

Endbericht

Substitution von SVHC-Stoffen und mögliche Folgen für die Erreichung der Green-Deal- und Nachhaltigkeitsziele

IM AUFTRAG DER

WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH
BUNDESSPARTE INDUSTRIE
ABTEILUNG FÜR UMWELT- UND ENERGIEPOLITIK



Dr. Andreas Windsperger
Dipl.-Ing.ⁱⁿ Nadine Brunnhuber

St. Pölten, im September 2023

Inhalt

Einleitung.....	1
Begriffsdefinitionen.....	1
Auswahl der betrachteten SVHC-Stoffe.....	2
Fallbeispiele.....	4
Trichlorethylen (CAS-Nr.: 79-01-6).....	4
Verwendung.....	4
Regulierung.....	4
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	4
Substitution.....	5
Nonylphenol, ethoxyliert (CAS-Nr.: 9016-45-9).....	8
Verwendung.....	8
Regulierung.....	8
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	8
Substitution.....	8
Bisphenol A (BPA, CAS-Nr.: 80-05-7).....	12
Verwendung.....	12
Regulierung.....	12
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	12
Substitution.....	13
1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP, CAS-Nr.: 872-50-4).....	17
Verwendung.....	17
Regulierung.....	17
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	17
Substitution.....	17
Glutaraldehyd (CAS-Nr.: 111-30-8).....	21
Verwendung.....	21
Regulierung.....	21
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	21
Substitution.....	21
Chromtrioxid (CAS-Nr.: 1333-82-0).....	26
Verwendung.....	26
Regulierung.....	26
Nachhaltigkeitsrelevanz.....	26

Substitution	27
N,N-Dimethylacetamid (DMAC, CAS-Nr.: 127-19-5)	29
Verwendung	29
Regulierung.....	29
Nachhaltigkeitsrelevanz	29
Substitution	30
Herausforderungen bei der Recherche	33
Herausforderungen bei der Substitution	33
Kein universelles Substitut möglich.....	34
Regrettable Substitution	34
Ressourcen und Kosten	34
Vorschläge für das Design von Substitutionsempfehlungen.....	35
Schritt 1: Sammeln von Informationen über verwendete Chemikalien	37
Schritt 2: Identifizieren von unerwünschten Stoffen	37
Schritt 3: Suche nach verfügbaren Alternativstoffen oder neuen technischen Lösungen.....	39
Schritt 4: Bewertung und Auswahl alternativer Stoffe oder neuer technischer Lösungen	40
Schritt 5: Pilot-Tests und Implementieren der Substitution	40
Weiterführende Informationen und zusätzliche Ressourcen zur Chemikaliensubstitution	41
Mögliche Rollen der Gesetzgebung bei der Substitution.....	42
Abschließendes Fazit	43
Quellen	45

Einleitung

Chemische Stoffe sind heute ein unverzichtbarer Bestandteil unseres Alltags. Da diese neben vielfältigem Nutzen auch zahlreiche Gefahren mit sich bringen, ist ein nachhaltiger und sorgsamer Umgang mit Chemikalien ein wesentlicher Aspekt unseres Lebens. In den Bereich der Chemiepolitik fallen nicht nur klassische Chemikalien, die vor allem in Laboren verwendet werden, an, sondern auch viele "gewöhnliche" Chemikalien des Alltags wie Kunststoffe, Verpackungsmaterialien, Klebstoffe oder Lacke. Besondere Bedeutung haben Anwendungsbereiche wie Düngemittel, Biozide, Detergenzien oder Pflanzenschutzmittel.

Neben der berechtigten Aufmerksamkeit auf die Gefahren durch Chemieprodukte muss aber auch deren Nutzen in den jeweiligen Anwendungsbereichen gegenübergestellt werden. Für den sicheren Umgang mit Chemikalien sollte der Fokus verstärkt auf bewährten Instrumenten (z.B.: Sicherheitsdatenblatt) liegen. Auch das gestärkte Bewusstsein für einen besseren Umgang mit Chemikalien ist notwendig, da viele Belastungen und Gefährdungen auch durch falsche Handhabung entstehen.

Mögliche Substitutionen müssen gründlich geprüft und bewertet werden, speziell hinsichtlich der dadurch ausgelösten Veränderungen durch die verwendeten Alternativen, sowie auch betreffend Kosten, Energieverbrauch und Ressourceneinsatz. Die Verlagerung von Belastungen zwischen verschiedenen Umweltmedien muss ebenfalls im Auge behalten werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es das Ziel, die Auswirkungen der Substitution von SVHC-Chemikalien auf die Erreichung der Green-Deal- und Nachhaltigkeitsziele abzuschätzen. Der Fokus lag dabei auf für den Green Deal relevanten Sektoren wie Industriechemikalien, Mobilität, Kreislaufwirtschaft, Gebäude, Energieerzeugung und -netze sowie der Bioökonomie. Die im Zuge der Arbeit aufgetretenen Schwierigkeiten (sowohl bei der Recherche als auch allgemein bei der chemischen Substitution) werden beschrieben und Vorschläge für das Design von Substitutionsempfehlungen gemacht.

Begriffsdefinitionen

Gefährliche Stoffe: Stoffe, von denen Gefahr für Menschen, Tiere, Pflanzen oder die Umwelt allgemein auch bei bestimmungsgemäßer Verwendung ausgehen können [1].

Substitution gefährlicher Stoffe: Vermeidung oder Ersatz einer gefährlichen Chemikalie in Produkten oder Prozessen durch einen weniger gefährlichen Stoff. Dabei ist die Gleichartigkeit der Funktion zu berücksichtigen [2].

Regrettable Substitution: Wenn ein Stoff durch einen anderen ersetzt wird und sich erst im Laufe der Anwendung herausstellt, dass das Substitut gleich gefährlich oder sogar gefährlicher ist als der ursprüngliche Stoff [3].

SVHC-Stoff: Ein chemischer Stoff mit besonders gefährlichen Eigenschaften (z.B.: karzinogen, mutagen, reprotoxisch). Die Identifizierung eines Stoffs als SVHC-Stoff ist der erste Schritt der Aufnahme des Stoffs auf die Liste der zulassungspflichtigen Stoffe [4].

Auswahl der betrachteten SVHC-Stoffe

Nicht alle SVHC-Stoffe werden in gleichem Umfang eingesetzt. Deshalb wurden basierend auf der Vorgehensweise des belgischen Fahrplans zur Substitution von SVHC-Stoffen [5] die mengenmäßig bedeutendsten SVHC-Stoffe für diese Studie priorisiert. Da es keine Daten zum mengen- oder funktionsspezifischen Einsatz von SVHC-Stoffen in Österreich gibt, wurde die SPIN-List [6] hierfür als Datengrundlage verwendet. Die SPIN-List ist eine Datenbank über die Verwendung von Stoffen in Produkten in den nordischen Ländern (Dänemark, Finnland, Norwegen, Schweden). Der Verbrauch von SVHC-Stoffen in diesen Ländern in den Jahren 2018 bis 2020 wurde herangezogen, um die Liste der SVHC-Stoffe auf die mengenmäßig bedeutendsten Stoffe einzugrenzen. Ein Auszug aus der ersten Stoffeingrenzung ist in Tabelle 1 angeführt.

Anschließend wurde recherchiert, wie wichtig die eingegrenzten Stoffe für eine Nachhaltigkeitstransaktion von Gesellschaft und Industrie sind. Dabei wurde angenommen, dass Stoffe, die in nachhaltigkeitsrelevanten Bereichen wie Kreislaufwirtschaft, Energiespeicherung und -versorgung, erneuerbare Energien, Digitalisierung, Medizin und Gesundheit oder Bioökonomie von hoher Relevanz sind. Zusätzlich wurden ausgewählte Fachorganisationen der WKÖ per Fragebogen befragt, welche (SVHC-)Stoffe für ihre Branche in Österreich von hoher Relevanz sind.

Basierend auf der mengenmäßigen Relevanz und Nachhaltigkeitsrelevanz der Stoffe sowie den Rückmeldungen der Fachorganisationen der WKÖ wurden sieben Stoffe aus der oben erwähnten Stoffeingrenzung für die Detailausarbeitung ausgewählt (in Tabelle 1 in grün markiert). Ihre Verwendung, derzeitige gesetzliche Regulierung, Relevanz für Nachhaltigkeit und Möglichkeiten zur Substitution wurden im Detail recherchiert. Diese Stoffe sind:

- Trichlorethylen
- Nonylphenol, ethoxyliert
- Bisphenol A (BPA)
- 1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP)
- Glutaraldehyd
- Chromtrioxid
- N,N-Dimethylacetamid (DMAC)

Chemikalien-Substitution

Tabelle 1: Beispiele der als am relevantesten identifizierte SVHC-Stoffe und die für die Studie ausgewählten Fallbeispiele (in grün)

CAS-Nr.	Stoff	Nachhaltigkeitsaspekt
68-12-2	N,N-dimethylformamide	Kunststoffherstellung
80-05-7	4,4'-isopropylidenediphenol, bisphenol A	Kunststoffherstellung
107-15-3	Ethylenediamine	Kunststoffherstellung
111-30-8	Glutaraldehyde, 25% Aqueous Solution	Desinfektionsmittel, chromfreie Ledergerbung
872-50-4	1-Methyl-2-pyrrolidone (NMP)	Energiespeicher, Medizin
1314-41-6	Orange lead (lead tetroxide)	Energiespeicher
1333-82-0	Chromium trioxide	Langlebigkeit von Produkten
9016-45-9	Nonylphenol, ethoxylated	Herstellung von Impfstoffen
10043-35-3	Boric acid	Flammschutzmittel
10124-43-3	Cobalt(II) sulphate	Energiespeicher
85535-85-9	Alkanes, C14-17, chloro	keiner
121158-58-5	Phenol, dodecyl-, branched	keiner
107-06-2	1,2-dichloroethane	Kunststoffherstellung
127-19-5	N,N-dimethylacetamide	Recycling, Medizin
7758-97-6	Lead chromate	keiner
25154-52-3	Nonylphenol	keiner
26523-78-4	Phenol, nonyl-, phosphite (3:1)	Kunststoffherstellung
61788-32-7	Terphenyl, hydrogenated	PV-Anlagen
65996-93-2	Pitch, coal tar, high-temp.	Elektronik
74499-35-7	Phenol, (tetrapropenyl) derivs.	keiner
84852-15-3	Phenol, 4-nonyl-, branched	keiner
85535-84-8	Alkanes, C10-13, chloro (Short Chain Chlorinated Paraffins)	Kunststoffherstellung
7778-39-4	Arsenic acid	keiner
1327-53-3	Diarsentrioxide	Kunststoffherstellung
79-01-6	Trichloroethylene	PV-Anlagen
1344-37-2	Lead sulfochromate yellow (C.I. Pigment Yellow 34)	keiner
2687-91-4	N-ethyl-2-pyrrolidone	keiner
1303-86-2	Diboron trioxide	Energiespeicher
12626-81-2	Lead titanium zirconium trioxide	Elektronik

