch das Ziel, die „Bedeutung der Chemie und ihrer Produkte im Umfeld jedes Einzelnen, im Alltag, in der Freizeit und im Beruf heute und in der Zukunft“ bewusst zu machen (Bader et al. 2002, S. 115, i.O. Fettdruck), auch die Relevanz naturwissenschaftlicher Bildung in den Vordergrund gerückt.

Auch mit Blick auf die zu entwickelnden Materialien und Experimente spielen die oben genannten Kriterien eine Rolle. Denn entsprechend dem Ansatz der curricularen Innovationsforschung werden rohe (fachwissenschaftliche) Phänomene, Verfahren und Anwendungen dadurch zu innovativen Unterrichtskonzepten bzw. Unterrichtsmaterialien, indem sie durch das Auge der Didaktik und Methodik betrachtet (und durch eventuelle didaktische Reduktion) entsprechend angepasst werden. Diese Anpassung erfolgt im Falle des aktuellen Themas Löwenzahnkautschuk unter anderem auch anhand der Kriterien einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, eines relevanten und gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts und anhand des Ziels, Wissen über *nature of science* anzubahnen.

5.2.1 Förderung von Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) durch Beschäftigung mit Kautschuk aus Löwenzahn

Auch nach Beendigung der UN-Dekade Bildung für nachhaltige Entwicklung wird eine weitere Förderung von BNE (in der formalen und nichtformalen Bildung) angestrebt. Sowohl von der Politik als auch von der Didaktik wird gefordert, dass Lernende in Schule und speziell auch im Chemieunterricht mehr Bildung für nachhaltige Entwicklung erfahren und sich mit dem Nachhaltigkeitskonzept auseinandersetzen sollen.⁷⁷ In diesem Sinne formulieren Parchmann und Menthe das Ziel, dass Schülerinnen und Schüler „jetzt und zukünftig in der Lage sind, auf der Basis ihrer chemischen Kenntnisse Fragen und Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung zu erkennen, zu diskutieren und umzusetzen“ (Parchmann und Menthe 2006, S. 115).

Auch in den weltweiten Zielen nachhaltiger Entwicklung (*sustainable development goals*, SDGs) der Vereinten Nationen ist die Forderung nach „hochwertiger“ Bildung und lebenslangem Lernen festgeschrieben: Bis 2030 soll demnach sichergestellt werden,

dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung und nachhaltige Lebensweisen, Menschenrechte, Geschlechtergleichstellung, eine Kultur des Friedens und der Gewaltlosigkeit, Weltbürgerschaft und die Wertschätzung kultureller Vielfalt und des Beitrags der Kultur zu nachhaltiger Entwicklung. (Vereinte Nationen 2015, S. 18)

Daher wurde für den Zeitraum von 2015-2019 und als Verlängerung der UN-Dekade von der UNESCO das „Weltaktionsprogramm Bildung für nachhaltige Entwicklung“ ausgerufen, um eine Veränderung im Bildungssystem zu bewirken und Bildung für nachhaltige Entwicklung in dessen Struktur zu bringen. Für Deutschland wurde dazu ein nationaler Aktionsplan ausgearbeitet, der die zu erreichenden Ziele und Maßnahmen in allen Bildungsbereichen zusammenfasst (vgl. Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung 2017).

Kriterien für die Auswahl geeigneter Inhalte für BNE in der Schule finden sich unter anderem bei Barth (2015), aber auch bei Stoltenberg und Burandt (2014, S. 577ff.). Barth

⁷⁷ Diese Bildungsoffensive für nachhaltige Entwicklung verfolgt unter anderem das Ziel, die Lernenden vorzubereiten, an Entwicklungsprozessen mit ökologischer, ökonomischer und sozio-kultureller Bedeutung teilzunehmen. Aufgrund der Bekanntheit des Konzepts wird in dieser Arbeit keine weitere detailliertere Einführung in das Konzept und seine Entstehung gegeben. Eine ausführliche Beschäftigung mit dem Konzept findet sich u.a. bei Bormann und Haan (2008), Haan (2002); Haan (2008).

prüft die Themen dabei vor allem in Hinblick auf deren Relevanz, unsere Verantwortung und die Chancen, wie die folgende Tabelle widerspiegelt (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Rahmen für Definition und Auswahl geeigneter Themen für Bildung für nachhaltige Entwicklung nach Barth (vgl. Barth 2015, S. 78, Übersetzung M.G.)

Relevanz	
Thematische Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - globale Relevanz: Zahl der betroffenen Personen - lokale Relevanz - Relevanz im öffentlichen und politischen Diskurs - Langzeitliche Relevanz - Dringlichkeit 	Unterrichtliche Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - Bedeutung für das tägliche Leben der Schüler - Verknüpfung zu Vorwissen und Erfahrungen
Verantwortung	
Thematische Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - Beteiligung an negativen Auswirkungen - Berücksichtigung ethischer Schlüsselprinzipien - Wissenslücken 	Unterrichtliche Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - Zukunftsrelevanz für die Schüler - Unterstützung im zukünftigen Entscheidungsspielraum der Schüler
Chancen	
Thematische Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - Erfahrungsschatz und existierende Wissensbasis - Handlungsmöglichkeiten auf individueller/institutioneller Ebene - Potenzial, sich zu engagieren und teilzuhaben - Potenzial für eine wirkliche Veränderung 	Unterrichtliche Aspekte <ul style="list-style-type: none"> - Modellcharakter des Themas - Verknüpfung zu generellen Phänomenen oder fundamentalen Prinzipien

Barth fasst Anforderungen an Themen und Lernumgebungen, d.h. an Inhalte und Methoden für den Umgang mit nachhaltiger Entwicklung in der Schule folgendermaßen zusammen:

The aim must be to design learning settings that ask for ethically reflected decision-making, build bridges between disciplinary knowledge and interdisciplinary, problem oriented approaches, and allow for the integration of different types of knowledge for solutions of practical relevance. (Barth 2015, S. 47)

Diese Forderung nach fachimmanenten und interdisziplinären Möglichkeiten sowie nach problemorientierten Ansätzen liefert neben Antworten auf inhaltliche Fragestellungen auch bereits Anhaltspunkte für die methodische Umsetzung.

Inhaltlich kann Bildung für nachhaltige Entwicklung anhand der Kautschukgewinnung im Sinne des etablierten Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit leicht realisiert werden:

Ökonomisch betrachtet sind die Mehrfachnutzung durch die Gewinnung von mehreren Rohstoffen (Kautschuk, Inulin, Fructose, Ethanol, Biomasse), die Zeitersparnis beim Anbau (wenige Monate bei *Taraxacum kok-saghyz* vs. mehrere Jahre bei *Hevea brasiliensis*) sowie die Unabhängigkeit vom stark schwankenden *Hevea brasiliensis*-basierten Kautschukpreis wichtige Aspekte, die mit Lernenden diskutiert werden können. Der Befall der Plantagenbäume durch den auf *Hevea brasiliensis* spezialisierten Schlauchpilz *Microcyclus ulei* führt in Südamerika (und möglicherweise auch bald in Südostasien) zu Ernteeinbußen, deren mögliche Folgen Schülern ebenfalls verdeutlicht werden können.

Ökologisch gesehen spielen eine Vielzahl von Gründen eine Rolle, die den russischen Löwenzahn zu einem anschaulichen Beispiel nachhaltiger Entwicklung werden lassen: Die Gewinnung der Rohstoffe kann ohne die Verwendung umweltschädigender Stoffe erfolgen. Durch den deutlich kürzeren Transportweg in der Nähe der Verarbeitungsstätten im Vergleich zum Latex aus *Hevea brasiliensis*, die Vermeidung weiterer unnötiger Abholzung von Regenwald, die Verringerung von Monokulturen des Kautschukbaumes und die anspruchslosen Wachstumsbedingungen z.B. auf bisher ungenutzten Kargböden wird die Umwelt ebenfalls entlastet.

Und auch der Pfeiler des Sozialen kann Berücksichtigung finden, wenn z. B. die Arbeitsbedingungen auf den Kautschukplantagen oder die Vor- und Nachteile der Schaffung neuer bzw. anderer Arbeitsplätze an anderen Orten vor allem im Anbau und in der Forschung rund um *Taraxacum kok-saghyz* in den Blick genommen werden.

Methodisch sollte Bildung für nachhaltige Entwicklung vor allem anwendungs- und problemorientiert stattfinden, sodass die Flexibilität von Wissen gefördert wird (vgl. Michelsen und Fischer 2015, S. 28). Um Perspektivenwechsel zu ermöglichen, wird eine interdisziplinäre Zusammenarbeit gefordert (vgl. Stoltenberg und Burandt 2014, S. 578). Die Gestaltungskomponente der nachhaltigen Entwicklung kann veranschaulicht werden, indem Arbeitsweisen, die Kreativität und antizipierendes Denken fördern, angeboten werden (vgl. Stoltenberg und Burandt 2014, S. 578ff.). Konkret werden beispielsweise die Projektarbeit, Methoden des spielerischen Lernens wie Rollen- und Planspiele, problemorientiertes Arbeiten, Mediationsverfahren, Szenarioanalysen, Arbeit mit Datenbanken und elektronischen Informationssystemen oder auch Naturerlebnisse genannt (vgl. Stoltenberg und Burandt 2014, S. 580-581; Michelsen und Fischer 2015, S. 27ff.; Höttecke 2013).

Bezüglich geeigneter Methoden zur Ermöglichung einer Bildung für nachhaltige Entwicklung lässt sich das Thema Kautschuk aus Löwenzahn also ebenfalls umsetzen: Es bietet das Potenzial für problemorientiertes Arbeiten (Welche Extraktionsmethoden für den Kautschuk sind besonders geeignet?), für Rollenspiele (z.B. Gruppendiskussionen) und für den Umgang mit Datenbanken und elektronischen Informationssystemen (z.B. Recherche zu Kautschukpreisen, zu Eigenschaften verschiedener Synthesekautschuke). Auch Szenarioanalysen (z.B.: Welche Folgen brächte ein Pilzbefall des Kautschukbaums mit sich?) sind denkbar.

5.2.2 Förderung von Wissen über *nature of science*

Wissen über *nature of science* (NOS)⁷⁸ ist unabdingbar für die Ausbildung einer naturwissenschaftlichen Grundbildung (*scientific literacy*) und stellt einen wichtigen Bestandteil naturwissenschaftlichen Unterrichts dar (vgl. u. a. Hofheinz 2008; Höble et al. 2004; Höttecke 2001).

Es umfasst das Nachdenken über naturwissenschaftliche Methoden, Wertvorstellungen einer Forschergemeinschaft, die zur Entwicklung wissenschaftlichen Wissens führen, eine Reflexion über den erkenntnistheoretischen Status naturwissenschaftlichen Wissens sowie kulturelle und soziale Verflechtungen sowohl des wissenschaftlichen Wissens als auch des Wissenschaftsbetriebs selbst. So werden erkenntnistheoretische, wissenschaftstheoretische, wissenschaftsethische, wissenschaftshistorische sowie soziologische Aspekte in Betracht gezogen (vgl. Hofheinz 2010, S. 8).

Die Forschergruppe um Lederman hält folgende Aspekte von NOS für den naturwissenschaftlichen Unterricht für relevant:

- die empirische Basis naturwissenschaftlichen Wissens
- der Status von Beobachtungen, Deutungen und Modellen
- der Status von Theorien und Gesetzen
- die anschaulich-kreative Seite der Naturwissenschaften
- die Theoriegebundenheit naturwissenschaftlichen Wissens
- der soziale und kulturelle Einfluss auf naturwissenschaftliches Wissen

⁷⁸ Eine Abgrenzung von *nature of science* und den daran angrenzenden Termini und Übersetzungen findet sich bei Hofheinz (2010, S. 9). In der vorliegenden Arbeit werden *nature of science* und die deutsche Übersetzung „Natur der Naturwissenschaften“ synonym verwendet.

- der Mythos einer einheitlichen naturwissenschaftlichen Methode
- die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens (vgl. Lederman et al. 2002, S. 499ff., Übersetzung nach Hofheinz 2010)

Ein Unterricht mit dem Thema Löwenzahnkautschuk oder -inulin bietet einerseits aufgrund modernster Forschungsbestrebungen, zum anderen aufgrund seiner historischen Perspektive, das Potenzial, ein Lernen *über* Chemie anzubahnen, indem einige der von Lederman beschriebenen Aspekte thematisiert werden. Dabei kann der Aspekt der sozialen und kulturellen Einbettung von naturwissenschaftlichem Wissen besonders anschlussfähig sein. Diesen definiert Lederman folgendermaßen:

[...] science as a human enterprise is practiced in the context of a larger culture, and its practitioners (scientists) are the product of that culture. Science, it follows, affects and is affected by the various elements and intellectual spheres of the culture in which it is embedded. These elements include, but are not limited to, social fabric, power structures, politics, socioeconomic factors, philosophy, and religion. (Lederman 2007, S. 834)

Naturwissenschaft und Gesellschaft beeinflussen sich demnach gegenseitig. Dabei handelt es sich nicht nur um die Politik (als Akteur der Gesellschaft), die auf die Naturwissenschaft Einfluss nehmen kann, sondern unter anderem auch um ökonomische Faktoren und sogar um religiöse Ansichten.

Im Folgenden werden Möglichkeiten vorgestellt, einige der von Lederman herausgearbeiteten Aspekte von NOS mithilfe der Themen Löwenzahnkautschuk und -inulin zu thematisieren. Dabei wird zwischen der historischen Perspektive und der Annäherung über aktuelle Forschung unterschieden; der Aspekt des sozialen und kulturellen Einflusses auf naturwissenschaftliches Wissen steht in beiden Fällen im Fokus. Weitere Diskussionspunkte, über die durch Auseinandersetzung mit Löwenzahnkautschuk Wissen über NOS angebahnt werden kann, könnten die empirische Basis von Naturwissenschaften, die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens und der Mythos einer einheitlichen naturwissenschaftlichen Methode sein. Auch für diese Aspekte werden Anknüpfungspunkte vorgestellt.

Zum Potenzial, Wissen über *nature of science* über eine historische Perspektive anzubahnen

Auch wenn die Beschäftigung mit historischen Themen im Chemieunterricht laut einer Studie zum Chemieinteresse von Gräber und Lindner⁷⁹ nur für etwa ein Drittel der Befragten besonders interessant zu sein scheint (vgl. Gräber und Lindner 2009, S. 93), bietet der historische Aspekt der Löwenzahnforschung vielfältige Lerngelegenheiten und sollte nicht außer Acht gelassen werden. Wie bereits in Kapitel 3.2.5 ausführlich dargelegt, war das Ziel, den russischen Löwenzahn züchterisch zu optimieren und Löwenzahnkautschuk industriell zu gewinnen, in den 1930er Jahren vor allem politisch motiviert. Die Mittel, mit denen dies zu erreichen versucht wurde, waren durch die Ideologie und die Einstellung gegenüber anderen Religionen und Kulturen geprägt. Auch auf andere Bereiche der Naturwissenschaften (z.B. die Medizin) hat die Politik damals nachhaltig Einfluss genommen.

Im Fall des russischen Löwenzahns bietet sich eine Beschäftigung über seine historische Perspektive besonders an, um den Aspekt der kulturellen und sozialen Eingebundenheit von Naturwissenschaften (im Unterricht) zu thematisieren. In den alltäglichen Chemieunterricht findet Geschichte häufig dann Einzug, wenn es um Entdeckungen bedeutender Chemiker und das Nachempfinden ihres Erkenntnisprozesses geht (z. B. beim Atombau oder dem Haber-Bosch-Verfahren). Geschichte und Chemie können aber auch auf andere Weise verknüpft werden.

Teilaspekte einer Einbindung von NOS in den naturwissenschaftlichen Unterricht über einen historischen Ansatz werden schon 1985 von Stork in einem Artikel über die Rolle der Naturwissenschaftsgeschichte im naturwissenschaftlichen Unterricht benannt⁸⁰. Er beschreibt dort vier Ziele, die man durch „zeitweilige Einbeziehung von Wissenschaftsgeschichte in den Unterricht“ erreichen kann (Stork 1985, S. 297). Eine Berücksichtigung chemiehistorischer Aspekte ermöglicht es demnach ...

... manche Unterrichtsinhalte sachlich besser verständlich zu machen.

⁷⁹ Es wurden etwa 1100 Schüler der achten bis zehnten Klassen von Gymnasien und Realschulen in Schleswig-Holstein befragt.

⁸⁰ Obgleich Konzepte einer *nature of science* an den Beginn des 20. Jahrhunderts zurückreichen, entwickelten sich seit den 1990er Jahren im englischsprachigen Raum konkrete Aspekte, die in einem naturwissenschaftlichen Unterricht angebracht zu sein scheinen (vgl. McComas et al. 2002; Deng et al. 2011). Im deutschsprachigen Raum ist v.a. Höttecke (2001) anzuführen.

- ... Charakteristika der empirischen Naturwissenschaft Chemie zu verdeutlichen.
- ... Chemie als Ergebnis der Tätigkeit kreativer, kooperierender Menschen herauszustellen.
- ... externe Einflüsse auf die Entwicklung der Chemie aufzuzeigen. (vgl. Stork 1985, S. 297)

Neben allen anderen kann insbesondere das vierte Ziel, externe Einflüsse aufzuzeigen, kann mit dem Beispiel der Kautschukgewinnung aus russischem Löwenzahn zur Zeit des Zweiten Weltkriegs gut erarbeitet werden.

Nach Stork beschäftigen sich unter anderen auch Höttecke und Henke mit Möglichkeiten, über einen historischen Kontext die Natur der Naturwissenschaften näher kennenzulernen (vgl. Höttecke und Henke 2010). Ihrer Meinung nach wird naturwissenschaftlicher „Unterricht immer dann schon philosophisch reflektierend, wenn nach den Bedingungen der Möglichkeiten von Erkenntnis oder nach den tatsächlichen Praxen wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung gefragt wird“ (Höttecke und Henke 2010, S. 4–5). Die Autoren schlagen Fragenbeispiele vor, die Lehrer zur expliziten Reflexion über die Natur der Naturwissenschaften einsetzen können. Für das Beispiel der Gewinnung des Kautschuks aus *Taraxacum kok-saghyz* können Denkanlässe wie „Wenn ihr daran denkt, wie Wissenschaftler im Land XXX in der Zeit XXX gelebt und gedacht haben ...“ und Fragestellungen wie „Was treibt Wissenschaftler bei ihrer Forschung an? Und wie wissen sie eigentlich, woran geforscht werden soll?“ besonders geeignet sein (vgl. Höttecke und Henke 2010, S. 4, 6). Durch die Beschäftigung nicht nur mit den Fachinhalten, sondern auch mit einem Gesellschaftsbezug und kritischen Fragestellungen wird der Chemieunterricht seiner in den Bildungsstandards festgeschriebenen Aufgabe der Schulung von Bewertungskompetenz gerecht. Diese hat unter anderem die Aufgabe, eine Grundlage dafür zu legen, „rationale und begründete Entscheidungen zu treffen und dafür zielführend Position zu beziehen“ (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2014, S.18). Das diesbezügliche Potenzial des Chemieunterrichts benennt bereits Scharf (1984), indem er beschreibt, dass durch Wissen über die Natur der Naturwissenschaften und durch Hinterfragen der Bedingungen des Gegebenen ein Beitrag zu einem „allgemeinen, rationalen Urteilsvermögen“ geliefert werden kann (Scharf 1984, S. 24).

Betrachtet man in diesem Zusammenhang Heymanns sieben Aufgaben allgemeinbildender Schulen, zu denen „Lebensvorbereitung“, „Stiftung kultureller Kohärenz“, „Weltorientierung“, „Anleitung zum kritischen Vernunftgebrauch“, „Entfaltung von Verantwortungsbereitschaft“, „Einübung in Verständigung und Kooperation“ sowie „Stärkung des Schüler-Ichs“ zählen (vgl. Heymann 2013, S. 50ff.), fällt auf, dass sich die von Scharf beschriebene Aufgabe, einen Beitrag zu rationalem Urteilsvermögen zu leisten, in der

Aufgabe der Anleitung zum kritischen Vernunftgebrauch verorten lässt. Ebenso kann durch die Beschäftigung mit NOS anhand des Themas Löwenzahnkautschuk ein Beitrag zur Entfaltung von Verantwortungsbereitschaft und zur Einübung in Verständigung und Kooperation geleistet werden.

Zum Potenzial, Wissen über NOS durch Beschäftigung mit aktueller Forschungsliteratur anzubahnen

Die soziale und kulturelle Eingebundenheit der Naturwissenschaften, die Lederman als ein zentrales Charakteristikum des Wesens der Naturwissenschaften erachtet (vgl. Lederman 2007, S. 834), lässt sich auch anhand aktueller Forschung am russischen Löwenzahn aufzeigen. Wenngleich heutzutage keine Autarkiebestrebungen im Sinne einer Ersatzstoffforschung mehr im Vordergrund stehen, sondern vielmehr das Nachhaltigkeitsprinzip und die Suche nach alternativen Rohstoffen, sind es dennoch sozioökonomische Faktoren und die Politik, die auf Wissenschaft Einfluss nehmen und sie z.B. durch die Ausschreibung von Forschungsschwerpunkten in Förderprogrammen lenken. Es besteht die Möglichkeit, Fragen zu diskutieren, denen auch Forscher und Politiker (beispielsweise in Gremien zur Genehmigung von Forschungsgeldern) gegenüberstehen, wie zum Beispiel ob ein Forschungsprojekt besonders förderungswürdig ist oder ob das, woran geforscht ist, für die Zukunft von Bedeutung und relevant sein wird. So können die Schüler Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Naturwissenschaften, Technik und Gesellschaft gewinnen und ein Gefühl dafür entwickeln, welchen Einfluss aktuelle gesellschaftliche und politische Entwicklungen auf das, was erforscht wird, nehmen.

Die Beschäftigung mit aktueller Forschungsliteratur und aktuellen Forschungsmethoden bietet zusätzlich das Potenzial, Wissen über die Natur der Naturwissenschaften aufzubauen, indem andere der von Lederman beschriebenen Charakteristika wie die empirische Basis, die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens oder auch der Mythos einer einheitlichen naturwissenschaftlichen Methode in den Vordergrund rücken.

So kann beispielsweise über die Lektüre und Reflexion aktueller Forschungsliteratur zu *Taraxacum kok-saghyz* auf authentische Art und Weise ein Verständnis dafür aufgebaut werden, wie wissenschaftliche Arbeit und Forschung strukturiert sind, wie wichtig eine genaue Protokollierung von Arbeitsschritten ist und dass nicht immer alle Forschungsansätze sofort zielführend sind. Zur Thematisierung der empirischen Basis naturwissenschaftlichen Wissens bieten sich beispielsweise Ausschnitte der Artikel zur saisonalen

Veränderung von Biomasse, Kautschuk- und Inulingehalt im Löwenzahn von Kreuzberger et al. (2016) oder zur Entwicklung von kautschukreicheren Löwenzahnvarianten von Stolze et al. (2017) an. Die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens als ein weiteres der Hauptkriterien für naturwissenschaftliche Arbeit lässt sich anhand der immer wieder neu erscheinenden Publikationen thematisieren. (Im Anhang Teil V finden sich dazu mögliche Materialien und Arbeitsaufträge.)

Auch das Nachempfinden verschiedener Versuche zur Extraktion von Kautschuk, die die Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines technischen Prozesses widerspiegeln, kann dazu beitragen, ein Verständnis dafür aufzubauen, dass keine einheitliche naturwissenschaftliche Methode existiert und dass auch die Naturwissenschaften eine kreative Seite aufweisen.

5.2.3 Förderung von als relevant wahrgenommenen Themen

Im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von Chemie- (und anderem naturwissenschaftlichen) Unterricht ist häufig von einer Erhöhung der Relevanz der Unterrichtsthemen die Rede. Während Relevanz in der Literatur teilweise mit Interesse umschrieben wird (vgl. Schreiner und Sjøberg 2004, S. 21), haben Stuckey, Sperling, Hofstein, Mamlouk-Naaman und Eilks auf Basis von Literaturanalyse und Gruppendiskussionen ein Modell entwickelt, das Relevanz naturwissenschaftlicher Bildung in drei Dimensionen, sowie motivationale und zeitliche Aspekte aufspaltet (vgl. Stuckey et al. 2014). Die Autoren definieren Relevanz im Sinne von Konsequenzen: „Naturwissenschaftlicher Unterricht wird relevant, wenn er (positive) Konsequenzen für das Leben des Lernenden hat“ (Stuckey et al. 2014, S. 177).

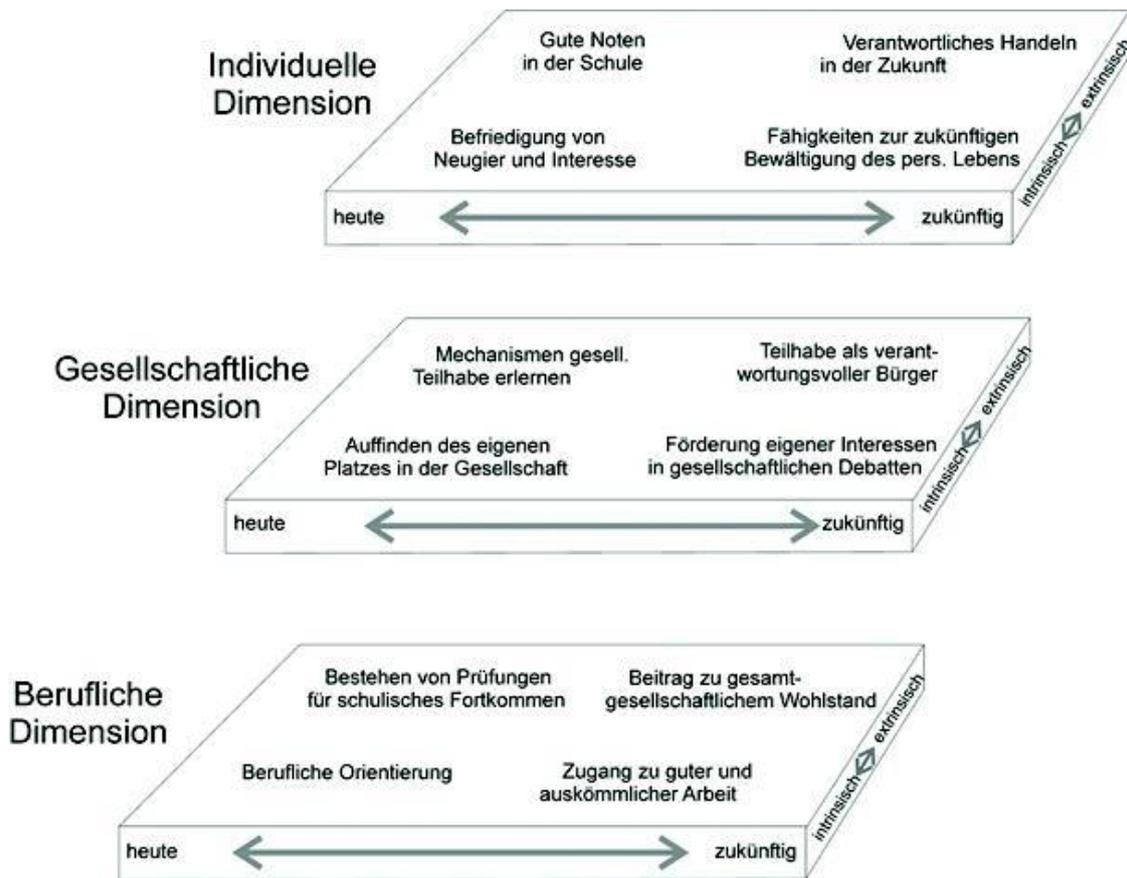


Abbildung 75: Modell zum Verständnis von Relevanz im naturwissenschaftlichen Unterricht (Stuckey et al. 2014, S. 178)

Die Autoren schlagen vor, ihr Modell als Hilfestellung für die Analyse zu nutzen, inwieweit ein Thema das Potenzial hat, relevant für die Schüler zu sein oder von ihnen als relevant wahrgenommen zu werden. Auch für einzelne Unterrichtssequenzen oder ganze Schulbücher kann reflektiert werden, welche Dimensionen von Relevanz darin besonders angesprochen werden (vgl. Stuckey et al. 2014, S. 179).

Im Folgenden wird anhand des vorgestellten Relevanzmodells (nach Stuckey et al.) dargestellt, inwiefern Dimensionen von Relevanz durch eine Beschäftigung mit dem russischen Löwenzahn als potenzielle Kautschukquelle und den daran angrenzenden Themenbereichen angesprochen werden können.

Individuelle Dimension: Dem Wunsch nach Befriedigung von Neugier und Interesse der Lernenden als ein besonders häufig benannter Faktor von Relevanzempfinden kann z.B. durch eine (auch) experimentell ausgerichtete Beschäftigung mit dem Thema nachgekommen werden. Wissen über die Herstellung z.B. von synthetischem Kautschuk im Vergleich zu Naturkautschuk aus nachwachsenden Rohstoffen kann für Schülerinnen und

Schüler möglicherweise insofern relevant sein, als dass es zu einer Grundlage für verantwortliches Handeln heute und in der Zukunft beiträgt.

Mittlerweile ist durch Studien hinreichend belegt, dass Schülerinnen und Schüler großes Interesse am Experimentieren im Chemieunterricht haben und dass Lernen in Kontexten und mit Lebensweltbezug das Interesse fördert (vgl. u.a. Gräber 1992, S. 357; Holstermann und Bögeholz 2007). Ergebnisse einer Interessenstudie zum Chemieunterricht zeigen, dass ein großes Interesse an den Bereichen „Chemische Anwendungen, die jetzt und in Zukunft von großem Nutzen für uns sein könnten“ sowie „Chemische Anwendungen, die für uns und unsere Umwelt mit großen Gefahren verbunden sind“ besteht (Gräber und Lindner 2009, S. 93). Die Autoren schlussfolgern, dass es also vor allem Kontexte mit gesellschaftspolitischen Dimensionen sind, die die Lernenden ansprechen. Historische Aspekte werden hingegen nur von einem kleineren Teil der Lernenden als interessant oder sehr interessant wahrgenommen (vgl. Gräber und Lindner 2009, S. 93). Ergebnisse der in Deutschland durchgeführten ROSE-Erhebung⁸¹ deuten darauf hin, dass Jugendliche wenig Interesse an Inhalten der Botanik zeigen, dass aber großes Interesse an den Bereichen Spektakuläres, Gesundheit und Jugend besteht (vgl. Elster 2007).

Es lässt sich schlussfolgern, dass aktuelle Problemstellungen sowie Themen, die der Lebenswelt der Jugendlichen entstammen, demzufolge im Besonderen geeignet sind, aktuelles Interesse zu wecken. Um solche Fragestellungen erfolgreich in den Unterricht einbringen zu können, wird gefordert, solche aktuellen Themen (in Kombination von Fachwissenschaft und Fachdidaktik) auch in Fortbildungsveranstaltungen für Lehrer aufzunehmen (vgl. Ropohl et al. 2016). Für die Bereiche „Umwelt“, „Naturstoffe“ oder „Energie“ konnte z.B. festgestellt werden, dass sowohl ein großer Wunsch nach Fortbildung vorhanden ist als auch bereits eine Umsetzung im Unterricht erfolgt (vgl. Ropohl et al. 2016, S. 29). Als Schwerpunkte für zukünftige Fortbildungsarbeit wurden daher unter anderem die Bereiche „Nachhaltigkeit im Chemieunterricht, Chemie und Life Science, Moderne Materialien und Werkstoffe“ festgelegt und zum Beispiel in Fortbildungszentren der Gesellschaft Deutscher Chemiker genauer in den Blick genommen (vgl. Ropohl et al. 2016, S. 32).

⁸¹ Die ROSE-Studie (The Relevance of Science Education) ist eine internationale Vergleichsstudie, in der Interessen, Meinungen und Einstellungen von Jugendlichen zu Naturwissenschaften erhoben werden.

Dass unter anderem Themen, die heute und in Zukunft für die Schüler von Bedeutung sein können, das Interesse der Lernenden wecken können, wurde bereits erläutert. Inwiefern das Thema Kautschuk aus Löwenzahn für Lernende interessant ist und welche Aspekte bei der Beschäftigung mit der Materie besonderes Interesse wecken wird anhand einer kleinen Stichprobe in Kapitel 5.4 gezeigt.

Gesellschaftliche Dimension: Diese Dimension von Relevanz bezieht sich vor allem auf „Vorbereitung auf Selbstbestimmung und verantwortungsvolle Teilhabe an der Gesellschaft [...] durch den Aufbau eines Verständnisses über die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Gesellschaft, Naturwissenschaft und Technik“ (Stuckey et al. 2014, S. 177). Da es sich also besonders auch um Kompetenzen aus dem Bereich von *nature of science* handelt, sei hier auf den Absatz zur Förderung der Natur der Naturwissenschaften verwiesen (vgl. Kap. 5.2.2 zur Förderung von Wissen über *nature of science*).

Im Bereich der gesellschaftlichen Dimension kann durch die Auseinandersetzung mit Kautschuk aus Löwenzahn vor allem mit Blick auf die Zukunft der Lernenden das Empfinden von Relevanz des Themas erhöht werden. Die Möglichkeit zu ergebnisoffenen Diskussionen, zum Beispiel über die Vor- und Nachteile verschiedener Kautschukpflanzen oder Herstellungsmethoden als auch über die Frage nach ihrer Nachhaltigkeit kann die Ausbildung (und das Vertreten) eigener Interessen in gesellschaftlichen Debatten sowie die Teilnahme als verantwortungsvoller Bürger stärken und so die Lernenden auf Teilhabe und Mitbestimmung in der Gesellschaft vorbereiten.

Berufliche Dimension: Betrachtet man die aktuelle PISA-Studie, so wird deutlich, dass sich in Deutschland etwa 15 % der 15-Jährigen für einen MINT-Beruf im weiteren Sinne interessieren (vgl. OECD 2016, S. 125). Eine in den Regionen Siegen-Wittgenstein und Olpe durchgeführte Befragung mit 1113 Lernenden der Jahrgangsstufen 8, 10 und 11 (Q1) stimmt mit diesen Ergebnissen überein und zeigt im Speziellen auf die Chemie bezogen, dass nur etwa 0,1 % der Achtklässler und etwa 0,7 % der Schüler der Qualifikationsphase (11) eine Ausbildung oder ein Studium im Bereich der Chemie anstreben (Spitzer 2017, S. 92ff.). Insgesamt arbeitet jedoch aktuell etwa 1 % aller Beschäftigten in Deutschland in der chemischen Industrie⁸². Interventionen, um dem daraus prognostizierbarem Fachkräftemangel entgegenzuwirken, sind also dringend erforderlich. Gerade der

⁸² Von etwa 44 Mio. Erwerbstätigen (vgl. Statistisches Bundesamt 30.06.2017 - 226/17) finden sich etwa 445.800 Mitarbeiter in der chemischen Industrie (vgl. Verband der chemischen Industrie e.V. 2013, S. 32).

Chemieunterricht, dessen Image die Berufswahl für chemische Berufe signifikant beeinflusst und der somit einen stärkeren Einfluss als z.B. das Image der Chemie als Wissenschaft bei den Lernenden hat, ist hier in der Pflicht, durch einen zeitgemäßen Unterricht einen Beitrag zur Berufsorientierung zu leisten (vgl. Spitzer 2017).

Die Aufgabe der Berufsorientierung ist in den Lehrplänen aller Bundesländer verankert. Im Chemieunterricht wird dieser Forderung häufig durch die Durchführung von Exkursionen in chemische Betriebe, die Einladung von Experten aus Unternehmen oder auch durch Kooperationen bzw. Patenschaften zwischen Schule und Industrie oder Schule und Universitäten nachgekommen (vgl. Haucke 2014, S. 16).

Für eine stärkere Integration von Berufsorientierung in den alltäglichen Chemieunterricht und um die Attraktivität und Exklusivität des Forschungs- und Innovationsstandortes Deutschland, der weltweit einen guten Ruf hat, auch in Zukunft zu sichern, fordert vor allem Tausch, aktuelle und innovative Inhalte in die Curricula der Fächer aufzunehmen und diese in Form einer didaktischen Integration mit etablierten Unterrichtsinhalten zu verknüpfen (vgl. Tausch 2008, S. 75–76). Auch Anton nennt die Schaffung von Lehrermitteln, die über innovative Forschungsinhalte aufklären und somit für eine Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses sorgen, eine wichtige Komponente fachdidaktischen Forschens und Entwickelns (vgl. Tausch und Anton 2015, S. 82; Anton 2008, S. 167–168).