Fallbeispiele

Trichlorethylen (CAS-Nr.: 79-01-6)

Verwendung

Trichlorethylen (TCE) wird unter anderem als Lösungsmittel in der industriellen Teilreinigung und als Extraktionsmittel in Prüflaboratorien der Bitumen- und Asphaltindustrie verwendet [7]. Weitere Verwendungszwecke sind Industrie- und Metallentfettung, Trockenreiniger, Herstellung von Kleb- und Schmierstoffen für die Elektroindustrie und die Herstellung von Kältemitteln. TCE kann auch in verschiedenen Konsumgütern enthalten sein (z.B.: Fleckenentferner, Reinigungstücher, Druckfarben, Sprühkleber) [8]. Die geschätzte Menge des importierten und in der EU hergestellten TCE ist von ca. 47.000 t im Jahr 2010 auf ca. 12.000 t im Jahr 2019 gesunken (siehe Abbildung 1). Es wird erwartet, dass die Verwendung von TCE in der EU weiter sinken wird [9].

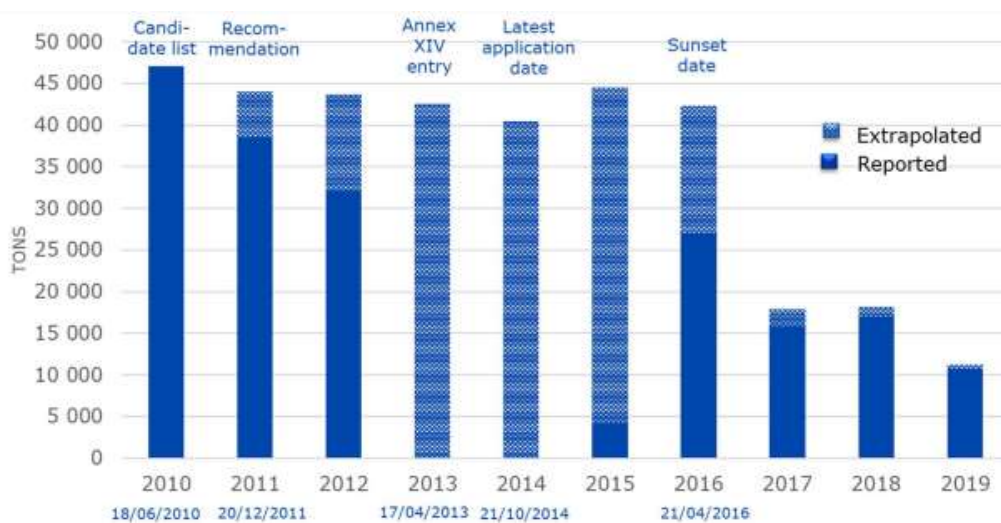


Abbildung 1: Mengen des importierten oder in der EU hergestellten TCE [9]

Regulierung

TCE ist krebserregend und steht unter Verdacht, erbgutschädigend zu sein. Es steht auf der Liste der besorgniserregenden Stoffe und ist zulassungspflichtig nach der REACH-VO (Annex XIV) [10]. Derzeit sind in der EU 15 Zulassungen für die Verwendung von TCE gültig, der Großteil davon für eine Verwendung als Lösungsmittel [9]. Derzeit liegen keine Informationen über geplante zusätzliche Beschränkungen vor.

Nachhaltigkeitsrelevanz

TCE wird für die Herstellung der Galliumarsenid-Schicht (GaAs) für Dünnschicht-PV-Module verwendet. Nur 1 µm eines direkten GaAs-Halbleiters reicht aus, um die gleiche Menge an Photonenlicht zu absorbieren wie 100 µm eines indirekten Silizium-Halbleiters [11]. TCE kann auch für das chemische Recycling von PV-Modulen eingesetzt werden [12], [13]. Durch die Verwendung von TCE als Lösungsmittel für Ethylvinylacetat (bei 80°C für 10 Tage) konnte die Silikonzelle ohne Beschädigungen zurückgewonnen werden [14].

Substitution

Für TCE sowie für die anderen in diesem Bericht behandelten Stoffe, gibt es mehrere technisch mögliche Substitute. Bei der Auswahl der Substitute sind neben der technischen Eignung auch die besorgniserregenden Eigenschaften der jeweiligen Stoffe zu berücksichtigen. Tabelle 2 zeigt die identifizierten möglichen Substitute für TCE, ihre besorgniserregenden Eigenschaften und ihre derzeitige Regulierung. Dies stellt keine allgemeine Empfehlung für individuelle Substitution dar, da jedes potenzielle Substitut in Bezug auf die konkrete Anwendung im Einzelfall geprüft werden muss.

Für die Reinigung von Metallteilen wurde TCE durch Perchlorethylen (PER) substituiert [15]. Allerdings hat PER mehrere unerwünschte Eigenschaften: Es erfüllt die Kriterien für Persistenz (P), aber nicht für Bioakkumulation (B) und Toxizität (T), ist hautreizend, augenreizend, hautsensibilisierend und möglicherweise krebserregend [9]. Es ist nicht anzunehmen, dass eine Substitution von TER durch PER zu einer Reduktion der stoffbedingten Risiken führt [16]. Andere Alternativen für TCE bei der Reinigung von Metallteilen sind:

- Kohlenwasserstoff-Lösungsmittel (besorgniserregend: Entflammbarkeit)
- Dichlormethan (besorgniserregend: Carc 2).
- n-Propylbromid (besorgniserregend: Repr 1B und Entflammbarkeit)
- Fluorierte Lösungsmittel (besorgniserregend: Treibhausgas)
- Wässrige Reinigung
- Plasma- und Koronareinigung
- Naturöl-Ester
- Reiniger auf Basis sauerstoffhaltiger Kohlenwasserstoffe [15]

Von der Verwendung fluorierter Lösungsmittel ist jedoch abzusehen, da sie zur Gruppe der Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) gehören. PFAS sind schwer abbaubar und werden sich, wenn die Freisetzung anhält, in der Umwelt anreichern, wo sie Grundwasser, Oberflächengewässer und Böden verunreinigen [17]. Aus diesem Grund wurde im Februar 2023 ein Vorschlag der ECHA für ein europäisches Verbot von PFAS veröffentlicht. Darin wird ein vollständiges Verbot des Inverkehrbringens von PFAs, sowohl als eigenständiger Stoff als auch als Bestandteil anderer Substanzen, Gemischen oder Produkten (über einem Grenzwert von 25 ppb bzw. 50 ppm je nach Stoff) empfohlen. Eine Übergangsfrist von 18 Monaten ist vorgesehen [18].

Als Lösungsmittel für Bitumen in Asphalt könnte Toluol anstelle von TCE verwendet werden [9]. Ein weiterer Stoff, der zur Substitution von TCE geeignet ist, ist Octansäuremethylester (OME) [19]. In der Bitumenextraktion aus Asphalt mit OME gibt es keine signifikanten Unterschiede. Bei der Lösungsmittelrückgewinnung lässt sich OME nicht vollständig von der Bitumenphase trennen, was die physikalischen Eigenschaften der Bitumenphase verändert [20].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 2: Vergleich von Trichlorethylen und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ¹
79-01-6	Trichlorethylen	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) - Kann vermutlich genetische Defekte verursachen (H341) - Kann Krebs verursachen (H350) - Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung (H412) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Zulassungspflichtig 	70,40 €/l bei Thermo Fisher
127-18-4	Perchlorethylen	<ul style="list-style-type: none"> - Kann vermutlich Krebs verursachen (H351) - Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung (H411) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	71,40 €/l bei Fisher Scientific
71-55-6	1,1,1-Trichlorethan (Kohlenwasserstoff-Lösungsmittel)	<ul style="list-style-type: none"> - Treibhauspotential 193 - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Führt zu Ozonabbau in der äußeren Atmosphäre (H420) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	k.A.
75-09-2	Dichlormethan	<ul style="list-style-type: none"> - Treibhauspotential 11 - Kann vermutlich Krebs verursachen (H351) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	63,60 €/l bei Merck
106-94-5	n-Propylbromid	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) - Kann die Organe schädigen (H373) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen und vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen (H360FD) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Zulassungspflichtig 	83,60 €/l bei Fisher Scientific

¹ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]-[24]	Preis ²
920-66-1	Hexafluoroisopropanol (Fluorierte Lösungsmittel)	<ul style="list-style-type: none"> - Treibhauspotential 221 - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (H361) - Kann die Organe schädigen (H373) 	- CLP	2.728, -- €/l bei Fisher Scientific
108-88-3	Toluol	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein (H304) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) - Kann die Organe schädigen (H373) - Kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen (H361D) 	- CLP	72 €/l bei Fisher Scientific
111-11-5	Octansäuremethylester	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht klassifiziert 	- keine	836,-- €/kg bei Fisher Scientific

² Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Nonylphenol, ethoxyliert (CAS-Nr.: 9016-45-9)

Verwendung

Die Stoffgruppe der Nonylphenoethoxylate sind nichtionische Tenside [25]. Dabei sind Nonylphenol, ethoxyliert (CAS-Nr.: 9016-45-9) und 4-Nonylphenol, ethoxyliert (CAS-Nr.: 26027-38-3) die beiden wichtigsten kommerziellen NPEs [26]. Im Folgenden wird auf Nonylphenol, ethoxyliert (NPE, CAS-Nr.: 9016-45-9) eingegangen. NPE kann in Reinigungs- oder Waschmitteln, in Schutzbeschichtungen und als oberflächenaktiver Stoff zur Herstellung anderer Chemikalien eingesetzt werden [27]. Des Weiteren kann NPE auch als Additiv in Fracking-Flüssigkeit zur Förderung von Erdgas verwendet werden [28], [29]. NPE wird dabei als Tensid zur Verminderung der Oberflächenspannung eingesetzt [29].

Regulierung

NPE ist auf der Liste der besorgniserregenden Stoffe [22] und auf der Liste der zulassungspflichtigen Stoffe [23]. Zusätzlich ist der Einsatz von NPE beschränkt. NPE darf in einer Konzentration > 0,1 Gewichtsprozent in Stoffen oder Gemischen nicht für folgende Zwecke verwendet werden:

- industrielle Reinigung (ausgenommen in geschlossenen Reinigungssystemen)
- Haushaltsreinigung
- Textil -und Lederverarbeitung (ausgenommen Systeme mit spezieller Prozesswasserbehandlung)
- Metallbearbeitung (ausgenommen in kontrollierten geschlossenen Systemen, bei denen die Waschflüssigkeit recycelt oder verbrannt wird)
- Herstellung von Zellstoff oder Papier
- Kosmetikprodukte
- Sonstige Körperpflegeprodukte (ausgenommen Spermizide)
- Beistoffe in Pestiziden und Bioziden (mit Ausnahmen) [30]

Nachhaltigkeitsrelevanz

NPE kann auch in der Medizin, beispielsweise für Grippeimpfstoffe, verwendet werden [31]. Durch Zentrifugation in Gegenwart von NPE werden aus dem Influenzaviruspartikel die Oberflächenantigene, Hämagglutinin und Neuraminidase gewonnen. Das NPE wird anschließend aus dem Oberflächenantigenpräparat entfernt [32]. Sollte NPE im Impfstoff zurückbleiben, ist die Menge sehr gering (< 0,015 % des Gewichts der Lösung im Gesamtvolumen der Lösung für den monovalenten Influenza A H1N1 Impfstoff von Novartis) [31].

Substitution

Die einfachste Substitutionsmöglichkeit für industrielle Anwendungsbereiche von NPE ist das Verwenden anderer Alkylphenoethoxylate (APE; z.B.: Alkoholethoxlate und Kohlenhydratderivate auf Glukosebasis wie Alkylpolyglucosid, Glucamide und Glucaminoxide). Silikontenside können NPE bei der Herstellung von Polyurethanschaum ersetzen. In Fotofinishing-Lösungen können Naphthalenkondensate anstelle von NPE verwendet werden [25].

Im Rahmen des Design for the Environment (DfE) Programms [33] und des NP/NPE Aktionsplans [25] der US Environmental Protection Agency werden acht sicherere Alternativen, welche die DfE-Kriterien erfüllen, vorgestellt:

- C9-11-Alkohole, ethoxyliert 6EO (68439-46-3)
- C12-15-Alkohole, ethoxyliert 9EO (68131-39-5)
- Oxiran, methyl-, Polymer mit Oxiran, Mono(2-ethylhexylether) (64366-70-7) (Ecosurf EH-9)
- D-Glucopyranose, oligomer, Decyloctylglycoside (68515-73-1)
- Benzolsulfonsäure, C10-13-Alkylderivate, Natriumsalz (68411-30-3)
- Natriumlaurylsulfat (151-21-3)
- Polyoxy(1,2-ethandiyl), alpha-Sulfo-omega-dodecyloxy-, Natriumsalz (9004-82-4)
- Sorbitanmonostearat (1338-41-6)

Allen acht Alternativen wurde auf der Grundlage experimenteller Daten entweder eine niedrige oder eine sehr niedrige Gefahrenstufe für die Persistenz zugeordnet. Die Gefahreneinstufungen für die akute aquatische Toxizität reichen von mäßig (Ecosurf EH-9; D-Glucopyranose, oligomer, Decyloctylglycoside) bis sehr hoch (C12-15 Alkohole, ethoxylierte 9EO). Alle wurden mit einer hohen Gefährdungsstufe für chronische aquatische Toxizität eingestuft, mit Ausnahme von D-Glucopyranose, oligomer, Decyloctylglycoside (mäßige Gefährdung auf der Grundlage experimenteller Daten) und Ecosurf EH-9 (mäßige Gefährdung; geschätzt auf der Grundlage experimenteller Daten zur akuten Toxizität und Expertenurteil). Bei keinem dieser Stoffe gibt es bedenkliche biologische Abbauprodukte [34].

Auf der Suche nach geeigneten Substituten für NPE wurden in einer weiteren Studie folgende Stoffalternativen mit NPE verglichen: Alkohol-Ethoxylat-9 (AEO₉), sekundäres Alkohol-Ethoxylat-9 (SAE₉), isomeres Alkohol-Ethoxylat-9 (TO₉) und Nonylcyclohexanol-Ethoxylat (NCEO_n). NCEO₇ verfügte dabei über die beste Emulgierfähigkeit und NCEO₁₁ über die besten Reinigungseigenschaften. NCEO_n hat auch eine geringere Toxizität für Wasserorganismen und kommt deshalb als umweltfreundlicheres Substitut für NPE in Frage [35].

Jedes potenzielle NPE-Substitut muss von Fall zu Fall bezüglich seiner funktionellen Eigenschaften und seines Sicherheitsprofils bewertet werden. Obwohl die Stoffalternativen die Eigenschaften eines echten Tensids aufweisen, hängt ihre Fähigkeit NPE zu ersetzen von der jeweiligen Leistungsanforderung einer Formulierung ab [34]. Neben den stoffspezifischen Eigenschaften ist die Marktakzeptanz der potenziellen Substitute auch von preislichen Faktoren abhängig [25]. Oft wird NPE auch mit einer Mischung aus zwei oder mehr Tensiden ersetzt. Abhängig vom Produkttyp kann die Verwendung eines anderen Tensides weitere Änderungen in der Produktformulierung notwendig machen [34]. Zur Substitution von NPE für die Impfstoffherstellung sind derzeit keine Daten verfügbar.

Chemikalien-Substitution

Tabelle 3: Vergleich von Nonylphenol, ethoxyliert und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ³
9016-45-9	Nonylphenol, ethoxyliert	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung (H411) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Zulassungspflichtig - Beschränkung 	544, -- €/l bei Merck Millipore
59122-55-3	Dodecylglucosid (Alkylpolyglucosid)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	450.000, -- €/kg bei Merck Millipore
87246-72-8	Lauroylmethylglucoamid (Glucamid)	<ul style="list-style-type: none"> - k.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - k.A. 	k.A.
27306-78-1	mit Polyalkylenoxiden modifiziertes Heptamethyltrisiloxan (Silikontensid)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung (H411) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	1074,65 €/l bei Fisher Scientific
68439-46-3	C9-11-Alkohole, ethoxyliert 6EO	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	87,60 €/kg bei Merck
68131-39-5	C12-15-Alkohole, ethoxyliert 9EO	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	k.A.
64366-70-7	Oxiran, methyl-, Polymer mit Oxiran, Mono(2-ethylhexylether), (Ecosurf EH-9)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H412) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	101,60 €/l bei Fisher Scientific

³ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ⁴
68515-73-1	D-Glucopyranose, oligomer, Decyloctylglycoside Octyl- oder Decyl-Glyceride	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) 	- CLP	131,20 €/l bei Merck
68411-30-3	Benzolsulfonsäure, C10-13-Alkylderivate, Natriumsalz	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H412) 	- CLP	k.A.
151-21-3	Natriumlaurylsulfat	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H412) 	- CLP	1.700, -- €/kg bei Merck
9004-82-4	Natriumdodecylpoly(oxyethylen)sulfat	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) 	- CLP	k.A.
1338-41-6	Sorbitanmonostearat	- Keine Klassifizierung	- CLP	69,10 €/kg bei Merck
k.A.	Nonylcyclohexanol-Ethoxylat (NCEO _n)	- k.A.	- k.A.	k.A.

⁴ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Bisphenol A (BPA, CAS-Nr.: 80-05-7)

Verwendung

Bisphenol A (BPA) wird als Ausgangsstoff zur Herstellung von Polycarbonat-Kunststoffen oder Epoxidharzen verwendet [36]. Die wichtigste Anwendung von BPA ist dabei die Herstellung von Polycarbonat (64 % des gesamten BPA-Verbrauchs) [37]. Nichtpolymerisiertes BPA wird als Additiv verwendet (z.B.: Farbentwicklungskomponente in Thermopapier, Antioxidans bei Hochtemperaturkabeln und Reifen) [36]. Zusätzlich ist BPA Ausgangsstoff in der Herstellung von Tetrabrombisphenol A (TBBPA), welches als Flammschutzmittel eingesetzt wird [38]. In der Zahnmedizin werden sogenannte zahntechnische Komposite, die auf BPA basieren, eingesetzt (Bisphenol A-Glycidylmethacrylat oder Bisphenol A-Dimethacrylat) [36].

Regulierung

BPA ist unter REACH reguliert und steht auf der Liste der SVHC-Stoffe [39]. Zusätzlich ist die Verwendung von BPA beschränkt. Die Beschränkung bezieht sich auf das Inverkehrbringen von Thermopapier mit einer BPA-Konzentration von mehr als 0,02 Gewichtsprozent [40].