Die Beschäftigung mit neuen und innovativen Themen wie der Industrialisierung des Löwenzahnkautschuks hält immer auch Möglichkeiten zum Aufzeigen beruflicher Chancen und zur Förderung des naturwissenschaftlichen Nachwuchses bereit. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Forschungen zum Löwenzahnkautschuk noch in der Entwicklungsphase befinden, bietet es sich an, über die Prozesshaftigkeit von Forschung aufzuklären und so Lernende im Idealfall für naturwissenschaftliche Forschung zu interessieren. Dass solche Ideen in Deutschland entwickelt und anschließend auch die Tat umgesetzt werden (können), ist ebenfalls als positiv für den Innovationsstandort Deutschland anzusehen und bietet somit ein Potenzial, Schüler zu motivieren. Indem transparent gemacht wird, wie der Prozess der Gewinnung des Löwenzahnkautschuks bzw. des Inulins aus den Wurzeln entwickelt wurde und aktuell in der Industrie umgesetzt wird, lassen sich Einblicke in verschiedene Berufsbilder gewinnen. So können unter anderem Berufe in der Reifenindustrie vorgestellt werden. Durch die Möglichkeit der Beschäftigung mit aktueller For-

schungsliteratur und durch die Nachahmung von Experimenten, die Einblicke in den Forschungs- und Entwicklungsprozess geben, wird der Fokus jedoch vor allem auf die Prozesshaftigkeit der Arbeit und auf die Forschung gelegt. Berufsbilder wie z.B. das eines Chemikers, eines Chemieingenieurs oder eines Forschers im Bereich der Pflanzenzüchtung, Genetik oder Verfahrenstechnik sind hier anschlussfähig. Die Vorstellung des von Continental geplanten „Taraxagum Lab“, in dem die Überführung der Kautschukproduktion vom Gramm- in den Tonnenmaßstab umgesetzt werden soll, bietet weiterhin die Möglichkeit zu zeigen, dass in diesem Bereich Arbeitsplätze geschaffen werden (vgl. Continental Reifen Deutschland GmbH 28.03.2017).

5.2.4 Gestaltung eines gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts

Den zuvor beschriebenen Forderungen nach Orientierung an Interessen, Lebenswelt und auch aktuellen politischen und gesellschaftlichen Themen soll im Konzept des gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterrichts, das in den 1990er Jahren von Eilks entwickelt wurde, nachgekommen werden (vgl. Stolz et al. 2011). National und international wird bereits seit einiger Zeit eine stärkere Orientierung des naturwissenschaftlichen Unterrichts an gesellschaftlichen und allgemeinbildenden Fragestellungen gefordert und umgesetzt. Im gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterricht wird unter anderem die Entwicklung einer chemiebezogenen Kommunikations- und Bewertungskompetenz angestrebt. International ist der Ansatz unter dem Begriff *socio-scientific issues*⁸³, das dem gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterricht sehr nahe kommt, besser bekannt (vgl. u.a. Sadler 2011).

⁸³ Unter *socio-scientific issues* werden offen diskutierbare und kontroverse Themen verstanden, die einen Bezug zu den Naturwissenschaften aufweisen und die eine Problemlage aus dem globalen oder lokalen Umfeld ohne klare Lösung beinhalten.

Tabelle 16: Vier-Säulen-Modell des gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts
(vgl. Eilks 2011, S. 52)

Ziele	Kriterien für die Themenwahl	Methodische Konsequenzen für die Umsetzung	Struktur der Unterrichtseinheit
Allgemeinbildung/ „education through science“	Authentizität	Authentische Alltagsmedien	Zugang und Analyse der Kontroverse
(Multidimensional) Scientific Literacy	Relevanz	Schülerorientiertes und experimentelles Lernen von Chemie	Fachliche Klärung unter Einbezug experimenteller Arbeit
Förderung von Bewertungskompetenz	Bewertungslage offen in Bezug auf gesellschaftlich relevante Fragen	Schülerzentrierte und kooperative Lernformen	Wiederaufgreifen der kontroversen Problemlage
Förderung von Kommunikationskompetenz	Offene Diskutierbarkeit	Methoden zu Strukturierung kontroverser Debatten	Erarbeitung und Diskussion verschiedener Perspektiven
Naturwissenschaftliche Kenntnisse & Fähigkeiten erlernen	Fragestellen mit Bezug zu Chemie und Technik	Methoden zur Provokation und Explikation individueller Meinung	Metareflexion

Mit Bezug auf den von Eilks beschriebenen Ansatz wird in Tabelle 17 ein Überblick über die Kriterien zur Eignung eines Themas im Rahmen des gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterrichts gegeben und die Thematik „Kautschuk aus Löwenzahn“ hinsichtlich dieser Kriterien geprüft.

Tabelle 17: Kriterien für die Themenwahl am Beispiel „Kautschuk aus Löwenzahn“
(vgl. Eilks 2011, S. 53)

Kriterium	Anforderung und Prüfung	Beispiel „Kautschuk aus Löwenzahn“
Authentizität	Das Thema ist authentisch, weil es aktuell in der Gesellschaft diskutiert wird. <i>Prüfung:</i> Es wird überprüft, ob das Thema aktuell in Alltagsmedien (Zeitungen, Zeitschriften, Fernsehen, Werbung, ...) präsent ist.	Schlagzeilen zur Thematik sind in verschiedenen Zeitungen zu finden. Einige Videos sind online verfügbar und lassen sich im Unterricht nutzen.
Relevanz	Das Thema ist relevant, da Entscheidungen über das Thema in der Gesellschaft unmittelbare Auswirkungen für das heutige oder zukünftige Leben der Schüler haben werden. <i>Prüfung:</i> Zur Überprüfung werden Szenarios formuliert und hinterfragt. Es wird geprüft, ob gesellschaftliche Entscheidungen im Thema Auswirkungen auf Handlungsoptionen des Einzelnen	Alle Schüler nutzen täglich mehrfach – wenn auch unbewusst – Gummiprodukte. Wo diese Produkte herkommen bzw. wie sie produziert werden, ist dabei wohl nur wenigen Lernenden bewusst.

	haben, etwa im Sinne von Konsum- und Verhaltensoptionen.	
Offene Bewertungslage in Bezug auf eine gesellschaftlich relevante Frage	Die gesellschaftliche Bewertung ist offen und erlaubt verschiedene Sichtweisen. <i>Prüfung:</i> Es wird überprüft, ob in der öffentlichen Diskussion verschiedene, kontroverse Standpunkte vertreten werden (von Interessensvertretern, Medien, Politikern, ...).	Es lassen sich verschiedene Sichtweisen erarbeiten und einnehmen. Da es kein richtig oder falsch gibt, sind kontroverse und offene Diskussionen möglich. Der Umgang mit dem Problem, dass Naturkautschuk ein notwendiger Rohstoff ist, die Ressource jedoch knapp werden könnte, kann kontrovers diskutiert werden (Pro <i>Hevea</i> -Kautschuk, Pro-Löwenzahnkautschuk, Pro-Synthesekautschuk).
Offene Diskutierbarkeit	Das Thema ist offen diskutierbar. <i>Prüfung:</i> In Gedankenexperimenten werden Meinungsäußerungen mit verschiedenen Standpunkten hinterfragt. Es wird geprüft, ob einzelne Personen oder Gruppen aus ethischen oder sozialen Gründen potenziell diffamiert werden oder sich ins Abseits gesetzt fühlen könnten.	Eine Diskussion über mögliche Gummiprodukte aus Löwenzahnkautschuk ist unbedenklich. Da noch keine tatsächlichen Produkte auf dem Markt sind, kann niemand für eine vermeintlich falsche Entscheidung zur Rechenschaft gezogen werden.
Bezug zu Naturwissenschaft und Technik	Das Thema dreht sich um eine naturwissenschaftlich-technische Sachfrage, bei deren Verständnis naturwissenschaftliche Fakten und Zusammenhänge wesentlich sind. <i>Prüfung:</i> Zur Überprüfung wird der Diskurs in den Medien herangezogen. Werden in ihm fachinhaltliche Konzepte der Naturwissenschaften angesprochen und explizit oder implizit für die Argumentation genutzt?	Die Untersuchung der Eigenschaften des neuen Naturkautschuks und die Gewinnung des Kautschuks aus den Löwezahnwurzeln sind naturwissenschaftliche und technische Inhalte.

Es lässt sich zusammenfassen, dass sich die Thematik des Löwenzahnkautschuks unter bestimmten Gesichtspunkten für eine Unterrichtssequenz nach dem gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterricht eignet. Die wichtigsten Aspekte, die für das beschriebene Konzept sprechen, aber auch Argumente gegen eine Annäherung an das Thema über dieses Konzept, sollen im Folgenden noch einmal zusammengefasst werden.

Zum einen lassen sich offen und kontrovers die Fragen nach der Nachhaltigkeit verschiedener Kautschukarten und darüber, inwiefern eine Erforschung und Erschließung von Alternativen überhaupt sinnvoll ist, diskutieren. Auch die Fragen, ob sich der neu entwickelte Löwenzahnkautschuk durchsetzen und welchen Stellenwert er in der Industrie einnehmen könnte, können von den Schülern erörtert und offen diskutiert werden. Mit Blick auf Schülerexperimente in einem problemorientierten Chemieunterricht zum Thema Löwenzahnkautschuk lässt sich zudem festhalten, dass die verschiedenen Experimente zu unterschiedlichen Gewinnungsmöglichkeiten Einblicke in die Schwierigkeiten bei der

Entwicklung und Produktion eines neuen Rohstoffs in industriellem Maßstab geben können. So kann ebenfalls ein Beitrag zur Vorbereitung auf eine mögliche spätere kontroverse Diskussion über die Konkurrenzfähigkeit des Löwenzahnkautschuks zum synthetischen oder *Hevea*-Kautschuk geleistet werden.

Schwierig könnte es aufgrund der Tatsache werden, dass bisher noch keine Produkte mit Löwenzahnkautschuk auf dem Markt und für alle erreichbar sind, sodass Alltagsnähe und Authentizität nur bedingt bzw. über den Umweg des Kontakts mit herkömmlichen Gummiprodukten gegeben sind. Das ist für die nächste Zeit jedoch absehbar. Da im gesellschaftskritisch-problemorientierten Ansatz der Unterrichtsfokus vor allem auf der Kontroverse und ihrer Diskussion liegen soll, könnte weiterhin die Gefahr bestehen, dass die Chemie und die fachlichen Möglichkeiten, die dieses Thema birgt, vernachlässigt werden könnten. Dem kann durch eine geschickte Unterrichtsgestaltung aber vorgebeugt werden.

5.3 Schlussfolgerungen für den Einsatz im Unterricht

In den vorangegangenen Teilkapiteln wurden Aspekte vorgestellt, die bei der Planung von Unterrichtsinhalten zu Kautschuk aus Löwenzahn besondere Berücksichtigung finden sollten. Im Folgenden werden nun einige beispielhafte Überlegungen für die Auseinandersetzung mit dem Thema in der Oberstufe angestellt.

Dabei werden zum einen methodische Gedanken zum Unterrichtsgang präsentiert, zum anderen Anregungen für fächerverbindendes oder fächerübergreifendes Arbeiten mit Biologie, Geschichte und Politik gegeben.

Anschließend werden in einem Exkurs Vorschläge für die Anwendung im Sachunterricht in der Grundschule und im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht der Klassen 5 und 6 unterbereitet (Kap. 5.3.2) und schließlich ein beispielhafter Projekttag im Schülerlabor Science Forum der Universität Siegen vorgestellt (Kap. 5.3.3).

Einen Überblick über unterrichtliche Möglichkeiten liefert die folgende Tabelle.

Tabelle 18: Überblick über mögliche Fragestellungen bei der Beschäftigung mit *Taraxacum kok-saghyz*

Schulform und Unterrichtsfach	Mögliche Fragestellungen
Grundschule: Sachunterricht und Sek. I: NaWi	Welche Eigenschaften hat Kautschuk? Wo kommt Kautschuk her? Warum interessiert man sich für alternative Kautschukquellen?
Sekundarstufe II: Chemie	Wie lassen sich die Eigenschaften von Kautschuk und Gummi mithilfe der Molekülstruktur erklären? Welche Vor- und Nachteile hat der Löwenzahnkautschuk im Vergleich zu Kautschuk aus <i>Hevea brasiliensis</i> und synthetisch hergestelltem Kautschuk? Inwiefern ist Kautschuk aus Löwenzahn nachhaltig? Welche Berufe können mit der Beschäftigung mit Kautschuk vorgestellt werden?
Biologie	Was sind Milchröhren und wie sind sie aufgebaut? Welche Aufgaben erfüllt Kautschuk in der Pflanze?
Geschichte	Wie funktionierte Forschung zur Zeit des Nationalsozialismus? In welchen Arbeitsbedingungen und Lebensumstände befanden sich Zwangsarbeiter in der Löwenzahnforschung im 2. Weltkrieg? Inwiefern sind sie mit der Lage von Zwangsarbeitenden in anderen Einsatzbereichen im Dritten Reich vergleichbar?
Politik / Sozialwissenschaften	Wie wird Forschung heute von Gesellschaft und Politik gelenkt? Welche Auswirkungen könnte ein Verlust an <i>Hevea</i> -Kautschuk/eine Zunahme von Löwenzahnkautschuk auf den Weltmarkt haben?

5.3.1 Anregungen für die weiterführende Schule

5.3.1.1 Chemieunterricht

Es bieten sich verschiedene Herangehensweisen für eine unterrichtliche Betrachtung des Themas Kautschuk aus Löwenzahn an. Dabei kann entweder eine ganzheitliche Annäherung über die Pflanze, ihr Potenzial und ihre Inhaltsstoffe gewählt werden⁸⁴ oder aber der Ansatz, das Thema vom Produkt, dem Autoreifen, aus zu ergründen. Letzteres kommt der Idee eines Unterrichts nach „Chemie im Kontext“ nahe (vgl. Demuth et al. 2008). Neben der Kontextorientierung liegt dieser Konzeption die Verknüpfung zu Basiskonzepten zugrunde. Einige Möglichkeiten, chemische Basiskonzepte durch einen Unterricht zu Kautschuk aus Löwenzahn zu vertiefen, werden in Tabelle 19 zusammengefasst.

⁸⁴ In diesem Fall würde der Blick sicherlich auch auf den Inhaltsstoff Inulin fallen.

Tabelle 19: Chemische Basiskonzepte und ihre mögliche Anwendung in der Beschäftigung mit Kautschuk aus Löwenzahn

Basiskonzept	Beispiele – Kautschuk
Stoff-Teilchen-Konzept	Makromoleküle – Aufbau
Struktur-Eigenschafts-Konzept	Elastizität, Plastizität, Vulkanisation, IR-Spektroskopie
Energie-Entropie-Konzept	Pyrolyse, Dehnungskristallisation
Donator-Akzeptor-Konzept	Nachweise: Elektrophile Addition, Baeyer-Nachweis
Konzept des chemischen Gleichgewichts	Kettenwachstum/Polymerisationsgrad

Im Folgenden wird exemplarisch eine Planung einer möglichen Reihe mit dem Kontext „Gummi – ein Naturprodukt?“ nach der Phasierung des Ansatzes Chemie im Kontext (Parchmann et al. 2008, S. 26ff.) vorgestellt.

Dazu könnte die Begegnungsphase beispielsweise mit einem Bild des Löwenzahns und eines Reifens und der Frage beginnen, welche Gemeinsamkeiten beiden Dingen zugrunde liegen. Dies könnte vorhandenes Schülerwissen aktivieren.

In der anschließenden Neugier- und Planungsphase können Fragen gesammelt und Ideen für die Gewinnung und Analyse des Kautschuks entwickelt werden. (Dazu sollte Wissen zur herkömmlichen Herstellung von Reifen und zur Gewinnung von Naturkautschuk erarbeitet worden sein.)

Die Erarbeitungsphase könnte sich vor allem durch selbstständiges Experimentieren der Lernenden auszeichnen. Die Experimente zur Gewinnung des Kautschuks aus Löwenzahnwurzeln lassen sich gut in Kleingruppen durchführen. Dabei können zum einen Anleitungen vorgegeben werden, zum anderen könnte es auch möglich sein, dass Lernende anhand von Ausschnitten aus (aktueller und älterer) Forschungsliteratur selbstständig Experimente entwickeln. Auch die Experimente zur Untersuchung des gewonnenen Kautschuks können sich in dieser Phase anschließen.

In der abschließenden Vertiefungs- und Vernetzungsphase könnte neben dem Zusammentragen der Beobachtungen und Ergebnisse diskutiert werden, ob der russische Löwenzahn eine Alternative zum herkömmlichen Kautschuk darstellen könnte. So würde neben dem Rückbezug zum Einstieg in die Reihe auch eine Brücke zu BNE geschlagen.

Aufgrund ihres Potenzials, Probleme aus multiplen Perspektiven zu betrachten und so Entscheidungs- und Kommunikationssituationen zu erkunden, ist auch die Durchführung

einer Podiumsdiskussion in der Vernetzungsphase möglich. Denkbare Rollen wären beispielsweise die Geschäftsleitung einer Firma, die Synthetikgummi produziert, ein Vertreter einer Firma, die *Hevea*-Kautschuk vertreibt, ein Leiter einer Forschungsgruppe zu russischem Löwenzahn und ein Umweltaktivist. Auch die Rolle des Moderators könnte von einem Schüler besetzt werden.

Es ist eingängig, dass neben dem hier skizzierten exemplarischen Verlauf auch andere Pläne und andere Konzeptionen wie zum Beispiel ein stärker gesellschaftskritisch-problemorientiert ausgerichtetes Konzept möglich sind.

5.3.1.2 Fächerübergreifendes Arbeiten

Die Beschäftigung mit den Themen Kautschuk und Inulin aus Löwenzahn bietet nicht nur Lernanlässe für den Chemieunterricht, sondern auch für andere Disziplinen, auch außerhalb der Naturwissenschaften. Die im Folgenden aufgezeigten horizontalen Vernetzungen sollen Möglichkeiten für fächerübergreifendes Arbeiten eröffnen⁸⁵. Dabei könnten beispielsweise in einem fächerkoordinierenden Unterricht in Form einer Projektwoche die verschiedenen Perspektiven in einem gemeinsamen Unterricht zusammengeführt werden.

Biologie

In Kooperation mit dem Biologieunterricht bietet es sich an, im Rahmen der Cytologie des Löwenzahns Milchröhren und ihre Funktion zu thematisieren. In diesem Zuge kann auch eine Betrachtung von Pflanzenschnitten unter dem Mikroskop und das Anfärben der Milchröhren mit Sudanschwarz B (vgl. Experiment in Teilkapitel 4.1.3.6) interessant sein. Vorschläge für entsprechendes Arbeitsmaterial finden sich im Anhang dieser Arbeit.

Geschichte

Die historische Entwicklung von der Entdeckung des kautschuktragenden Löwenzahns bis zu ersten industriellen Herstellungsverfahren kann im Geschichtsunterricht thematisiert werden. Dazu wurden Arbeitsaufträge entwickelt, die mit Blick auf die Sachthemen Zwangsarbeit, NS-Ideologie und Widerstand anschlussfähig an die Lehrpläne für Geschichte in der gymnasialen Oberstufe sind. Gleichzeitig fördert die Auseinandersetzung mit dem Thema aus dieser historischen Perspektive im Chemieunterricht Kompetenzen

⁸⁵ Fächerübergreifender Unterricht wird in diesem Fall als ein Oberbegriff nach der Definition von Labudde (2010) verstanden.

im Bereich NOS, indem der soziale und kulturelle Einfluss auf naturwissenschaftliches Wissen und Arbeiten aufgezeigt wird. Mögliche Arbeitsmaterialien und -aufträge finden sich im Anhang (Teil V) der vorliegenden Arbeit. Diese wurden entsprechend den Anregungen von Höttecke und Henke (2010) formuliert.

Politik und Sozialwissenschaften

Es kann fächerverbindend mit dem Politik- bzw. Sozialwissenschaftsunterricht gearbeitet werden. Dort kann sich mit der Nachhaltigkeit des Löwenzahnkautschuks aus der ökonomischen und sozialen Perspektive beschäftigt werden und möglicherweise eine CO₂-Bilanz der beiden Rohstoffe Löwenzahn- und *Hevea*-Kautschuk berechnet werden. Es bietet sich eine modellhafte Berechnung der für einen Satz Autoreifen notwendigen Fläche für Löwenzahnpflanzen oder sogar des ökologischen Fußabdrucks und eine anschließende Reflexion über die Rentabilität der neuen Herstellungsmethode an.

5.3.2 Exkurs: Anregungen für die Grundschule

Nicht nur aufgrund seiner Aktualität und Relevanz, sondern auch durch den Alltagsbezug und die Möglichkeit, Aspekte von nachhaltiger Entwicklung zu thematisieren, ist Kautschuk aus Löwenzahn ein Thema, mit dem man sich auch schon in der Grundschule beschäftigen kann⁸⁶. Dies soll im Folgenden erläutert werden, indem zunächst eine kurze Übersicht über die didaktische Forderung nach Themen von Bildung für nachhaltige Entwicklung im Sachunterricht gegeben wird und anschließend Möglichkeiten aufgezeigt werden, Kautschuk aus Löwenzahn in einen solchen Sachunterricht zu integrieren. Dabei wird keine konkrete Unterrichtsreihe nach einem speziellen Planungsmodell beschrieben, sondern es werden lediglich Anregungen gegeben.

Die Integration von Themen und Fragestellungen einer nachhaltigen Entwicklung in den Sachunterricht der Grundschule und den naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht der weiterführenden Schulen wird vielfach gefordert (vgl. u.a. Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts 2013, S. 75ff.; Gröger et al. 2017; Bolscho und Hauenschild 2007). Denn diese Themen erlauben es, perspektivenvernetzend zu arbeiten. Der Sachunterricht bietet

⁸⁶ Ebenso bietet sich eine Beschäftigung mit dem Thema im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht in der Orientierungsstufe (im NaWi-Unterricht) an. Die Stärkung chemischer Inhalte in dieser Stufe zeigt in aktuellen Studien positive Resonanz und wird von Fachdidaktikern unbedingt gefordert (vgl. Gesellschaft Deutscher Chemiker 2017).

sich für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung besonders an, da dieser durch eine „genuin Perspektiven und damit Disziplinen übergreifende Herangehensweise“ geprägt ist (Barth 2017, S. 47) und deshalb als ein „disziplinübergreifendes Fundament [...] fungieren [kann], auf dem systematisch Problemstellungen gegenwärtiger und zukünftiger Entwicklungen erschlossen werden können“ (Bolscho und Hauenschild 2007, S. 203).

Auch die Ziele einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, wie etwa die Förderung von Gestaltungskompetenz und die Vorbereitung zur aktiven Teilhabe an der Gesellschaft (Partizipation) (vgl. Haan 2002), legitimieren eine Auseinandersetzung mit Themen und Fragestellungen der Nachhaltigkeit in der Grundschule, da bereits Kinder diesen Alters als Akteure der Gesellschaft zu betrachten sind (vgl. Bolscho und Hauenschild 2007, S. 203f.).

Im Perspektivrahmen Sachunterricht der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) werden folgende inhaltliche Aspekte, die zum perspektivenübergreifenden Themenbereich der nachhaltigen Entwicklung passen, vorgeschlagen:

- Wasser, Luft, Boden, Energie u.a. sowie der schonende Umgang damit
- Rohstoffe und ihre Verarbeitungen zu Gebrauchsgegenständen sowie die Frage von Abfall und Wiederverwertung
- Konsum, Konsumverhalten und -entscheidungen
- Unterschiedliche Lebensweisen und Lebensbedingungen von Menschen, Ungleichheiten und Ungerechtigkeiten
- Veränderungen von Lebensräumen und die Folgen für Tiere, Pflanzen und Menschen (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts 2013, S. 77)

Die Beschäftigung mit dem Löwenzahn und seinem Inhaltsstoff Kautschuk lässt sich vor allem in den Aspekt der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung integrieren, es ist aber auch eine Anlehnung an die Aspekte Konsumverhalten oder Veränderung von Lebensräumen denkbar. Der Löwenzahn als ein möglicher Rohstofflieferant für Kautschuk in der Zukunft ermöglicht eigenständige Recherchen über den Werk- und Naturstoff Kautschuk und seinen Weg von der Pflanze bis zum Produkt. Zum Thema „Rohstoff Kautschuk“ kann gemeinsam mit den Schülern eine Liste von Produkten aus oder mit Kautschuk, die uns im Alltag begegnen, erstellt werden. Da Gummiprodukte aus unserem täglichen Leben nicht wegzudenken sind, entsteht schnell eine lange Liste.

Beispiele für Gummiprodukte im Alltag von Schülerinnen und Schülern sind:

- (Fahrrad-)Reifen
- Gummistiefel
- Flummis
- Gummiringe (Loom-Bänder)
- Schuhsohlen
- Handschuhe
- Luftballons
- Taucheranzüge
- Schnuller

Zusätzlich können die Schüler kurze Experimente durchführen. Zwei der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Versuche bieten sich auch bereits in der Grundschule an. Dabei handelt es sich zum einen um das vorsichtige Knicken einer getrockneten Wurzel, um so auf einfache Weise den Kautschuk sichtbar zu machen (vgl. Experiment in 4.1.1.1). Zum anderen kann anhand des Experiments „Gewinnung von Kautschuk durch Mörsern“ (Experiment 4.1.1.2) von den Lernenden sogar ein kleiner Radiergummi selbst hergestellt werden, der dann getestet werden kann. Dies gelingt, indem besonders dünne getrocknete Wurzeln eine Zeit lang gemörsert werden, bis kleine Kautschukpartikel zusammenklumpen.

Der im Perspektivrahmen verankerten Forderung nach Möglichkeiten zum Evaluieren und Reflektieren kann bei einer Beschäftigung mit Löwenzahnkautschuk ebenfalls nachgekommen werden. Es bieten sich beispielsweise solche Momente als Reflexionsphasen an, in denen „Aspekte wie Gerechtigkeit, Solidarität, Frieden oder Nachhaltigkeit besprochen“ werden (vgl. Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts 2013, S. 23). Bezogen auf die Thematik „Kautschuk aus Löwenzahn“ lässt sich unter anderem reflektieren, wie Kautschuk herkömmlicherweise hergestellt wird und warum eine Alternative notwendig sein könnte. So können die Schüler Grundlagen für ein ökologisches Problembewusstsein entwickeln.

5.3.3 Beschreibung eines beispielhaften Projekttages

Um die Durchführbarkeit der für Lernende der Oberstufe entwickelten Experimente und Materialien zu gewährleisten, wurde ein Projektmodul konzipiert, das im Rahmen des

Schülerlabors Science Forum der Universität Siegen mehrfach erprobt wurde. Der Projektablauf wird im Folgenden beschrieben und soll exemplarisch einen genaueren Einblick in mögliche inhaltliche Schwerpunkte und den Ablauf einer Unterrichtssequenz mit Löwenzahnkautschuk geben. Die eingesetzten Arbeitsmaterialien und Experimentiervorschriften finden sich im Anhang (siehe Anhang Teil V). Die Arbeitsmaterialien wurden so gestaltet, dass sie den Schülern zunächst einen möglichst umfassenden, aber verständlichen Überblick über die Thematik geben und im Anschluss eine ergebnisoffene Diskussion über Zukunft und Nachhaltigkeit des Löwenzahnkautschuks ermöglichen.

Im Science Forum haben Schüler aller Jahrgangsstufen die Möglichkeit, an einem Vormittag (i.d.R. in einem etwa vierstündigen Workshop) zu verschiedenen Inhalten zu experimentieren. Sie werden dabei in Kleingruppen von Studenten und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe betreut. Dabei können unter anderem auch mit Schulklassen und -kursen neu entwickelte Unterrichtsmaterialien erprobt werden. Neben dem Laborraum steht ein Hörsaal zur Vor- und Nachbesprechung des Projektes bereit. Aufgrund der äußeren Gegebenheiten des Schülerlabors wurde ein Projektmodul entwickelt, das an einem Praktikumstag innerhalb von vier Stunden durchführbar ist.

Das Projektmodul gliedert sich in vier Phasen, die im folgenden Verlaufsplan übersichtsartig dargestellt sind (vgl. Tabelle 20). Eine detailliertere Beschreibung der Inhalte und Aktivitäten erfolgt anschließend.

Tabelle 20: Tabellarischer Verlaufsplan über den Projekttag im Science Forum

Phase	Unterrichtsinhalte	Sozialform, Materialien und Medien ⁸⁷	Didaktisch-methodischer Kommentar
Einstieg	<ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung und Vorstellung • Sammlung von Schülervorwissen/Alltagswissen zum Thema • Hinführung zur Leitfrage: Wie wird Kautschuk gewonnen und warum greift man auf Alternativen zurück? Welche Vor- und Nachteile haben sie? • Übersicht über den Ablauf des Projekttag 	<ul style="list-style-type: none"> • UG • Tafel • Bildkarten • Kautschuk- und Latexprobe 	<ul style="list-style-type: none"> • Schüleraktivierung und Fokussierung auf das Thema • Anknüpfen an Vorwissen • Visualisierung und Strukturierung des Wissens durch Concept-Map und Bilder
Erarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Erarbeitung der Struktur und Eigenschaften von Kautschuk und Gummi • Arbeitsteilige Erarbeitung verschiedener Kautschukquellen • Vorstellung von Löwenzahnkautschuk, seiner Entdeckung und Zielsetzungen in der aktuellen Forschung 	<ul style="list-style-type: none"> • UG • PowerPoint • EA/PA/UG • Praktikumsskript M1, M2 • LV 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktivierung chemischen Vorwissens • Kooperatives und schüleraktivierendes Lernen durch Think-Pair-Share
Experimentierphase	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung der Experimente • ... zur Gewinnung des Kautschuks aus Löwenzahn • ... zur Untersuchung der Eigenschaften von Latexmilch und den Möglichkeiten ihrer Weiterverarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Praktikumsskript mit Experimentieranleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Schüleraktivität durch kooperative Gruppenarbeit • Binnendifferenzierung nach Arbeitstempo
Sicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammentragen der Experimentierergebnisse (Beobachtungen) • Erläuterung/Auswertung der Experimente 	<ul style="list-style-type: none"> • UG • PowerPoint 	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnissicherung • Visualisierung der gewonnenen Produkte auf Folien • Bewertung durch Anfassen der Produkte möglich
Transfer	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgreifen der Leitfrage: Warum greift man auf alternative Kautschukquellen zurück? Welche Vor- und Nachteile haben sie? • Videodokumentation „Taraxagum“ • Sammlung besonders stichhaltiger Argumente für und gegen die unterschiedlichen Kautschukarten • Ergebnisoffene Diskussion über die Zukunft und Nachhaltigkeit der Kautschukquellen 	<ul style="list-style-type: none"> • PA, UG • Film • Praktikumsskript M4 	<ul style="list-style-type: none"> • Abrunden des Projekts durch Aufgreifen der Leitfrage • Verknüpfung • Förderung von Kommunikation und Bewertungskompetenz, (durch Argumente) gestützte Stellungnahme • BNE: Nachdenken über ökologische, ökonomische und soziale Faktoren
Abschluss	Erhebung des aktuellen Interesses	Fragebogen	

⁸⁷ UG = Unterrichtsgespräch, EA = Einzelarbeit, PA = Partnerarbeit, GA = Gruppenarbeit, LV = Lehrervortrag, M1-4 = Material 1-4

Der Einstieg sowie der erste Teil der Erarbeitung zeichnen sich vor allem durch Aktivierung von Alltagswissen und Erarbeitung von detaillierterem (chemischen) Wissen zu Kautschuk aus. Zunächst wird eine Concept-Map erstellt, um vorhandenes Schülerwissen zu aktivieren und eine erste Klärung der Begriffe „Kautschuk“, „Latex“ und „Gummi“ herbeizuführen (vgl. Abbildung 76).

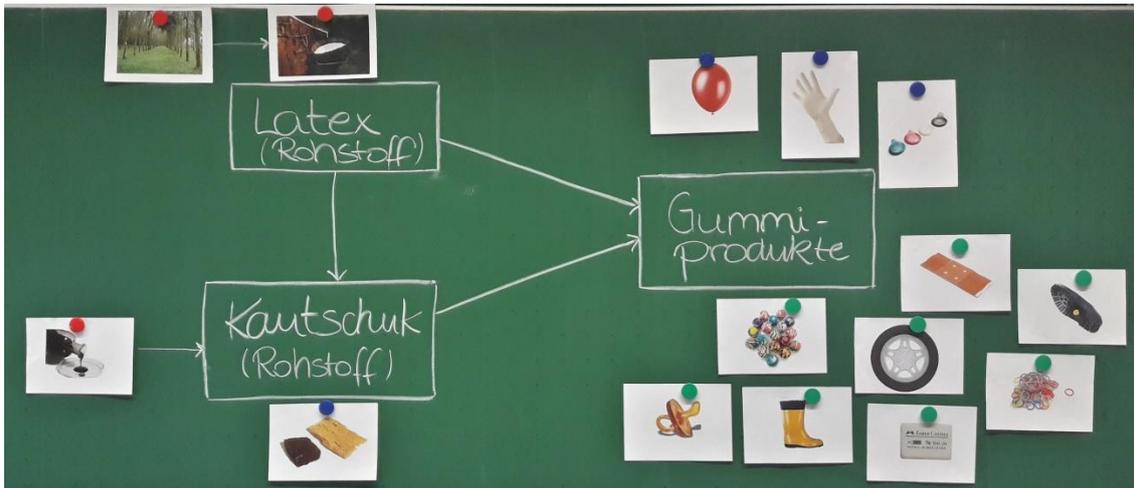


Abbildung 76: Concept-Map zur Begriffsklärung von Latex, Kautschuk und Gummi

Anschließend werden Struktur und Eigenschaften von Kautschuk und Gummi erarbeitet, um chemiebezogenes Wissen in den Bereichen der organischen und makromolekularen Chemie zu aktivieren. In einem Think-Pair-Share-Verfahren informieren sich die Schüler über die Vor- und Nachteile verschiedener Kautschukquellen, wodurch offensichtlich wird, dass beide Quellen Schwachstellen besitzen. Wenngleich Synthesekautschuk in den Experimenten im Verlauf des Projektes keine Rolle spielt, bietet Wissen über die verschiedenen Kautschukquellen eine Grundlage, um später abwägen und bewerten zu können, ob und in welcher Form Löwenzahnkautschuk als eine alternative Kautschukquelle in Frage kommen könnte. Im Anschluss an diese Arbeitsphase werden erste einführende Informationen zum russischen Löwenzahn und seinem Potenzial als alternative Kautschukquelle gegeben.

Die Experimentierphase beginnt mit dem Experiment „Erster Kontakt mit Kautschuk“ (Exp. 4.1.1.1), in dem das Problem der Gewinnung des Rohstoffs durch die enge Verbindung des Kautschuks mit den holzigen Wurzelbestandteilen deutlich wird. Während der folgenden (längeren) Experimentierphase erproben die Lernenden in Kleingruppen von

zwei bis vier Schülern zunächst drei Methoden zur Gewinnung von Kautschuk aus getrockneten Löwenzahnwurzeln (V1 Kautschuk durch Mörsern, V2 Kautschuk durch Kochen, V3 Kautschuk durch Lösen in Benzin), um verschiedene Extraktionsansätze kennenzulernen und ihre Effektivität bzw. Umweltfreundlichkeit und Ökonomie abzuwägen. Anschließend werden an Stationen Experimente zu den Eigenschaften von Latexmilch (aus *Hevea brasiliensis*) und ihrer Weiterverarbeitung durchgeführt (V4: Herstellen von Gummi (durch Vulkanisation), V5 Eigenschaften von Latexmilch (Tyndall-Effekt), V6 Koagulation von Kautschuk (Herstellung eines Flummis)). Da Latexmilch aus dem Kautschukbaum die gleichen Eigenschaften wie Latexmilch aus *Taraxacum kok-saghyz* aufweist und darüber hinaus leichter erhältlich ist, können die Schüler mit gekaufter Latexmilch modellhaft Einblicke in die Weiterverarbeitung des Rohstoffs erlangen. Damit lassen sich auch die ersten Arbeitsschritte zur Lagerung des Kautschuks in Südostasien nachvollziehen.