Zusätzlich ist die Verwendung von BPA bei der Herstellung von Säuglingsflaschen aus Polycarbonat in der Europäischen Union vollständig verboten. Die Beschränkung, die 2011 durch die Verordnung (EU) Nr. 321/2011 eingeführt wurde, gilt für die Herstellung und das Inverkehrbringen von Säuglingsflaschen aus Polycarbonat, die BPA enthalten [41].

Im Labortest an Mäusen zeigt BPA eine schädigende Wirkung auf das Immunsystem. Um gesundheitliche Risiken für den Menschen zu minimieren, wurde 2023 der TDI (Tolerable Daily Intake) für BPA von der EFSA von 4 µg/kg Körpergewicht auf 0,2 ng/kg Körpergewicht gesenkt [42]. BPA darf gemäß der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 der Europäischen Union über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, nur eingeschränkt in Lebensmittelkontaktmaterialien verwendet werden [43]. Laut dieser Verordnung gilt für BPA ein spezifischer Migrationsgrenzwert (SML) von 0,05 mg/kg Lebensmittel für Polycarbonatmaterialien und 0,6 mg/kg Lebensmittel für Epoxidharze, die als Beschichtungen in Lebensmittelkontaktmaterialien verwendet werden. Das bedeutet, dass die Menge an BPA, die aus dem Lebensmittelkontaktmaterial in Lebensmittel übergehen kann, auf diese spezifischen Werte begrenzt ist [44].

Ein Antrag auf eine weitere Beschränkung von BPA unter REACH wurde 2022 bei der ECHA eingereicht [45], [46]. Dieser Antrag schlägt eine Beschränkung des Inverkehrbringens von Gemischen und Gegenständen vor, deren Konzentration an BPA mehr als 10 ppm bzw. 0,001 Gewichtsprozent oder mehr beträgt. Nicht in den Bereich dieser Beschränkung fallen Gemische und Gegenstände, bei denen entweder an eine Matrix gebunden sind (z.B.: über die Funktion als Vernetzer) oder als Zwischenprodukte bei der Herstellung von Polymeren verwendet werden und für die während der gesamten Lebensdauer der Kontakt mit wässrigen Medien in jeder Form ausgeschlossen werden kann oder der Migrationsgrenzwert der jeweiligen Gemische und Erzeugnisse 0,04 mg/L über die gesamte Nutzungsdauer nicht überschreitet [45].

Nachhaltigkeitsrelevanz

BPA kann zur Herstellung von Polycarbonat verwendet werden [36]. Polycarbonat ist ein Kunststoff, der unter anderem in verschiedenen Anwendungen zur Erzeugung erneuerbarer Energien verwendet werden kann, zum Beispiel für:

- Sonnenkollektoren (als Material für die Schutzabdeckungen von Solarzellen) [47]
- Blätter von Windkraftanlagen [48], [49]
- Gehäuse für elektrische Komponenten, die in Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien eingesetzt werden [50]–[52]

BPA wird auch für medizinischen Zwecke eingesetzt. Es ist beispielsweise in Klebstoffen und Dichtungsmitteln in der Zahnmedizin, Kathetern, Implantaten, Inkubatoren für die Neugeborenenversorgung, Hämodialysatoren und kardiopulmonalen Bypass-Maschinen enthalten [53].

Substitution

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Substitution von BPA:

- Direkte Substitution durch einen anderen Stoff
- Substitution durch einen anderen Kunststoff
- Substitution durch ein anderes Material bzw. einen anderen Werkstoff
- Substitution durch einen Prozess [54]

Substitution durch einen anderen Stoff

In der Praxis bereits verwendete Substitute für BPA in Kunststoffen sind Bisphenol F (BPF), Bisphenol S (BPS) [55], [56], Bisphenol AF (BPAF) und das kürzlich entwickelte Tetramethylbisphenol F (TMBPF) [57]. Aufgrund ihrer ähnlichen chemischen Struktur und Eigenschaften wird davon ausgegangen, dass die gesamte Gruppe der Bisphenole dieselben endokrin wirksamen Eigenschaften aufweist [3], [55], [56].

Die Eigenschaften und Wirkung von BPA sind bereits gut untersucht und dokumentiert und als Folge wurde BPA unter REACH reguliert. Im Gegensatz dazu ist das ED-Assessment (Bewertung von endokrin wirksamen Stoffen) von BPS noch in Bearbeitung und der Stoff wurde noch nicht auf die Liste der besorgniserregenden Stoffe aufgenommen, obwohl anzunehmen ist, dass BPS über ähnliche besorgniserregende Eigenschaften verfügt wie BPA [3]. Wird anstelle von BPA BPS verwendet, liegt eine sogenannte „regrettable Substitution“ bzw. bedauerliche Substitution vor. Das bedeutet, dass ein Stoff durch einen anderen Stoff ersetzt wurde, der mindestens genauso gefährlich oder sogar noch gefährlicher ist, als der ursprüngliche Stoff. Produkte, die als „BPA-frei“ vermarktet werden, können dennoch stattdessen genauso gefährliche BPA-Substitute wie beispielsweise BPS enthalten [3].

Die Ursache für „regrettable Substitution“ ist meist der Mangel an Informationen über den alternativen Stoff, während die zu ersetzenden Stoffe bereits ausführlich untersucht wurden (wie es bei BPA und BPS der Fall ist). In diesen Fällen wird davon ausgegangen, dass im Fall, wenn keine Daten über die jeweiligen Substitute vorliegen, diese auch keine Risiken darstellen [3]. In Labortests an Ratten und menschlichen Stammzellen wurde die Toxizität von BPAF, TMBPF und BPS untersucht und mit der Toxizität von BPA verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass BPAF und TMBPF eine höhere Toxizität und BPS eine geringere Toxizität als BPA aufweisen. Bei all diesen Stoffen liegt nach den Ergebnissen der Untersuchung eine „regrettable Substitution“ von BPA vor [57].

Zur Identifikation geeigneter Substitute für den Einsatz von BPA als Entwickler in Thermopapier wurde von der US Environmental Protection Agency eine Studie durchgeführt [58]. In dieser Studie wurden 19 Stoffalternativen zur Substitution von BPA in Thermopapier evaluiert und verglichen. Dabei wurden folgende Evaluierungskriterien angewandt: menschliche Gesundheit, Ökotoxizität und Umweltauswirkungen (basierend auf den Alternatives Assessment Criteria for Hazard Evaluation des Design for the Environment Programms). Die untersuchten Stoffe umfassten beispielsweise verschiedene Bisphenole (z.B.: BPF, BPC, BPS, BPAP), Methyl 2-hydroxybutanoat (MBHA), Benzyl 4-hydroxybenzoat (PHBB), Pergafast 201, 4,4'-Bis(N-carbamoyl-4-methylbenzene-sulfonamide)diphenylmethan (BTUM) oder Urea Urethane Compound (UU). Da alle der untersuchten Stoffe moderate oder hohe Humantoxizität oder aquatische Toxizität aufweisen, konnte in der Studie keine sichere Alternative für BPA identifiziert werden [58].

Ein weiteres mögliches Substitut für BPA im Kunststoffbereich ist das Ligninderivat Bisguaiacol F (BGF). Dieser Stoff kann aus dem in der Papierindustrie anfallenden Lignin hergestellt werden [59]. In Labortests konnte für BGF keine östrogene Aktivität nachgewiesen werden, was es zu einer umweltfreundlichen Alternative zu BPA macht, die auch für den Kontakt mit Lebensmitteln (z.B.: in Lebensmittelverpackungen) geeignet ist [60].

Substitution durch einen anderen Kunststoff bzw. einen anderen Werkstoff

Eine weitere Möglichkeit, den Einsatz von BPA zu vermeiden, ist die Verwendung von Kunststoffen, die kein BPA enthalten und für deren Herstellung kein BPA benötigt wird. Diese Kunststoffe sind beispielsweise Polyethylenterephthalat (PET), High-Density Polyethylen (HDPE), Low-Density Polyethylen (LDPE), Polypropylen (PP) oder Polystyrol (PS) [61]. Andere Kunststoffe, die anstelle von BPA-haltigen Kunststoffen verwendet werden können, sind unter anderem Polyethersulfon (PES), Polyphenylsulfon (PPS), Polymilchsäuren (PLA), Melamin-Materialien, Methylmethacrylatpolystyrol, Methylpolymethacrylat, Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS). Diese Kunststoffe können in der Verpackung von Lebensmitteln, Kosmetikprodukten oder Medizinprodukten (z.B.: in Blisterverpackungen oder Dialysekassetten) Anwendung finden [62].

Eine weitere Möglichkeit die Verwendung von BPA zu vermeiden, ist der Einsatz anderer Werkstoffe. So können beispielsweise anstelle von BPA-haltigen Kunststoffen Materialien wie Glas (z.B.: für Lebensmittelverpackungen), Edelstahl (z.B.: für Behälter zur Lebensmittelaufbewahrung), Keramik (z.B.: für Küchenutensilien) oder Silikon (z.B.: für Babyflaschen) eingesetzt werden [62].