Im dritten Teil des Moduls werden zunächst Beobachtungen, Ergebnisse und Erläuterungen zu den durchgeführten Experimenten im Plenum zusammengetragen. Es folgt ein (Werbe-)Film der Firma Continental, der den Prozess der Kautschukgewinnung und die Produkt-Prototypen, die aus dem Kautschuk schon heute hergestellt werden können, veranschaulicht⁸⁸. Um zu der Frage überzuleiten, was den Löwenzahnkautschuk gegenüber anderen Kautschuken auszeichnet und ob er möglicherweise in Zukunft den Kautschuk aus *Hevea brasiliensis* ersetzen könnte, erhalten die Schüler eine Tabelle mit einigen Vor- und Nachteilen des russischen Löwenzahns bzw. des tropischen Kautschukbaumes. (Unter schulischen Bedingungen und mehr zur Verfügung stehender Zeit könnte es sinnvoller sein, die Schüler diese Informationen selbstständig erarbeiten zu lassen.) Es folgt eine Sammlung besonders stichhaltiger Argumente für bzw. gegen die Produktion von Kautschuk auf die jeweiligen Gewinnungsarten, die die Lernenden in Partnerarbeit anhand der Tabelle vorbereiten. Diese soll den Lernenden eine Stütze für die zum Abschluss des Projekttages stattfindende ergebnisoffene Diskussion sein. Dort wird die Frage, welche Rolle der Löwenzahnkautschuk in Zukunft möglicherweise einnehmen wird, erörtert. Dabei können die Lernenden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Versuchen

⁸⁸ Die Video-Dokumentation ist etwa elf Minuten lang und kann über die Internetseite der Firma Continental heruntergeladen werden (<https://www.continental-reifen.de/autoreifen/media-services/newsroom/taraxagum/2016-06-22-video-reifen-aus-loewenzahn>, letzter Abruf: 14.06.2017).

und den Fakten aus dem Informationsmaterial Stellung beziehen und eine Einschätzung abgeben.⁸⁹

Zur Vertiefung des Themas in der Schule erhalten die Lehrkräfte der teilnehmenden Kurse, wenn gewünscht, Materialien zur Analyse und Interpretation von IR-Spektren, zur Behandlung des historischen Aspektes sowie zu einer modellhaften Berechnung der nötigen Menge an Löwenzahnpflanzen für einen Reifen.

Bei einem Rückblick auf die durchgeführten Projektmodule lässt sich bezüglich der Durchführbarkeit der Experimente zusammenfassend beschreiben, dass diese in der Regel gut und ohne Schwierigkeiten funktionierten. Diese Erfahrung lässt sich ohne weitere Erprobungen jedoch selbstverständlich nicht auch auf alle anderen entwickelten Experimente übertragen.

5.4 Evaluation des Projektmoduls

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass sich die Beschäftigung mit *Taraxacum kok-saghyz* und seinen Facetten schwierig nur auf eine einzelne Unterrichtseinheit (oder einen Projekttag in der Schule) beschränken lässt, sondern dass sich vielfältige Anknüpfungs- und unterschiedlich tiefgehende Beschäftigungsmöglichkeiten anbieten. Aus dieser Vielzahl von Umsetzungs- und Schwerpunktmöglichkeiten wurde das im Schülerlabor der Universität Siegen erprobte Projektmodul ausgewählt (dieses wurde vorangegangenen Teilkapitel detailliert beschrieben), um daran exemplarisch das aktuelle Interesse von Lernenden an der Thematik zu untersuchen und somit im Sinne des für die vorliegende Arbeit gewählten Forschungsansatzes der Curricularen Innovationsforschung das entwickelte Material zunächst mit wenigen Lerngruppen zu erproben (vgl. Kapitel 2).

Da die Untersuchung nur eine punktuelle Erprobung einer möglichen Umsetzung der Thematik bezüglich des Interesses der Lernenden darstellt und nur einen ersten Eindruck zum Potenzial des entwickelten Materials und der Thematik liefern soll, wird sie zwar in der gebotenen Sorgfalt durchgeführt, soll und kann aber nicht alle Anforderungen an eine Evaluationsforschungsstudie erfüllen.

⁸⁹ Die Rahmenbedingungen des Projekttages ließen keine Vorbereitung und Durchführung einer Podiumsdiskussion zu.

5.4.1 Das Interessenkonstrukt

Um der Fragestellung nachzugehen, inwiefern das entwickelte Praxismodul zur Gewinnung von Kautschuk aus Löwenzahn das aktuelle Interesse von Lernenden der Oberstufe weckt, werden die Schüler nach ihrem Interesse an Tätigkeiten und Inhalten am Thema sowie nach Handlungsintentionen und ihrer Meinung zu den Materialien befragt. Als methodische Grundlage dieser Untersuchung wurde das aus der pädagogischen Psychologie bekannte Interessenskonzept der „Münchner Gruppe“ um Krapp, Prenzel und Schiefele ausgewählt, das im Folgenden kurz dargestellt wird.

Die Autoren definieren Interesse als ein mehrdimensionales Konstrukt, das sich unter anderem „in der Tendenz, sich wiederholt, freudvoll und ohne äußere Veranlassung mit einem realen oder symbolisch vermittelten Interessensgegenstand auseinanderzusetzen“ äußert (Krapp 1992b, S. 749; vgl. Prenzel et al. 2000) und das „eine besondere, durch bestimmte Merkmale herausgehobene Beziehung einer Person zu einem Gegenstand“ bezeichnet (Krapp 2010, S. 312).

Generell werden drei Komponenten von Interesse unterschieden: Zum einen wird von einer *epistemischen Komponente* gesprochen, die besagt, dass eine Person mehr über den Interessensgegenstand erfahren möchte, um ihr Wissen zu erweitern. Sie wird auch als kognitive Ausprägung bezeichnet. Die zweite, *emotionale Komponente* beschreibt positive Gefühle während der Auseinandersetzung mit einem Interessensgegenstand wie Freude oder auch Flow-Erleben⁹⁰. Mit der *wertbezogenen Komponente* ist gemeint, dass der Gegenstand als persönlich relevant erlebt wird. Dies verweist auf eine Präferenz, d.h. dass die Beschäftigung mit dem Interessensgegenstand unter gleichen Bedingungen einer Beschäftigung mit anderen Gegenständen vorgezogen wird (vgl. Krapp 1992a, S. 310).

Weiterhin wird zwischen *situationalem* und *persönlichem (bzw. individuellem) Interesse* unterscheiden, wobei es sich beim persönlichen Interesse eher um eine Disposition handelt, also ein dauerhaftes Persönlichkeitsmerkmal. Situationales Interesse wird dagegen – laut dem Modell der Interessengenese nach Krapp – durch die Lernsituation und durch andere persönliche Interessen der Person bedingt und ist daher eher kurzfristig (vgl. Krapp 1992b, S. 750). Die relationale Struktur der Begrifflichkeiten verdeutlicht Abbildung 77.

⁹⁰ Unter „Flow-Erleben“ versteht man das positive Gefühl des völligen Aufgehens in einer Tätigkeit. Es wurde erstmals von Csikszentmihalyi beschrieben (vgl. u.a. Csikszentmihalyi und Schiefele 1993).

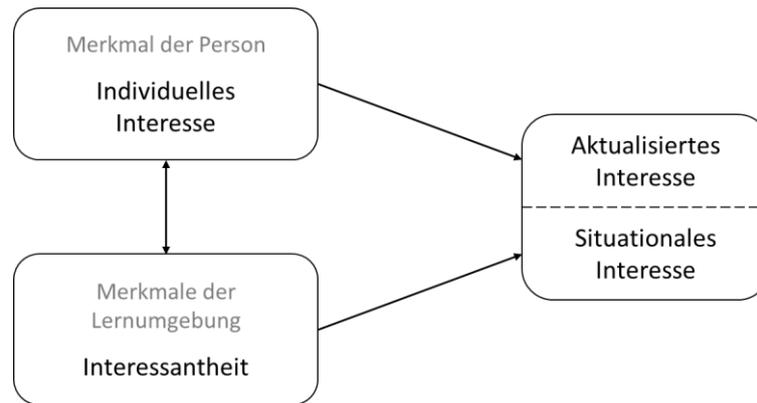


Abbildung 77: Relationale Struktur im Interessenkonstrukt (nach Krapp 1992b, S. 750)

In der Literatur wird beschrieben, dass situationales Interesse die Ausbildung von individuellem Interesse fördern kann (vgl. Krapp 1998, S. 191ff.). Die Genese von individuellem Interesse aus situationalem Interesse wird dabei häufig als ein mehrstufiger Prozess beschrieben (vgl. Hidi und Renninger 2006; Krapp 2002). Für einen Lernprozess bedeutet das, dass „ein neu gewecktes situationales Interesse oder ein bereits bestehendes Interesse für einige Zeit (z.B. die Dauer einer Unterrichts- oder Lernepisode) aktiviert und aufrecht erhalten werden“ muss (Krapp 2010, S. 312). Dabei wird situationales Interesse vor allem durch äußere Faktoren der Lernumgebung, beispielsweise der Präsentation des Lerninhaltes oder durch besondere Anreizbedingungen geschaffen (vgl. Krapp 2002, S. 397). Ein bereits bestehendes individuelles Interesse kann durch Anreize aktualisiert werden (aktualisiertes Interesse). Mitchell spricht in diesen Fällen von so genannten „catch“-Faktoren (vgl. Mitchell 1993). Die Aufrechterhaltung des situationalen Interesses, begünstigt durch „hold“-Faktoren wie persönliche Bedeutsamkeit oder Beteiligung, stellt die zweite Stufe bei der Entwicklung individuellen Interesses dar (vgl. Mitchell 1993, S. 427). Durch Internalisierung und Identifikation mit dem Interessensgegenstand entwickelt sich im letzten Schritt eine dauerhafte Neigung, sich mit dem Gegenstand zu befassen, das individuelle Interesse (vgl. Krapp 2002, S. 398ff.).

Es ist festzuhalten, dass dieser letzte Schritt nur selten vollzogen wird und dass weder er noch der vorherige nach einem einmaligen Besuch im Schülerlabor vollzogen werden kann. Im Rahmen der Erhebung nach der Teilnahme am Projektmodul wird daher nur auf das situationale bzw. aktualisierte Interesse eingegangen. Ob dabei durch die Beschäftigung mit dem Thema ein bereits vorhandenes individuelles Interesse aktualisiert oder ob durch die Interessanztheit ein neues situationales Interesse geschaffen wurde, bleibt unberücksichtigt. Im Folgenden wird dafür der Begriff des aktuellen Interesses verwendet.

5.4.2 Beschreibung der Erhebung

Unter anderem aufgrund der besonderen Lernumgebung und des speziellen Themenbereichs sowie der Betreuung durch schulfremde Personen bietet der Besuch eines Schülerlabors verschiedene „catch“-Faktoren und kann somit die Entstehung von situationalem Interesse begünstigen und zur Aktualisierung von eventuell bereits bestehenden individuellen Interessen der Schüler beitragen (vgl. Guderian et al. 2006, S. 143). Verschiedene Studien belegen, dass Schülerlaborbesuche das Potenzial haben, aktuelles Interesse für Naturwissenschaften und Technik zu wecken, auch wenn nur von einem kurzfristigen Effekt ausgegangen wird (vgl. u.a. Engeln 2004; Guderian 2007; Pawek 2009; Glowinski 2007; Scharfenberg 2005).

In der vorliegenden Arbeit wird das aktuelle Interesse der Lernenden über die epistemische, emotionale und wertbezogene Komponente im Rahmen einer Fragebogenstudie im Post-Design erhoben. Weiterhin werden Handlungsintentionen erhoben, die auf der epistemischen Komponente des aktuellen Interesses beruhen. Da es sich bei der Befragung um einen Teil einer ersten Erprobung des Konzeptes und der Materialien handelt und da im Projektmodul lediglich ein Ausschnitt der vielseitigen Facetten des Themas Löwenzahnkautschuk behandelt wird, werden weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise die Aspekte der Lernumgebung oder Persönlichkeitsmerkmale wie Sach- und Fachinteressen nicht erhoben.

Die verwendeten Items zu den Komponenten des aktuellen Interesses und zu intendierten Handlungen aus Interesse wurden aus dem von Engeln (2004) und Pawek (2009) entwickelten, erprobten und als reliabel erwiesenen Testinstrument übernommen und an das vorliegende Modul angepasst. Weiterhin wurden drei offene Fragen gestellt, um den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit zu geben, eigene Ideen, weitere Anregungen oder Kritik einzubringen. Bei der Konzeption des Fragebogens wurde darauf geachtet, ihn möglichst kurz zu halten, um eine hohe Bereitschaft der Lernenden zur Mitarbeit zu fördern. Für die Bearbeitung des Fragebogens wurden zwischen fünf und zehn Minuten benötigt.

Die Items zum aktuellen Interesse werden auf einer vierstufigen unipolaren Rating-Skala (Likert-Skala) beantwortet (Antwortmöglichkeiten: stimmt voll und ganz (codiert mit vier), stimmt eher, stimmt eher nicht, stimmt überhaupt nicht (codiert mit eins)). Die erhobenen Daten werden mithilfe von Excel ausgewertet. Im Anhang (Teil III und IV) finden sich eine Kopie des Fragebogens sowie weitere Informationen zur Stichprobe.

Tabelle 21: Übersicht über die erhobenen Variablen

Variable	Eigenschaften	Beispielitem
Emotionale Komponente	Itemset bestehend aus vier Items	Die Arbeit im Projekt hat mir Spaß gemacht.
Wertbezogene Komponente	Itemset bestehend aus fünf Items (davon eins invertiert)	Dass wir Experimente durchgeführt haben, war mir persönlich wichtig.
Epistemische Komponente	Itemset bestehend aus vier Items	Ich würde gerne mehr über das Thema erfahren.
Intendierte Handlungen aus Interesse	Itemset bestehend aus drei Items	Ich werde mit Freunden, Eltern oder Geschwistern über Dinge sprechen, die ich im Projekt erlebt habe.
Gefallen	Offene Frage	Was hat Ihnen am Projekt am besten gefallen? Warum?
Missfallen	Offene Frage	Was hat Ihnen am Projekt am wenigsten gefallen? Warum?
Vermissten	Offene Frage	Das hätte mich noch zusätzlich interessiert:

Anders als bei den Untersuchungen von Engeln (2004) und Pawek (2009) soll hier nicht das Interesse am Schülerlabor im Allgemeinen, sondern das Interesse der Lernenden am neuen Themenfeld erhoben werden. Da die Erhebung nur eine ergänzende Absicherung darstellt, erfolgt keine tiefgehende Analyse oder Korrelation von Variablen. Es wird lediglich eine deskriptive Auswertung der erhaltenen Informationen mit Blick auf die Eignung für den Chemieunterricht hinsichtlich der Erzeugung von Interesse am Thema vorgenommen.

Eine Vorab-Erprobung eines Projekttages sowie des Fragebogens erfolgte im Oktober 2016 an zwei Tagen im Rahmen einer Projektwoche mit Schülern der Einführungsphase an einem Gymnasium im Kreis Olpe⁹¹. Dort konnten durch Beobachtung der Schüler in den Experimentierphasen und über Rückmeldungen der Lernenden Probleme und Schwierigkeiten in den theoretischen Arbeitsphasen als auch beim Experimentieren aufgedeckt werden. Im Anschluss wurden die Materialien und Experimente für das Modul sowie der Fragebogen überarbeitet und optimiert.

Das überarbeitete Praxismodul wurde im Schülerlabor Science Forum der Universität Siegen im Dezember 2016 und Februar 2017 mit insgesamt 53 Lernenden im Alter von 15-20 Jahren (Jgst. 10-13) getestet.

⁹¹ Von den teilnehmenden 23 Schülern führen nur vier Chemie in der Oberstufe fort.

5.4.3 Ergebnisse der Erhebung

Die in Tabelle 22 dargestellten Mittelwerte zeigen, dass das entwickelte Modul bei den meisten Schülerinnen und Schülern ein hohes aktuelles Interesse bezüglich der emotionalen und wertbezogenen Komponente erzeugt hat.

Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen für die Komponenten des aktuellen Interesses und die einzelnen Items des Fragebogens (1=stimmt überhaupt nicht (...) 4=stimmt voll und ganz). Werte oberhalb des theoretischen Mittelwertes von 2,5 werden als starke bzw. sehr starke Zustimmung verstanden.

Komponenten des aktuellen Interesses und Items des Fragebogens	Mittelwert	Standardabweichung (SD)
Emotionale Komponente	3,58	0,49
Das Thema war für mich interessant	3,45	0,53
Die Arbeit mit Geräten, die auch in der Forschung verwendet werden, hat mir Spaß gemacht.	3,51	0,50
Die Arbeit im Projekt hat mir Spaß gemacht.	3,81	0,39
Während des Projekts ist die Zeit schnell vergangen.	3,58	0,53
Wertbezogene Komponente⁹²	3,45	0,58
Dass wir Experimente durchgeführt haben, war mir persönlich wichtig.	3,55	0,69
Das eigenständige Arbeiten war mir wichtig.	3,19	0,70
Dass wir das Projekt durchgeführt haben, erscheint mir sinnvoll.	3,47	0,50
Der Bezug des Themas zum Alltag war mir wichtig.	3,17	0,64
Das Projekt war langweilig.	1,15	0,36
Epistemische Komponente	2,45	0,68
Bei der Besprechung des Themas bin ich auf neue Ideen gekommen.	2,52	0,86
Der Bezug des Themas zu anderen naturwissenschaftlichen Gebieten war mir wichtig.	2,77	0,61
Ich würde gerne mehr über das Thema erfahren.	2,55	0,63
Die Experimente und Informationen, die wir heute im Projekt thematisiert haben, würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	2,04	0,61
Handlungsintentionen	2,45	0,72
Ich werde mit Freunden, Eltern oder Geschwistern über Dinge sprechen, die ich im Projekt erlebt habe.	2,83	0,79
Ich werde in Büchern nachschlagen oder im Internet recherchieren, um mehr Informationen über das im Projekt behandelte Thema zu bekommen.	1,92	0,64
Ich werde außerhalb des Unterrichts über Dinge nachdenken, die wir im Projekt gesehen oder angesprochen haben.	2,58	0,71

⁹² Item „Das Projekt war langweilig“ wurde invertiert.

Bei den Items zur emotionalen Komponente liegen 52 von 53 Befragten mit ihren Kreuzen im Bereich von „stimmt eher“ und „stimmt voll und ganz“. Mehr als die Hälfte kreuzt sogar „stimmt voll und ganz“ an. Bei der wertbezogenen Komponente erreichen ebenfalls fast alle Schülerinnen und Schüler die Bereiche von „stimmt eher“ und „stimmt voll und ganz“. Bei der epistemischen Komponente ist es etwas weniger als die Hälfte.

Um mehr über das aktuelle Interesse zu erfahren, wurden die Lernenden befragt, inwiefern sie Handlungen beabsichtigen, die mit der epistemischen Komponente ihres Interesses verbunden sind. Dabei ist zu beobachten, dass im Durchschnitt etwas weniger als die Hälfte der Befragten eine starke oder sehr starke Intention angeben. Beim Item „Ich werde mit Freunden, Eltern oder Geschwistern über Dinge sprechen, die ich im Projekt erlebt habe“ kreuzen jedoch mehr als zwei Drittel der Schülerinnen und Schüler die Möglichkeiten „stimmt eher“ bzw. „stimmt voll und ganz“ an. Auf die Frage, ob sie außerhalb des Unterrichts über Dinge, die im Projekt gesehen oder angesprochen wurden, nachdenken werden, liegt ebenfalls etwas mehr als die Hälfte der Schülerantworten in den Bereichen „stimmt eher“ und „stimmt voll und ganz“.

Im folgenden Abschnitt soll abschließend ein Überblick über die Antworten auf die offenen Fragen gegeben werden. Eine Übersicht der Schülerantworten findet sich im Anhang.

Auf die Frage, was den Teilnehmern am Projekt am besten gefallen hat, wird vor allen Dingen das Experimentieren genannt. Weiterhin werden der Bezug zum Alltag („Film zum Alltagsbezug“), die Möglichkeit zum eigenständigen Arbeiten („Selbstständiges Arbeiten“) sowie die Produktorientierung („man hat nachher wirklich ein Ergebnis in der Hand gehabt“) positiv angemerkt. Dazu zählt auch die Herstellung des Flummis, die am häufigsten positiv angemerkt wird („Der Flummi → was man sonst kauft, selbst gemacht“).

Auf die Fragen, was den Schülern am wenigsten gefallen bzw. was sie noch zusätzlich interessiert hätte, geben deutlich weniger Schüler (jeweils weniger als die Hälfte) eine Antwort. Einige Teilnehmer hätten gerne mehr über den wirtschaftlichen Aspekt des Löwenzahns erfahren („Wie viel Geld dort investiert wurde in die Forschung, Herstellung (Reifen) und den An-/Abbau“), andere über die Wiederverwertbarkeit („Ist es biologisch abbaubar?“). Interesse an Herstellungsverfahren von Produkten aus Latexmilch („Kondomherstellung“, „‘Latex-Milch‘ aus Löwenzahn – Herstellung von Handschuhen etc.?!“) und an der Formgebung von koaguliertem Kautschuk („Wie man den Kautschuk in Form presst“) wird ebenfalls geäußert. Weiterhin wird gewünscht, die Materialien mit

detaillierteren Erläuterungen auszustatten („Genauere Erklärungen → welches Material was bewirkt“).

Auf die Frage, was den Schülern am Projekt am wenigsten gefallen habe, wird der theoretische Block zu Beginn des Praktikums mit dem chemischen Hintergrund benannt („Chemische Zusammensetzung“, „Chem. Info über den Aufbau von Kautschuk“). Andere negative Anmerkungen sind auf die Gegebenheiten der einzelnen Projektstage zurückzuführen („zu kurze Pause“, „Die Zeit hat nicht immer ausgereicht“).

Es ist offensichtlich, dass die erhobenen Daten zum Interesse an „Kautschuk aus Löwenzahn“ nicht repräsentativ sind und keine alleinige Argumentationsgrundlage zur Beschäftigung mit dem Thema im Chemieunterricht darstellen. Sie können jedoch ergänzende Informationen für die Frage nach der Eignung des Themas für den Chemieunterricht darstellen.

5.5 Zusammenfassende Diskussion des Moduls und der Erhebung

Bei der Entwicklung des beschriebenen Projekttages wurde erwägt, die beiden Kernthemen Kautschuk und Inulin in einer Einheit miteinander zu verknüpfen. So würde zwar ein ganzheitlicher Blick auf den Löwenzahn als Untersuchungsgegenstand geworfen, allerdings könnten beide Themenbereiche nur sehr oberflächlich bearbeitet werden. Aufgrund des großen zeitlichen Aufwandes der meisten Experimente ließe sich ein Projekttag, der beide Inhaltsstoffe des Löwenzahns, Kautschuk und Inulin behandelt, nicht im für einen Besuch des Schülerlabors vorgesehenen Zeitrahmen durchführen. Weiterhin handelt es sich bei den Hauptinhaltsstoffen um sehr unterschiedliche und komplexe Stoffe, die für Schüler möglicherweise nicht gleichzeitig überschaubar wären. Aus diesen Gründen und weil zum Thema Inulin bereits verschiedene Unterrichts- und Projektmodule entwickelt wurden, wurde im Rahmen dieser Arbeit Material für die Auseinandersetzung mit Kautschuk aus Löwenzahn entwickelt.

Die Auswertung der erhobenen Daten zeigt, dass das untersuchte Modul das Potenzial hat, Interesse für das Thema Kautschuk aus Löwenzahn und für damit verbundene Aktivitäten zu wecken. Es kann insgesamt festgehalten werden, dass der Besuch des Schülerlabors zu diesem Thema als positiv und angenehm empfunden wird.

Es lässt sich konstatieren, dass durch die Auseinandersetzung mit dem Thema in dieser Form eines außerschulischen Praktikumstages im Schülerlabor vor allem die emotionale und wertbezogene Komponente des aktuellen Interesses angesprochen werden. Auch Anzeichen für Flow-Erleben sind durch die positiven Rückmeldungen zur Frage „Während des Projekts ist die Zeit schnell vergangen“ erkennbar.

Dass die Lernenden die Koagulation des Kautschuks aus der Latexmilch und die Herstellung des „Flummis“ als besonders ansprechend empfinden, könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Schüler nicht damit rechnen, aus einer milchigen Flüssigkeit eine größere Menge Feststoff (Kautschuk) zu gewinnen. Weiterhin ist positiv anzumerken, dass es in diesem Experiment möglich ist, ein Produkt herzustellen, das anschließend mit bloßen Händen angefasst werden und sogar mit nach Hause genommen werden kann.

Wenngleich die Lernenden das Thema als für sie interessant oder sogar sehr interessant einstufen, werden weiterführende Handlungen aus Interesse deutlich seltener intendiert. Dies könnte daran liegen, dass es sich bei dem Besuch des Schülerlabors zu diesem Thema um eine einmalige Exkursion handelt, die in der Regel im Unterricht nicht voroder weiter nachbereitet wird und sich die Schüler daher kognitiv nicht weiter auf das Thema einstellen. Denkbar ist auch, dass hier keine hohe Zustimmung erzielt wird, weil es für Jugendliche dieses Alters eher ungewöhnlich ist, mit Eltern oder Freunden vertieft über Schul Inhalte zu sprechen.

Die geringe Zustimmung zu intendierten Handlungen aus Interesse kann ebenfalls darauf zurückgeführt werden, dass sich Interesse erst nach wiederholter Auseinandersetzung manifestiert und sich daher noch kein längerfristiges Interesse mit dem Willen, sich eigenständig weiter mit dem Thema auseinander zu setzen, ausbilden konnte.

Der in der Literatur vielfach beschriebene Wunsch der Lernenden nach (mehr) Experimenten im Chemieunterricht findet sich in den Antworten auf die offenen Fragen wieder, in denen die Schüler vermehrt beschreiben, dass ihnen gerade das selbstständige Experimentieren die meiste Freude bereitet hat.

Aus den Antworten auf die offenen Fragen, was den Schülern am wenigsten gefallen habe und was sie vermisst haben, lassen sich Schlüsse für die Zukunft ziehen. Für die zeitliche Planung weiterer Praktikumsblöcke zu diesem Thema sollte demnach darauf geachtet werden, dass Zeit für eine ausreichend lange Pause für alle Schüler eingeplant wird. Je nach Klassenstufe und Wissensstand der Lernenden kann der Theorieblock zu Beginn des

Moduls etwas abgewandelt oder möglicherweise gekürzt bzw. schon vorbereitend in der Schule erarbeitet werden. Ergänzt werden könnte das Modul um weitere Alltagsbezüge: wie können Handschuhe und weitere Latexprodukte aus Löwenzahn hergestellt werden? Wie wird Kautschuk in der Industrie in Form gebracht? Welche Art von Kautschuk steckt im Kaugummi?

Wie Engeln in ihrer Studie gezeigt hat, sind vor allem die Herausforderung und die wahrgenommene Authentizität bei einem Besuch im Schülerlabor wichtige Einflussfaktoren auf das aktuelle Interesse der Lernenden (vgl. Engeln 2004, S. 107). Da ein Zusammenhang zwischen den beiden Variablen der wahrgenommenen Authentizität und der kognitiven Herausforderung besteht, empfiehlt sie, einen Bezug zur aktuellen Forschung herzustellen, da dies positive Auswirkungen habe (vgl. Engeln 2004, S. 116). Dass die Antworten zu den Items der kognitiven Komponente des Interesses gegenüber denen der emotionalen und wertbezogenen Komponenten etwas abgefallen sind, könnte also möglicherweise darauf zurückzuführen sein, dass der Grad der Herausforderung während des Praktikumstages für die Lernenden möglicherweise nicht passend war. Aus den Antworten auf die offenen Fragen, was den Schülern besonders gut und besonders wenig gefallen hat, lassen sich weder auf eine Über- noch auf eine Unterforderung gesicherte Rückschlüsse ziehen.

Insgesamt lässt sich die Erprobung des Projektmoduls durchaus als erfolgreich umgesetzt beschreiben. Alle Lernenden haben alle Experimente in der vorgesehenen Zeit durchführen können und zeigten Interesse am Thema. Für weitere Durchläufe sollte auf eine stärkere Einbindung des Projekttages in den Unterricht geachtet werden, sodass weitere offene Fragen und Interessen der Schüler bearbeitet werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die aktuelle Forschung am russischen Löwenzahn mit ihren bisherigen Erkenntnissen und zukünftigen Herausforderungen nach dem Vorbild der curricularen Innovationsforschung didaktisch zu erschließen und Voraussetzungen dafür zu schaffen, diesen Inhalt in Lehrgänge oder Projektmodule zu integrieren.

Dazu wurden zunächst der russische Löwenzahn und sein Potenzial als alternative Kautschukquelle ausführlich beschrieben. *Taraxacum kok-saghyz* wird seit einigen Jahren intensiv beforscht. In nationalen und internationalen Forschungsprojekten konnten bereits Prozesse zur Extraktion des Kautschuks und des Inulins entwickelt sowie Prototypen von Reifen und Motorlagern hergestellt werden. Die Firma Continental plant, den entwickelten Reifen in fünf bis zehn Jahren zur Marktreife zu führen und wird für die weitere Erforschung und Züchtung des Löwenzahns ein eigenes Forschungslabor eröffnen.

Um dieses in Wissenschaft und Technik aktuelle und authentische Thema für den Chemieunterricht praktisch aufzubereiten, wurden vielfältige Experimente sowohl zur Extraktion der Rohstoffe als auch zur Analyse und Weiterverarbeitung der Produkte entwickelt, erprobt und optimiert. Dabei haben sich drei Versuche zur Gewinnung des Kautschuks aus getrockneten Wurzeln als besonders für die Schule geeignet erwiesen: die mechanische Trennung des Wurzelgewebes vom Kautschuk mit Mörser und Pistill, die chemische Auftrennung durch Auflockern und Lösen des Wurzelgewebes in Natronlauge sowie die Extraktion des Kautschuks mittels eines organischen Lösemittels mit anschließendem Abdampfen. Zum Nachweis des Kautschuks wurden unter anderem ein Burchfield-Farbnachweis und eine IR-Spektroskopie erprobt und als sinnvoll für den Chemieunterricht der Oberstufe befunden.

Neben Versuchen zu Kautschuk wurden auch Inulin, seine Gewinnung sowie seine Eigenschaften experimentell für den Chemieunterricht aufbereitet. Dazu wurden verschiedene Extraktionsmethoden nachempfunden, von denen sich die Extraktion wie bei Zuckerrüben, d.h. unter Zusatz von Calciumhydroxid und Kohlenstoffdioxid, als am geeignetsten erwiesen hat. Um die Struktur zu verstehen, lässt sich am einfachsten eine Dünnschichtchromatographie von Inulin im Vergleich zu einem Inulinhydrolysat sowie zu Fructose und Glucose durchführen.

Zusätzlich zur Entwicklung und Erprobung verschiedener Experimente wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie durch die Beschäftigung mit *Taraxacum kok-saghyz* Bildung für nachhaltige Entwicklung und *nature of science* gefördert sowie der gesellschaftliche Bezug und die Relevanz des Chemieunterrichts erhöht werden können.

Eine Bildung für nachhaltige Entwicklung kann insbesondere durch das Abwägen von Vor- und Nachteilen in der Herstellung verschiedener Kautschuktypen (Naturkautschuk aus *Hevea brasiliensis*, aus *Taraxacum kok-saghyz* sowie synthetisch hergestellter Kautschuk) angebahnt werden. Für die Vermittlung von Wissen über *nature of science* kann über einen historischen Zugang die Verwobenheit von Forschung und Gesellschaft reflektiert werden. Durch Beschäftigung mit aktueller Forschungsliteratur lassen sich Vorgehensweisen von Naturwissenschaftlern nachvollziehen und zusätzlich die empirische Natur und die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens verstehen. Eine Erhöhung des gesellschaftlichen Bezuges und der Relevanz des Chemieunterrichts kann beispielsweise über eine kontroverse Diskussion über die Konkurrenzfähigkeit des neuen Löwenzahnkautschuks oder durch Erörterung von Szenarien im Falle von Ernteaussfällen bei *Hevea*-Kautschuk gelingen.

Eine Verortung des Themas im Sachunterricht der Grundschule oder im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht der Sekundarstufe I kann mit einem einfachen Experiment und über die Frage der Herkunft von Rohstoffen, insbesondere von Kautschuk, erfolgen.

Die Eignung ausgewählter Experimente und Arbeitsmaterialien wurde mit Oberstufenschülern im Rahmen von Praktikumstagen im Schülerlabor Science Forum überprüft. Die praktische Erprobung zeigt, dass die Mehrheit der Lernenden das Thema sowie die damit im Praktikum verbundenen Aktivitäten als interessant empfindet und dass den Lernenden die Arbeit mit dem Löwenzahn Freude bereitet. Für die zukünftige Beschäftigung mit dem Thema in Projekttagen in der Universität sollte ein Teil der theoretischen Erarbeitung der chemischen Hintergründe vorbereitend in die Schule verlagert und weitere alltagsrelevante Fragestellungen in den Projekttag aufgenommen werden. Die entwickelten Experimente und Materialien können neben dem Einsatz in Projekttagen an der Universität ebenso direkten Einzug in den regulären Chemieunterricht finden und auch mehr und mehr in Lehrbüchern abgebildet werden.

Im Sinne der curricularen Innovationsforschung und um das Ziel zu erreichen, dass die neuen Lernmaterialien möglichst weite Anwendung finden, sollte in der zukünftigen Arbeit eine weitere Erprobung und Optimierung mit Lerngruppen in Schülerlaboren, Projektkursen und Schulen und eine Präsentation in Lehrerfortbildungen stattfinden.

Experimentell könnte die Forschung in der Zukunft ausgeweitet werden, indem Experimente zur Kautschukgewinnung beispielsweise aus dem heimischen Stachellattich (*Lactuca serriola*), der laut Forschungsergebnissen eine weitere vielversprechende Quelle für Naturkautschuk sein könnte, durchgeführt werden.

Mit dieser Arbeit konnte somit erfolgreich gezeigt werden, dass sich eine Beschäftigung mit dem Thema Kautschuk aus Löwenzahn in der Schule oder in Projekttagen an Universitäten grundsätzlich eignet: Die entwickelten Experimente sind als schultauglich anzusehen, das Thema ist anschlussfähig an die Lehrpläne für das Fach Chemie und erfüllt fachdidaktische Anforderungen an einen modernen Chemieunterricht. Die bereits in der Einleitung vorgestellte Forderung, sich im naturwissenschaftlichen Unterricht auch mit aktuell für Forschung und Technik wichtigen Fragestellungen zu befassen, wird in der Auseinandersetzung mit der Pflanze an sich, mit Extraktionsmethoden, Potenzial und Grenzen des Einsatzes des neuen Löwenzahnkautschuks erfüllt.

7 Literaturverzeichnis

Altmayer, Wolfgang (2012): *Salter's Chemie - chemical ideas*. [Schülerband ; theoretische Grundlagen]. Dt. Ausg. Braunschweig: Schroedel.

Ambros, Otto (1937): Contribution à l'étude de la formation du caoutchouc dans la plante. In: *Revue générale du caoutchouc* (133), S. 3–4.

Anton, Michael A. (2008): Die Chemie und der 'Innere Wohlstand' des Menschen. In: Hans Güsten und Heinrich Reiner mann (Hg.): *Die Chemie zwischen Hoffnung und Skepsis. Wege zur Vertiefung von Wissen und Verständnis in Chemie und Technik*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos, S. 136–184.

Arias, Marina; Herrero, Javier; Ricobaraza, María; Hernández, Mónica; Ritter, Enrique (2016): Evaluation of root biomass, rubber and inulin contents in nine *Taraxacum koksaghyz* Rodin populations. In: *Industrial Crops and Products* 83, S. 316–321.

Arnold, Karin; Dietrich, Volkmar; Eberle, Andreas; Grimmer, Andreas; Labahn, Bettina; Malz, Ralf; Schäfer, Steffen (2010): *Chemie Oberstufe. Gesamtband*. Berlin: Cornelsen.

Aschan, Ossian (1929): *Naphtenverbindungen. Terpene und Campherarten inkl. Pinusharzsäuren sowie Körper der Kautschukgruppe*. Berlin/Leipzig: Walter de Gruyter & Co.

Au, Dawn Tung; Chen, Hubiao; Jiang, Zhihong; Zhao, Zhongzhen (2009): A novel method to identify the Chinese herbal medicine Wuzhimaotao by quantification of laticifers. In: *Microscopy research and technique* 72 (4), S. 293–298, zuletzt geprüft am 02.12.2015.

Bader, Hans Joachim; Lutz, Bernd; Pfeifer, Peter (2002): *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 3. Aufl. München: Oldenbourg.

Banerji, Amitabh (2012): *Vom Plexiglas zum OLED-Display. Konjugierte Polymere in der curricularen Innovation*. Dissertation. Bergische Universität, Wuppertal.

Barth, Matthias (2015): *Implementing sustainability in higher education. Learning in an age of transformation*. New York: Routledge.

Barth, Matthias (2017): Bildung für nachhaltige Entwicklung - (k)ein Thema für den Sachunterricht? In: Martin Gröger, Mareike Janssen und Jutta Wiesemann (Hg.): *Nachhaltig Handeln lernen im Sachunterricht. Beitragsdokumentation zur Tagung am 5. Oktober 2016 an der Universität Siegen*. Siegen: universi - Universitätsverlag Siegen, S. 41–57.

Bate, Peter (2004): *Weißer König, roter Kautschuk, schwarzer Tod*. Belgien. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=VUgypBcnARE>, zuletzt geprüft am 10.01.2017.

Baumann, Werner; Ismeier, Monika (1998): *Kautschuk und Gummi 1. Daten und Fakten zum Umweltschutz*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Beck, R. H. F.; Praznik, W. (1986): Inulinhaltige Pflanzen als Rohstoffquelle. Biochemische und pflanzenphysiologische Aspekte. In: *Starch/Stärke* 38 (11), S. 391–394.

Belitz, Hans-Dieter; Grosch, Werner; Schieberle, Peter (2008): *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. 6., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer.

Bell, Jared L.; Burke, Ian C.; Neff, Michael M. (2015): Genetic and biochemical evaluation of natural rubber from Eastern Washington prickly lettuce (*Lactuca serriola* L.). In: *Journal of agricultural and food chemistry* 63 (2), S. 593–602.

Bernhardt, Sarah (2017): Plastikflaschen aus Biomüll. In: *Nachrichten aus der Chemie* 65 (5), S. 549–550.

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) (2017): *DEGINTU - Gefahrstoffinformationssystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung*. Online verfügbar unter <https://www.degintu.de/>, zuletzt geprüft am 10.10.2017.

- Bildungswerk Stanisław Hantz (2015): "Der Ausbau von Auschwitz als Zentrale Zuchtstation hat erhebliche Fortschritte gemacht". Infomappe zum "Interessengebiet" des Konzentrationslagers Auschwitz. 5. überarb. Aufl. Kassel.
- Blecker, C. et al. (2003): Characterisation of different inulin samples by DSC. Influence of polymerisation degree on melting temperature. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (71), S. 211–220.
- Blume, Rüdiger (o.J.): Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie. Online verfügbar unter <http://www.chemieunterricht.de/dc2/>, zuletzt geprüft am 06.04.2017.
- Böckler, Ina (2007): Diätetische Lebensmittel. Wissenschaftliche Hausarbeit (Staatsexamensarbeit). Philipps-Universität Marburg, Marburg.
- Böhme, Richard W. (1941): Kautschuk aus Pflanzen in nördlichen Breiten. In: *Die Umschau. Wochenschrift über die Fortschritte in Wissenschaft und Technik* 45 (21), S. 321–323.
- Bolscho, Dietmar; Hauenschild, Katrin (2007): Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Joachim Kahlert, Maria Fölling-Albers, Margarete Götz, Andreas Hartinger, Dietmar von Reeken und Steffen Wittkowske (Hg.): *Handbuch Didaktik des Sachunterrichts*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, S. 200–205.
- Bonciu, Camelia; Tabacaru, Cristina; Bahrim, Gabriela (2010): Yeasts isolation and selection for bioethanol production from inulin hydrolysates. In: *Innovative Romanian Food Biotechnology* 6, S. 29–34.
- Bormann, Inka; Haan, Gerhard de (Hg.) (2008): Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Botsch, Walter (1992): Die Geschichte des Kautschuks. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 41 (4), S. 17–20.
- Braun, Dietrich (2012): Der lange Weg zum Makromolekül. In: *Chemie in unserer Zeit* 46 (5), S. 310–320.
- Braun, Dietrich (2013): *Kleine Geschichte der Kunststoffe*. München: Hanser.
- Braun, Dietrich; Jenkins, Aubrey (2016): Samuel Pickles Formel des Naturkautschuks. In: *Chemie in unserer Zeit*, S. 1–5.
- Bridgestone (2015): Durchbruch: Bridgestone produziert ersten Reifen aus Guayule-Naturkautschuk. Online verfügbar unter <http://www.bridgestone.de/lkw-und-busse/sitecore/inhalt/psr/web/home/pkw-4x4-und-transporter/your-journey/news/2015/11/bridgestone-produziert-ersten-reifen-aus-guayule-naturkautschuk/>, zuletzt geprüft am 09.01.2017.
- Buranov, Anvar U. (2009): Process for recovering rubber from rubber-bearing plants with a gristmill. Veröffentlichungsnr: US 7,540,438 B2.
- Buranov, Anvar U.; Elmuradov, Burkhon J. (2010): Extraction and characterization of latex and natural rubber from rubber-bearing plants. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 58 (2), S. 734–743.
- Burchfield, H. P. (1945): Qualitative Spot Tests for Rubber Polymers. In: *Industrial and Engineering Chemistry* 17 (12), S. 806–810.
- Burger, Ludwig (2014): Tire makers race to turn dandelions into rubber. Reuters. Online verfügbar unter <http://www.reuters.com/article/us-dandelion-rubber-idUSKBN0GK0LN20140820>, zuletzt geprüft am 19.01.2017.
- Bushman, Bradley S.; Scholte, Andrew A.; Cornish, Katrina; Scott, Deborah J.; Brichta, Jenny L.; Vederas, John C. et al. (2006): Identification and comparison of natural rubber from two *Lactuca* species. In: *Phytochemistry* 67 (23), S. 2590–2596.
- Chemie heute. Nordrhein-Westfalen Gesamtband (2015). Braunschweig: Schroedel.
- Chemie im Kontext - Sekundarstufe II. Kontexte, Medien, Basiskonzepte (2009). 1. Aufl. Berlin: Cornelsen.
- Christophersen, Thies (1978): Die Auschwitz-Lüge. Ein Erlebnisbericht. 7., erw. Aufl. Mohrkirch: Kritik-Verlag.

- Collins-Silva, Jillian; Nural, Aise Taban; Skaggs, Amanda; Scott, Deborah; Hathwaik, Upul; Woolsey, Rebekah et al. (2012): Altered levels of the *Taraxacum kok-saghyz* (Russian dandelion) small rubber particle protein, TksRPP3, result in qualitative and quantitative changes in rubber metabolism. In: *Phytochemistry* 79, S. 46–56.
- Continental Reifen Deutschland GmbH (2016): Video-Dokumentation: Löwenzahnkautschuk *Taraxagum*". Online verfügbar unter <http://www.continental-reifen.de/autoreifen/media-services/newsroom/taraxagum/2016-06-22-video-reifen-aus-loewenzahn>, zuletzt geprüft am 17.01.2017.
- Continental Reifen Deutschland GmbH (28.03.2017): Pläne von Continental für *Taraxagum* Lab Anklam erhalten breite Zustimmung vom Stadtrat in Anklam. Online verfügbar unter <https://www.continental-reifen.de/autoreifen/media-services/newsroom/20170328-taraxagum-lab-anklam>, zuletzt geprüft am 13.06.2017.
- Cornish, Katrina (2014): Biosynthesis of natural rubber (NR) in different rubber-producing species. In: Shinzo Kohjiya (Hg.): *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber*. Amsterdam: Woodhead Publishing, S. 3–29.
- Cornish, Katrina (2016): Temporal diversity of *Taraxacum kok-saghyz* plants reveals high rubber yield phenotypes. In: *Biodiversitas* 17 (2), S. 847–856.
- Cornish, Katrina; Siler, Deborah J. (1996): Hypoallergenic Guayule Latex: Research to Commercialization. In: Jules Janick (Hg.): *Progress in new crops. Proceedings of the third national symposium new opportunities, new technologies*. Alexandria: ASHS Press, S. 327–335.
- Cornish, Katrina; Xie, Wenshuang (2012): Natural rubber biosynthesis in plants: rubber transferase. In: *Methods in enzymology* 515, S. 63–82. DOI: 10.1016/B978-0-12-394290-6.00004-5.
- Cornwell, John (2004): *Forschen für den Führer. Deutsche Naturwissenschaftler und der Zweite Weltkrieg*. Bergisch Gladbach: Lübbe.
- Csikszentmihalyi, Mihaly; Schiefele, Ulrich (1993): Die Qualität des Erlebens und der Prozeß des Lernens. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 39 (2/3), 207-222.
- Cura, Katrin (2010): Springende Kautschukbälle und Autoadhäsion. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 59 (3), S. 27–29.
- De, Prajna P. (2002): Infrared Spectroscopy of Rubbers. In: Victor M. Litvinov und Prajna P. De (Hg.): *Spectroscopy of rubber and rubbery materials*. Shawbury, U.K.: Rapra Technology Ltd, S. 77–124.
- Demuth, Reinhard; Gräsel, Cornelia; Parchmann, Ilka; Ralle, Bernd (Hg.) (2008): *Chemie im Kontext. Von der Innovation zur nachhaltigen Verbreitung eines Unterrichtskonzepts*. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.
- Deng, Feng; Chen, Der-Thang; Tsai, Chin-Chung; Chai, Ching Sing (2011): Students' views of the nature of science. A critical review of research. In: *Science Education* 95 (6), S. 961–999.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2017): DGUV Information 213-098. Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“.
- Ditmar, Rudolf (1912): *Der Kautschuk. Eine kolloidchemische Monographie*. Berlin: Julius Springer.
- Eilks, Ingo (2011): Plädoyer für eine konsequentere gesellschaftliche Orientierung des Chemie- und Physikunterrichts. In: Dietmar Höttecke (Hg.): *Naturwissenschaftliche Bildung als Beitrag zur Gestaltung partizipativer Demokratie*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Potsdam 2010. Münster: LIT-Verl., S. 47–62.
- Elemente Chemie. Oberstufe. Gesamtband für die Einführungsphase und Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe in Nordrhein-Westfalen (2015). 1. Aufl. Stuttgart: Klett.
- Elster, Doris (2007): Interessante und weniger interessante Kontexte für das Lernen von Naturwissenschaften. Erste Ergebnisse der deutschen ROSE-Erhebung. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 60 (4), S. 243–249.

- Engeln, Katrin (2004): Schülerlabors. Authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. Berlin: Logos (Studien zum Physiklernen, 36).
- Epping, Janina; van Deenen, Nicole; Niephaus, Eva; Stolze, Anna; Fricke, Julia; Huber, Claudia et al. (2015): A rubber transferase activator is necessary for natural rubber biosynthesis in dandelion. In: *NPLANTS* 1 (5), S. 1–9.
- Eskew, Roderick K.; Edwards, Paul W. (1946): Process for recovering rubber from fleshy plants. Veröffentlichungsnr: 2,393,035.
- Faraday, Michael (1826): On pure Caoutchouc, and the Substances by which it is accompanied in the State of Sap, or Juice. In: *The Quarterly Journal of Science and the Arts* (21), S. 19–27.
- Fischer, Rainer; Gronover, Christian Schulze; Prüfer, Dirk (2017): Naturkautschuk aus Russischem Löwenzahn. Grundlage für die Erschaffung eines neuen, biobasierten Industriezweigs. In: Reimund Neugebauer (Hg.): Ressourceneffizienz. Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft, S. 323–331.
- Fitting, Hans (1909): Physiologische Grundlagen zur Bewertung der Zapfmethoden bei Kautschukbäumen. nach einigen Versuchen an *Hevea brasiliensis*. In: O. Warburg und F. Wohltmann (Hg.): Beihefte zum Tropenpflanzer. Wissenschaftliche und praktische Abhandlungen über tropische Landwirtschaft. Der Tropenpflanzer. Zeitschrift für das Gesamtgebiet der Land- und Forstwirtschaft warmer Länder 10 (1), S. 1–43.
- Flitner, Michael (1995): Sammler, Räuber und Gelehrte. Die politischen Interessen an pflanzengenetischen Ressourcen 1895 - 1995. Frankfurt a. M.: Campus.
- Franck, Anne (2002): Technological functionality of inulin and oligofructose. In: *British Journal of Nutrition* 87 (2), S287-S291.
- Franck, Anne; Leenheer, Leen de (2002): Inulin. In: Erick J. Vandamme, Alexander Steinbüchel und Sophie de Baets (Hg.): Polysaccharides II. Polysaccharides from eukaryotes. Weinheim: Wiley-VCH (Biopolymers, 6), S. 441–473.
- Freytag, Berthold (1998): Gummi - ein seltsam elastisches Material. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 47 (1), S. 35–39.
- Fritschi, Jakob: Über die Konstitution des Kautschuks. Zürich: Verlag Seldwyla.
- Fröbe, Rainer; Füllberg, Stolberg, Claus; Gutmann, Christoph; Keller, Rolf; Obenaus, Herbert (1985): Konzentrationslager in Hannover. KZ-Arbeit und Rüstungsindustrie in der Spätphase des Zweiten Weltkriegs. Teil I. Hildesheim: Lax.
- Gesellschaft Deutscher Chemiker (2003): Stellungnahme zu Fructooligosacchariden und Inulin. In: *Lebensmittelchemie* 57, S. 74–75.
- Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hg.) (2017): Bildung in Chemie stärken - Trutzinger Offensive der GDCh für die Jahrgangsstufen 5 & 6. Diskussionsergebnisse und Empfehlungen aus der Klausurtagung "Stärkung des Chemieunterrichts in den Schulklassen 5 und 6". Frankfurt am Main: GDCh.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (Hg.) (2013): Perspektivrahmen Sachunterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Gey, Manfred H. (2015): Instrumentelle Analytik und Bioanalytik. Biosubstanzen, Trennmethode, Strukturanalytik, Applikationen. 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Giersch, Ulrich; Kubisch, Ulrich (1995): Gummi - die elastische Faszination. Berlin: Nicolai.
- Glöckner, Wolfgang; Jansen, Walter; Weißenhorn, Rudolf G. (Hg.) (1997): Handbuch der experimentellen Chemie. Sekundarbereich II. Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie. Köln: Aulis Verlag Deubner.
- Glowinski, Ingrid (2007): Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fördernde Lernumgebungen. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Gräber, Wolfgang (1992): Interesse am Unterrichtsfach Chemie, an Inhalten und Tätigkeiten. In: *Chemie in der Schule* 39 (10), S. 354–358.

- Gräber, Wolfgang; Lindner, Martin (2009): Interessenstudie Chemieunterricht: Vergleich 1990-2008. In: Dietmar Höttecke (Hg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Schwäbisch Gmünd 2008. Berlin, Münster: LIT-Verl., S. 92–94.
- Gröger, Martin; Janssen, Mareike; Wiesemann, Jutta (Hg.) (2017): Nachhaltig Handeln lernen im Sachunterricht. Beitragsdokumentation zur Tagung am 5. Oktober 2016 an der Universität Siegen. Siegen: universi - Universitätsverlag Siegen.
- Groot, Hilka de; Farhadi, Jutta (2015): Ernährungswissenschaft. 6. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer.
- Gross, D. (1974): Aufschluß von Vulkanisaten und Identifizierung durch IR-Spektrometrie. In: *Kautschuk und Gummi - Kunststoffe* 27 (6), S. 225–234.
- Gruber, Erich (o. J.): Chemische Grundlagen der Zellstoff- und Papierherstellung. Natron- (Soda-) Aufschluss. Online verfügbar unter www.gruberscript.net, zuletzt geprüft am 15.05.2017.
- Guderian, Pascal (2007): Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte. Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik. Dissertation. Humboldt-Universität, Berlin.
- Guderian, Pascal; Priemer, Burkhard; Schön, Lutz-Helmut (2006): In den Unterricht eingebundene Schülerlaborbesuche und deren Einfluss auf das aktuelle Interesse an Physik. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 5 (2), S. 142–149.
- Günzler, Helmut; Gremlich, Hans-Ulrich (2003): IR-Spektroskopie. Eine Einführung. 4., vollst. überarb. und aktual. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- Haan, Gerhard de (2002): Die Kernthemen der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. In: *Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik* 25 (1), S. 13–20.
- Haan, Gerhard de (2008): Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept der Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Inka Bormann und Gerhard de Haan (Hg.): *Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 23–43.
- Hamilton, Robert G.; Cornish, Katrina (2010): Immunogenicity studies of guayule and guayule latex in occupationally exposed workers. In: *Industrial Crops and Products* (31), S. 197–201.
- Handelsblatt GmbH (Hg.) (2009): Gib Gummi. Vor 100 Jahren fanden deutsche Forscher einen Weg, Kautschuk künstlich herzustellen. Ohne den flexiblen Werkstoff stünden in unserer modernen Welt viele Räder still. *agenda. Handelsblatt*.
- Hannibal, B. K. (2007): To the memory of the geobotanist Leonid E. Rodin (to the 100th anniversary of his birthday). In: *Vegetation of Russia* (10), S. 106–107.
- Harries, Carl Dietrich (1905): Zur Kenntniss der Kautschukarten: Ueber Abbau und Constitution des Parakautschuks. In: *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* 38 (1), S. 1195–1203.
- Harries, Carl Dietrich (1911): Über Kohlenwasserstoffe der Butadienreihe und über einige aus ihnen darstellbare künstliche Kautschukarten. In: *Justus Liebigs Annalen der Chemie* (Bd. 383).
- Harries, Carl Dietrich (1919): Untersuchungen über die natürlichen und künstlichen Kautschukarten. Berlin: Julius Springer.
- Haucke, Kerstin (2014): Berufsorientierung im Chemieunterricht. Erhebung von Schülervorstellungen zu ausgewählten Berufen und Entwicklung von Konzepten zur Integration von Berufsorientierung in Unterricht und Lehrerbildung. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Heim, Susanne (2002): Forschung für die Autarkie. Agrarwissenschaft an Kaiser-Wilhelm-Instituten im Nationalsozialismus. In: Susanne Heim (Hg.): *Autarkie und Ostexpansion. Pflanzenzucht und Agrarforschung im Nationalsozialismus*. Göttingen: Wallstein, S. 145–179.

- Heim, Susanne (2003): Kalorien, Kautschuk, Karrieren. Pflanzenzüchtung und landwirtschaftliche Forschung in Kaiser-Wilhelm-Instituten 1933 - 1945. Göttingen: Wallstein (Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus).
- Heim, Susanne (2004): Naturkautschuk im Zweiten Weltkrieg. Boom und Scheitern eines Forschungsprojekts. In: *Theresienstädter Studien und Dokumente* (11), S. 261–305.
- Heim, Susanne; Kaulen, Hildegard (2010): Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung. Münchenberg - Köln. In: Peter Gruss, Reinhard Rürup und Susanne Kiewitz (Hg.): Denkkorte. Max-Planck-Gesellschaft und Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft ; Brüche und Kontinuitäten 1911 - 2011. Dresden: Sandstein-Verl., S. 348–358.
- Heldt, Hans Walter; Piechulla, Birgit (2015): Pflanzenbiochemie. 5., überarb. und aktual. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Hellier, Barbara (2011): Collecting in Central Asia and the Caucasus: U.S. National Plant Germplasm System Plant Explorations. In: *HortScience* 46 (11), S. 1438–1439.
- Herbst, Karola; Sommer, Katrin (2002): Carokaffee. Ein Klassiker neu entdeckt. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 13 (69), S. 23–27.
- Hessisches Kultusministerium (2010): Lehrplan Chemie. Gymnasialer Bildungsgang. Gymnasiale Oberstufe. Online verfügbar unter <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/go-chemie.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2017.
- Heymann, Hans Werner (2013): Allgemeinbildung und Mathematik. 2., neu ausgestattete Aufl. Weinheim, Basel: Beltz.
- Hidi, Suzanne; Renninger, K. Ann (2006): The Four-Phase Model of Interest Development. In: *Educational Psychologist* 41 (2), S. 111–127.
- Hillebrand, Andrea; Post, Janina J.; Wurbs, David; Wahler, Daniela; Lenders, Malte; Krzyzanek, Vladislav et al. (2012): Down-regulation of small rubber particle protein expression affects integrity of rubber particles and rubber content in *Taraxacum brevicorniculatum*. In: *PLoS one* 7 (7), S. 1–9.
- Hochschild, Adam (2000): Schatten über dem Kongo. Die Geschichte eines der großen, fast vergessenen Menschheitsverbrechen. 5. Aufl. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Hofheinz, Volker (2008): Erwerb von Wissen über "Nature of Science". Eine Fallstudie zum Potenzial impliziter Aneignungsprozesse in geöffneten Lehr-Lern-Arrangements am Beispiel von Chemieunterricht. Dissertation. Universität Siegen, Siegen.
- Hofheinz, Volker (2010): Das Wesen der Naturwissenschaften. Was die Naturwissenschaften ausmacht. In: *Unterricht Chemie* 21 (118/119), S. 8–13.
- Hofmann, Fritz (1909): Verfahren zur Herstellung von künstlichem Kautschuk. Veröffentlichungsnr: 250690.
- Holstermann, Nina; Bögeholz, Susanne (2007): Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 13, S. 71–86.
- Hoppenhaus, Kerstin (2013): Pilzbefall: Die Kautschuk-Apokalypse. Hg. v. ZEIT ONLINE GmbH. Online verfügbar unter <http://www.zeit.de/2013/45/kautschuk-gummi-pilzbefall>, zuletzt geprüft am 17.03.2016.
- Horne, S. E.; Kiehl, J. P.; Shipman, J. J.; Folt, V. L.; Gibbs, C. F.; Willson, E. A. et al. (1956): Ameripol SN — A Cis-,4-Polyisoprene. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 48 (4), S. 784–791.
- Hößle, Corinna; Höttecke, Dietmar; Kircher, Ernst (Hg.) (2004): Lehren und Lernen über die Natur der Naturwissenschaften. Baltmannsweiler: Schneider-Verl. Hohengehren.
- Höttecke, Dietmar (2001): Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen. Berlin: Logos (Studien zum Physiklernen, 16).

- Höttecke, Dietmar (2013): Rollen- und Planspiele in der Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Jürgen Menthe, Dietmar Höttecke, Ingo Eilks und Corinna Hößle (Hg.): *Handeln in Zeiten des Klimawandels. Bewerten lernen als Bildungsaufgabe*. Münster: Waxmann, S. 95–111.
- Höttecke, Dietmar; Henke, Andreas (2010): Über die Natur der Naturwissenschaften lehren und lernen. Geschichte und Philosophie im Chemieunterricht? In: *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 21 (118/119), S. 2–7.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): GESTIS-Stoffdatenbank. Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Online verfügbar unter http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestis-deu:sdbdeu, zuletzt geprüft am 02.11.2017.
- Javorsky, L. (1944): Die neue Kautschukpflanze Kok-Sagys und ihr Anbau in Sowjet-Rußland. In: *Der Tropenpflanzer Zeitschrift für das Gesamtgebiet der Land- und Forstwirtschaft warmer Länder* 47 (1), S. 1–74.
- Julius Kühn-Institut (2013): Pest risk analysis on *Taraxacum koksaghyz*.
- Kerrutt, Günter (1977): Quellungsmessungen als Methode zur Untersuchung vernetzter Makromoleküle in der Sekundarstufe II. In: *Chemieunterricht* (3), S. 44–62.
- Kierst, M. P. J. (1978): Production of fructose syrups from inulin-containing plants. In: *Biotechnology and Bioengineering* 20, S. 447–450.
- Kirschner, J.; Štěpánek, Jan; Černý, Tomáš; Heer, Peter de; van Dijk, Peter J. (2013): Available ex situ germplasm of the potential rubber crop *Taraxacum koksaghyz* belongs to a poor rubber producer, *T. brevicorniculatum* (Compositae–Crepidinae). In: *Genetic Resources and Crop Evolution* 60 (2), S. 455–471.
- Klaushofer, Hans (1986): Zur Biotechnologie fructosanhaltiger Pflanzen. In: *Starch/Stärke* 38 (3), S. 91–94.
- Kloppenburger, Heike; Groß, Thomas; Mezger, Martin; Wrana, Claus (2009): Das elastische Jahrhundert. Synthesekautschuke. In: *Chemie in unserer Zeit* 43 (6), S. 392–406.
- Kollmer, Dieter H. (2008): Kongo-Freistaat und Belgisch-Kongo: Die belgische Kolonialherrschaft 1885 bis 1960. In: Bernhard Chiari und Dieter H. Kollmer (Hg.): *Demokratische Republik Kongo*. 3., überarb. Aufl. Paderborn: Schöningh, S. 39–47.
- Krapp, Andreas (1992a): Das Interessenkonstrukt. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In: Andreas Krapp und Manfred Prenzel (Hg.): *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung*. Münster: Aschendorff (Arbeiten zur sozialwissenschaftlichen Psychologie, 26), S. 297–329.
- Krapp, Andreas (1992b): Interesse, Lernen und Leistung. Neue Forschungsansätze in der Pädagogischen Psychologie. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 38 (5), S. 747–770.
- Krapp, Andreas (1998): Entwicklung und Förderung von Interessen im Unterricht. In: *Psychologie in Erziehung und Unterricht* 44, S. 185–201.
- Krapp, Andreas (2002): Structural and dynamic aspects of interest development: theoretical considerations from an ontogenetic perspective. In: *Learning and Instruction* 12, S. 383–409.
- Krapp, Andreas (2010): Interesse. In: Detlef H. Rost (Hg.): *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie*. 4., überarb. und erw. Aufl. Weinheim: Beltz, S. 311–323.
- Krees, Simone (2009): Wirt-Gast-Komplexe mit Cyclodextrinen. Strukturelle Merkmale und didaktisches Potenzial. Dissertation. Bergische Universität, Wuppertal.
- Kreuzberger, Marie; Hahn, Thomas; Zibek, Susanne; Schiemann, Joachim; Thiele, Katja (2016): Seasonal pattern of biomass and rubber and inulin of wild Russian dandelion (*Taraxacum koksaghyz* L. Rodin) under experimental field conditions. In: *European Journal of Agronomy* 80, S. 66–77.
- Kröger, Martin (2002): Herstellung von 5-Hydroxymethylfurfural aus D-Fructose und In-situ-Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural zu 2,5-Furandicarbonsäure ausgehend von D-Fructose; Entwicklung neuartiger

- Verfahren auf Basis von Membranen und immobilisierten Katalysatoren. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Labudde, Peter (2010): Ziele bewusst machen - Kompetenzen fördern. In: Peter Labudde (Hg.): Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1. - 9. Schuljahr. 1. Aufl. Bern: Haupt, S. 13–28.
- Laibach, Natalie; Hillebrand, Andrea; Twyman, Richard M.; Prüfer, Dirk; Schulze Gronover, Christian (2015): Identification of a *Taraxacum brevicorniculatum* rubber elongation factor protein that is localized on rubber particles and promotes rubber biosynthesis. In: *The Plant journal* 82 (4), S. 609–620.
- Lederman, Norman G. (2007): Nature of Science: Past, Present, and Future. In: Sandra K. Abell und Norman G. Lederman (Hg.): Handbook of research on science education. Mahwah, NJ: Erlbaum, S. 831–879.
- Lederman, Norman G.; Abd-El-Khalick, Fouad; Bell, Randy L.; Schwartz, Renée S. (2002): Views of nature of science questionnaire. Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. In: *Journal of Research in Science Teaching* 39 (6), S. 497–521.
- Lühken, Arnim; von der Lahr, Linn-Malena (2012): Borverbindungen im Schulexperiment. Die Auswirkungen der Neu-Kategorisierung von Borverbindungen auf den Experimentalunterricht. In: *CHEMKON* 19 (4), S. 179–184.
- Madorsky, Samuel L. (1964): Thermal Degradation of Organic Polymers. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons, Inc.
- Madsen, Rudrik et al. (2000): Saftreinigung. In: van der Poel, Pieter W., Hubert M. Schiweck und Thomas K. Schwartz (Hg.): Zuckertechnologie. Rüben- und Rohrzuckergewinnung. Berlin: Bartens, S. 485–584.
- Martinez, M.; Poirrier, P.; Chamy, R.; Prüfer, D.; Schulze-Gronover, C.; Jorquera, L.; Ruiz, G. (2015): *Taraxacum officinale* and related species-An ethnopharmacological review and its potential as a commercial medicinal plant. In: *Journal of ethnopharmacology* 169, S. 244–262.
- McComas, William; Clough, Michael P.; Almazroa, Hiya (2002): The Role And Character of The Nature of Science in Science Education. In: William F. McComas (Hg.): The Nature of Science in Science Education. Rationales and Strategies. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Science & Technology Education Library, 5), S. 3–39.
- Mensink, Maarten A.; Frijlink, Henderik W.; van der Voort Maarschalk, Kees; Hinrichs, Wouter L. J. (2015): Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. In: *Carbohydrate polymers* 130, S. 405–419.
- Metzger, Susanne (2010): Die Naturwissenschaften fächerübergreifend vernetzen. In: Peter Labudde (Hg.): Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1. - 9. Schuljahr. 1. Aufl. Bern: Haupt, S. 29–44.
- Metzner, Helmut (1982): Pflanzenphysiologische Versuche. Stuttgart: Fischer.
- Meyer, P. Diederich; Wolf, Joop de; Oliver, Peter (2007): Neue Zucker. Inulin und Fructooligosaccharide. In: Kurt Rosenplenter, Ulrich Nöhle und Gert-Wolfhard von Rymon Lipinski (Hg.): Handbuch Süßungsmittel. Eigenschaften und Anwendung. 2., vollst. überarb. Aufl. Hamburg: Behr, S. 155–193.
- Michelsen, Gerd; Fischer, Daniel (2015): Bildung für nachhaltige Entwicklung. Wiesbaden: Hessische Landeszentrale für politische Bildung (Schriftenreihe Nachhaltigkeit, 2).
- Miedaner, Thomas (2017): Pflanzenkrankheiten, die die Welt beweg(t)en. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2016): Bildungsplan des Gymnasiums. Bildungsplan 2016. Chemie. Online verfügbar unter http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_CH.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2017.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Chemie. 1. Aufl., 2014. Online verfügbar unter http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ch/KLP_GOSt_Chemie.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2017): Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in Nordrhein-Westfalen (RISU-NRW). Online verfügbar unter https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Recht/Schulrecht/Erlasse/RISU-NRW_2017.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2017.

Mitchell, Mathew (1993): Situational Interest: Its Multifaceted Structure in the Secondary School Mathematics Classroom. In: *Journal of Educational Psychology* 85 (3), S. 424–436.

Mooibroek, Hans; van Beilen, Jan B. (2011): EU production and exploitation of alternative rubber and latex sources. An EU-founded project has been established to develop the necessary groundwork and tools for the commercial development of alternatives to natural rubber and latex. In: *Tire Technology International*, S. 62–65.

Mörrike, Klaus Dieter; Betz, Eberhard (1997): *Biologie des Menschen*. 14., überarb. und aktual. Aufl. Wiesbaden: Quelle & Meyer.

Munt, Oliver; Arias, Marina; Hernandez, Mónica; Ritter, Enrique; Schulze Gronover, Christian; Prüfer, Dirk (2012): Fertilizer and planting strategies to increase biomass and improve root morphology in the natural rubber producer *Taraxacum brevicorniculatum*. In: *Industrial Crops and Products* 36 (1), S. 289–293.

Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung (Hg.) (2017): Nationaler Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung. Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Weltaktionsprogramm. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/files/Nationaler_Aktionsplan_Bildung_fuer_nachhaltige_Entwicklung.pdf, zuletzt geprüft am 26.07.2017.

Nickel, Heike (2002): Präbiotischer Joghurt - besonders gesund? Ein Einstieg in die Unterrichtseinheit Oligosaccharide. In: *Unterricht Chemie* 13 (69), S. 32–33.

Niness, Kathy R. (1999): Inulin and Oligofructose: What Are They? In: *The Journal of Nutrition* (129), 1402S–1406S.

Nwadinigwe, C. A. (1981): Comparative yield of *cis*-1,4-polyisoprene from stem latex of four *Landolphia* species. In: *Phytochemistry* 20 (9), S. 2301–2302.

OECD (2016): PISA 2015 Ergebnisse (Band I). Exzellenz und Chancengerechtigkeit in der Bildung: Bertelsmann.

Ohya, Norimasa; Koyama, Tanetoshi (2001): Biosynthesis of Natural Rubber and Other Natural Polyisoprenoids. In: Tanetoshi Koyama und Alexander Steinbüchel (Hg.): *Polyisoprenoids*. Weinheim: Wiley-VCH (Biopolymers, 2), S. 73–109.

Ostromow, Hermann (1981): *Analyse von Kautschuken und Elastomeren*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Parchmann, Ilka; Menthe, Jürgen (2006): Von Anfang an - Nachhaltigkeit durch Chemieunterricht. In: Michael Angrick, Klaus Kümmerer und Lothar Meinzer (Hg.): *Nachhaltige Chemie. Erfahrungen und Perspektiven* [Beiträge der Tagung in der Evangelischen Akademie Tutzing]. Marburg: Metropolis (Ökologie und Wirtschaftsforschung, 66).

Parchmann, Ilka; Ralle, Bernd; Di Fuccia, David (2008): Entwicklung und Struktur der Unterrichtskonzeption Chemie im Kontext. In: Reinhard Demuth, Cornelia Gräsel, Ilka Parchmann und Bernd Ralle (Hg.): *Chemie im Kontext. Von der Innovation zur nachhaltigen Verbreitung eines Unterrichtskonzepts*. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann, S. 9–47.

Parchmann, Ilka; Schwarzer, Stefan; Wilke, Timm; Tausch, Michael W.; Waitz, Thomas (2017): Von Innovationen der Chemie zu innovativen Lernanlässen für den Chemieunterricht und darüber hinaus. In: *CHEMKON* 24 (4), S. 161–164.

Pawek, Christoph (2009): *Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe*. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

Pickles, Samuel Shrowder (1910): The constitution and synthesis of caoutchouc. In: *Journal of the Chemical Society, Transactions* 97, S. 1085–1090.