Substitution durch einen anderen Prozess

BPA kann auch durch andere Verfahren ersetzt werden. BPA wird häufig als Monomer bei der Herstellung bestimmter Arten von Kunststoffen wie Polycarbonat und Epoxidharzen verwendet [36]. Es gibt jedoch alternative Produktionsmethoden, die zur Herstellung dieser Kunststoffarten ohne BPA verwendet werden können. Beispielsweise wurde eine Methode entwickelt, um Polycarbonate aus Limonen und CO₂ herzustellen [63]. Limonen kann aus Zitronen oder Orangen gewonnen werden und ist somit biobasiert. Dieses von Limonen abgeleitete Polymer hat zudem eine höhere Glasübergangstemperatur als konventionelle Polycarbonate [64].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 4: Vergleich von Bisphenol A und seinen potenziellen chemischen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ⁵
80-05-7	Bisphenol A	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen (H360F) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Beschränkung 	42,80 €/kg bei Fisher Scientific
620-92-8	Bisphenol F	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H412) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	28.100,-- €/kg bei Fisher Scientific
80-09-1	Bisphenol S	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das Kind im Mutterleib schädigen und vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen (H360FD) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	392, -- €/kg bei Merck Millipore
1478-61-1	Bisphenol AF	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (H360) - Kann die Organe schädigen (H373) - Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	460, -- €/kg bei Merck Millipore
5384-21-4	Tetramethylbisphenol F	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	34.000, -- €/kg bei Fisher Scientific

⁵ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ⁶
79-97-0	Bisphenol C	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H411) 	- CLP	2.120, -- €/kg bei Fisher Scientific
1571-75-1	Bisphenol AP	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400), mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	460, -- €/kg bei Merck Millipore
5129-00-0	Methyl 2-hydroxybutanoat (MBHA)	- k.A.	- k.A.	k.A.
94-18-8	Benzyl 4-hydroxybenzoat (PHBB)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) 	- CLP	530, -- €/kg bei Merck Millipore
232938-43-1	Pergafast 201	- Giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H411)	- CLP	2.150, -- €/kg bei Toronto Research Chemicals
151882-81-4	4,4'-Bis(N-carbamoyl-4-methylbenzenesulfonamide)diphenylmethan (BTUM)	- Kann vermutlich Krebs verursachen (H351)	- CLP	k.A.
321860-75-7	Urea Urethane Compound (UU)	- Nicht klassifiziert	- CLP	k.A.
k.A.	Bisguaiacol F (BGF)	- k.A.	- k.A.	k.A.
138-86-3	Limonen	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400), mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	330, -- €/l bei Merck Millipore

⁶ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP, CAS-Nr.: 872-50-4)

Verwendung

NMP wird als dipolares aprotisches Lösungsmittel in Beschichtungen, Reinigungsmitteln, für die Herstellung elektronischer Geräte, in der Halbleiterindustrie, in der petrochemischen Verarbeitung, in Arzneimitteln und in Agrochemikalien verwendet. Man benötigt es für die Herstellung von Beschichtungen, Farben, Verdünnern, Farbentfernern, Tinten und Tonern. Außerdem wird es als Netzmittel in der PVC-Herstellung und für die Herstellung von Polyurethanbeschichtungen [65] und in der Herstellung verschiedener Polymere (z.B.: Polyanilin, Polyimid, Polysulfone und andere Hochleistungsthermoplasten) eingesetzt [62]. Weitere Anwendungsbereiche von NMP sind das Dispergieren von Polyvinylidifluorid (PVDF) für Batterieelektroden, Herstellung von Polyamidimid (PAI)-Drahtlacken, Synthese von Feinchemikalien und Polymeren, Extraktion von Stoffen, Herstellung von Entlackungsprodukten und Dispergieren von Nanomaterialien wie Graphen [66].

Regulierung

NMP ist nach REACH reguliert und steht auf der Liste der besorgniserregenden Stoffe (SVHC) [65]. Die Anwendung von NMP ist beschränkt. Seit 9. Mai 2020 darf der Stoff nicht allein oder in Gemischen mit einer Konzentration von mehr als 0,3 % in Verkehr gebracht werden. Eine Ausnahme dafür besteht, wenn Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender in den Sicherheitsdatenblättern und Stoffsicherheitsberichten DNEL-Werte (Derived No-Effect Levels) für die Exposition von Arbeitnehmer:innen ausweisen, die unter einem festgelegten Grenzwert liegen (14,4 mg/m³ für die Exposition durch Einatmen und 4,8 mg/kg/Tag für die Exposition über die Haut). Eine weitere Ausnahme für den Einsatz von NMP liegt vor, wenn Hersteller und nachgeschaltete Anwender durch geeignete Risikomanagementmaßnahmen sicherstellen können, dass die Exposition der Arbeitnehmer:innen unter den oben angeführten DNEL-Werten liegt. Die oben erwähnte Beschränkung gilt ab dem 9. Mai 2024 auch für das Inverkehrbringen zur Verwendung oder die Verwendung von NMP als Lösungsmittel oder Reaktanten bei der Beschichtung von Drähten [67].

Nachhaltigkeitsrelevanz

NPE wird für die Herstellung von Batterien eingesetzt und ist somit für Energiespeicherung wichtig. Es ist das gängigste Lösungsmittel für die Herstellung von Kathodenelektroden in der Batterieindustrie [68]. Die meisten Herstellungsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien verwenden NMP als Lösungsmittel für das Elektrodenbindemittel. Das als Lösungsmittel verwendete NMP wird anschließend zurückgewonnen und recycelt. Die fertigen Lithium-Ionen-Batterien enthalten kein NMP [69].

In der Medizin ist NMP eines der wichtigsten pharmazeutischen Co-Lösungsmittel [70] und wird für die Extraktion, Reinigung und Kristallisation von Arzneimitteln verwendet [71]. Es ist ein chemischer Penetrationsverstärker [72] und wird zur Verbesserung der transdermalen Abgabe von Arzneimitteln verwendet [73]. Präparate, die NMP als Adsorptionsverstärker enthalten können, sind beispielsweise Lidocain [74], Insulin [75], Estradiol [76] oder Ibuprofen [77]. Weitere medizinische Präparate, die NMP enthalten, sind beispielsweise Leuprolidacetat (zur Behandlung von Prostatakarzinomen, Brustkrebs und Endometriose [78]) oder Doxycyclin-Hyclat-Gel (zur Behandlung bakterieller Parodontalerkrankungen [79]).

Substitution

Zur Substitution von NMP können verschiedene Stoffe eingesetzt werden. Beispiele dafür sind N-Ethylpyrrolidon (NEP), Dimethylformamide (DMF), Dimethylacetamid (DMAc), Aceton, Methylethylketon (MEK), Gamma-Butyrolacton (GBL) oder Dichlormethan (DCM). Diese Stoffe können NMP in unterschiedlichen Anwendungen (z.B.: als Lösungsmittel, in Reinigungsmitteln für die industrielle Reinigung oder in der Herstellung von Beschichtungen) ersetzen [62].

In einem Forschungsprojekt der Universität York wurden biobasierte Lösungsmittel als Alternative zu NMP verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass keiner der untersuchten Stoffe NMP in allen Anwendungsbereichen ersetzen kann, sondern die potenziellen Lösungsmittelalternativen für jeden Anwendungsfall einzeln bewertet werden müssen [66]. Zur Untersuchung von biobasierten Substituten für NMP wurden 29 Stoffe für 13 verschiedene Anwendungsbereiche getestet und verglichen. Zehn dieser Stoffe wurden allerdings aus Vertraulichkeitsgründen nicht namentlich genannt, sondern nur hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften beschrieben [66]. Von diesen vertraulichen Stoffen ist ein Stoff eine vielversprechende Alternative zum Abbeizen (Code OT16) und zwei Stoffe sind sehr gute Lösungsmittel für PVC und PS (OT16 und LG64). Zwei dieser Stoffe (LG6 und LG64) können für die nukleophile Fluorierung eingesetzt werden. Allerdings verläuft diese in den genannten Stoffen langsamer als in NMP [66].

N-Butylpyrrolidinon und N,N'-Dibutyl-N,N'-Dimethylsuccinamid wurden in den Tests als gute Lösungsmittel für PES (Polysulfone) und PAI (Polyamidimide) identifiziert. Zur Herstellung einer PES-Membran ist N,N'-Dibutyl-N,N'-Dimethylsuccinamid geeignet. Bei der Graphen-Dispersion kann Cyrene NMP ersetzen. Bei der Kohlenwasserstoffextraktion haben Cyrene und 1,6-Anhydro-3,4-Dideoxy-Hexopyranose eine vergleichbare oder bessere Selektivität als NMP bei niedrigem Aromatengehalt gezeigt. Dies geht jedoch häufig mit einem Rückgang der Masseneffizienz einher. Die Heck-Reaktion kann auch in N-Butylpyrrolidinon und N,N'-Dibutyl-N,N'-Dimethylsuccinamid durchgeführt werden, verläuft aber ebenfalls langsamer als in NMP. Zur Aktivierung von C-H-Bindungen können spiro[6,8-Dioxabicyclo[3.2.1]octane-4,2'-[1,3]Dioxolan] und N-Butylpyrrolidinon NMP ersetzen. Bei der heterozyklischen Synthese erzielte 1,6-Anhydro-3,4-Dideoxy-Hexopyranose bessere Ergebnisse als NMP, während N-Butylpyrrolidinon und 1,6-Anhydro-3-Deoxy-4-O-Methyl-Hexopyranose ebenfalls geeignete Substitute sind [66].

2,5,7,10-Tetraoxaundecane (TOU) und Elcosol DM haben sehr ähnliche physikalische Eigenschaften wie NMP und sind mit einer Vielzahl an Polymeren kompatibel. Deshalb sind viele der Synthesen und Polymerisationen, die in NMP durchgeführt werden, auch in TOU oder Elcosol DM möglich. Eine weitere Alternative ist 1,3-Dioxolan. Es ist volatil als NMP aber hat eine ähnliche Lösungskraft wie NMP [80]. Dimethylsulfoxid (DMSO) ist eine weitere mögliche Alternative, die vergleichbare physikalische Eigenschaften zu NMP aufweist (beide Stoffe haben hohe Flammpunkte, niedrige Dampfdrücke und vergleichbare Lösungsmittelparameter) [81].