- Post, Janina; van Deenen, Nicole; Fricke, Julia; Kowalski, Natalie; Wurbs, David; Schaller, Hubert et al. (2012): Laticifer-specific cis-prenyltransferase silencing affects the rubber, triterpene, and inulin content of *Taraxacum brevicorniculatum*. In: *Plant Physiology* 158 (3), S. 1406–1417.
- Prenzel, Manfred; Lankes, Eva-Maria; Minsel, Beate (2000): Interessenentwicklung in Kindergarten und Grundschule: Die ersten Jahre. In: Ulrich Schiefele (Hg.): *Interesse und Lernmotivation. Untersuchungen zu Entwicklung, Förderung und Wirkung*. Münster: Waxmann, S. 11–30.
- Prüfer, Dirk: Von der Pustelblume zur Industriepflanze: hochwertiger Naturkautschuk für die gummiverarbeitende Industrie. *Innovative Biomasse-Erzeugung - Herausforderungen und Perspektiven*. Online verfügbar unter http://www.hez.wzw.tum.de/fileadmin/Agrarwissenschaftliches_Symposium/Agrar-Symp_2015/Praesentationen_2015/Vortrag_Prof_Pruefer.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2017.
- Pummerer, Rudolf; Burkard, Peter A. (1922): Über Kautschuk. In: *Ber. dtsh. Chem. Ges. A/B* 55 (10), S. 3458–3472.
- Puskas, J. E.; Chiang, K.; Barkakaty, B. (2014): Natural rubber (NR) biosynthesis: perspectives from polymer chemistry. In: Shinzo Kohjiya (Hg.): *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber*. Amsterdam: Woodhead Publishing, S. 30–67.
- Puskas, J. E.; Gautriaud, E.; Deffieux, A.; Kennedy, J. P. (2006): Natural rubber biosynthesis - A living carbocationic polymerization? In: *Progress in Polymer Science* 31 (6), S. 533–548.
- RAAbits Chemie. Grundwerk SI/II.
- Rapp, Knut M.; Daub, Jörg (1993): Herstellung und Derivatisierung von 5-Hydroxymethylfurfural. In: Manfred Eggendorfer und Siegfried Warwel (Hg.): *Nachwachsende Rohstoffe. Perspektiven für die Chemie*. Weinheim: VCH, S. 183–196.
- Reiners, Christiane S. (2017): *Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Reiners, Christiane S.; Tausch, Michael W. (2009): Curricula für das Lehramt Chemie an der Universität. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 58 (2), S. 29–31.
- Requardt, Axel (2017): Staudingers Kautschukmodell auf dem Prüfstand. In: *Nachrichten aus der Chemie* 65 (2), S. 161–163.
- Roberfroid, Marcel B. (2005a): Introducing inulin-type fructans. In: *British Journal of Nutrition* 93 (S1), S. S13-S25.
- Roberfroid, Marcel B. (2005b): *Inulin-type fructans. Functional Food Ingredients*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Rodin, Leonid E. (1933): НОВЫЙ ВИД ОДУВАНЧИКА. Eine neue Art der Gattung *Taraxacum* L. In: *Acta Instituti Botanici Academiae Scientiarum USSR* 1 (1), S. 187–189.
- Römpp Lexikon Chemie (Hg.) (2017a): Eintrag zu: Naturkautschuk. Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-14-00569>, zuletzt geprüft am 23.02.2017.
- Römpp Lexikon Chemie (Hg.) (2017b): Eintrag zu: Polychloroprene. Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03160>, zuletzt geprüft am 17.01.2017.
- Römpps Chemie-Lexikon (1975). Stuttgart: Franckh (3).
- Ropohl, Mathias; Schönau, Katharina; Parchmann, Ilka (2016): Welche Wünsche und Erwartungen haben Lehrkräfte an aktuelle Forschung als Gegenstand von Fortbildungsveranstaltungen? Ergebnisse einer Befragung im Rahmendes Fortbildungsprogramms „Transfer Wissenschaft - Schule“. In: *CHEMKON* 23 (1), S. 25–33.
- Röthemeyer, Fritz; Sommer, Franz (2013): *Kautschuk-Technologie. Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte*. 3., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser.

- Sadler, Troy D. (Hg.) (2011): *Socio-scientific Issues in the Classroom. Teaching, Learning and Research*. Dordrecht: Springer (Contemporary Trends and Issues in Science Education, 39).
- Scharf, Volker (1977): Das "Kautschukrätsel" - eine für die Entwicklung der makromolekularen Chemie bahnbrechende Strukturaufklärung und deren experimentelle Behandlung im Unterricht von Leistungskursen. In: *Chemieunterricht* (3), S. 4–43.
- Scharf, Volker (1984): Zum Bildungsbeitrag von Experimenten im Chemieunterricht. In: *Der Chemieunterricht* (2), S. 13–28.
- Scharf, Volker (1985): C. D. Harries und das "Kautschuk-Problem". In: *chimica didactica* (11), S. 175–195.
- Scharf, Volker (1993): Bezeichnetes und Zeichen in der Chemie. Zur Geschichte der 'Kautschukformeln'. In: *Diagonal* (1), S. 211–223.
- Scharf, Volker (2015): Naturwissenschaftlicher Unterricht im technischen Zeitalter. In: Kurt Freytag, Volker Scharf, Roland Meloefski und Eberhard Thomas (Hg.): *Mensch - Chemie - Technik*. Köln: Aulis (Handbuch des Chemieunterrichts, 6), S. 2–43.
- Scharfenberg, Franz-Josef (2005): *Experimenteller Biologieunterricht zu Aspekten der Gentechnik im Lernort Labor: empirische Untersuchung zu Akzeptanz, Wissenserwerb und Interesse*. Dissertation. Universität Bayreuth, Bayreuth.
- Schlichter, Alexander (1999): *Forschung im "Dritten Reich" - Taraxacum kok-sagyz*. Ein Fallbeispiel. Diplomarbeit. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Schlieper, Cornelia A. (2014): *Grundfragen der Ernährung*. 21., überarb. und erw. Aufl. Hamburg: BÜCHNER Handwerk und Technik.
- Schmidt, Heinrich T. (1971): *Continental. Ein Jahrhundert Forschung und Leistung. 1871-1971*. Hg. v. Continental. Hannover.
- Schmidt, Thomas; Hillebrand, Andrea; Wurbs, David; Wahler, Daniela; Lenders, Malte; Schulze Gronover, Christian; Prüfer, Dirk (2010a): Molecular Cloning and Characterization of Rubber Biosynthetic Genes from *Taraxacum koksaghyz*. In: *Plant Molecular Biology Reporter* 28 (2), S. 277–284.
- Schmidt, Thomas; Lenders, Malte; Hillebrand, Andrea; van Deenen, Nicole; Munt, Oliver; Reichelt, Rudolf et al. (2010b): Characterization of rubber particles and rubber chain elongation in *Taraxacum koksaghyz*. In: *BMC biochemistry* 11, S. 1–11.
- Schreiner, Camilla; Sjøberg, Svein (2004): *Sowing the seeds of ROSE. Background, rationale, questionnaire development and data collection for ROSE (The Relevance of Science Education) : a comparative study of students' views of science and science education*. Oslo: University of Oslo, Department of Teacher Education and School Development.
- Schulze Gronover, Christian; Prüfer, Dirk (2010): Kautschuk aus Löwenzahn. In: Karl-Friedrich Berger und Sandra Kiefer (Hg.): *Dichtungstechnik. Jahrbuch 2009*. Mannheim: ISGATEC, S. 46–50.
- Schulze Gronover, Christian; Wahler, Daniela; Prüfer, Dirk (2011): Natural Rubber Biosynthesis and Physico-Chemical Studies on Plant Derived Latex. In: Magdy Elnashar (Hg.): *Biotechnology of Biopolymers*. Rijeka: InTech, S. 75–88.
- Schwedt, Georg (2013): *Experimente rund um die Kunststoffe des Alltags*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley.
- Seidel, Wolfgang (2012): *Die Weltgeschichte der Pflanzen*. Köln: Eichborn.
- Seliwanoff, Theodor (1887): Notiz über eine Fruchtzuckerreaction. In: *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* 20 (1), S. 181–182.
- Shelley, Lore (Hg.) (1991): *Criminal experiments on human beings in Auschwitz and war research laboratories. Twenty women prisoners' accounts*. San Francisco: Mellen Research University Press.

Sigma-Aldrich: Inulin, from chicory. Sicherheitsdatenblatt. Online verfügbar unter <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=DE&language=de&productNumber=I2255&brand=SIGMA&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Fsigma%2Fi2255%3Flang%3Dde>, zuletzt geprüft am 07.02.2017.

Siler, Deborah J.; Cornish, Katrina (1994): Hypoallergenicity of guayule rubber particle proteins compared to *Hevea* latex proteins. In: *Industrial Crops and Products* 2 (4), S. 307–313.

Sommer, Katrin (2000): Substitute für Hauptnährstoffe - Neue Impulse aus der Lebensmittelchemie für einen zeitgemäßen Chemieunterricht - dargestellt am Beispiel Inulin. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg.

Sommer, Katrin (2001): Inulin - Naturstoff und Lebensmittelinhaltsstoff. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 12 (62), S. 24–28, zuletzt geprüft am 06.11.2015.

Sommer, Katrin; Pfeiffer, Peter (1999): Inulin - Von der Wegwarte zum "Functional Food". In: *Chemie und Schule* 14 (4), S. 10–21.

Sommer, Katrin; Pfeiffer, Peter (2001): Inulin: Ein Kohlenhydrat als Ballast- und Fettaustauschstoff. In: *Unterricht Biologie* 25 (270), S. 34–39.

Spectral Database for Organic Compounds (SDBS). Online verfügbar unter http://sdbs.db.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi, zuletzt geprüft am 06.09.2017.

Spitzer, Philipp (2017): Untersuchungen zur Berufsorientierung als Baustein eines relevanten Chemieunterrichts. Dissertation. Universität Siegen, Siegen.

Statistisches Bundesamt (30.06.2017 - 226/17): Über 44 Millionen Erwerbstätige im Mai 2017. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/06/PD17_226_132pdf.pdf;jsessionid=093B1636BD6483EF9CCE9D9D50986B39.cae1?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

Staudinger, Hermann (1924): Über die Konstitution des Kautschuks (6. Mitteilung). In: *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series)* 57 (7), S. 1203–1208.

Staudinger, Hermann (1932): Widerrufung der Vortragseinladung, 07.07.1932. Brief an H. Mark.

Staudinger, Hermann (1961): Arbeitserinnerungen. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH.

Staudinger, Hermann (1969): Das Wissenschaftliche Werk von Hermann Staudinger. Gesammelte Arbeiten nach Sachgebieten geordnet. Hg. v. Magda Staudinger. Basel, Heidelberg: Hüthig & Wepf Verlag.

Staudinger, Hermann; Fritsch, Jakob (1922): Über Isopren und Kautschuk. 5. Mitteilung. Über die Hydrierung des Kautschuks und über seine Konstitution. In: *Helvetica Chimica Acta* 5 (5), S. 785–806.

Stavely, F. W. (1956): Coral Rubber — A *Cis*-1,4-Polyisoprene. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 48 (4), S. 778–783.

Stoltenberg, Ute; Burandt, Simon (2014): Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. In: Harald Heinrichs und Gerd Michelsen (Hg.): *Nachhaltigkeitswissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 567–594.

Stolz, Miriam; Witteck, Torsten; Marks, Ralf; Eilks, Ingo (2011): 'Doping' für den Chemieunterricht. und eine Reflexion über geeignete Themen für einen gesellschaftlich relevanten Chemieunterricht. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 64 (8), S. 472–479.

Stolze, Anna; Wanke, Alan; van Deenen, Nicole; Geyer, Roland; Prüfer, Dirk; Schulze Gronover, Christian (2017): Development of rubber-enriched dandelion varieties by metabolic engineering of the inulin pathway. In: *Plant biotechnology journal* (15), S. 740–753.

Stork, Heinrich (1985): Zur Rolle der Naturwissenschaftsgeschichte im naturwissenschaftlichen Unterricht, vor allem im Chemieunterricht. In: *Chemiker-Zeitung* 109 (9), S. 293–301.

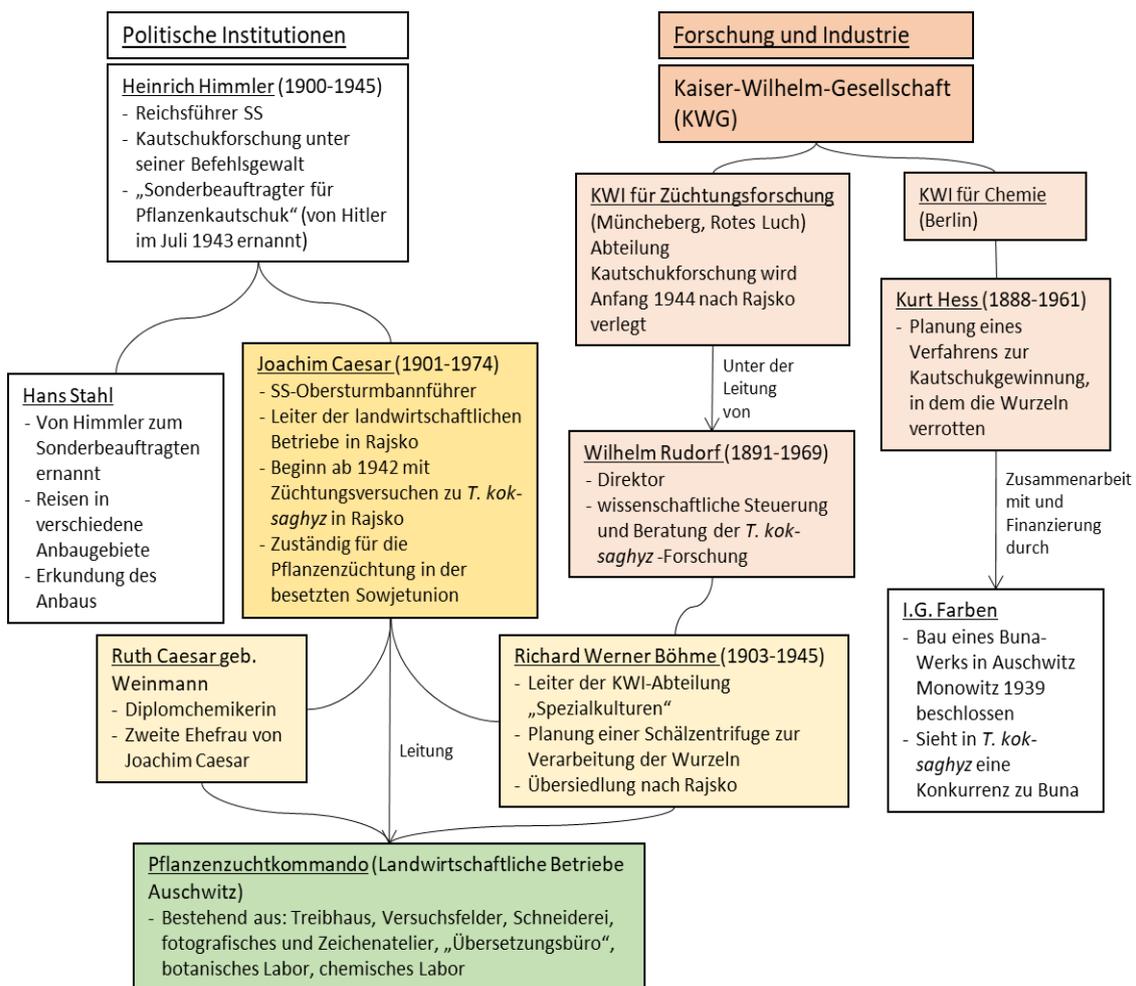
- Strebel, Bernhard; Wagner, Jens-Christian (2009): "No time to Debate and Ask Questions" - Forced Labor for Science in the Kaiser Wilhelm Society, 1939-1945. In: Carola Sachse, Mark Walker und Susanne Heim (Hg.): *The Kaiser Wilhelm Society under national socialism*. New York: Cambridge University Press, S. 47–73.
- Streck, R.; Piltzing, N.; Müller, Michael (1992): Die Rolle des Butadiens in der chemischen Technik. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 5 (41), S. 2–9.
- Stuckey, Marc; Sperling, Jan P.; Hofstein, Avi; Mamlok-Naaman, Rachel; Eilks, Ingo (2014): Ein Beitrag zum Verständnis der Relevanz des Chemieunterrichts. In: *CHEMKON* 21 (4), S. 175–180.
- Świebocka, Teresa; Webber, Jonathan (1993): *Auschwitz. A history in photographs*. Bloomington: Published for the Auschwitz-Birkenau State Museum Oświęcim and Książka i Wiedza Warsaw by Indiana University Press.
- Tanaka, Yasuyuki; Sakdapipanich, Jitladda T. (2001): Chemical Structure and Occurrence of Natural Polyisoprenes. In: Tanetoshi Koyama und Alexander Steinbüchel (Hg.): *Polyisoprenoids*. Weinheim: Wiley-VCH (Biopolymers, 2), S. 1–25.
- Tausch, Michael W. (2000): Didaktische Integration – die Versöhnung von Fachsystematik und Alltagsbezug. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 47 (3), S. 179–182.
- Tausch, Michael W. (2004): Curriculare Innovation. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 53 (8), S. 18–21.
- Tausch, Michael W. (2008): Innovation und Bildung durch Chemie: Aktivierung der Kommunikation von Chemie in Lehre und Gesellschaft. In: Hans Güsten und Heinrich Reiner mann (Hg.): *Die Chemie zwischen Hoffnung und Skepsis. Wege zur Vertiefung von Wissen und Verständnis in Chemie und Technik*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos, S. 52–92.
- Tausch, Michael W. (2009): Innovationen. In *Zeiten von Kerncurricula und PISA*. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 58 (2), S. 35–37.
- Tausch, Michael W.; Anton, Michael A. (2015): CHEM₂DO. Lehrlernmittel für den innovativen Unterricht. In: *CHEMKON* 22 (2), S. 82–84.
- Tausch, Michael W.; Wachtendonk, Magdalene von (2007): *Chemie 2000+. Sekundarstufe II*. Bamberg: C. C. Buchner.
- Tichauer, Eva (1988): *J'étais le numéro 20832 à Auschwitz*. Paris: L'Harmattan.
- Trabs, Kathrin (2012): *Thermisch induzierte Veränderungen von Inulin: Strukturelle und funktionelle Veränderungen*. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Online verfügbar unter <http://d-nb.info/1068152451/34>, zuletzt geprüft am 07.07.2015.
- Ulmann, Max (1951): *Wertvolle Kautschukpflanzen des gemässigten Klimas*. Dargestellt auf Grund sowjetischer Forschungsarbeiten. Berlin: Akademie-Verlag.
- van Beilen, Jan B.; Poirier, Yves (2007): Guayule and Russian dandelion as alternative sources of natural rubber. In: *Critical reviews in biotechnology* 27 (4), S. 217–231.
- van der Poel, Pieter W.; Schiweck, Hubert M.; Schwartz, Thomas K. (Hg.) (2000): *Zuckertechnologie. Rüben- und Rohrzuckergewinnung*. Berlin: Bartens.
- van Dijk, Peter J.; Kirschner, Jan; Štěpánek, Jan; Omarovich Baitulin, Issa; Černý, Tomáš (2010): *Taraxacum koksaghyz* Rodin definitely is not an example of overcollecting in the past. A reply to S. Volis et al. (2009). In: *Journal of Applied Botany and Food Quality* (83), S. 217–219.
- Venkatachalam, Perumal; Geetha, Natesan; Sangeetha, Palanivel; Thulaseedharan, Arjunan (2013): Natural rubber producing plants: An overview. In: *African Journal of Biotechnology* 12 (12), S. 1297–1310.
- Verband der chemischen Industrie e.V. (2013): *Die deutsche chemische Industrie 2030*. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/langfassung-prognos-studie-30-01-2013.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

- Verbraucherzentrale NRW e.V. (2016): Was steckt hinter "zuckerfrei", "fettarm" und Co? Online verfügbar unter <https://www.verbraucherzentrale.de/Was-steckt-hinter-zuckerfrei-fettarm-und-Co>, zuletzt geprüft am 29.03.2017.
- Vereinte Nationen (2015): Entwurf des Ergebnisdokuments des Gipfeltreffens der Vereinten Nationen zur Verabschiedung der Post-2015-Entwicklungsagenda. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 1. September 2015.
- Volaric, Lisa; Hagen, John (2002): The Isolation of Rubber from Milkweed Leaves. An Introductory Organic Chemistry Lab. In: *Journal of Chemical Education* 79 (1), S. 91–93.
- Wahler, Daniela; Gronover, Christian Schulze; Richter, Carolin; Foucu, Florence; Twyman, Richard M.; Moerschbacher, Bruno M. et al. (2009): Polyphenoloxidase silencing affects latex coagulation in *Taraxacum* species. In: *Plant Physiology* 151 (1), S. 334–346.
- Weiler, Elmar W.; Nover, Lutz (2008): Allgemeine und molekulare Botanik. 1. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Whaley, W. Gordon; Bowen, John S. (1947): Russian dandelion (Kok-Saghyz). An emergency source of Natural Rubber. Washington: United States Government Printing Office.
- Wieland, Thomas (2002): 'Die politischen Aufgaben der deutschen Pflanzenzüchtung'. NS-Ideologie und die Forschungsarbeiten der akademischen Pflanzenzüchter. Agrarwissenschaft an Kaiser-Wilhelm-Instituten im Nationalsozialismus. In: Susanne Heim (Hg.): Autarkie und Ostexpansion. Pflanzenzucht und Agrarforschung im Nationalsozialismus. Göttingen: Wallstein, S. 35–56.
- Wieland, Thomas (2004): "Wir beherrschen den pflanzlichen Organismus besser, ...". Wissenschaftliche Pflanzenzüchtung in Deutschland, 1889 - 1945. München: Deutsches Museum.
- Williams, C. Greville (1860): On Isoprene and Caoutchine. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (150), S. 241–255.
- Wilson, Robert G.; Kachman, Stephen D.; Martin, Alex R. (2001): Seasonal changes in glucose, fructose, sucrose, and fructans in the roots of dandelion. In: *Weed Science* 49 (2), S. 150–155.
- Wolf, Michael (1982): Inulin aus Artischocken. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* (1), S. 27–28.
- Wortmann, Christopher; Dettmer, Fabian; Steiner, Frank (2013): Die Chemie des Reifens. In: *Chemie in unserer Zeit* 47, S. 300–309.
- WWU Münster; Phytowelt Green Technologies GmbH; Technische Universität München (Hg.) (o. J.): Nachhaltige Bioproduktion von allergenfreiem Naturlatex und -kautschuk in Zellkulturen. LaKaZell. Online verfügbar unter <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-13255.pdf>, zuletzt geprüft am 15.08.2017.
- Zięba, Anna (1966): Das Nebenlager Rajska. In: *Hefte von Auschwitz* (9), S. 75–108.

Anhang

I. Personenregister und Personenkonstellation

Die folgende Concept-Map soll einen Überblick über die wichtigsten Akteure in der *T. kok-saghyz*-Arbeit zur Zeit des Zweiten Weltkriegs und ihre Verbindungen untereinander geben.



Im Namensregister sind die an der Forschung und Arbeit am russischen Löwenzahn zur Zeit des Zweiten Weltkriegs beteiligten Personen aufgeführt.

Baur, Erwin	Gründer des KWI für Züchtungsforschung Pflanzen genetiker und Züchtungsforscher
Böhme, Richard Werner	1903-1945 Abteilungsleiter im Bereich „Spezialkulturen“ am KWI für Züchtungsforschung Leiter des botanischen Labors in Rajsko Nach der Evakuierung von Auschwitz wurde er in Polen erschlagen.

Caesar, Joachim	1901-1974 SS-Obersturmbannführer Leiter der Landwirtschaftlichen Betriebe Auschwitz (1942-1945) und zuständig für den <i>kok-saghyz</i> -Anbau in der besetzten Sowjetunion Nach dem Krieg wurde er juristisch nicht belangt, sagte jedoch als Zeuge in mehreren Prozessen aus. Ab 1951 betrieb er eine Wäscherei in Konstanz.
Caesar, Ruth geb. Weinmann	Diplomchemikerin Leiterin des chemischen Labors in Rajsko Zweite Ehefrau von Joachim Caesar
Hess, Kurt	1888-1961 Chemiker Abteilungsleiter im Bereich „Organische Chemie“ am KWI für Chemie (finanziert von der IG Farben) Zur Forschung an <i>Taraxacum kok-saghyz</i> stellte die Deutsche Arbeitsfront Hess ab 1943 in Löwenberg/Schlesien ein Labor zur Verfügung, das er leitete
Himmler, Heinrich	1900-1945 Reichsführer SS Sonderbeauftragter für Pflanzenkautschuk
Kehrl, Hans	Generalbevollmächtigter für Rüstungsaufgaben Stellte sich gegen den Bau neuer Verarbeitungsanlagen von <i>kok-saghyz</i>
Kudriawtzow, Georg	SS-Hauptsturmführer Reiste mehrmals in die Sowjetunion, um <i>Taraxacum kok-saghyz</i> zu erforschen
Nikitin (Vorname unbekannt)	Russischer Agronom, der nach dem Ersten Weltkrieg in Deutschland blieb und mit den Deutschen kollaborierte
Rudorf, Wilhelm	1891-1969 Direktor des KWI für Züchtungsforschung Nach Kriegsende konnte er seine Karriere weiterführen und lehrte auch an den Universitäten Göttingen und Köln.
Schattenberg, Heinz	SS-Obersturmführer Vertreter von Caesar Diplom-Landwirt Wählte besonders gut gewachsene Löwenzahnpflanzen zur Isolierung und zur Bestäubung von Hand aus
Stahl, Hans	Korvettenkapitän Leiter der Dienststelle des Reichsführers SS Unternahm Reisen in die Anbaugelände für <i>kok-saghyz</i> , um den Anbau in den besetzten Gebieten zu überwachen
Vogel, Heinrich	1901-1958 Leiter des Amtes für Land-, Forst- und Fischwirtschaft im Wirtschaftsverwaltungshauptamt der SS „Vorgesetzter“ von Caesar

Überblick über die Häftlingsfrauen, die überlebt haben und die sich in Interviews oder Memoiren zu Rajsko und ihrer Arbeit dort geäußert haben:

Laboratoriumsarbeit	Kultivierung und Anbau auf den Feldern	Fotografisches Atelier und Zeichenatelier
<ul style="list-style-type: none">• Claudette Bloch (später Kennedy)• Simone Floersheim• Marie-Elisa Cohen• Madeleine Odru• Hélène Parreaux• Eva Tichauer	<ul style="list-style-type: none">• Jozefa Kiwalowa• Zofia Abramowiczowa• Riva Krieglova	<ul style="list-style-type: none">• Wanda Ladniewska• Inge Schlesinger

II. Fotostrecke für theoretische Versuche

Nachweis des gewonnenen Kautschuks durch Pyrolyse und Farbreaktion nach Burchfield und IR-Spektroskopie

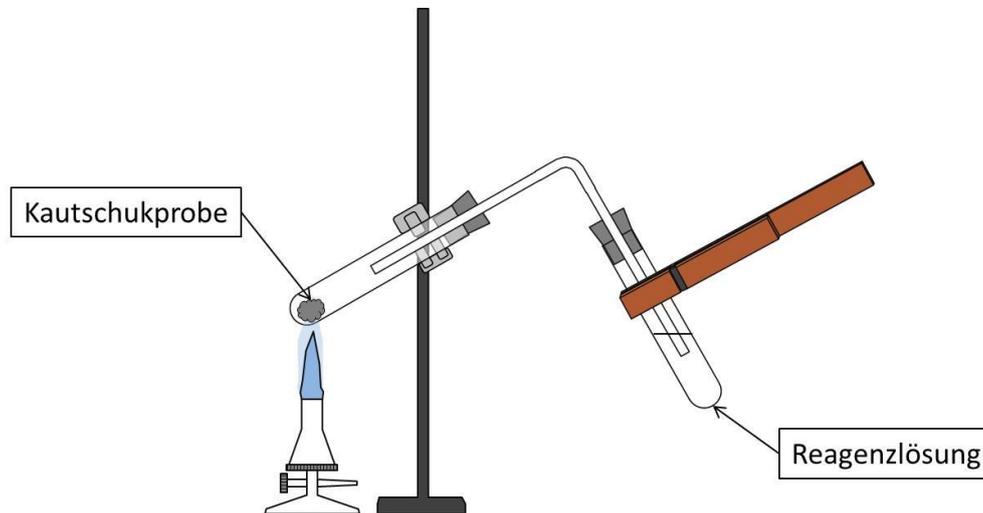


Abbildung 78: Versuchsaufbau



Zusammensetzung:

1,0 g	<i>p</i> -Dimethylaminobenzaldehyd
0,01 g	Hydrochinon
100 mL	Methanol
5 mL	konz. Salzsäure
10 mL	Ethylenglykol

Durchführung:

Pyrolysedämpfe werden eingeleitet. Die Lösung wird mit 5 mL Methanol versetzt und erhitzt. Dann wird die Färbung notiert.

Abbildung 79: Reagenzlösung

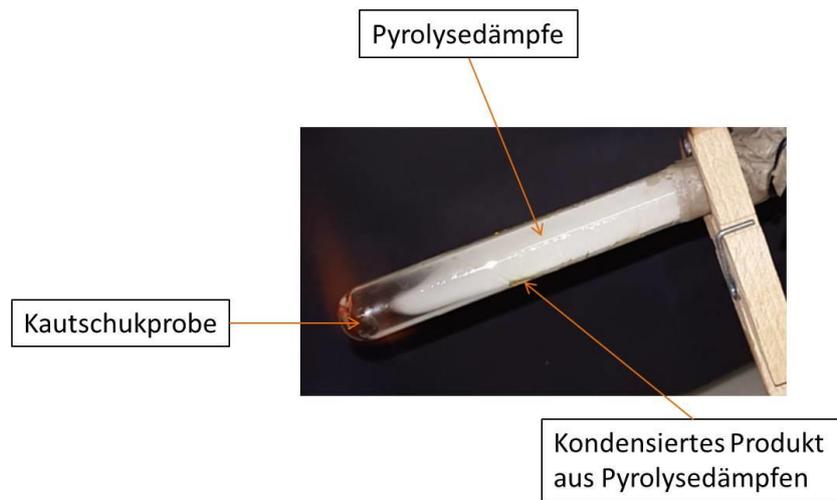
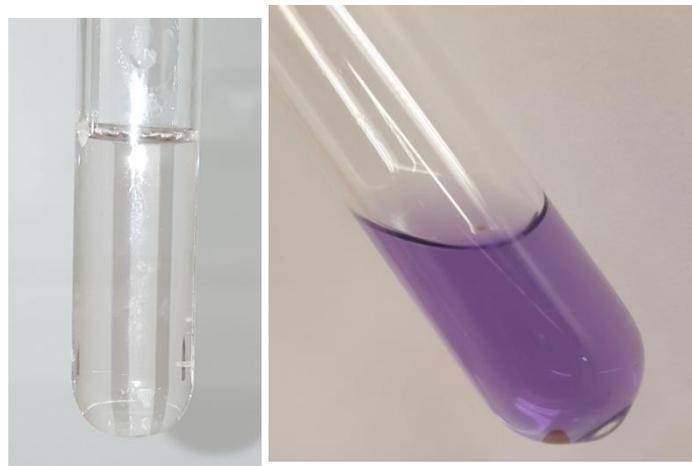


Abbildung 80: Erhitzen der Probe



Abbildung 81: Versuchsausrüstung nach Abschluss der Pyrolyse

Abbildung 82: Reagenzlösung nach Einleiten eines Naturkautschuk-Pyrolysats (aus *Taraxacum kok-saghyz*) und Erhitzen mit Methanol

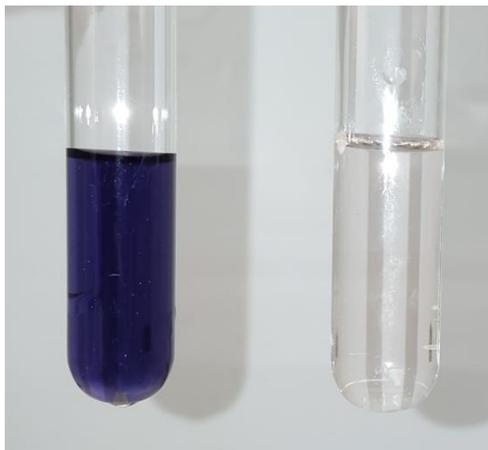


Abbildung 83: Reagenzlösung nach Einleiten eines Naturkautschuk-Pyrolysats (aus *Hevea brasiliensis*) und Erhitzen mit Methanol

Tabelle 23: Spezifische Färbungen nach Burchfield

Kautschuktyp	Färbung der Reagenzlösung nach Einleiten der Pyrolysedämpfe und Erhitzen mit Methanol
Vergleichsprobe ohne Kautschuk	Farblos – hellgelb
Naturkautschuk	Dunkelblau – violett
Nitril-Kautschuk	Orange – rot
Styrol-Butadien-Kautschuk	Grün
Silikon-Kautschuk	Gelb
Polyurethan-Kautschuk	Gelb

III. Fragebogen

	<h2 style="margin: 0;">Didaktik der Chemie</h2>	
---	---	---

Fragebogen zum Projekt mit dem Thema „Kautschuk aus Löwenzahn“

Bitte füllen Sie den folgenden Fragebogen spontan, gewissenhaft und zügig aus. Es gibt keine „richtigen“ oder „falschen“ Antworten. Ihre persönliche Meinung ist uns wichtig – und nicht die Ihres Nachbarn. Alle Daten werden von uns selbstverständlich anonym und vertraulich behandelt. Vielen Dank!

Mein Alter: _____

Ich bin: weiblich männlich

Bitte kreuzen Sie an!

	stimmt voll und ganz	stimmt eher	stimmt eher nicht	stimmt überhaupt nicht
Das Thema war für mich interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich werde in Büchern nachschlagen oder im Internet recherchieren, um mehr Informationen über das im Projekt behandelte Thema zu bekommen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Arbeit im Projekt hat mir Spaß gemacht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bei der Besprechung des Themas bin ich auf neue Ideen gekommen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich werde mit Freunden, Eltern oder Geschwistern über Dinge sprechen, die ich im Projekt erlebt habe.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das eigenständige Arbeiten war mir wichtig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass wir das Projekt durchgeführt haben, erscheint mir sinnvoll.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Experimente und Informationen, die wir heute im Projekt thematisiert haben, würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Bezug des Themas zum Alltag war mir wichtig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Während des Projekts ist die Zeit schnell vergangen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Bezug des Themas zu anderen naturwissenschaftlichen Gebieten war mir wichtig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich würde gerne mehr über das Thema erfahren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass wir Experimente durchgeführt haben, war mir persönlich wichtig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Projekt war langweilig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Arbeit mit Geräten, die auch in der Forschung verwendet werden, hat mir Spaß gemacht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich werde außerhalb des Unterrichts über Dinge nachdenken, die wir im Projekt gesehen oder angesprochen haben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welche Teile des Themas haben Sie besonders interessiert?
Bitte kreuze an.

	sehr	eher	eher nicht	überhaupt nicht
Die aktuelle Arbeit in der Reifenindustrie.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der chemische Hintergrund und die Eigenschaften von Kautschuk.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Natur- vs. Synthetikautschuk.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Experimente zur Gewinnung aus Löwenzahn.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Experiment zu den Eigenschaften von Latexmilch (Tyndall-Effekt).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Experiment zur Gewinnung von Kautschuk aus Latexmilch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Herstellen von Gummi (Vulkanisation).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Diskussion über Vor- und Nachteile der verschiedenen Kautschukpflanzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges: _____ _____				

Bitte verteilen Sie Schulnoten von 1 bis 6!

	1	2	3	4	5	6
Thema Löwenzahnkautschuk allgemein	<input type="checkbox"/>					
Experimente zum Thema	<input type="checkbox"/>					
Verständlichkeit der Materialien	<input type="checkbox"/>					

Das hätte mich noch zusätzlich interessiert: (Stichpunkte möglich)

Was hat Ihnen am Projekt am besten gefallen? Warum? (Stichpunkte möglich)

Was hat Ihnen am Projekt am wenigsten gefallen? Warum? (Stichpunkte möglich)

Vielen Dank für Ihre Mithilfe! 😊

IV. Beschreibung der Stichprobe und grafische Übersicht über die Ergebnisse

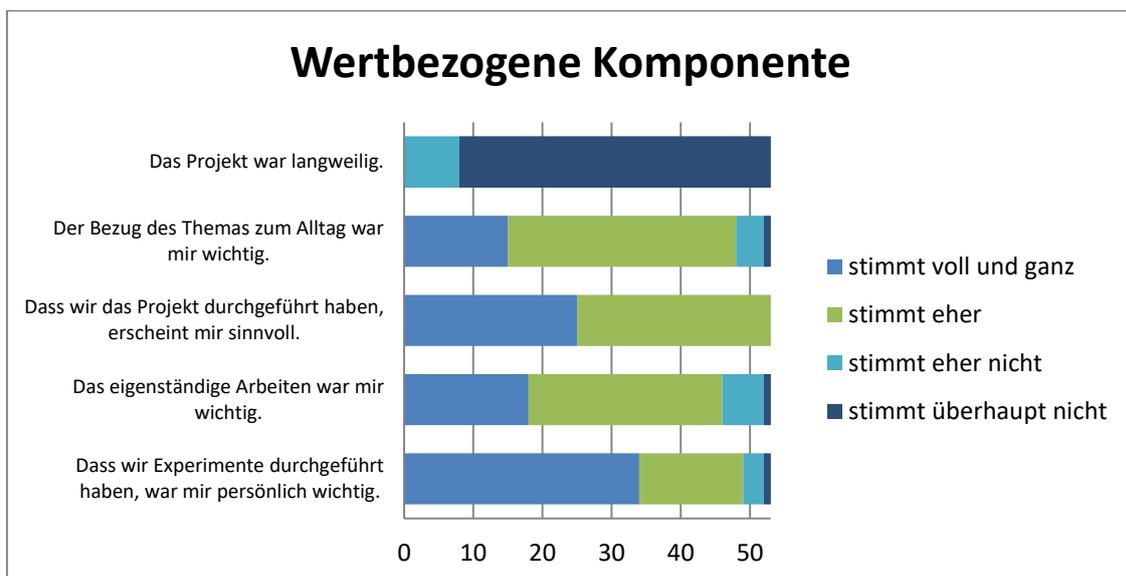
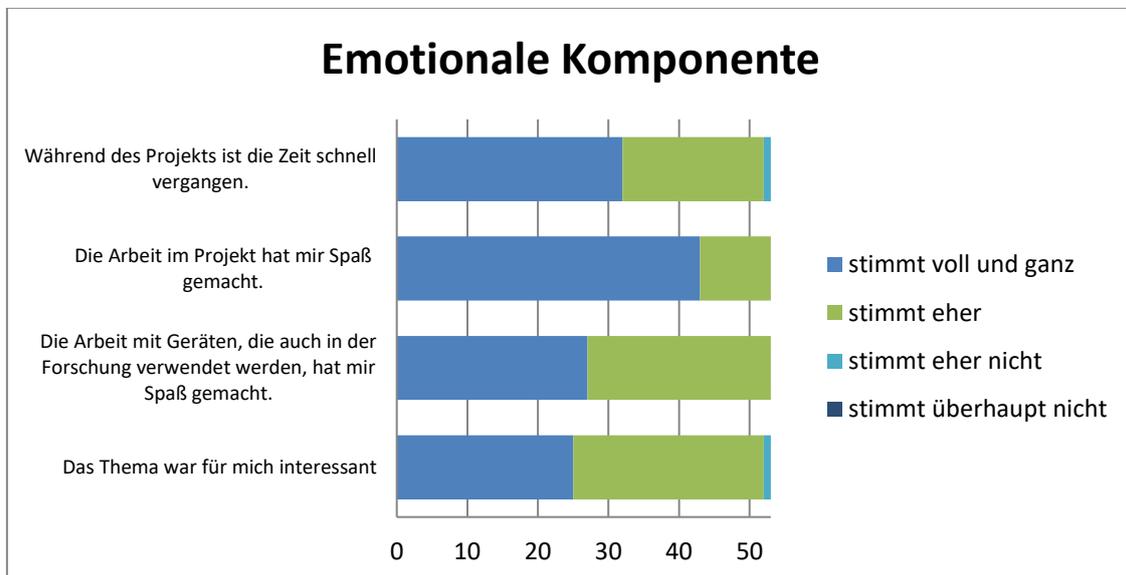
Tabelle 24: Übersicht über die Stichprobe

Datum des Besuchs	Schule	Klassenstufe	Anzahl gesamt	Anzahl weiblich	Anzahl männlich
01.12.2016	Berufskolleg Wirtschaft und Verwaltung des Kreises Siegen-Wittgenstein	13	15	10	5
15.12.2016	Kopernikus-Gymnasium Wissen	13	15	8	7
20.02.2017	Kopernikus-Gymnasium Wissen	10	23	17	6
Gesamt			53	35	18

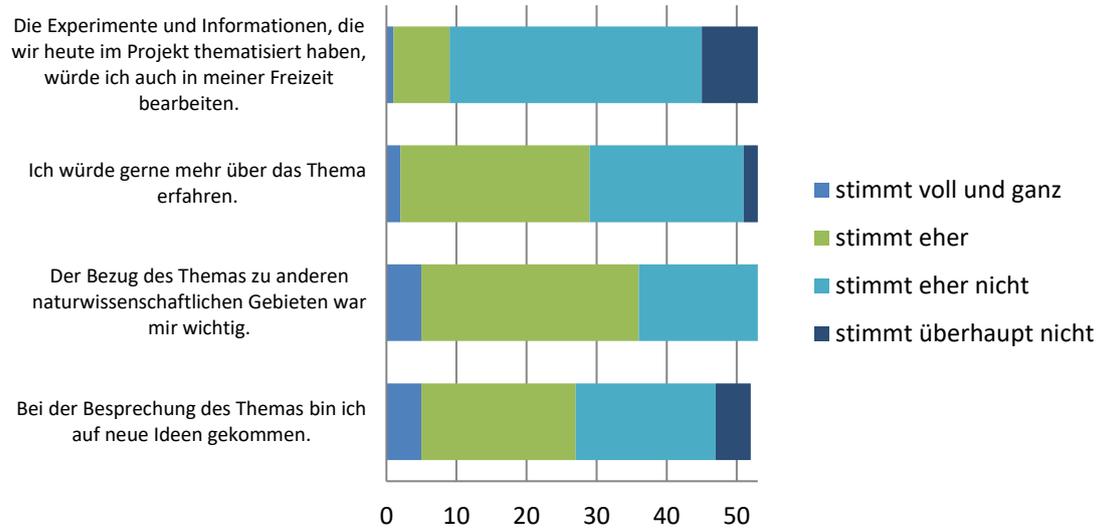
Tabelle 25: Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Items

Items zur emotionale Komponente	Mittelwert	SD
Das Thema war für mich interessant	3,45	0,53
Die Arbeit mit Geräten, die auch in der Forschung verwendet werden, hat mir Spaß gemacht.	3,51	0,50
Die Arbeit im Projekt hat mir Spaß gemacht.	3,81	0,39
Während des Projekts ist die Zeit schnell vergangen.	3,58	0,53
Durchschnittlich	3,58	0,49
Items zur wertbezogene Komponente		
Dass wir Experimente durchgeführt haben, war mir persönlich wichtig.	3,55	0,69
Das Projekt war langweilig.	1,15	0,36
Das eigenständige Arbeiten war mir wichtig.	3,19	0,70
Dass wir das Projekt durchgeführt haben, erscheint mir sinnvoll.	3,47	0,50
Der Bezug des Themas zum Alltag war mir wichtig.	3,17	0,64
Durchschnittlich	3,45	0,58
Items zur epistemische Komponente		
Bei der Besprechung des Themas bin ich auf neue Ideen gekommen.	2,52	0,86
Der Bezug des Themas zu anderen naturwissenschaftlichen Gebieten war mir wichtig.	2,77	0,61
Ich würde gerne mehr über das Thema erfahren.	2,55	0,63

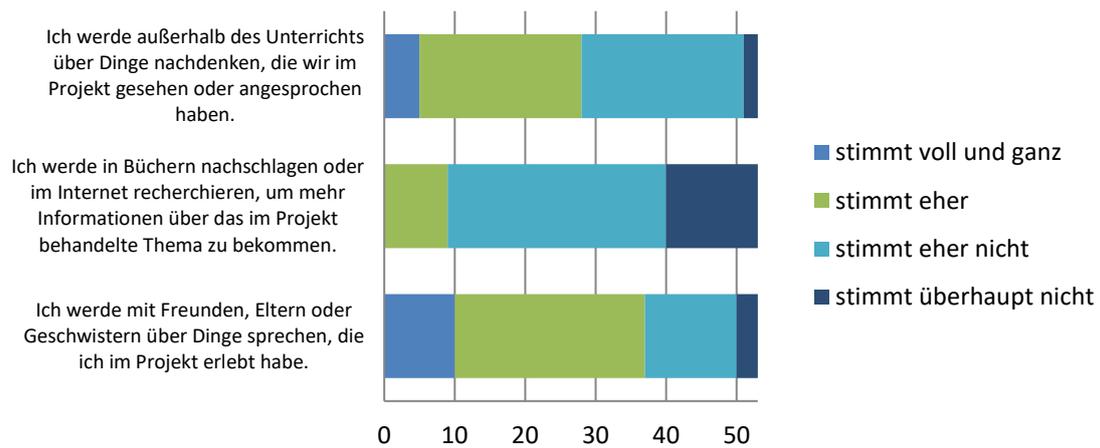
Die Experimente und Informationen, die wir heute im Projekt thematisiert haben, würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	2,04	0,61
Durchschnittlich	2,45	0,68
Items zu intendierten Handlungen aus Interesse		
Ich werde mit Freunden, Eltern oder Geschwistern über Dinge sprechen, die ich im Projekt erlebt habe.	2,83	0,79
Ich werde in Büchern nachschlagen oder im Internet recherchieren, um mehr Informationen über das im Projekt behandelte Thema zu bekommen.	1,92	0,64
Ich werde außerhalb des Unterrichts über Dinge nachdenken, die wir im Projekt gesehen oder angesprochen haben.	2,58	0,71
Durchschnittlich	2,45	0,72



Epistemische Komponente



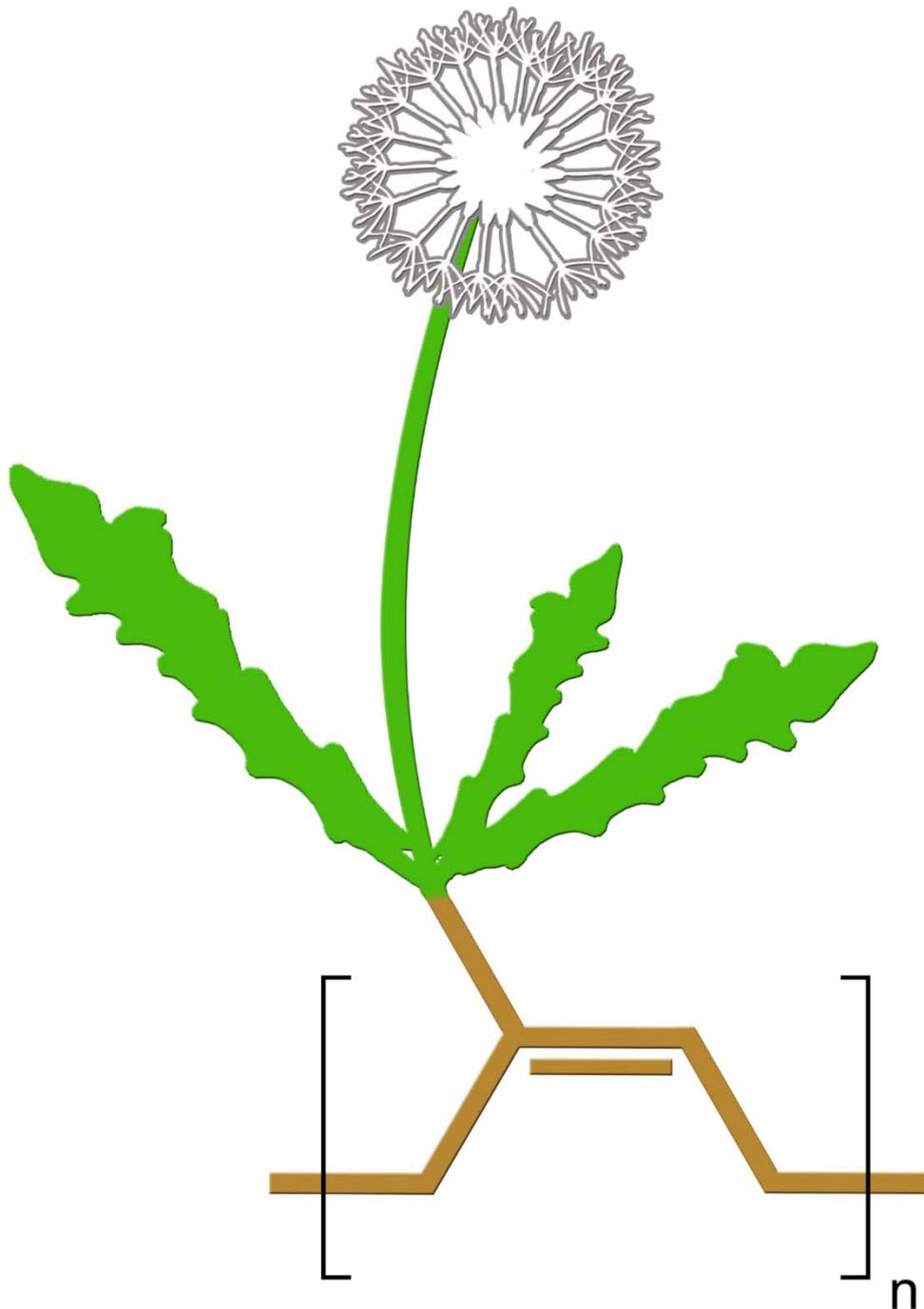
Intendierte Handlungen aus Interesse



V. Versuchsanleitungen und Arbeitsmaterialien für den Einsatz in Schulen

A. Praktikumsskript für den Einsatz im Schülerlabor

Kautschuk aus Löwenzahn



Kautschuk aus dem Kautschukbaum

M1



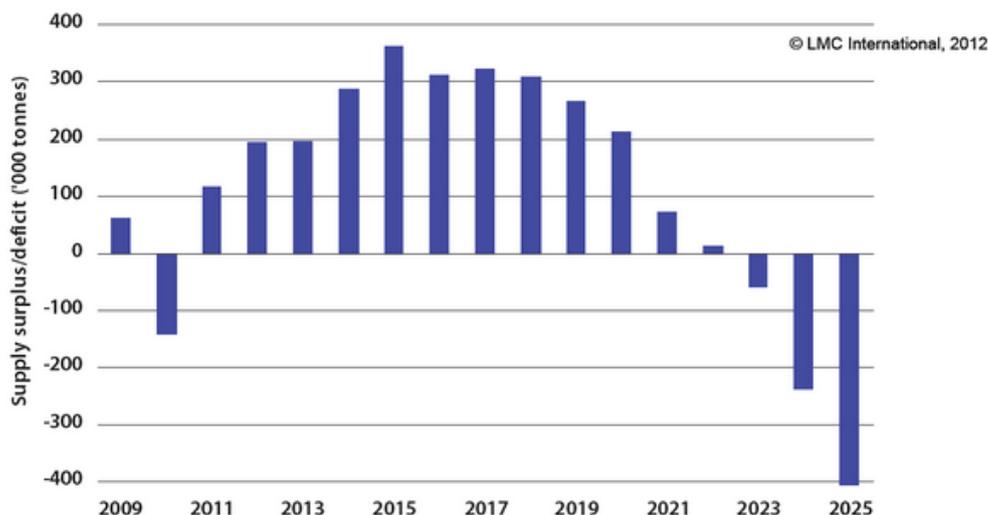
Naturkautschuk wird hauptsächlich aus dem tropischen Kautschukbaum *Hevea brasiliensis* gewonnen. Im ersten Schritt wird der Baum vorsichtig angeritzt, sodass die Latexmilch austritt (Bild 1). Diese wird gesammelt und in größeren Becken mit Säure versetzt, sodass der Kautschuk, der sich in der Latexmilch befindet, zusammenklumpt (Bild 2). Diesen Vorgang nennt man Koagulation. Nach dem Abschöpfen wird der koagulierte Kautschuk zu Fellen gewalzt (Bild 3) oder zum Transport zu Ballen gepresst. Um ihn haltbarer zu machen, wird er getrocknet oder geräuchert (Bild 4).



Seit einigen Jahren breitet sich in Südamerika in den Gegenden des Wildvorkommens des Kautschukbaums ein gefährlicher Pilz aus, der dafür sorgt, dass die Blätter abfallen und die Pflanze stirbt. Sollte sich dieser Pilz nach Südostasien in die Gebiete der Kautschukplantagen ausbreiten, wäre die gesamte Produktion gefährdet.

Ein weiteres Problem ist die Entwicklung von Allergien. Studien belegen, dass mittlerweile bereits bis zu 17 % des klinischen Personals unter Latexallergien leidet. Diese werden durch die im Latex vorhandenen Proteine bei direktem (Schleim-)Hautkontakt mit latexhaltigem Material ausgelöst und können sich in Form von Ausschlägen, aber auch einem anaphylaktischen Schock äußern.

Heute wird schon mehr als die Hälfte des weltweit benötigten Kautschuks synthetisch hergestellt, aber Statistiken sagen voraus, dass schon in wenigen Jahren die Menge an Naturkautschuk aus dem Kautschukbaum nicht mehr ausreichen wird, um den weltweiten Bedarf zu decken. Die folgende Abbildung zeigt den berechneten Überschuss sowie das berechnete Defizit an Naturkautschuk in den Jahren 2009 bis 2025.

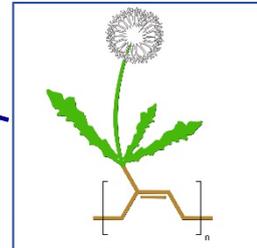


Aufgabe:

Tauschen Sie sich mit Ihrem Sitznachbarn über die beiden Texte „Kautschuk aus dem Kautschukbaum“ (M1) und „Synthesekautschuk“ (M2) aus. Tragen Sie Argumente zusammen, warum es sinnvoll ist, dass sich Wissenschaftler auf die Suche nach weiteren, alternativen Kautschukquellen begeben.

Synthesekautschuk

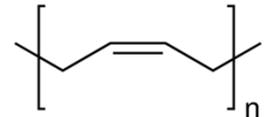
M2



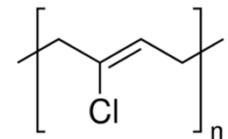
Der erste qualitativ recht hochwertige synthetische Kautschuk „Buna“ wurde 1927 zum Patent angemeldet. Buna (Butadien-Natrium mit Natrium als Katalysator während der Synthese) wurde während des Zweiten Weltkriegs großtechnisch hergestellt. In Auschwitz wurde sogar mit dem Bau einer großen Buna-Fabrik begonnen, die allerdings unter deutscher Herrschaft nie ihren Betrieb aufnahm. Heutzutage werden bereits etwa 60 % des weltweit benötigten Kautschuks synthetisch hergestellt. Rohstoff für die Synthese ist Erdöl. Synthesekautschuk lässt sich sehr genau auf die Bedürfnisse des Produktes abstimmen. So können z.B. durch Einbauen von Sauerstoff- und/oder Stickstoffatomen in die Hauptkette die Eigenschaften des Produktes beeinflusst werden. So lassen sich Produkte designen, die ein großes Anwendungsspektrum bedienen können.

Beispiele für Synthesekautschuke

Polybutadien (Formel rechts) besitzt eine besonders gute Elastizität und Flexibilität auch in niedrigen Temperaturbereichen bis ca. - 80 °C. Es wird auch heute vor allem in Autoreifen eingesetzt.

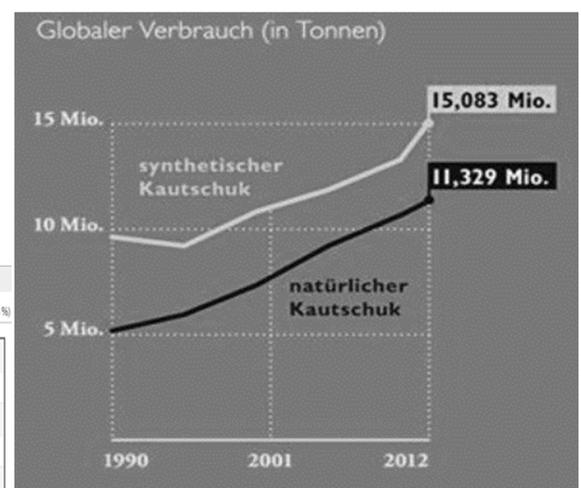
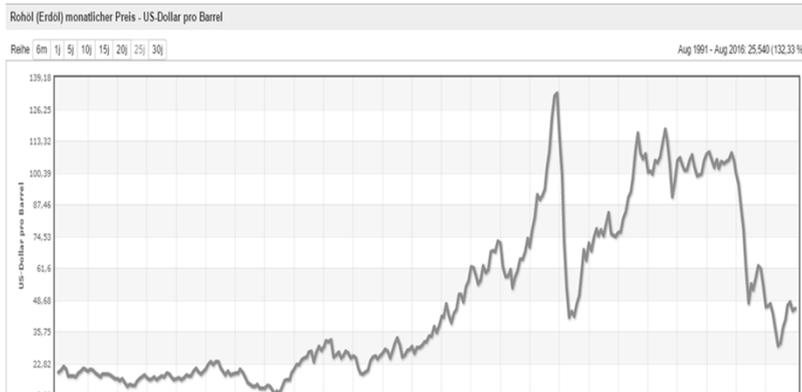


Polychloroprenkautschuk (Formel rechts), ein Chlor enthaltender Synthesekautschuk zeichnet sich z.B. durch gute chemische Beständigkeit sowie Robustheit gegenüber Witterungseinflüssen, Alterung und Ozon aus. Der Kautschuk ist Basis vieler Klebstoffe, kommt aber auch in Taucheranzügen, Riemen und Luftfedern zum Einsatz.



In einigen Eigenschaften wie z.B. der Beständigkeit gegenüber Temperaturschwankungen oder in der Flexibilität ist Naturkautschuk seiner synthetischen Variante allerdings immer noch deutlich überlegen. Vergleicht man den Energieaufwand der Herstellung von Synthesekautschuk mit dem der Gewinnung von Naturkautschuk stellt man fest: Die Herstellung von aus Erdöl gewonnenen Produkten ist energieaufwendig und meist mit vielen Prozessschritten sowie schweren Eingriffen in die Umwelt verbunden. So beträgt der Energieaufwand für die Herstellung von 1 kg Synthesekautschuk 130 MJ (130.000 kJ) gegenüber 13-16 MJ bei Naturkautschuk.

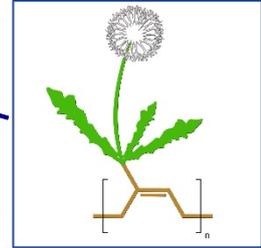
Die folgenden Abbildungen zeigen den weltweiten Verbrauch an Synthese- und Naturkautschuk in den vergangenen zwei Jahrzehnten, sowie die Entwicklung des Rohölpreises (in US-\$ pro Barrel), von dem die Synthesekautschukindustrie abhängt. Die Nachfrage nach Kautschuk, sowohl synthetisch als auch natürlich, wird weiterhin steigen.



Aufgabe: Tauschen Sie sich mit Ihrem Sitznachbarn über die beiden Texte „Kautschuk aus dem Kautschukbaum“ (M1) und „Synthesekautschuk“ (M2) aus. Tragen Sie Argumente zusammen, warum es sinnvoll ist, dass sich Wissenschaftler auf die Suche nach weiteren, alternativen Kautschukquellen begeben.

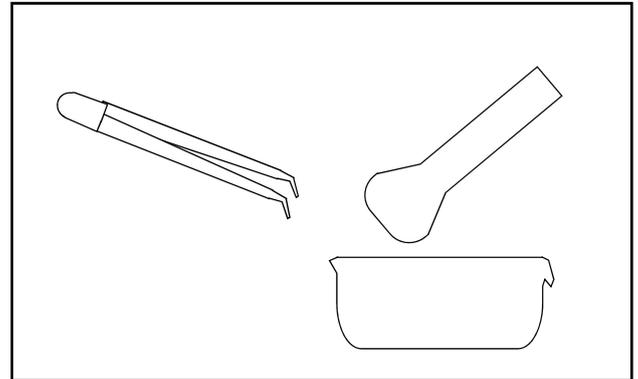
Kautschuk durch Mörsern

V1



Geräte und Chemikalien:

- Mörser mit Pistill, Pinzette
- 2-3 sehr dünne getrocknete Wurzeln, Wasser



Information:

Auch wenn die Kautschukfäden beim Durchbrechen der Wurzel weiß erscheinen, erkennt man den Kautschuk in diesem Experiment an seiner braunen bis dunkelgrauen Farbe. Zunächst sieht es so aus, als würden die Wurzeln komplett zu Staub zerfallen, doch dann beginnen sie zusammenzuhaften.

Durchführung:

5-10 Min.

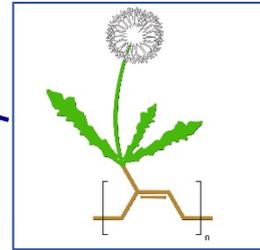
- 1) 2-3 dünne Wurzelstücke werden im Mörser einige Minuten gemörsert bis sie pulverig werden.
- 2) Kleine, etwa 2 mm große zusammenhängende Klümpchen werden mit einer Pinzette herausgenommen.
- 3) Der restliche „Holzstaub“ wird mit Wasser ausgespült. Anschließend werden die kleinen schwarzen Partikel wieder in den Mörser gegeben und bearbeitet, bis sie aneinander kleben.
- 4) Das Produkt kann durch leichtes Auseinanderziehen auf Elastizität geprüft und nach dem Trocknen als Radiergummi getestet werden.

Kautschuk aus Löwenzahn

3

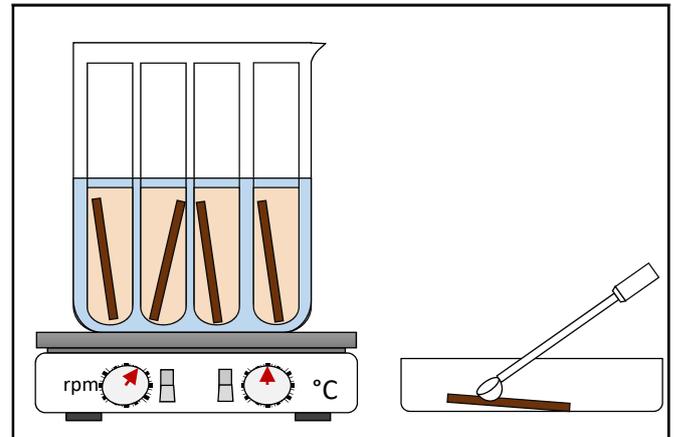
Kautschuk durch Kochen

V2



Geräte und Chemikalien:

- Wasserbad, Reagenzgläser, Petrischale, Löffel, Pinzette, evtl. Handschuhe, kleines Becherglas
- getrocknetes Wurzelmaterial (1 Stück à 3-5 cm pro Reagenzglas), Natronlauge (3 %ig), heißes Wasser



Durchführung:

Ca. 80 Min. (20 Min. + 60 Min Wartezeit)

- 1) In ein Reagenzglas werden 2 etwa 3-5 cm lange Wurzelstücke eingefüllt.
- 2) Die Wurzeln werden mit etwa 3 %iger Natronlauge **eine Stunde** lang im Wasserbad gekocht. Die Natronlauge muss die Wurzelstücke bedecken.
- 3) Die Wurzel wird mit der Pinzette entnommen und in einer Petrischale mit einem Löffel vorsichtig gerieben (auseinander gezogen). Dabei ist darauf zu achten, dass man das elastische Netz nicht zerstört (zerreißt) und dass man die letzten hölzernen Teile sowie den Zentralzylinder (hellbrauner, fester Kanal im Zentrum des Netzes) entfernt.
- 4) Anschließend wird das Wurzelstück mithilfe der Pinzette vorsichtig in heißem Wasser ausgewaschen und danach erneut in der Petrischale ausgebreitet.
- 5) Erst nach gründlichem Auswaschen kann das Produkt auch mit bloßen Händen angefasst und auf elastische Eigenschaften geprüft werden. Das Netz kann zum Trocknen in der Petrischale belassen werden.

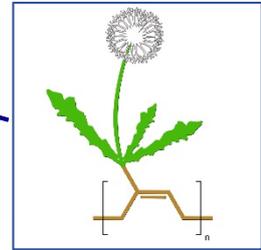
Entsorgung: Die Natronlauge kann mit Wasser verdünnt in den Abguss gegeben werden.

Kautschuk aus Löwenzahn

4

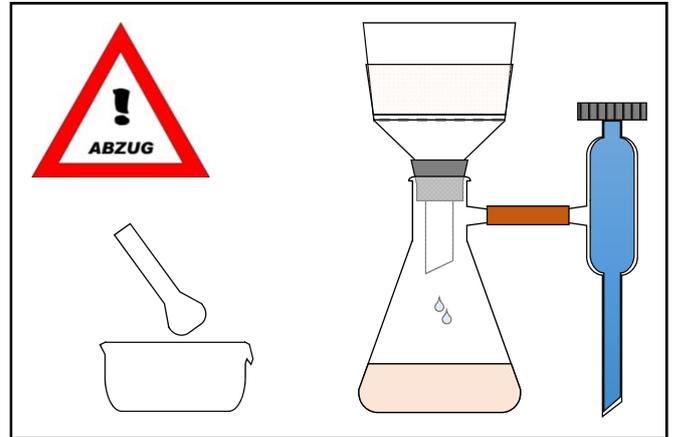
Kautschuk durch Lösen in Benzin

V3



Geräte und Chemikalien:

- Mörser mit Pistill oder Gefrierbeutel und Hammer oder Getreidemühle, Vorrichtung zur Vakuumfiltration, Sieb, Abdampfschale, Becherglas, Glasstab
- 1 kleine Handvoll getrocknete Wurzeln, etwas Sand, Petroleumbenzin (Siedebereich 40–60 °C)



Durchführung:

20 Min. + 30 Min.
Wartezeit

- 1) Die getrockneten Wurzeln werden in der Mühle oder mit anderen Hilfsmitteln wie Schere, Hammer, Mörser oder Getreidemühle zerkleinert (nicht ganz so fein wie in V1 notwendig).
- 2) In einem Becherglas werden die Wurzelstücke viel Benzin versetzt, dass das Pflanzenmaterial bedeckt ist. Zusätzlich wird ein Löffel Sand hinzugefügt und das Gemisch mit dem Glasstab gut verrührt.
- 3) Die Mischung wird kurz stehen gelassen und anschließend durch ein feinmaschiges Sieb gegossen oder mithilfe der Wasserstrahlpumpe über einen Büchnertrichter filtriert (rechtes Bild). Dazu wird die Saugflasche über einen Gummischlauch mit einer Vakuumpumpe verbunden. Über den Porzellantrichter kann der Feststoff deutlich schneller abgetrennt werden als bei einer herkömmlichen Filtration mit einem Glasfilter.
- 4) Der Rückstand im Filter wird mit etwas Benzin ausgewaschen.
- 5) Das Filtrat (die Flüssigkeit) wird in eine Abdampfschale überführt und zum Abdampfen des Lösungsmittels im Abzug **30-40 Minuten** lang stehen gelassen.
- 6) Mit einer Pinzette kann nun vorsichtig eine Schicht aus Kautschuk angehoben werden.

Entsorgung: Die mit Petroleumbenzin getränkten Pflanzenreste werden auf einer großen Petrischale (zum Abdampfen) gesammelt.

Kautschuk aus Löwenzahn

5

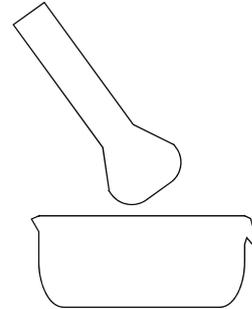
Herstellen von Gummi

V4



Geräte und Chemikalien:

- Mörser mit Pistill, Abdampfschale, Wägebepapier, Spatel
- 10 mL Latex-Milch, 1,5 g Schwefel, 0,25 g Vulkanisationsbeschleuniger ZBEC, 0,15 g Zinkoxid, 2-3 Tropfen Tensid (Spülmittel), 1 Spatelspitze Ruß, evtl. einige Tropfen destilliertes Wasser



Erklärung:

Bei der Vulkanisation (dem Herstellen von Gummi aus dem Rohstoff Kautschuk) werden die langen Polymerketten durch den Schwefel untereinander vernetzt. Es bilden sich Schwefelbrücken aus.

Dabei entsteht ein formstabileres, haltbares Produkt mit gummielastischen Eigenschaften.

15 Min. + 30
Min Wartezeit

Durchführung:

- 1) In einem Mörser werden 1,5 g Schwefel, 0,25g ZBEC (Vulkanisationsbeschleuniger), 0,15 g Zinkoxid, Tensid und Ruß gründlich zerrieben und zu einer homogenen Masse verarbeitet. (Der Ruß steht schon bereit.)
- 2) Unter Rühren werden 10 mL Latexmilch zugegeben und im Mörser wiederum zu einer homogenen Masse bearbeitet.
- 3) Die Mischung wird in eine Abdampfschale überführt und in einen Abzug gestellt, bis der Wasseranteil verdunstet ist.
- 4) Die getrocknete Mischung wird im Trockenschrank bei etwa 130 °C 30 Minuten lang vulkanisiert.

Kautschuk aus *Hevea brasiliensis*

6

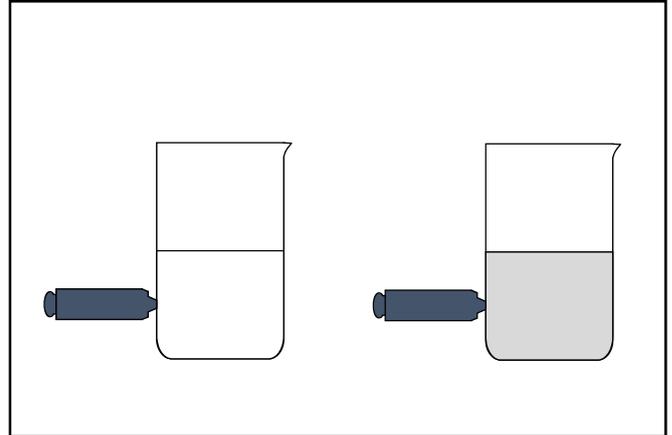
Eigenschaften von Latexmilch

V5



Geräte und Chemikalien:

- 2 gleiche Bechergläser, Pipette, Laserpointer, Messzylinder
- Latex-Milch, Wasser, gesättigte Kochsalz-Lösung



Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Laserpointern:

Niemals direkt in den Strahl schauen oder den Strahl auf Menschen oder Tiere richten!
Falls Laserstrahlung ins Auge trifft: Augen sofort bewusst schließen und den Kopf sofort aus dem Strahl wenden!

5-10 Min.

Durchführung:

- 1) In ein Becherglas werden etwa 100 mL Wasser und 1-2 Tropfen Latexmilch gegeben. (Die Lösung darf nur ganz leicht trüb werden!)
Im zweiten Becherglas werden etwa 10 mL der gesättigten Kochsalzlösung auf 100 mL verdünnt.
- 2) Ein Laserpointer wird nun seitlich an das Becherglas gehalten, sodass das Licht durch die Lösung strahlt.
- 3) Zum Vergleich wird die Lampe an das Becherglas mit verdünnter Kochsalzlösung gehalten.

Entsorgung: Die verdünnten Lösungen können mit Wasser im Abguss entsorgt werden.

Erklärung:

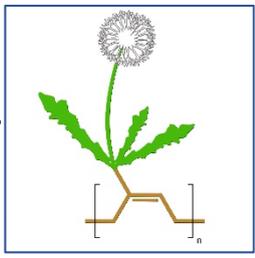
Da es sich bei Latex-Milch um eine kolloide Lösung handelt, bewirkt die Bestrahlung mit Licht – anders als bei anderen Lösungen, eine starke Lichtstreuung. Diesen Effekt nennt man „Tyndall-Effekt“. Kolloide sind Stoffe, die sich in einem besonders fein verteilten Zustand befinden. Ein weiteres Beispiel für einen kolloidalen Stoff ist Milch. Weiterführende Erklärungen und ein Beispielbild für einen Tyndall-Effekt in der Natur finden Sie auf S. 8.