In der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien kann NMP durch Dimethylformamid (DMF) ersetzt werden [68]. Für die Synthese von Polyurethan-Dispersionen können Dihydrolevoglucosenon (Cyrene) oder Gamma-Valerolacton eingesetzt werden [82]. Cyrene ist eine biologisch abbaubare Verbindung, die in einem zweistufigen Verfahren aus Zelluloseabfällen synthetisiert wird [83], und nach aktuellem Stand der Forschung eine Alternative zu dipolaren aprotischen Lösungsmitteln darstellt [84]. Gamma-Valerolacton ist ein biologisch abbaubarer Stoff, der aus lignozellulosehaltiger Biomasse gewonnen [85] und häufig in der Lebensmittel- und Parfümindustrie verwendet wird [86]. Kürzlich wurde über neue Anwendungen als grünes Lösungsmittel in der chemischen Industrie berichtet [82]. Laut Chemsec Marketplace wird Cyrene bereits von einem Kund:innen in der Elektronikchemie als biobasierte Alternative zu dipolaren aprotischen Lösungsmitteln auf petrochemischer Basis eingesetzt [87].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 5: Vergleich von 1-Methyl-2-Pyrrolidon und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ⁷
872-50-4	1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Beschränkung 	185,80 €/l bei Thermo Fisher
2687-91-4	1-Ethyl-2-pyrrolidon (NEP)	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	686, -- €/kg bei Thermo Fisher
68-12-2	N,N-Dimethylformamid (DMF)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Beschränkung 	107, -- €/l bei Thermo Fisher
127-19-5	N,N-Dimethylacetamid (DMAC)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC 	58,40 €/l bei Merck Millipore
67-64-1	Aceton	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	8, -- €/l bei Thermo Fisher
78-93-3	Methylethylketon (MEK); Butanon	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	9,52 €/l bei Thermo Fisher
96-48-0	Gamma-Butyrolacton (GBL)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	71,20 €/l bei Merck
75-09-2	Dichlormethan (DCM); Methylenchlorid	<ul style="list-style-type: none"> - Treibhauspotential 11 - Kann vermutlich Krebs verursachen (H351) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	63,6 €/l bei Merck

⁷ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ⁸
k.A.	N,N'-Dibutyl-N,N'-Dimethylsuccinamid	- k.A.	- k.A.	k.A.
k.A.	1,6-Anhydro-3,4-Dideoxy-Hexopyranose	- k.A.	- k.A.	k.A.
k.A.	spiro[6,8-Dioxabicyclo[3.2.1]octan-4,2'-[1,3]Dioxolan]	- k.A.	- k.A.	k.A.
k.A.	1,6-Anhydro-3-Deoxy-4-O-Methyl-Hexopyranose	- k.A.	- k.A.	k.A.
3470-98-2	N-Butylpyrrolidinon; 1-butylpyrrolidin-2-on	- Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319)	- CLP	79,90 €/l bei Merck
4431-83-8	2,5,7,10-Tetraoxaundecane (TOU)	- Nicht klassifiziert	- CLP	64,50 €/l bei Carl Roth
59039-15-5	Elcosol DM 4,8-Dimethyl-2,5,7,10-tetraoxaundecane	- Nicht klassifiziert	- CLP	k.A.
67-68-5	Dimethylsulfoxid (DMSO)	- Nicht klassifiziert	- CLP	121, -- €/l bei Thermo Fisher
53716-82-8	Dihydrolevoglucosenone (Cyrene) 6,8-Dioxabicyclooctan-4-one	- Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H411)	- CLP	215, -- €/l bei Merck
108-29-2	Gamma-Valerolacton	- Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319)	- CLP	222, -- €/l bei Thermo Fisher

⁸ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Glutaraldehyd (CAS-Nr.: 111-30-8)

Verwendung

Glutaraldehyd wird in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Aufgrund seiner Wirkung als Biozid kommt es als Desinfektionsmittel (z.B.: im medizinischen Bereich, Reinigung von Pipelines, in der Tierhaltung) oder als Konservierungsmittel (z.B.: in Kosmetika) zur Anwendung [88]. Glutaraldehyd ist dabei potenziell wirksam gegen eine Vielzahl an Mikroorganismen einschließlich grampositive und gramnegative Bakterien, Pilze (Hefen und Schimmelpilze), Biofilme und Viren [89].

In Gewerbe und Industrie wird Glutaraldehyd unter anderem für die Klebstoffherstellung, in der Photoindustrie und in Dichtungsmitteln und elektrischen Produkten verwendet. In der Erdölförderung wird es als Korrosionsschutzmittel zur Bekämpfung von korrosionsverursachenden Bakterien verwendet [90]. In der Ledergerbung wird Glutaraldehyd als alternative Methode zur Chromgerbung eingesetzt [91].

Regulierung

Glutaraldehyd wirkt beim Menschen reizend auf Augen, Haut und Atemwege und ist giftig für Wasserorganismen [92]. Durch seine gesundheitsschädlichen Eigenschaften führt der Einsatz von Glutaraldehyd zu potenziell erhöhten betrieblichen Kosten (z.B.: Krankenstand, Arbeitsschutzmaßnahmen). Sobald eine Person sensibilisiert wurde, kann eine weitere Exposition mit Glutaraldehyd die Symptome weiter verschlimmern (z.B.: kann berufsbedingtes Asthma auftreten) [93].

Glutaraldehyd wurde 2021 wegen seiner atemwegssensibilisierenden Eigenschaften auf die Liste der SVHC-Stoffe aufgenommen [94]. Nach der CLP-Regulierung ist es als giftig bei Verschlucken, lebensgefährlich bei Einatmen, atemwegs- und hautsensibilisierend und giftig für Wasserorganismen klassifiziert [89]. Zur Konservierung von Kosmetika ist Glutaraldehyd in einer maximalen Konzentration von 0,1 % erlaubt. Der Einsatz in Sprays ist verboten [95].

Nachhaltigkeitsrelevanz

Im medizinischen Bereich wird Glutaraldehyd als Desinfektionsmittel für chirurgische Instrumente, die nicht hitzesterilisiert werden können (z.B.: Dialyse-Instrumente, chirurgische Instrumente, Saugflaschen, Bronchoskope, Endoskope und Hals-Nasen-Ohren-Instrumente), eingesetzt [96]. Weitere Anwendungen in diesem Bereich sind als Fixiermittel für Gewebe in Histologie- und Pathologielabors, in Einbalsamierungslösungen, bei der Herstellung von Transplantaten und Bioprothesen oder als Härtemittel bei der Entwicklung von Röntgenbildern [88]. Im dentalmedizinischen Bereich kann Glutaraldehyde beispielsweise zur Behandlung überempfindlicher Zähne und in Dentinadhäsiven (Stoffe zur Vorbehandlung der Zähne bevor die Füllung gelegt wird) eingesetzt werden [97].

Glutaraldehyd ermöglicht eine chromfreie Ledergerbung. Da dadurch die Menge an Chromsalzen in den Gerbereiabfällen gänzlich reduziert wird, stellt die Ledergerbung mit Glutaraldehyd eine umweltfreundlichere Alternative zur Chromgerbung dar [98]. So werden gefährliche Abfälle und negative Auswirkungen auf die Umwelt reduziert. Das gegerbte Leder weist dabei eine sehr große Ähnlichkeit zu konventionell mit Chrom gegerbtem Leder auf [99].

Substitution

Ein ungefährlicher Ersatzstoff für Glutaraldehyd zur Instrumenten- und Flächendesinfektion ist Peressigsäure (PAA). PAA ist ein hochwirksames Biozid, das nach seinem Einsatz in Essig, Wasser und Sauerstoff zerfällt. Durch seinen Einsatz kann eine zuverlässige Desinfektion erreicht werden, ohne negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu verursachen [92]. Ein weiterer Vorteil der Anwendung von PAA ist seine schnelle Wirksamkeit (ca. 10 Minuten). Nachteile der Anwendung sind

die vergleichsweise hohen Kosten für das Desinfektionsmittel und die mögliche Korrosion von bestimmten Metallen (diese kann durch Zugabe eines Korrosionsschutzmittels verhindert werden) [93].

Ein weiteres mögliches Substitut zur Desinfektion ist super-oxidiertes Wasser [93], [100]. Super-oxidiertes Wasser wird durch die Elektrolyse von Natriumchlorid-haltigem Wasser zur Freisetzung von Oxychlorid-Ionen hergestellt. Es wirkt antimikrobiell, ohne dabei menschliche Körperzellen anzugreifen [101]. Super-oxidiertes Wasser wirkt schneller als Glutaraldehyd und ist nicht korrosiv. Aufgrund seiner Haltbarkeit von nur ca. 24 Stunden muss es bei Bedarf direkt vor Ort hergestellt werden [93]. Ethanol (in einer Konzentration von 60-70 %), Chlordioxid oder quaternäre Ammoniumverbindungen können ebenfalls als Desinfektionsmittel zur Bekämpfung von Mikroorganismen eingesetzt werden. Bei medizinischen Geräten ist dabei zu beachten, dass nur Stoffe verwendet werden, die laut Herstellerangaben für die Desinfektion geeignet sind, um Materialschäden zu vermeiden [93]. Bei quaternären Ammoniumverbindungen kann aufgrund der mangelhaften Datengrundlage eine Beeinträchtigung von Wasserorganismen nicht ausgeschlossen werden [102].

In einer Fallstudie zur Substitution von Glutaraldehyd als Desinfektionsmittel in Krankenhäusern wurde Ortho-Phthalaldehyd (OPA) als geeignetes Substitut identifiziert. Es weist ein geringeres Gesundheitsrisiko bei Inhalation auf und benötigt eine kürzere Wirkungsdauer für die Desinfektion [100]. Labortests kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass OPA eine geeignete Alternative zur Desinfektion mit Glutaraldehyd ist [103]. Ein Nachteil kann in der Verfärbung von Geweben und Schleimhäuten liegen [104].

Weitere potenzielle Substitute zur Desinfektion sind 5-Chloro-2-(4-Chlorophenoxy)-Phenol (DCPP) und Propan-2-ol [62]. Zur Konservierung von Kosmetika können Parabene (z.B.: Methylparaben), Methylisothiazolinon oder 2-Phenoxyethanol eingesetzt werden. In der Ledergerbung können Oxazolidine (z.B.: 4,4-Dimethyloxazolidin) statt Glutaraldehyd eingesetzt werden [62]. Für die chromfreie Gerbung können auch vegetabile Gerbstoffe aus Pflanzenteilen extrahiert und verwendet werden. Geläufige pflanzliche Gerbstoff-Quellen sind Mimosa, Quebracho und Tara. Europäische Gerbstoff-Quellen sind Kastanie und Eiche [105].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 6: Vergleich von Glutaraldehyd und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ⁹
111-30-8	Glutaraldehyd	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig bei Verschlucken (H301) - Lebensgefahr bei Einatmen (H330) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Kann bei Einatmen Allergie, asthmaartige Symptome oder Atembeschwerden verursachen (H334) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Kann die Atemwege reizend (H335) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) - Giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H411) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC 	90,80 €/kg bei Thermo Fisher
79-21-0	Peressigsäure (PAA)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	299, -- €/l bei Fisher Scientific
7790-92-5	Super-oxidiertes Wasser	<ul style="list-style-type: none"> - k.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - k.A. 	k.A.
64-17-5	Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	43,70 €/l bei Merck
10049-04-4	Chlordioxid	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig bei Verschlucken (H301) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	k.A.

⁹ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ¹⁰
68391-01-5	Benzyl-C12-18-alkyldimethyl-, Chloride (BAC C12-18) (Quaternäre Ammoniumverbindung)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) - Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	k.A.
643-79-8	(Ortho)Phthalaldehyd (OPA)	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig bei Verschlucken (H301) - Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann die Organe schädigen (H373) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400), mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	25.600,-- €/kg bei Merck
3380-30-1	5-Chloro-2-(4-Chlorophenoxy)-Phenol (DCPP)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400) - Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	k.A.
67-63-0	Propan-2-ol	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) 	- CLP	73,80 €/l bei Merck

¹⁰ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ¹¹
99-76-3	Methylparaben, d.i. Methyl 4-hydroxybenzoat (Paraben)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizungen (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung (H411) 	- CLP	72.500,-- €/kg bei Merck
2682-20-4	Methylisothiazolinon	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig bei Verschlucken und Hautkontakt (H301 + H311) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Lebensgefahr bei Einatmen (H330) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400), mit langfristiger Wirkung (H410) 	- CLP	14.740,-- €/kg bei Merck
122-99-6	2-Phenoxyethanol	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann die Atemwege reizen (H335) 	- CLP	65,40 €/l bei Merck
51200-87-4	4,4-Dimethyloxazolidin (Oxazolidin)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Giftig bei Hautkontakt oder Einatmen (H311+H331) - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) 	- CLP	k.A.

¹¹ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chromtrioxid (CAS-Nr.: 1333-82-0)

Verwendung

Chromtrioxid wird vorrangig für die Veredelung von Metallen, die Produktion von Holzschutzmitteln, die Herstellung von Katalysatoren, Chromdioxid und Pigmenten eingesetzt [62]. Das Verchromen von Metallen ist mit rund 84 % das größte Anwendungsfeld von Chromtrioxid [106]. Bei der ECHA sind über 1.000 Meldungen von Industrieanlagen, die Chromtrioxid in der EU für die Verchromung und Oberflächenbehandlung verwenden, eingegangen. Die jährliche Verwendung wird auf 7.000 t Chromtrioxid geschätzt [107], wobei die Branchen Automobilindustrie, Möbel und Sanitär den Großteil davon verarbeiten [106].

Regulierung

Chromtrioxid steht auf der Liste der SVHC-Stoffe. Seit dem „Sunset Date“ (21. September 2017) darf es gemäß REACH nicht mehr verwendet oder in Verkehr gebracht werden, wenn keine Zulassung für die Verwendung vorliegt. Dies schließt auch Lagerbestände und die wässrige Lösung des Chromtrioxid (Chromsäure) mit ein [108], [109].

Um sicherzustellen, dass Chromtrioxid im Rahmen der REACH-Verordnung weiterhin verwendet werden kann, haben verschiedene Hersteller- und Anwendergruppen wie CTAC sub (Chromium Trioxide Application Committee Submission Group), HAPOC oder FGK (Fachverband Galvanisierte Kunststoffe) Zulassungsanträge eingereicht [109]. Im Jahr 2020 hat die Europäische Kommission die Zulassung von Chromtrioxid für fünf von insgesamt sechs Verwendungen aus dem CTAC-Antrag erteilt [108]. Diese Verwendungen sind:

- Use 1: Formulierung der Verwendungen 2,4,5, und 6 (Reach/20/18/7 bis Reach 20/18/34)
- Use 2: Funktionelle (hartverchromte) Beschichtung (Reach 20/18/7 bis 20/18/13)
- Use 4: Andere Oberflächenbehandlungen als 2 oder 3 Luft und Raumfahrtindustrie spezifisch (Reach 20/18/14 bis 20/18/20)
- Use 5: Andere Oberflächenbehandlungen als Passivierung von verzinnem Stahl – Andere Industrien (Reach 20/18/21 bis Reach 20/18/27)
- Use 6: Passivieren von verzinnem Stahl (Reach 20/18/28 bis 20/18/34) [108]

Für das dekorative Verchromen (Use 3) wurde noch keine Entscheidung getroffen. Somit ist es bis zur endgültigen Entscheidung zulässig. Allerdings werden für die Zukunft strenge Auflagen für das dekorative Verchromen erwartet. Substituierende Verfahren können hier langfristig eine gute Alternative sein [97].

Die Überprüfungsfrist für Zulassungen endet am 21. September 2024 [110]. Bis zu diesem Datum ist die Zulassung von Chromtrioxid für die oben angeführten Verwendungsbereiche aufrecht. Der Großteil des in Europa verwendeten Chromtrioxid wird von einem der sieben Produzenten des CTAC-Konsortiums bezogen [108]. Die CTAC-Zulassung deckt somit ca. 90 % des europäischen Marktes der Anwender ab. Eigene Zulassungen von nachgeschalteten Anwendern decken die restlichen 10 % ab [111]. Die CTAC-Zulassung deckt die Verwendung von Chromtrioxid beim Anwender ab. Der Anwender steht in der Verantwortung die Zulassungsbedingungen umzusetzen, was von den nationalen Behörden überwacht wird [111].

Nachhaltigkeitsrelevanz

Durch das Verchromen mit Chromtrioxid kann die Langlebigkeit der Produkte (z.B.: Badezimmer- und Küchenarmaturen) erhöht werden. Die Korrosionsbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit, UV-Beständigkeit, Temperaturbeständigkeit und Farbbeständigkeit der Produkte können so gewährleistet werden. So müssen die Produkte weniger häufig ersetzt werden, was im Sinne der Nachhaltigkeit ist [112].

Substitution

An der Substitution von Chromtrioxid in Ätz- und Metallbeschichtungsanwendungen wird bereits seit längerer Zeit geforscht. Die chemischen Eigenschaften von Chromtrioxid sind dabei kaum replizierbar [106]. In der Metallbeschichtung kann anstelle von Chromtrioxid auf Chrom(III)-oxid basierte Prozesse umgestellt werden. So können Chrombeschichtungen von Metallen mit sehr ähnlichen Eigenschaften hergestellt werden. Allerdings ist für eine Chrom(III)-oxid basierte Beschichtung neues Equipment und eine längere Prozessdauer notwendig [106].

Bei der Elektropolitur von Aluminium sind Phosphorsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure potenzielle Substitute. Allerdings befindet sich die Anwendung dieser Stoffe noch im Forschungsstadium [62]. Anstelle von Chrom-basierten Katalysatoren können auch Platin-basierte Katalysatoren (Oleflex-Prozess) oder Katalysatoren auf Platin- bzw. Zinnbasis (Krupps-Uhde STAR Prozess) eingesetzt werden. Hierfür ist allerdings eine Umrüstung der Anlage notwendig [62].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 7: Vergleich von Chromtrioxid und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]–[24]	Preis ¹²
1333-82-0	Chromtrioxid	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig bei Verschlucken (H301) - Giftig bei Hautkontakt (H311) - Verursacht schwere Verätzungen der haut und schwere Augenschäden (H314) - Kann allergische Hautreaktionen verursachen (H317) - Lebensgefahr bei Einatmen (H330) - Kann bei Einatmen Allergie, asthmaartige Symptome oder Atembeschwerden verursachen (H334) - Kann genetische Defekte verursachen (H340) - Kann Krebs erzeugen (H350) - Schädigt die Organe (H372) - Sehr giftig für Wasserorganismen (H400), mit langfristiger Wirkung (H410) - Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen (H361F) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Zulassungspflichtig 	58,70 €/kg bei Thermo Fisher
1308-38-9	Chrom(III)-oxid	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht klassifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	107,40 €/kg bei Thermo Fisher
7664-38-2	(Ortho)Phosphorsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Verätzungen der haut und schwere Augenschäden (H314) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	85,40 €/kg bei Thermo Fisher
7664-93-9	Schwefelsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Verätzungen der haut und schwere Augenschäden (H314) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	46,30 €/l bei Thermo Fisher
7697-37-2	Salpetersäure	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Verätzungen der haut und schwere Augenschäden (H314) - Lebensgefahr bei Einatmen (H330) - Giftig bei Einatmen (H331) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	17,50 €/l bei Thermo Fisher
7440-06-4	Platin	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht klassifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	58.000,-- €/kg bei Merck
7440-31-5	Zinn	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht klassifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	275,- €/kg bei Merck

¹² Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

N,N-Dimethylacetamid (DMAC, CAS-Nr.: 127-19-5)

Verwendung

N,N-Dimethylacetamid (DMAC) wird als Lösungsmittel eingesetzt [113]. Im Jahr 2011 betrug der jährliche Verbrauch von DMAC in der EU zwischen 11.000 und 19.000 t. Der Großteil (65-70 %) wurde dabei für Agrochemikalien, pharmazeutische Produkte und Feinchemikalien verwendet. Ca. 20-25 % des DMAC werden für die Herstellung synthetischer Fasern (z.B.: Acryl, Polyurethan-Polyurea-Copolymer, Meta-Aramid) eingesetzt. Der Großteil davon wird für die Herstellung von Textilien für die Bekleidungsindustrie verwendet. In kleineren Mengen werden aus den synthetischen Fasern auch technische Textilien (z.B.: Glasfaser/Meta-Aramid Vliesstoffe für Luft- und Raumfahrt, Oberflächengewebe für faserverstärkte Kunststoffe) hergestellt. Ein geringer Anteil des gesamten DMAC-Verbrauchs in der EU wird für industrielle Beschichtungen (3-5 % des Gesamtverbrauchs), die Herstellung von Folien (< 2 %), Abbeizmitteln (< 1 %) und sonstige Anwendungen (< 1,5 %, z.B.: petrochemische Anwendungen, im Laborbetrieb) eingesetzt [114].