Kautschuk aus *Hevea brasiliensis*

7

Hintergrundinformation: Eigenschaften von Latexmilch

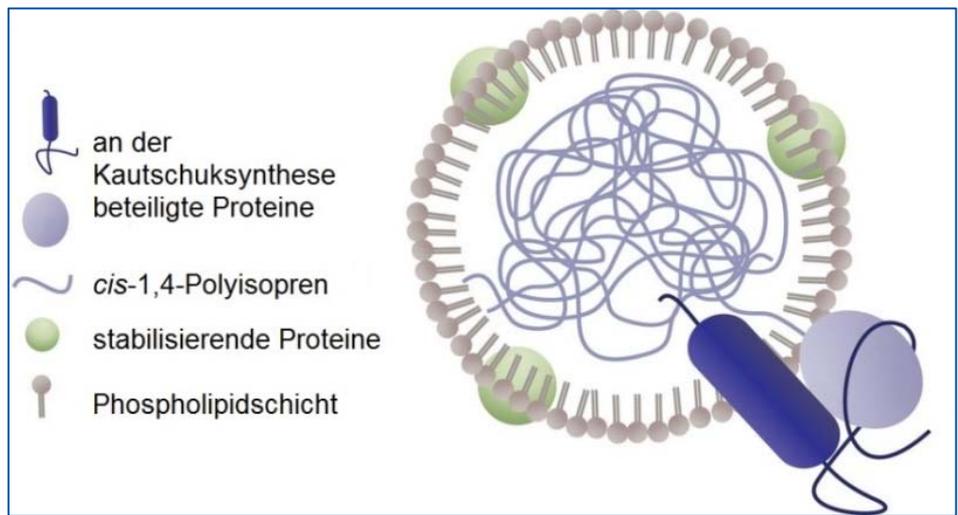
M3



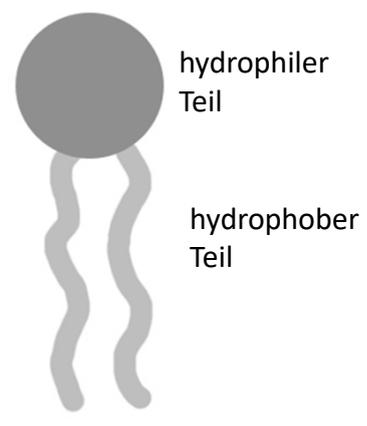
Latexmilch ist eine kolloide, wässrige Lösung, die meist weiß ist oder eine leicht gräuliche Färbung aufweisen kann. Bei einem Kolloid handelt es sich um kleine Festkörper, die innerhalb eines Mediums (z.B. einer Flüssigkeit oder eines Gases) fein verteilt vorliegen.

Die Bestandteile, die die Latexmilch zur kolloiden Lösung machen, sind 0,0005-0,001 mm große Kautschukpartikel. Diese bestehen etwa zu 90 % aus dem Makromolekül *cis*-1,4-Polyisopren, welches den eigentlichen Kautschuk darstellt. Sie werden von einer schützenden einschichtigen Membran umgeben (die Phospholipidschicht), die als Grenzfläche zwischen dem hydrophoben (wasserabweisenden) Kautschukkern und dem wässrigen Medium dient.

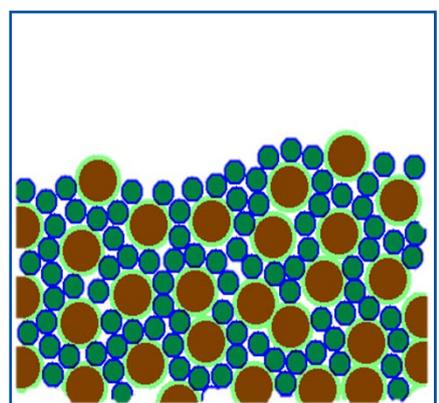
Bei Zugabe von Säure zur Latexmilch wird die schützende Phospholipidschicht, die die einzelnen Kautschukpartikel umschließt, zerstört und die Kautschukpartikel haften zu größeren Aggregaten zusammen. Bei diesem Vorgang spricht man von Koagulation.



Schematischer Aufbau eines Kautschukpartikels



Schematischer Aufbau eines Phospholipides



Modell einer kolloiden Lösung
 Rot: Kautschukpartikel
 Hellgrün: Phospholipidschicht
 Blau/grün: wässrige Lösung



Tyndall-Effekt in der Natur
 (Beispiel: Sonnenstrahlen im Nebel)

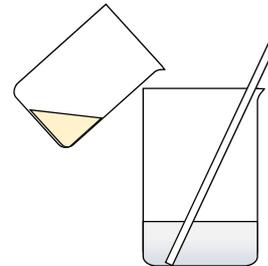
Koagulation von Kautschuk

V6



Geräte und Chemikalien:

- Becherglas, Messzylinder, Glasstab, evtl. Pinzette, Filterpapier oder Papiertücher
- Latex-Milch, Essigsäure (Essigessenz)



Durchführung:

5-10 Min.

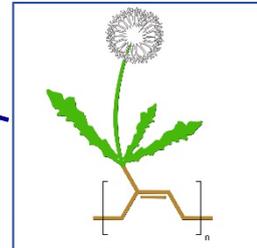
- 1) In ein kleines Becherglas werden etwa 10 mL Latexmilch gegeben.
- 2) Etwa 5-10 mL der verdünnten Essigsäure werden langsam und unter Rühren mit dem Glasstab hinzugegeben. Dadurch erhält man am ehesten ein kugelförmiges Produkt.
- 3) Ein Glasstab oder eine Pinzette wird in das Gemisch getaucht, um den Kautschukball aus der Lösung zu holen.
- 4) Der Kautschukball wird unter fließendem Wasser ausgewaschen und auf einem Filterpapier oder anderem Papiertuch gut getrocknet (Vorsicht: Spritzgefahr beim Herausdrücken der restlichen Flüssigkeit aus dem Ball!).
- 5) Nun können Sie die elastischen Eigenschaften des Produkts mit z.B. einem Flummi vergleichen.

Entsorgung: Der Feststoff kann über den Hausmüll entsorgt werden. Entsorgung der restlichen Flüssigkeit mit Wasser über den Abguss.

Kautschuk aus *Hevea brasiliensis*

Kautschuk aus *Hevea brasiliensis* oder aus *Taraxacum kok-saghyz*?

M4



<i>Hevea brasiliensis</i> (Tropischer Kautschukbaum)	<i>Taraxacum kok-saghyz</i> (Russischer Löwenzahn)
Anbau nur im Gebiet des sogenannten „Kautschukgürtels“ in Äquatornähe möglich	Anbau in fast allen Ländern des gemäßigten Klimas möglich
Langer Transportweg zur Weiterverarbeitung	Kurzer Transportweg zur Weiterverarbeitung
Abholzung von Regenwald durch Kultivierung auf Plantagen (Monokultur)	Kultivierung auf marginalen (am Rand liegenden, für die Lebens- oder Futtermittelproduktion ungeeigneten) Böden möglich
Schwierige Arbeitsbedingungen und geringe Bezahlung auf den Kautschukplantagen	Bisher nur Kultivierungsversuche
Jahrhundertealte und ausgefeilte Technik zur Gewinnung des Milchsafte (leichte Ernte)	Kleine, verzweigte Wurzeln (schwierige Ernte und Verarbeitung)
7 Jahre bis zur ersten Ernte, dann 20 Jahre lang	Wenige Monate bis zur Ernte, dadurch flexible Reaktion auf Nachfrage und Marktschwankungen möglich
25-35 % Kautschuk in der Latexmilch	4-5 % Kautschuk in den Wurzeln der Wildpflanze, durch Züchtung bis zu 30 % möglich
Hohe Qualität des gewonnenen Kautschuks	Hohe Qualität des gewonnenen Kautschuks
Nebenprodukt: Holz	Nebenprodukte: Inulin, Fructose, Ethanol
Schlauchpilz <i>Microcyclus ulei</i> verursacht Ernteeinbußen	Enzym verursacht schnelle Bräunung des austretenden Milchsafte
Kann Allergien auslösen	Bisher keine Allergie bekannt
Zusatz von Chemikalien wie Ammoniak oder Essig- bzw. Ameisensäure notwendig	Gewinnung nur unter Zugabe von Wasser möglich

Aufgabe:

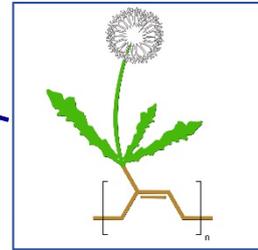
Sammeln Sie besonders stichhaltige Argumente für und gegen die Produktion von Kautschuk aus dem Kautschukbaum bzw. dem russischen Löwenzahn, vor allem unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch und sozial).

Kautschuk aus Löwenzahn

10

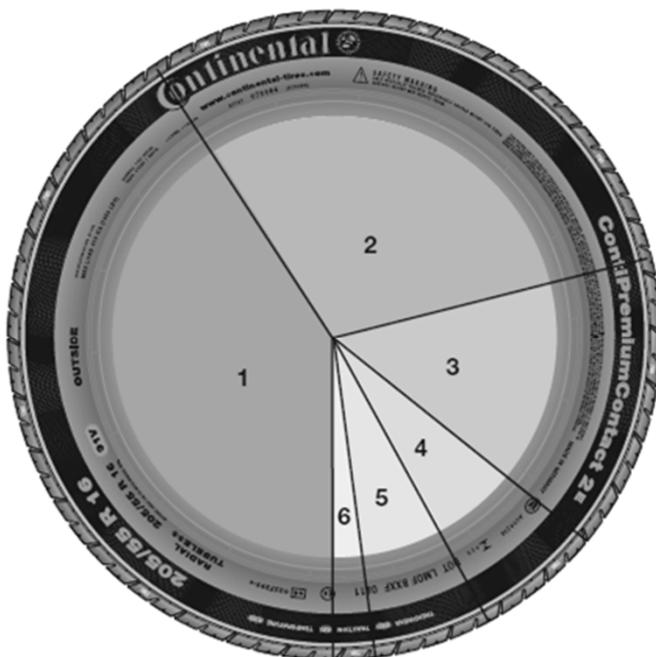
B. Weitere Schülerarbeitsmaterialien

Wieviel Löwenzahn benötigt man für einen Reifen?



Informationen

- Gewicht eines handelsüblichen Reifens: etwa 8 kg
- Annahme des Verhältnisses von Naturkautschuk : Synthetikautschuk 50 : 50
- Gewicht einer getrockneten Löwenzahnwurzel: etwa 5 g
- (angenommene) Menge an Kautschuk in der Wurzel einer gezüchteten Pflanze: etwa 10 %

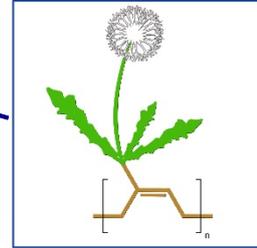


- | | |
|---|--|
| 1 | Kautschuk
(Natur- und Synthetikautschuk) . . .41% |
| 2 | Füllstoffe
(Ruß, Silica, Kohlenstoff, Kreide ...) 30% |
| 3 | Festigkeitsträger
(Stahl, Polyester, Rayon, Nylon) . . .15% |
| 4 | Weichmacher (Öle und Harze) ¹6% |
| 5 | Chemikalien für die Vulkanisation
(Schwefel, Zinkoxid,
diverse andere Chemikalien)6% |
| 6 | Alterungsschutzmittel
und sonstige Chemikalien2% |

Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Menge an Löwenzahnpflanzen, die für einen Reifen benötigt wird, dessen Naturkautschukanteil vollständig aus Löwenzahnkautschuk besteht.
2. Welche Fläche nimmt die Kultivierung der Pflanzen ein? (auf einem Quadratmeter können etwa 100 Löwenzahnpflanzen angebaut werden)
3. Rentiert sich der Anbau von Löwenzahnpflanzen für die Herstellung von Autoreifen? Begründen Sie.

Forschungsgeschichte



Wissenschaftliche Arbeit zur NS-Zeit und heute

Im nationalsozialistischen Deutschland wurde die Organisation wissenschaftlicher Forschung an Hochschulen und Forschungseinrichtungen neu strukturiert. Um diese Umstrukturierung vorzunehmen, wurden demokratische Strukturen in Forschungseinrichtungen aufgelöst, indem Senate oder Fakultäten ihrer Befugnisse enthoben wurden. Gemäß dem „Führerprinzip“ wurde der Rektor einer Hochschule bzw. der Präsident einer Forschungsgesellschaft zum „Führer“ ernannt und erhielt weitreichende Entscheidungsgewalten. Verschiedene Forschungsgebiete wurden als ‚kriegswichtig‘ klassifiziert, weil sie z.B. die deutsche Kriegswirtschaft oder das Militär voranbrachten. So erlangten sie einen besonderen Status und wurden auch besonders gefördert. Die Politik gab den Zugang zu Forschungsgeldern vor und lenkte den Blick auf bestimmte Fragen. Die Wissenschaftler hatten ihre Fragestellungen dementsprechend anzupassen oder sie verloren wichtige finanzielle Unterstützung (vgl. Heim 2002; Schlichter 1999).

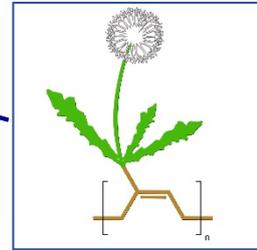
Heutzutage gibt es die Freiheit von Forschung und Lehre, ein Recht, das im Grundgesetz verankert ist. Solange die wissenschaftliche Tätigkeit als ein „ernsthafter planmäßiger Versuch zur Ermittlung der Wahrheit“ anzusehen ist, ist diese Freiheit des Wissenschaftlers geschützt.

Dennoch kann man sagen, dass Forschung heute nicht völlig frei abläuft, sondern gewisse Grenzen hat. Mögliche Grenzen können der Forschung durch ethische Gründe gesetzt sein (z. B. Gentechnik oder Embryonenforschung) aber auch durch fehlende Fördermittel. In Deutschland gibt es diverse Gremien/Institutionen/Organisationen, die Gelder von Bund und Ländern erhalten und diese anschließend zur Förderung verschiedener Forschungsprojekte an die Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und Forscher weitergeben. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) oder das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sind Beispiele. Auf ihren Internetseiten findet man eine Vielzahl an Informationen zu ihrer Arbeit und zu geförderten Projekten (www.dfg.de, www.bmbf.de). Eine weitere Möglichkeit zur Lenkung von Forschung kann der Industrie zugesprochen werden. Sie fördert häufig die Auseinandersetzung mit praktischen Fragestellungen vor einem wirtschaftlichen Hintergrund.

Aufgaben:

1. Wie funktionierte Forschung zur Zeit des Zweiten Weltkriegs? Fassen Sie wichtige Punkte in Hinblick auf ein Eingreifen der Politik in wissenschaftliche Abläufe zusammen.
2. Recherchieren Sie, wie Forschung heute funktioniert. Stellen Sie Informationen über die Lenkung von Wissenschaft heutzutage zusammen. Nehmen Sie dazu auch das Internet zu Hilfe.

Geschichte des Löwenzahnkautschuks



Suche nach alternativen Kautschukquellen und Auffinden des russischen Löwenzahns

Anfang der 1930er Jahre wurde in der damaligen Sowjetunion mit der Suche nach heimischen kautschuktragenden Pflanzen begonnen. 1931 wurde *Taraxacum kok-saghyz* auf einer Expedition in Kasachstan entdeckt. In den darauffolgenden Jahren wurde der Löwenzahn bereits in Russland kultiviert und Maschinen zur Extraktion des Kautschuks wurden gebaut.

Auch das Interesse der Deutschen an der neuen Kautschukpflanze wurde geweckt. Im Rahmen des Überfalls auf die Sowjetunion wurde Saatgut sowie Maschinen zur Kautschukgewinnung beschlagnahmt. In den ersten Kriegsjahren entstand ein ganzer Forschungsverbund mit Vertretern aus Wissenschaft, Technik und Politik in Deutschland. Der Löwenzahn wurde erforscht, in verschiedenen besetzten Gebieten angebaut und in geringen Mengen wurde Kautschuk aus den Löwenzahnwurzeln sogar zu Gummi weiterverarbeitet. Ziel war es, Deutschland autark zu machen, also alle benötigten Rohstoffe und Lebensmittel selbst herzustellen. Grund für das starke Interesse an heimischen Kautschukträgern war weiterhin, dass die meisten Transportwege für Kautschuk aus den Tropen blockiert waren und die Kautschukvorräte zur Neige gingen.

Um die Forschung voranzutreiben wurde bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs in Rajsko, einem Nebenlager des Konzentrationslagers Auschwitz, Züchtung und Forschung an *Taraxacum kok-saghyz* betrieben. Dort arbeiteten etwa 150 KZ-Häftlingsfrauen an der von der Politik als „kriegswichtig“ deklarierten Pflanze. Unter anderem wurde Russische Fachliteratur übersetzt, mikroskopische Untersuchungen wurden erledigt, Samen wurden gezählt und sortiert und Analysen zur Bestimmung des Kautschukgehaltes wurden durchgeführt.

Originalität von H. Himmler, Reichsführer SS und Sonderbeauftragter für Pflanzenkautschuk, über die Organisation der Löwenzahn-Kultivierung in den von Deutschland besetzten Gebieten:

„Der Führer hat entschieden, dass die bandenverseuchten Gebiete der Nordukraine und von Russland-Mitte von jeder Bevölkerung zu räumen sind.

[...]

Ein Teil der weiblichen Bevölkerung und alle elternlosen Kinder kommen in unsere Auffanglager.

Die bevölkerungsmässig evakuierten Gebiete sind [...] zum Teil mit Kok-Sagys zu bebauen und soweit es möglich ist, landwirtschaftlich auszunutzen. Die Kinderlager sind an den Rand dieser Gebiete zu legen, sodass die Kinder als Arbeitskräfte für den Kok-Sagys-Anbau und für die Landwirtschaft zur Verfügung stehen.“ (in: Zięba 1966, S. 101-102)

Letztendlich machte der Kriegsverlauf die Kultivierungspläne zunichte.

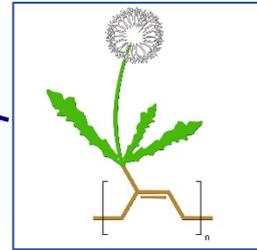


Abb. 1: Häftlingsfrauen bei der Arbeit auf den Feldern in Rajsko

Aufgaben:

1. Erläutern Sie, was die Wissenschaftler bei ihrer Forschung am russischen Löwenzahn angetrieben hat. Stellen Sie Hypothesen auf und recherchieren Sie mögliche Beweggründe für die Durchführung des Projekts.
2. Woher stammt das Wissen, das wir heute über den Löwenzahn als Kautschukträger haben? Wie gehen wir heute damit um?

Strukturaufklärung von Kautschuk

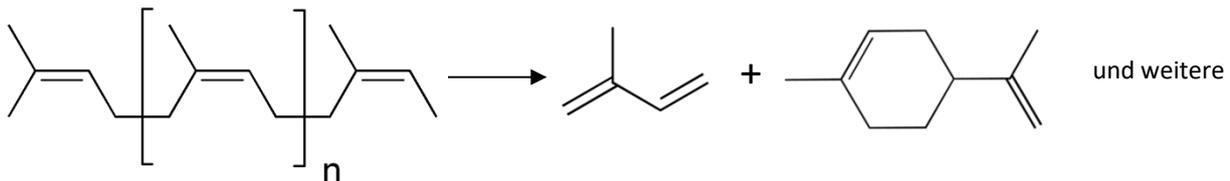


Über 100 Jahre lang forschten Wissenschaftler an der Erschließung der Strukturformel von Naturkautschuk.

Ein gängiges Verfahren dazu war die Pyrolyse (Trockendestillation). Dabei wird durch hohe Temperaturen eine Spaltung (Bindungsbruch) größerer organischer Moleküle herbeigeführt. Die entstehenden Produkte, sowohl Gase, Flüssigkeiten als auch Feststoffe, wurden dann mit den damals bekannten Methoden (meist Nachweise über Färbung) untersucht.



Bei der Pyrolyse von Naturkautschuk wird das *cis*-1,4-Polyisopren in sein Monomer (Isopren), in ein Dimer (Dipenten) und in weitere kürzere Produkte gespalten:

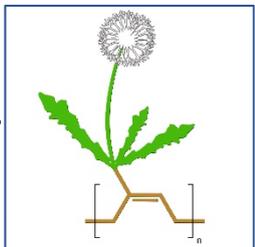


Heutzutage lässt sich beispielsweise mithilfe der Infrarotspektroskopie ein unbekannter Stoff bzw. seine Struktur identifizieren. Bei der Bestrahlung eines Stoffes mit IR-Strahlung werden bestimmte Frequenzbereiche absorbiert und die Bindungen im Molekül zur Schwingung angeregt. Die jeweils absorbierten Frequenzen sind charakteristisch für bestimmte Bindungen. Mithilfe von Tabellen kann die Probe identifiziert werden.

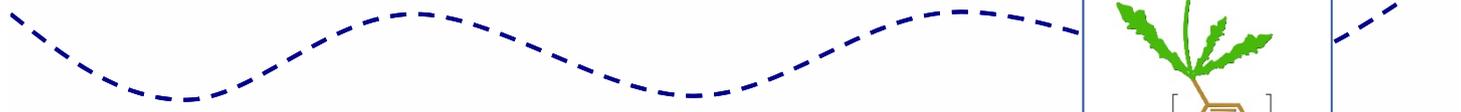
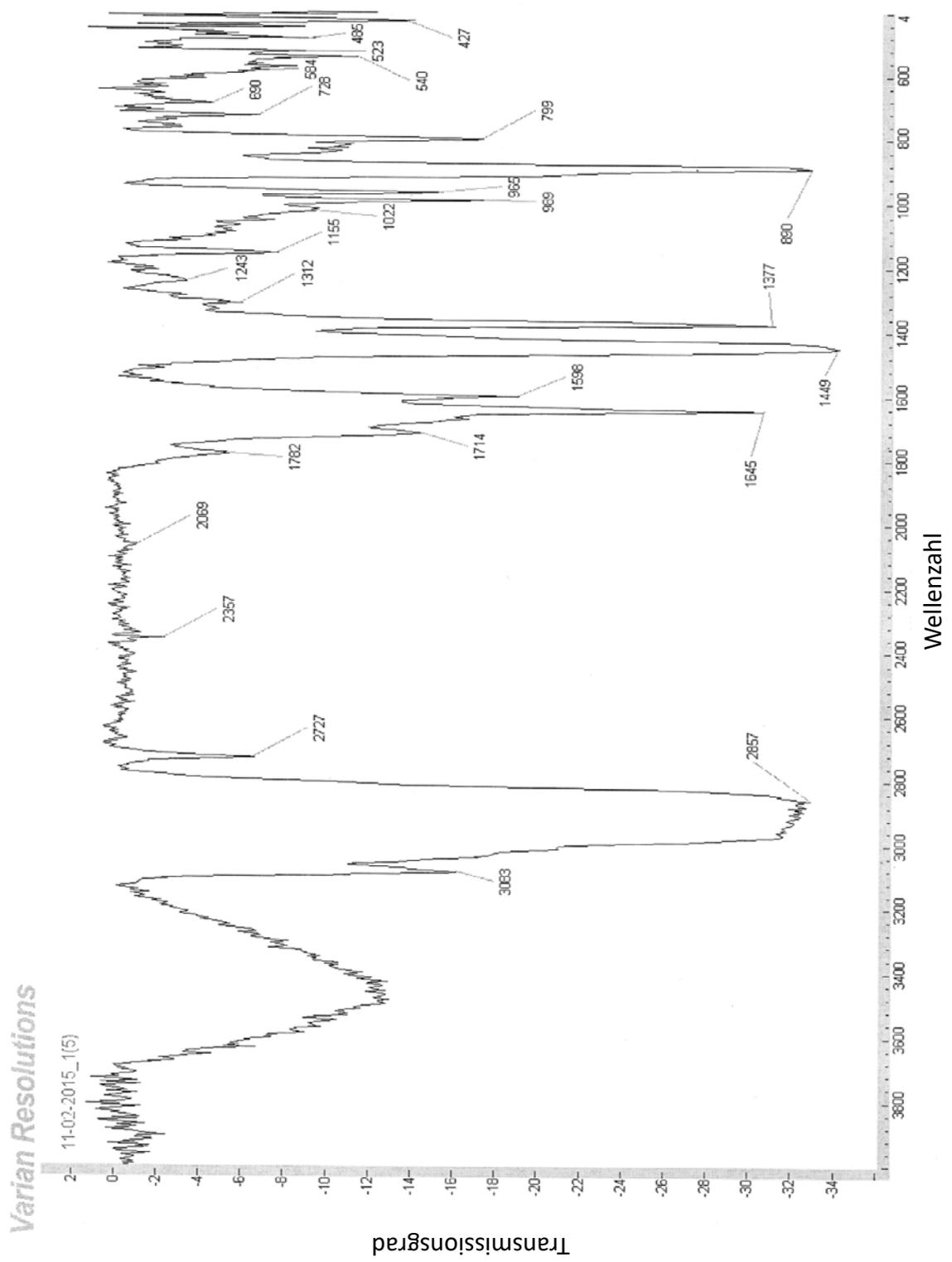
Wellenzahl (in cm^{-1})	Charakteristisch für:
885-890	Isopren (Fingerprint)
1430-1480	Methylgruppe ($-\text{CH}_3$)
1620-1680	C=C-Doppelbindung
3000-3100	C-H-Bindung

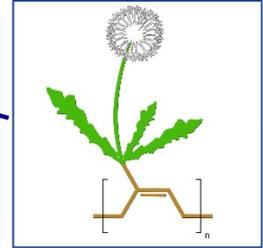
Aufgaben:

1. Informieren Sie sich im Internet oder in Fachbüchern genauer über die Infrarot-Spektroskopie und erläutern Sie Unterschiede zwischen Valenz- und Deformationsschwingungen.
2. Vergleichen Sie die IR-Spektren des pyrolysierten (gespaltenen) Naturkautschuks mit denen von Isopren und Dipenten, die man im Internet als Referenz nutzt. Gibt es Gemeinsamkeiten/Unterschiede? Markieren und beschriften Sie im Spektrum des pyrolysierten Naturkautschuks die charakteristischen Banden.

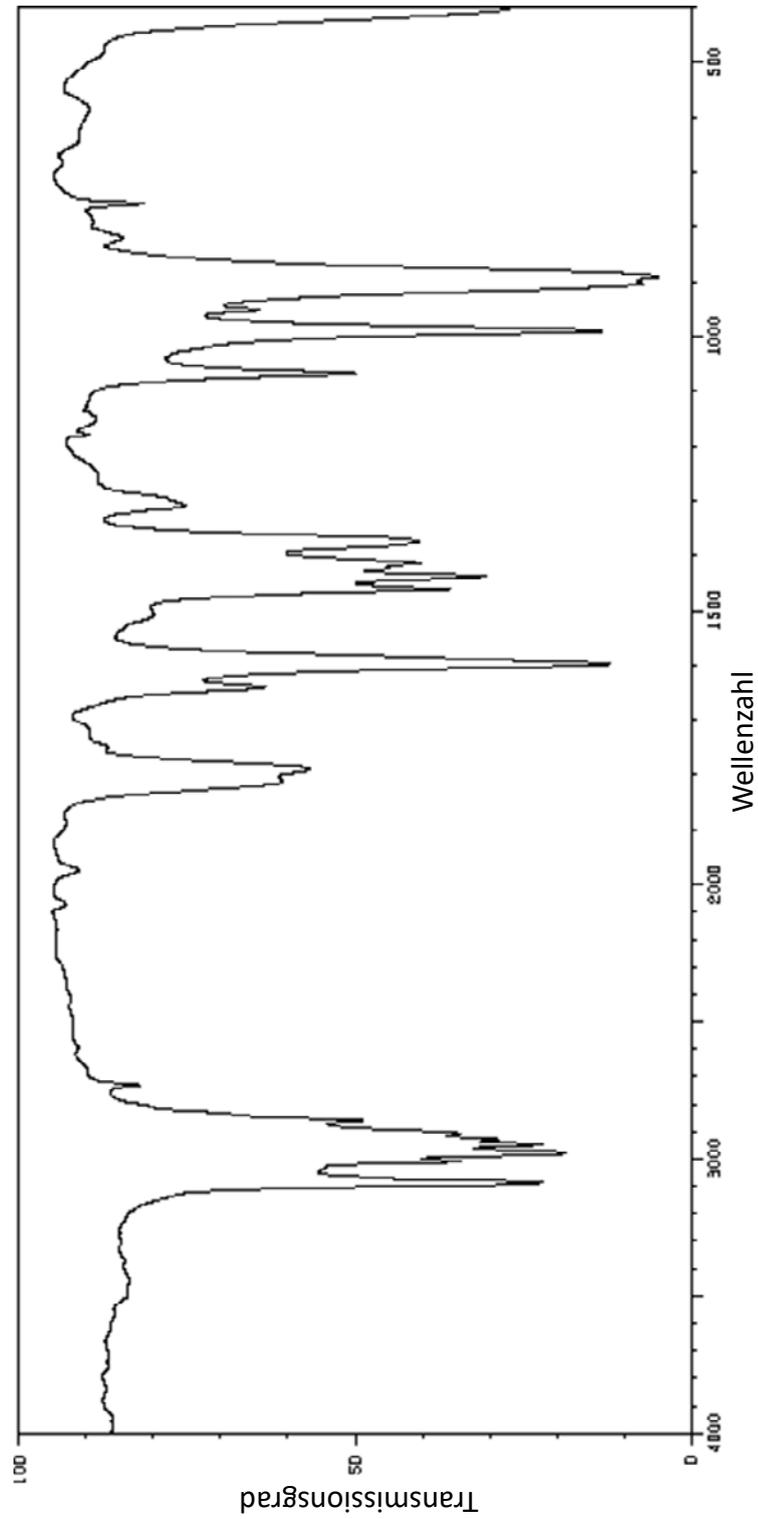
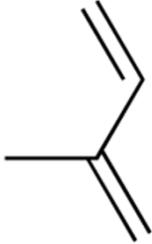


Infrarotspektroskopie von pyrolysiertem Löwenzahnkautschuk





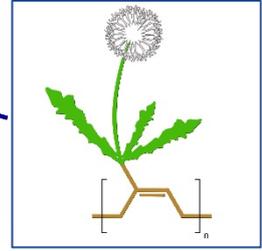
Infrarotspektroskopie von Isopren



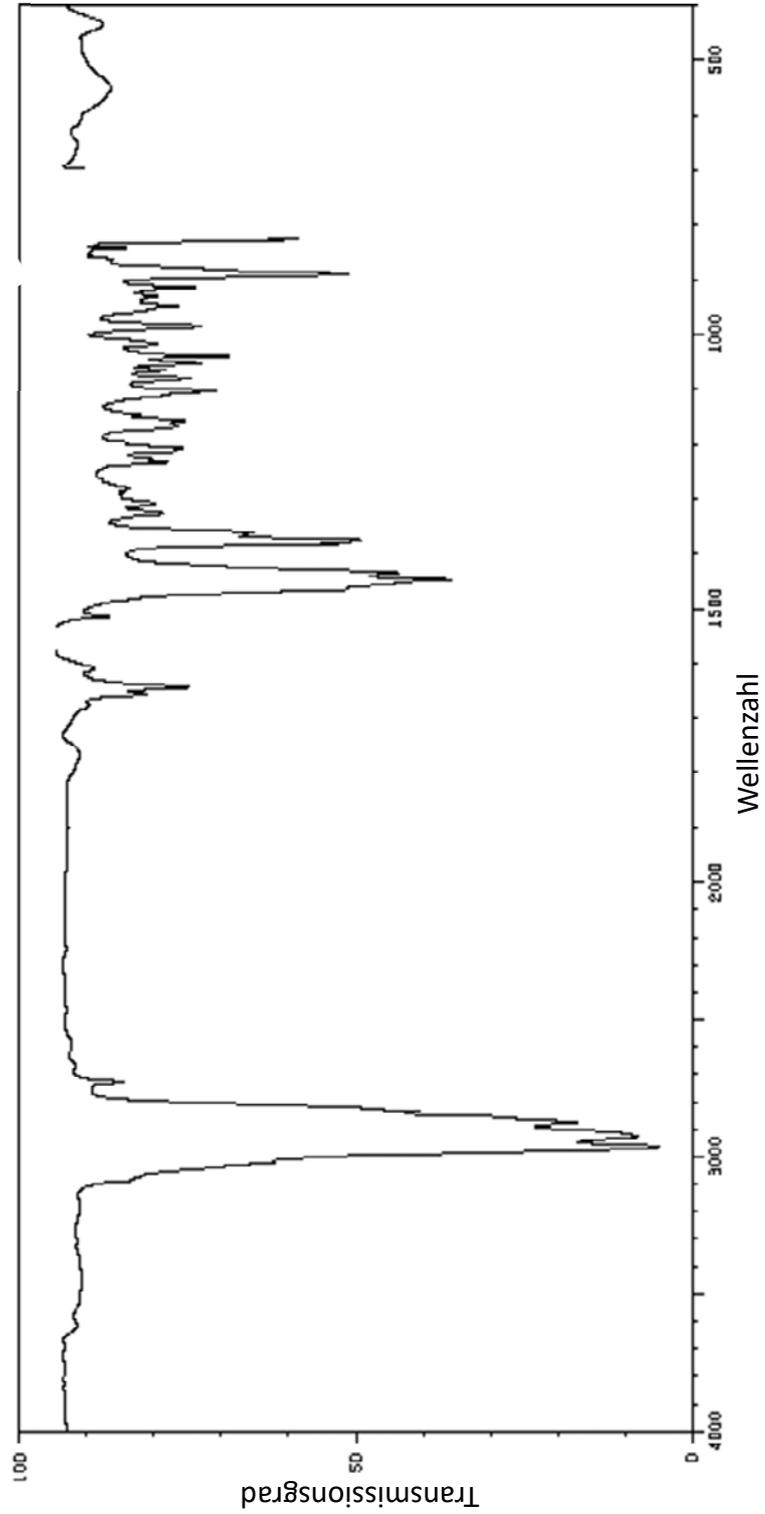
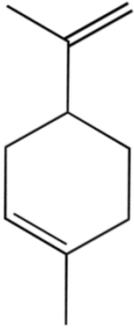
Quelle: http://sdbs.db.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi (09.08.2016)

Kautschuk aus Löwenzahn





Infrarotspektroskopie von Dipenten

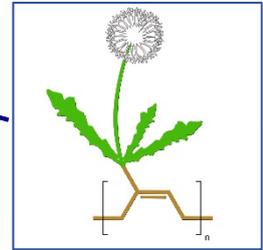


Quelle: http://sdfs.db.aist.go.jp/sdfs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi (09.08.2016)

Kautschuk aus Löwenzahn



Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem heimischen und dem russischen Löwenzahn



Taraxacum officinale
(Gewöhnlicher Löwenzahn)



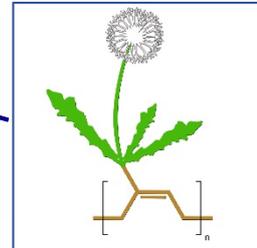
Taraxacum kok-saghyz
(Russischer Löwenzahn)



Aufgabe:

Arbeiten Sie auf Grundlage der vorliegenden Bilder Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem russischen und heimischen Löwenzahn heraus. Fertigen Sie dazu eine Tabelle an.

Eigenschaften von Naturkautschuk



Kautschuk ist ein organisches Polymer (ein sehr großes Molekül, das aus vielen gleichen kleinen Einzelbestandteilen, den Monomeren, aufgebaut ist), das aus verschiedenen Pflanzen oder auch durch chemische Synthese gewonnen werden kann. Die Bezeichnung Kautschuk „cahuchu“ stammt aus der Sprache der Amazonasindianer und bedeutet „weinender Baum“, was auf den Hauptproduzenten des Naturkautschuks, den Kautschukbaum *Hevea brasiliensis* zurückgeht.

Naturkautschuk besteht zu über 90 % aus *cis*-1,4-Polyisopren. Sein Monomer ist das Isopren (2-Methyl-1,3-Butadien).

Kautschuk zählt zu den Elastomeren, die aufgrund ihrer Struktur über eine hohe Elastizität verfügen. Die Makromoleküle der Elastomere sind weitmaschig miteinander vernetzt, sodass die Fäden durch Druck in einem bestimmten Maße gegeneinander bewegt werden können. Nicht gedehnt nehmen die Makromoleküle eine Knäuelgestalt an (Abbildung . Durch Krafteinwirkung werden sie gestreckt.

Kautschuk wird zu den unterschiedlichsten Produkten verarbeitet. Dazu wird er zu **Gummi** vulkanisiert. Bei der **Vulkanisation** wird der Kautschuk zunächst mit Schwefel und weiteren Chemikalien wie Weichmachern, Alterungsschutzmitteln, Beschleunigern und Füllstoffen vermischt und dann auf hohe Temperaturen und unter Druck erhitzt. Die Vulkanisation bewirkt ein Aufbrechen der meisten Doppelbindungen und eine Bildung von Schwefelbrücken zwischen den Polymerketten (siehe Reaktionsschema unten). Die Schwefelbrücken sind für die dauerhafte Elastizität des Gummis verantwortlich.

Neben Autoreifen, die den größten Teil der Gummiprodukte einnehmen, werden z. B. Handschuhe, Medizinprodukte, Dichtungen, Matratzen, Kondome oder Luftballons aus Kautschuk hergestellt.



Abb. 1: Naturkautschuk

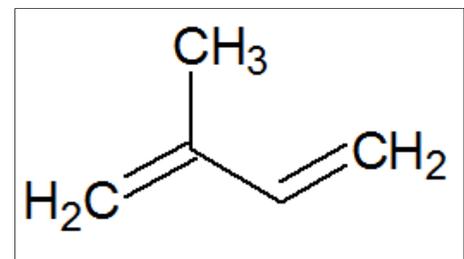


Abb. 2: Isopren

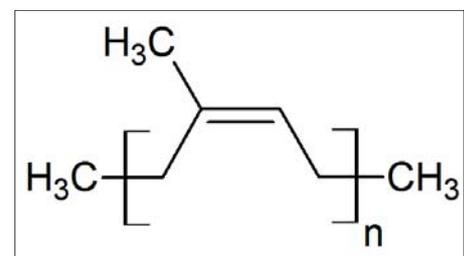


Abb. 3: Polyisopren

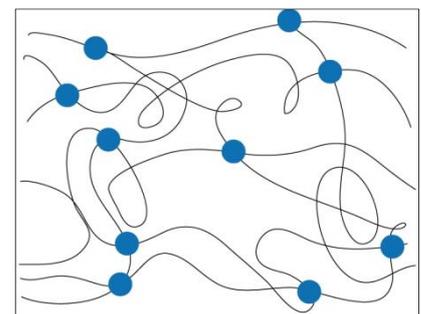


Abb. 4: Elastomer – schematische Darstellung

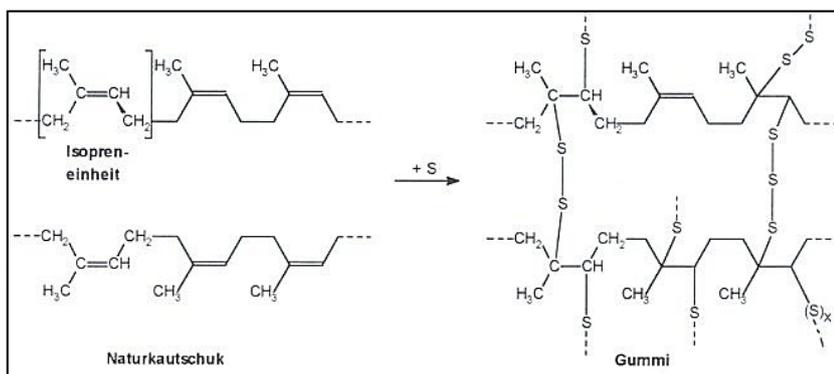


Abb. 5: Vulkanisation chemisch betrachtet

Aufgabe:

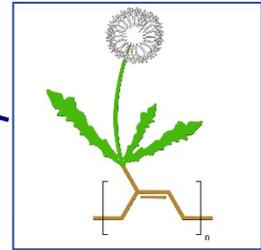
Beschreiben Sie die Vorgänge bei der Dehnung und Stauchung von

a) Kautschuk

b) Gummi.

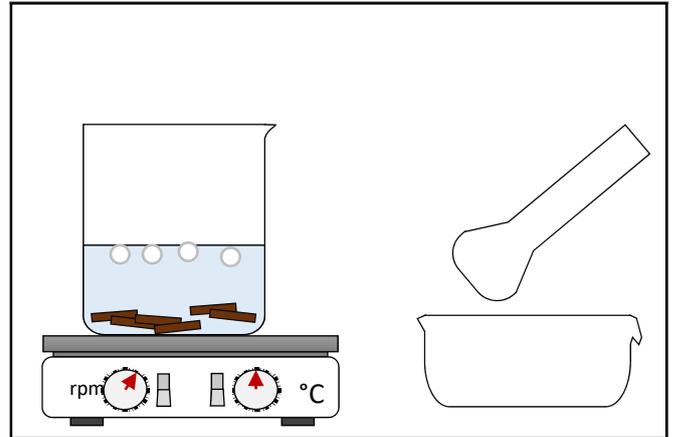
Kautschuk durch Koagulation des Milchsaftes

V4



Geräte und Chemikalien:

- Scharfes Messer (Rasierklinge oder Cutter-Messer), Spatel, Pinzette, Handschuhe, Magnetrührer mit Rührfisch, Becherglas, Löffel, Mörser mit Pistill
- frisches Wurzelmaterial, Wasser, Essigsäure (oder Essigessenz)



Achtung! Sorgfältig arbeiten, sonst zu geringe Ausbeute!

ca. 20-30 Min.

Durchführung:

Vorbereitung: Eine saubere Löwenzahnpflanze wurde über Nacht in Wasser eingelegt.

- 1) Die Wurzeln werden mit einer scharfen Klinge in etwa 0,5 cm große Stücke geschnitten (jedes Stück einzeln betrachten!). Austretender Milchsafte wird mithilfe eines Spatels sofort in ein kleines, zur Hälfte mit Essigsäure gefülltes Becherglas (oder eine Petrischale) gegeben. Die Wurzelstücke werden ebenfalls in die Essigsäure gelegt.
- 2) Die Mischung wird auf einer Rührplatte mit einem Rührfisch stark gerührt, sodass sich eventuell an der Wurzel anhaftende Kautschukteile ablösen können.
- 3) Der an der Oberfläche schwimmende Kautschuk wird mit einer Pinzette eingesammelt oder mit einem Löffel abgeschöpft und im Mörser zu einer zusammenhängenden Masse bearbeitet.

→ Entsorgung: Die Essigsäure kann mit Wasser verdünnt in den Abguss gegeben werden.

Aufgabe:

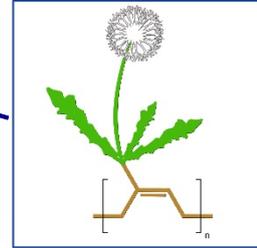
Erläutern Sie den Einsatz der Essigsäure. Fertigen Sie eine Skizze des Kautschuks (bzw. der Kautschukpartikel) vor und nach Kontakt mit Essigsäure an.

Hinweis:

Bei diesem Experiment und Arbeitsauftrag bietet es sich an, auf das Informationsmaterial M3 zu den Eigenschaften von Latexmilch zurückzugreifen.

Kautschuk aus Löwenzahn

Wie funktioniert Forschung in den Naturwissenschaften?



European Journal of Agronomy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eja

Seasonal pattern of biomass and rubber and inulin of wild Russian dandelion (*Taraxacum koksaghyz* L. Rodin) under experimental field conditions

Marie Kreuzberger^{a,*}, Thomas Hahn^b, Susanne Zibek^b, Joachim Schiemann^a, Katja Thiele^a

^a Julius Kühn-Institut, Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Biosafety in Plant Biotechnology, Erwin-Baur-Str. 27, 06484, Quedlinburg, Germany

^b Fraunhofer Institute for Interfacial Engineering and Biotechnology IGB, Molecular Biotechnology, Nobelstrasse 12, 70569, Stuttgart, Germany

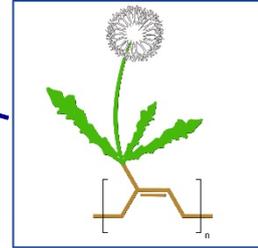
Aufgaben:

1. Schauen Sie sich die Überschriften des Artikels „*Seasonal pattern of biomass and rubber and inulin of wild Russian dandelion (Taraxacum koksaghyz L. Rodin) under experimental field conditions*“ von Kreuzberger, Hahn, Zibek und Schiemann (erschieden 2016 in der Zeitschrift European Journal of Agronomy, Nr. 80, S. 66-77) an und beschreiben Sie anhand dessen den Aufbau des Forschungsartikels.
2. Betrachten Sie die Unterüberschriften von Kapitel 3 genauer und beschreiben Sie die Daten, die erhoben wurden.
3. Erläutern Sie, inwiefern diese Daten wichtig für die weitere Forschung und Arbeit am russischen Löwenzahn sein können.
4. Informieren Sie sich im Internet über Kooperationen bei der Forschung an *Taraxacum koksaghyz*. Wählen Sie zwei Kooperationspartner aus und beschreiben Sie, wie dort die Forschung aufeinander aufbaut. (Auf der Internetseite „pflanzenforschung.de“ unter dem Suchwort “Tarulin” finden sich erste Informationen.)



Bildquelle: Kreuzberger et al. 2016

Das System der Milchröhren



Unter Milchröhren versteht man ein vernetztes Gefäßsystem in den Organen einiger höherer Pflanzen, welche Milchsaft führen.

Sie entstehen entweder durch Verschmelzung von mehreren Zellen im Pflanzenkörper, d.h. durch Auflösung der trennenden Querwände. Dabei entsteht häufig ein Netzwerk von seitlich untereinander verbundenen Röhren. Sie werden dann als gegliederte Milchröhren bezeichnet.

Oder aber sie wachsen mit der ganzen Pflanze parallel zu den Längsachsen der Organe weiter, wobei es laufend zu Kernteilungen ohne Querwandbildung kommt. In diesem Fall spricht man von ungegliederten Milchröhren; diese können viele Meter lang werden.

Der in den Milchröhren vorliegende Milchsaft besteht hauptsächlich aus einer wässrigen Emulsion, die unter anderem Zucker, Alkaloide, ätherische Öle, Harze, organische Säuren, sowie Proteine und Enzyme. Milchsaft, der zusätzlich Kautschuk enthält, wird Latex genannt.

Man geht davon aus, dass der Milchsaft von Pflanzen zum Wundverschluss nötig ist, da er nach einer Verletzung der Pflanze austritt, an der Luft aushärtet und so die Wunde verschließt. Durch die antibiotisch wirkenden Alkaloide schützt er zudem vor Infektionen.

Weiterhin ist ein Schutz gegen Fressfeinde denkbar. Der bittere Geschmack des Milchsafts sorgt dafür, dass diese abgeschreckt werden. Zusätzlich verkleben Harze und Kautschuk die Mundwerkzeuge von Insekten, sodass sie verhungern.

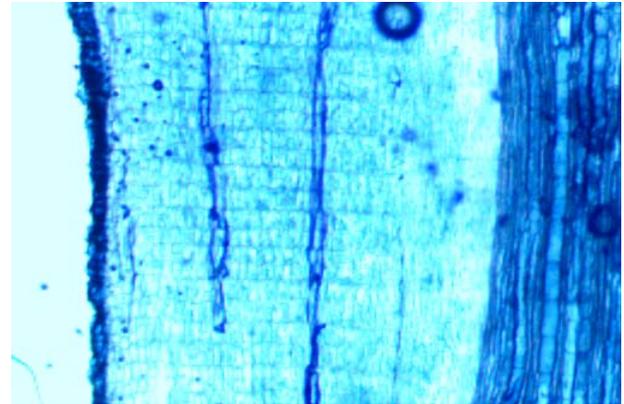
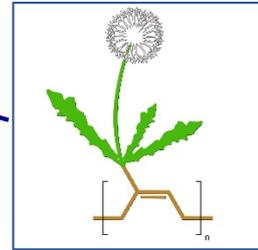


Abb. 1: Milchröhren im russischen Löwenzahn



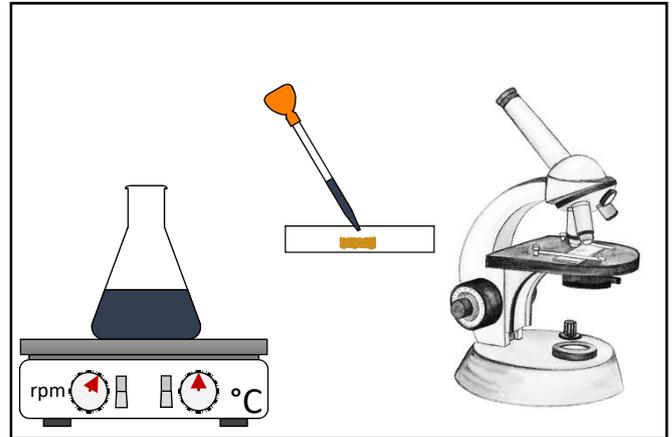
Abb. 2: Verklebung der Mundwerkzeuge bei Insekten
(Bildquelle: Prüfer 2015)

Färben der Milchröhren



Geräte und Chemikalien:

- Rasierklinge, Heizplatte, Reagenzglasklemme, Pinzette, zwei Pipetten, Objektträger mit Deckgläsern, Bastelkleber, Mikroskop
- 0,02 g Sudanschwarz B gelöst in 10 mL Ethanol (90 %ig), 10 mL Glycerin, Fixierlösung aus Formaldehyd : Eisessig : Ethanol (70 %ig) im Verhältnis 5:5:90, frische Löwenzahnwurzel des russischen Löwenzahns, Glycerin



Durchführung:

- 1) Eine frische Löwenzahnwurzel wird gereinigt und über Nacht in die Fixierlösung eingelegt.
- 2) Die Pflanzenprobe wird geschnitten. Dazu werden mithilfe der Rasierklinge möglichst dünne Längsschnitte hergestellt und auf Objektträger gelegt.
- 3) Auf einem Objektträger werden bei Raumtemperatur 1-2 Tropfen der Sudan-Lösung hinzugefügt, kurz gewartet und die Probe anschließend schnell zum Sieden erhitzt. Dies gelingt am besten, indem der Objektträger kurze Zeit auf eine heiße Heizplatte gelegt wird.
- 4) Überschüssige Färbelösung wird mithilfe eines Papiertuchs vorsichtig aufgenommen. Anschließend wird ein Tropfen Glycerin auf den Objektträger gegeben, die Probe mit einem Deckgläschen abgedeckt und mit Bastelkleber verklebt. Nun kann mikroskopiert werden.

Hinweis: Es sollten mindestens 10-20 Schnitte angefertigt und mikroskopiert werden, um eine möglichst hohe Chance auf eine gut sichtbare und gefärbte Probe zu erhalten!

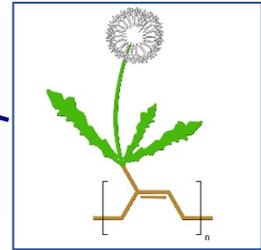
Information:

Sollten keine frischen Wurzeln des russischen Löwenzahns zur Verfügung stehen, ist die Färbung ebenso mit Wurzeln des heimischen Löwenzahns (*T. officinale*) durchführbar.

Aufgaben:

1. Fertigen Sie eine Skizze der Milchschläuche in der Pflanze an.
2. Welche Aufgabe erfüllen die kautschukführenden Milchschläuche in den Löwenzahnwurzeln?
3. Inwiefern unterscheiden sich Milchschläuche von normalen Gewebezellen? Belegen Sie Ihre Aussage mithilfe der Skizze.

Rollenkarte zur Podiumsdiskussion



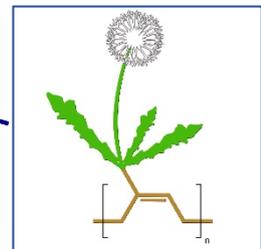
Geschäftsführer/in einer Synthesekautschukfirma

Sammeln Sie Argumente, die für die Produktion von Synthesekautschuk auch in der Zukunft sprechen. Bereiten Sie je ein Eingangs- und Schluss-Statement vor und überlegen Sie Gegenargumente, die Ihnen entgegengebracht werden könnten.

Folgende Personen nehmen ebenfalls an der Podiumsdiskussion teil:

- ein Werbesprecher einer Firma, die *Hevea*-Kautschuk vertreibt
- ein Leiter einer Forschungsgruppe zu russischem Löwenzahn
- ein Umweltaktivist

Rollenkarte zur Podiumsdiskussion



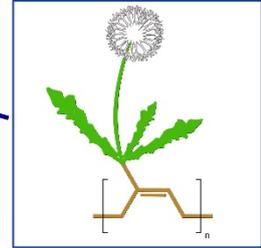
Werbesprecher/in einer Firma, die *Hevea brasiliensis*-Kautschuk vertreibt

Sammeln Sie Argumente, die für den Einsatz von Kautschuk aus dem tropischen Kautschukbaum sprechen. Bereiten Sie je ein Eingangs- und Schluss-Statement vor und überlegen Sie Gegenargumente, die Ihnen entgegengebracht werden könnten.

Folgende Personen nehmen ebenfalls an der Podiumsdiskussion teil:

- ein/e Geschäftsführer/Geschäftsführerin einer Synthesekautschukfirma
- ein Leiter einer Forschungsgruppe zu russischem Löwenzahn
- ein Umweltaktivist

Rollenkarte zur Podiumsdiskussion



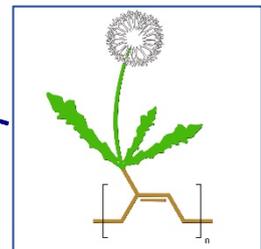
Leiter/in einer Forschungsgruppe zu russischem Löwenzahn

Sammeln Sie Argumente, die für die Produktion von Kautschuk aus den Wurzeln des russischen Löwenzahns sprechen. Bereiten Sie je ein Eingangs- und Schluss-Statement vor und überlegen Sie Gegenargumente, die Ihnen entgegengebracht werden könnten.

Folgende Personen nehmen ebenfalls an der Podiumsdiskussion teil:

- ein Werbesprecher einer Firma, die *Hevea*-Kautschuk vertreibt
- ein/e Geschäftsführer/Geschäftsführerin einer Synthesekautschukfirma
- ein Umweltaktivist

Rollenkarte zur Podiumsdiskussion



Umweltaktivist/in

Sammeln Sie Argumente, wie Kautschuk- und Gummiprodukte heutzutage umweltschonend, nachhaltig und mit Rücksicht auf Menschenrechte produziert werden können. Bereiten Sie je ein Eingangs- und Schluss-Statement vor und überlegen Sie Gegenargumente, die Ihnen entgegengebracht werden könnten.

Folgende Personen nehmen ebenfalls an der Podiumsdiskussion teil:

- ein/e Geschäftsführer/Geschäftsführerin einer Synthesekautschukfirma
- ein Leiter einer Forschungsgruppe zu russischem Löwenzahn
- ein Werbesprecher einer Firma, die *Hevea*-Kautschuk vertreibt

VI. Sicherheitsdaten zu den eingesetzten Chemikalien

In der folgenden Auflistung werden nur die Chemikalien genannt, die für die in der Schule durchführbaren Experimente nötig sind.

Da es schwierig ist, aktuelle und verbindliche Informationen über Tätigkeitsbeschränkungen im Umgang mit bestimmten Stoffen zu erhalten, werden in der nachfolgenden Liste zunächst die Gefahrstoffkennzeichnungen und H- und P-Sätze der Reinstoffe, entnommen aus der GESTIS-Stoffdatenbank angegeben (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung). Wenn vorhanden, werden ebenfalls Informationen zum Gefahrenpotenzial von Gemischen und Lösungen gegeben. Bei denjenigen Stoffen, von denen laut RISU NRW 2017 eine besondere Gefahr ausgeht (akut toxische Stoffe der Kategorien 1, 2 und 3, karzinogene oder keimzellmutagene Stoffe Kat. 1A, 1B oder 2, Stoffe mit spezifischer Zielorgantoxizität bei wiederholter Exposition Kat. 1, ebenso bei einmaliger Exposition Kat. 1, Hautätzende Stoffe Kat. 1A und bei reproduktionstoxischen Stoffen Kat. 1A oder 1B) wird eine genauere Untersuchung (und Überprüfung von Substitutionsmöglichkeiten) vorgenommen. Dabei handelt es sich um Ammoniak, Borsäure, Kaliumpermanganat, Natriumbromat, Petrolether, Resorcin und konzentrierte Schwefelsäure.

Informationen zu Tätigkeitsbeschränkungen bzw. Tätigkeitsverboten wurden von DEGINTU, dem Gefahrstoffinformationssystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung (vgl. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) 2017) und auf die Stoffliste für den „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“ der DGUV (vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. 2017).

In alphabetischer Reihenfolge:

Aceton [C₃H₆O]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar. H319: Verursacht schwere Augenreizung. H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.

P-Sätze	<p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P240: Behälter und zu befüllende Anlage erden.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p> <p>P403+P233: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Behälter dicht verschlossen halten.</p>
EUH-Sätze	<p>EUH066: Wiederholter Kontakt kann zu spröder oder rissiger Haut führen.</p>
Einstufung	<p>Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225</p> <p>Augenreizung, Kategorie 2; H319</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H336</p>
	<p>Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.</p>

Ammoniak, wässrige Lösung [NH₃]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.</p> <p>H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.</p> <p>H335: Kann die Atemwege reizen.</p> <p>H400: Sehr giftig für Wasserorganismen.</p>
P-Sätze	<p>P260: Dampf/Aerosol/Nebel nicht einatmen.</p> <p>P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.</p> <p>P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz tragen.</p> <p>P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P303+P361+P353: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle kontaminierten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut mit Wasser abwaschen/duschen.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p>
Einstufung	<p>Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290</p> <p>Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1B; H314</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335</p> <p>Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335: C >= 5 %</p>

	<p>Für wässrige Lösungen (5%): Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.</p> <p>Im Fall des beschriebenen Experiments wurde eine 0,2 %ige Lösung verwendet. Die oben genannten Gefahren sind dementsprechend geringer.</p>
--	---

Borsäure [H₃BO₃]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H360FD: Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann das Kind im Mutterleib schädigen.
P-Sätze	P201: Vor Gebrauch besondere Anweisungen einholen. P308+P313: BEI Exposition oder falls betroffen: Ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.
Einstufung	Reproduktionstoxizität, Kategorie 1B; H360FD Spezifische Konzentrationsgrenzen: Repr. 1B; H360FD: C >= 5,5 %
	<p>RISU NRW 2017: „Karzinogene und keimzellmutagene Stoffe der Kategorien 1A und 1B [...] dürfen bis auf wenige Ausnahmen im Unterricht nicht verwendet werden.“ (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2017, S. 23).</p> <p>Da es sich bei der in dieser Arbeit eingesetzten Lösung jedoch um eine 3 %ige Lösung handelt, ist das Gemisch nicht mehr in die oben genannte Kategorie 1B einzuordnen. Die Konzentration ist dementsprechend gering genug, dass ein Einsatz im Schulunterricht möglich ist (vgl. auch Lühken und von der Lahr 2012).</p>

Butanon [C₄H₈O]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar. H319: Verursacht schwere Augenreizung. H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.
P-Sätze	P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

	P403+P233: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Behälter dicht verschlossen halten.
EUH-Sätze	EUH066: Wiederholter Kontakt kann zu spröder oder rissiger Haut führen.
Einstufung	Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225 Augenreizung, Kategorie 2; H319 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H336
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Calciumhydroxid [Ca(OH)₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H315: Verursacht Hautreizungen. H318: Verursacht schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
P-Sätze	P280: Augenschutz/Gesichtsschutz tragen P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.
Einstufung	Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2; H315 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318 Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Calciumnitrat [Ca(NO₃)₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H272: Kann Brand verstärken; Oxidationsmittel. H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H318: Verursacht schwere Augenschäden.
P-Sätze	P210 Von Hitze/Funken/offener Flamme/heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen. P280 Schutzhandschuhe / Augenschutz tragen.

	P305+P351+P338 BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.
Einstufung	Oxidierende Feststoffe, Kategorie 3; H272 Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

4-(Dimethylamino)benzaldehyd	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	Kein gefährlicher Stoff nach GHS.
	Schüler- und Lehrerexperimente sind mit diesem Stoff ohne Einschränkungen erlaubt.

Essigsäure [C₂H₄O₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H226: Flüssigkeit und Dampf entzündbar. H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
P-Sätze	P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen. P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen. P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.
Einstufung	Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 3; H226 Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290 Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1A; H314 Spezifische Konzentrationsgrenzen: Hautätz. 1A; H314: C ≥ 90 % Hautätz. 1B; H314: 25 % ≤ C < 90 % Hautreiz. 2; H315: 10% ≤ C < 25 % Augenreiz. 2; H319: 10% ≤ C < 25 %

	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.
--	--

Ethanol [C₂H₆O]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar. H319: Verursacht schwere Augenreizung.
P-Sätze	P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. P240: Behälter und zu befüllende Anlage erden. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen. P403+P233: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Behälter dicht verschlossen halten.
Einstufung	Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225 Augenreizung, Kategorie 2; H319
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Ethylenglykol [C₂H₆O₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H373: Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition. ----- Betroffene Organe: Nieren
P-Sätze	P301+P312+P330: BEI VERSCHLUCKEN: Bei Unwohlsein GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen. Mund ausspülen.
Einstufung	Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302 Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition), Kategorie 2; H373
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Hydrochinon [C₆H₄(OH)₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen. H341: Kann vermutlich genetische Defekte verursachen. H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H318: Verursacht schwere Augenschäden. H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen. H400: Sehr giftig für Wasserorganismen.
P-Sätze	P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden. P280: Schutzhandschuhe/Augenschutz tragen. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen. P302+P352: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser und Seife waschen. P313: Ärztlichen Rat einholen / ärztliche Hilfe hinzuziehen.
Einstufung	Karzinogenität, Kategorie 2; H351 Keimzellmutagenität, Kategorie 2; H341 Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302 Schwere Augenschädigung, Kategorie 1; H318 Sensibilisierung der Haut, Kategorie 1; H317 Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4. Tätigkeitsverbot für werdende oder stillende Mütter.

Kaliumpermanganat [KMnO₄]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H272: Kann Brand verstärken; Oxidationsmittel. H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.
P-Sätze	P221: Mischen mit brennbaren Stoffen, Schwermetallverbindungen, Säuren und Laugen unbedingt verhindern. P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.

	<p>P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.</p> <p>P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p> <p>P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p>
Einstufung	<p>Oxidierende Feststoffe, Kategorie 2; H272</p> <p>Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302</p> <p>Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1C; H314</p> <p>Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400</p> <p>Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 1; H410</p>
	<p>Die aufgeführten H- und P-Sätze gelten für den Reinstoff. Für die hier verwendete 0,0001 %ige Lösung gelten die aufgeführten Kategorien in abgeschwächter Form.</p> <p>Für eine 3 %ige Lösung: Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.</p>

Kohlenstoffdioxid [CO₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.
P-Sätze	P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.
Einstufung	Gase unter Druck, verdichtetes Gas; H280
	Schüler- und Lehrerexperimente sind mit diesem Stoff ohne Einschränkungen erlaubt.

Naphthoresorcin (1,3-Dihydroxynaphthalin)	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319: Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H335: Kann die Atemwege reizen.</p>
P-Sätze	<p>P261 Einatmen von Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol vermeiden.</p> <p>P280 Schutzhandschuhe / Schutzkleidung / Augenschutz / Gesichtsschutz tragen.</p>

	<p>P305 + P351 + P338 BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p> <p>P304 + P340 BEI EINATMEN: Die Person an die frische Luft bringen und für ungehinderte Atmung sorgen.</p> <p>P405 Unter Verschluss aufbewahren.</p> <p>P501 Inhalt/Behälter entsprechend den örtlichen Vorschriften der Entsorgung zuführen.</p>
--	---

Methanol [CH₄O]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar.</p> <p>H331: Giftig bei Einatmen.</p> <p>H311: Giftig bei Hautkontakt.</p> <p>H301: Giftig bei Verschlucken.</p> <p>H370: Schädigt die Organe.</p> <p>----- Betroffene Organe: Augen</p>
P-Sätze	<p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P233: Behälter dicht verschlossen halten.</p> <p>P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung tragen.</p> <p>P302+P352: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser und Seife waschen.</p> <p>P304+P340: BEI EINATMEN: Die Person an die frische Luft bringen und für ungehinderte Atmung sorgen.</p> <p>P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p> <p>P403+P235: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Kühl halten.</p>
Einstufung	<p>Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225</p> <p>Akute Toxizität, Kategorie 3, Einatmen; H331</p> <p>Akute Toxizität, Kategorie 3, Hautkontakt; H311</p> <p>Akute Toxizität, Kategorie 3, Verschlucken; H301</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 1; H370 (H370: C >= 10 %, H371: 3 % <= C < 10 %)</p>
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Natriumbromid [NaBr]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	Kein gefährlicher Stoff nach GHS.

	Schüler- und Lehrerexperimente sind mit diesem Stoff ohne Einschränkungen erlaubt.
--	--

Natriumbromat [NaBrO₃]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H271: Kann Brand oder Explosion verursachen; starkes Oxidationsmittel.</p> <p>H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.</p> <p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319: Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H335: Kann die Atemwege reizen.</p> <p>H341: Kann vermutlich genetische Defekte verursachen.</p> <p>H350: Kann Krebs erzeugen.</p>
P-Sätze	<p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P221: Mischen mit brennbaren Stoffen/... unbedingt verhindern.</p> <p>P283: Schwer entflammbare/flammhemmende Kleidung tragen.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p> <p>P306+P360: BEI KONTAKT MIT DER KLEIDUNG: Kontaminierte Kleidung und Haut sofort mit viel Wasser abwaschen und danach Kleidung ausziehen.</p> <p>P370+P380+P375: Bei Brand: Umgebung räumen. Wegen Explosionsgefahr Brand aus der Entfernung bekämpfen.</p> <p>P420: Von anderen Materialien entfernt aufbewahren.</p> <p>P501: Entsorgung des Inhalts / des Behälters gemäß den örtlichen / regionalen / nationalen / internationalen Vorschriften.</p>
Einstufung	<p>Oxidierende Feststoffe, Kategorie 1; H271</p> <p>Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302</p> <p>Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2; H315</p> <p>Augenreizung, Kategorie 2; H319</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335</p> <p>Keimzellmutagenität, Kategorie 2; H341</p> <p>Karzinogenität, Kategorie 1B; H350</p>
	<p>Laut DGUV Stoffliste 213-098 und DEGINTU: Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.</p> <p>Nach Prüfung mit RISU NRW 2017 herrscht ein Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler. Natriumbromat darf zur Herstellung von Bromwasser mit einer Bromid-Bromat-Lösung (als Ersatzstoff für elementares Brom) verwendet werden (vgl. (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2017, S. 84).</p>

Natriumcarbonat [Na₂CO₃]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H319: Verursacht schwere Augenreizung.
P-Sätze	P260: Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.
Einstufung	Augenreizung, Kategorie 2; H319
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Natriumsulfit [Na₂SO₃]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	Kein gefährlicher Stoff nach GHS.
	Schüler- und Lehrerexperimente sind mit diesem Stoff ohne Einschränkungen erlaubt.

Natriumhydroxid [NaOH], Natronlauge, 3 %ig	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
P-Sätze	P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen. P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen. P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen. P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.
Einstufung	Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290 Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1A; H314 Spezifische Konzentrationsgrenzen: Hautätz. 1A; H314: C >= 5 %

	Hautätz. 1B; H314: 2 % \leq C < 5 % Hautreiz. 2; H315: 0,5 % \leq C < 2 % Augenreiz. 2; H319: 0,5 % \leq C < 2 %
	Für Natriumhydroxid-Lösungen (10 %ig): Tätigkeitsverbot für Schüerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Petrolether (Siedebereich 100-120 °C) Petrolether Siedebereich 40-60 °C	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar.</p> <p>H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.</p> <p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.</p> <p>H361f: Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen.</p> <p>H373: Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition.</p> <p>H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.</p>
P-Sätze	<p>P201: Vor Gebrauch besondere Anweisungen einholen.</p> <p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P301+P310: BEI VERSCHLUCKEN: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p> <p>P331: KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P370+P378: Bei Brand: Zum Löschen Trockensand, Trockenlöschpulver oder alkoholbeständigen Schaum verwenden.</p> <p>P501: Inhalt/ Behälter einer anerkannten Abfallentsorgungsanlage zuführen.</p>
Einstufung	<p>Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 2; H225</p> <p>Aspirationsgefahr, Kategorie 1; H304</p> <p>Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2; H315</p> <p>Reproduktionstoxizität, Kategorie 2; H361f</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H336</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition), Kategorie 2; H373</p> <p>Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 2; H411</p>
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4. Tätigkeitsverbot für werdende oder stillende Mütter.

Resorcin [C₆H₄(OH)₂]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.</p> <p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319: Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen.</p> <p>H370: Schädigt die Organe. Betroffene Organe: Blut, Zentrales Nervensystem, Atmungssystem. Expositionsweg: Oral</p> <p>H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.</p>
P-Sätze	<p>P260: Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen.</p> <p>P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.</p> <p>P280: Augenschutz/Gesichtsschutz tragen</p> <p>P308: BEI Exposition oder falls betroffen:</p> <p>P311: GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p> <p>P333+P313: Bei Hautreizung oder -ausschlag: Ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.</p> <p>P337+P313: Bei anhaltender Augenreizung: Ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.</p>
Einstufung	<p>Akute Toxizität, Kategorie 4, Verschlucken; H302</p> <p>Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2; H315</p> <p>Augenreizung, Kategorie 2; H319</p> <p>Sensibilisierung der Haut, Kategorie 1B; H317</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 1; H370</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 2; H371</p> <p>Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400</p> <p>Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 3; H412</p>
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Salzsäure [HCl_(aq)]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.</p> <p>H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.</p> <p>H335: Kann die Atemwege reizen.</p>

P-Sätze	<p>P260: Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen.</p> <p>P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.</p> <p>P303+P361+P353: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle kontaminierten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut mit Wasser abwaschen/duschen.</p> <p>P304+P340+P310: BEI EINATMEN: Die Person an die frische Luft bringen und für ungehinderte Atmung sorgen. Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p>
Einstufung	<p>Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290</p> <p>Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1B; H314</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335</p>
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4 (bei w = 10 %).

Schwefelsäure [H₂SO_{4(aq)}]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	<p>H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.</p> <p>H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.</p>
P-Sätze	<p>P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.</p> <p>P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p> <p>P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.</p>
Einstufung	<p>Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290</p> <p>Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1A; H314</p> <p>Spezifische Konzentrationsgrenzen: Hautätz. 1A; H314: C >= 15 % Hautreiz. 2; H315: 5 % <= C < 15 % Augenreiz. 2; H319: 5 % <= C < 15 %</p>
	Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.

Sudanschwarz B	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	Kein gefährlicher Stoff nach GHS.
	Schüler- und Lehrerexperimente sind mit diesem Stoff ohne Einschränkungen erlaubt.

Zum Gefahrenpotenzial einiger möglicher Produkte:

Isopren [C₅H₈]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	
H-Sätze	H224: Flüssigkeit und Dampf extrem entzündbar. H350: Kann Krebs erzeugen. H341: Kann vermutlich genetische Defekte verursachen. H412: Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.
P-Sätze	P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. P201: Vor Gebrauch besondere Anweisungen einholen. P281: Vorgeschriebene persönliche Schutzausrüstung verwenden. (gestrichen, s. 4. ATP) P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden. P308+P313: BEI Exposition oder falls betroffen: Ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.
Einstufung	Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 1; H224 Karzinogenität, Kategorie 1B; H350 Keimzellmutagenität, Kategorie 2; H341 Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 3; H412
	RISU: „Karzinogene und keimzellmutagene Stoffe der Kategorien 1A und 1B (...) dürfen bis auf wenige Ausnahmen im Unterricht nicht verwendet werden.“ Die Pyrolyse organischer Stoffe ist dennoch in kleinstmöglichen Mengen erlaubt, da nur geringe Mengen karzinogener und keimzellmutagener Produkte entstehen können. Ansonsten: Generelles Tätigkeitsverbot an Schulen.

Dipenten [C₅H₈]	
GHS-Gefahrstoffkennzeichnung	

H-Sätze	H226: Flüssigkeit und Dampf entzündbar. H315: Verursacht Hautreizungen. H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen. H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.
P-Sätze	P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden. P280: Schutzhandschuhe tragen. P302+P352: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser und Seife waschen.
Einstufung	Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 3; H226 Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2; H315 Sensibilisierung der Haut, Kategorie 1; H317 Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400 Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 1; H410
	Nach Prüfung der RISU NRW 2017 herrscht ein Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4.