Regulierung

DMAC ist ein SVHC-Stoff [114]. Es ist derzeit nicht zulassungspflichtig [113]. Die ECHA sieht allerdings eine hohe Priorität für die Aufnahme von DMAC in das Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe (Annex XIV) [114]. Eine Zulassungspflicht ist laut dem Ausschuss für sozioökonomische Analyse (SEAC) der ECHA allerdings keine effektive Option zum Risikomanagement, da es für einige Anwendungsbereiche von DMAC keine geeigneten Substitute gibt und man eine „regrettable Substitution“ von DMAC vermeiden möchte [115].

Die Niederlande haben bei der ECHA einen Antrag auf Beschränkung von DMAC und NMP gestellt [115]. Der Antrag fordert eine Beschränkung von Inverkehrbringen, Herstellung und Einsatz von DMAC und NP als eigenständigem Stoff, als Bestandteil anderer Stoffe oder in Gemischen mit einer Konzentration von 0,3 % oder mehr. Zusätzlich werden DNEL-Werte vorgeschlagen [116]. In ihrer Stellungnahme sprechen sich SEAC und der Ausschuss für Risikobewertung (RAC) für eine wie im Antrag geforderte Beschränkung von DMAC und NEP aus [115]. Allerdings wurden in der Stellungnahme die im Antrag vorgeschlagenen DNEL-Werte angepasst und eine Übergangsfrist von vier Jahren für Unternehmen, die künstliche Fasern herstellen, vorgeschlagen [116]. Die Konsultationsphase zu dieser Stellungnahme endete im Mai 2023 [117]. Basierend auf der Stellungnahme von SEAC und RAC ist davon auszugehen, dass DMAC und NEP in Zukunft einer Beschränkung unterliegen werden.

Nachhaltigkeitsrelevanz

DMAC kann als Lösungsmittel in verschiedenen Recyclingprozessen eingesetzt werden. Beispielsweise können beim chemischen Recycling von carbonfaserverstärkten Kunststoffen mit DMAC die Carbonfasern delaminiert und so rückgewonnen werden [118]. Weitere Anwendungsbeispiele von DMAC sind das Recycling von Leiterplattenabfällen [119] und von Textilabfällen (Herstellung von Cellulose aus alten Baumwolltextilien) [120]. Auch Mischfasern (z.B.: Baumwolle und Elasthan) können so recycelt werden [121].

DMAC wird im pharmazeutischen Bereich eingesetzt. Es kann als Lösungsmittel oder als Reagens bei der Herstellung verschiedener Pharmazeutika (z.B.: Röntgenkontrastmittel, Antibiotika) verwendet werden [122]. DMAC kann zur Behandlung von Osteoporose eingesetzt werden, da es die Osteoklasten vermittelnde Knochenresorption hemmt und die Knochenregeneration fördert [123].

Substitution

Mögliche alternative Lösungsmittel zu DMAC sind 1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP) und N,N-Dimethylformamid (DMF). Diese Stoffe sind zwar technisch als Substitute für DMAC geeignet, hinsichtlich ihrer gefahrenrelevanten Eigenschaften stellen sie allerdings keine sichere Alternative zu DMAC dar. Im pharmazeutischen Bereich kann DMAC durch Tetramethylurea (TMU), 1,3-Dimethyl-2-imidazolidinon (DMI), Dichlormethan (DCM), Tetrahydro-1,3-Dimethyl-1H-Pyrimidin-2-on (DMPU), Formamid, N-Methylformamid oder N-Methylacetamid ersetzt werden. Für die Herstellung synthetischer Fasern sind 1-Ethyl-2-pyrrolidon (NEP) und DMI geeignete Alternativen [114].

Weiteres potenzielles Substitut ist Dimethylsulfoxid (DMSO). Allerdings ist es thermisch instabil und hat ein geringeres Lösungsvermögen für Polymere. Sulfolan kann theoretisch ebenfalls eingesetzt werden (v.a. im pharmazeutischen Bereich). In der Praxis hat sich die Anwendung anstelle von DMAC oft als impraktikabel gezeigt. Aceton und Acetonitril sind weitere mögliche Alternativen (v.a. im pharmazeutischen Bereich), die in der Praxis ebenfalls geringeres Lösungsvermögen aufweisen [114].

Chemikalien-Substitution

Tabelle 8: Vergleich von N,N-Dimethylacetamid und seinen potenziellen Substituten in Bezug auf besorgniserregende Eigenschaften und derzeitige Regulierung

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ¹³
127-19-5	N,N-Dimethylacetamid (DMAC)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC 	58,40 €/l bei Merck Millipore
872-50-4	1-Methyl-2-Pyrrolidon (NMP)	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht Hautreizungen (H315) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann die Atemwege reizen (H335) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D)D 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Beschränkung 	185,80 €/l bei Thermo Fisher
68-12-2	N,N-Dimethylformamid (DMF)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Gesundheitsschädlich bei Einatmen (H332) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC - Beschränkung 	107, -- €/l bei Thermo Fisher
632-22-4	Tetramethylurea (TMU)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (H360) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	882,--€/kg bei Merck
80-73-9	1,3-Dimethyl-2-imidazolidinon (DMI)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen (H361) - Kann die Organe schädigen (H373) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	329, -- €/l bei Merck
75-09-2	Dichlormethan (DCM), Methylenechlorid	<ul style="list-style-type: none"> - Treibhauspotential 11 - Kann vermutlich Krebs verursachen (H351) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	63,6 €/l bei Merck
7226-23-5	Tetrahydro-1,3-Dimethyl-1H-Pyrimidin-2-on (DMPU)	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Verursacht schwere Augenschäden (H318) - Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen (H361F) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP 	670,30 €/kg bei Merck
75-12-7	Formamid	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC 	1.020, -- €/l bei Merck

¹³ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Chemikalien-Substitution

CAS-Nr.	Stoff	Besorgniserregende Eigenschaften [21]	Derzeitige Regulierung [21]– [24]	Preis ¹⁴
123-39-7	N-Methylformamid	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	- CLP	153, -- €/l bei Merck
79-16-3	N-Methylacetamid	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	<ul style="list-style-type: none"> - CLP - SVHC 	122, -- €/kg bei Merck
2687-91-4	1-Ethyl-2-pyrrolidon (NEP)	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das Kind im Mutterleib schädigen (H360D) 	- CLP	686, -- €/kg bei Thermo Fisher
67-68-5	Dimethylsulfoxid (DMSO)	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht klassifiziert 	- CLP	121, -- €/l bei Thermo Fisher
126-33-0	Sulfolan, auch Tetrahydrothiophen-1,1-dioxid	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) 	- CLP	157, -- €/kg bei Merck
67-64-1	Aceton	<ul style="list-style-type: none"> - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen (H336) 	- CLP	8, -- €/l bei Thermo Fisher
75-05-8	Acetonitril	<ul style="list-style-type: none"> - Gesundheitsschädlich bei Verschlucken (H302) - Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312) - Verursacht schwere Augenreizung (H319) - Gesundheitsschädlich beim Einatmen (H332) 	- CLP	46,40 €/l bei Merck

¹⁴ Einzelhandelspreise aus dem Chemikalienhandel (März/April 2023), Preise im Industriegroßhandel können abweichen, Kosten für allfällige Umstellung der Anlagen wurden nicht mitberücksichtigt

Herausforderungen bei der Recherche

Die **Suche nach möglichen Substituten für bestimmte Chemikalien ist ein schwieriger Prozess**, der **viel Zeit und Aufwand** erfordert. Es müssen zahlreiche Quellen wie Datenbanken der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) und wissenschaftliche Literatur durchsucht und verglichen werden, um geeignete Substitute zu finden. Viele potenzielle Ersatzstoffe für die zu substituierenden Stoffe sind noch nicht bekannt und oft noch am Beginn der Forschung.

Ein weiteres **Hindernis ist die Datenverfügbarkeit**: Nicht für alle geeigneten Substitute sind öffentlich zugängliche Daten und Informationen zu Stoff und Anwendungsbereich verfügbar. Dies erschwert die Bewertung der Sicherheit und Umweltverträglichkeit potenzieller Ersatzstoffe. Viele Unternehmen legen klarerweise ihre intern laufenden Verfahren zur Substitution nicht offen, um sich einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen oder um die Weitergabe von Ergebnissen kostenintensiver Forschung an die Konkurrenz zu vermeiden. Beispielsweise konnten im Rahmen des **Projekts ReSolve** [58] mehrere geeignete Substitute für NMP identifiziert werden. Die Namen einiger dieser Stoffe wurden allerdings nicht veröffentlicht [66]. Insgesamt stellt die Suche nach Substituten eine **Herausforderung** dar, die sowohl eine umfangreiche Recherche als auch eine Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen erfordert, **um die bestmöglichen Alternativen zu finden**. Sofern die öffentliche Hand ein hohes Interesse an einer raschen und bestmöglichen Substitution von Stoffen hat, wären **alternative Identifikationsprozesse** (z.B.: Ausschreibungen, Wettbewerbe, Anreize zur Kooperation oder Konsortien) **notwendig**.

Herausforderungen bei der Substitution

Die Substitution von Chemikalien ist ein Prozess, der im Rechtstext **der REACH-Verordnung nicht genau definiert und strukturiert** ist. Er wird als eine Aktivität innerhalb des Hauptmechanismus der Zulassung (Annex XIV) behandelt. Bei der Substitution von Chemikalien ist darauf zu achten, dass das Substitut nicht nur in Bezug auf das Risiko, sondern auch in Bezug auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit geeignet ist [3]. Um eine **nachhaltige Substitution zu gewährleisten**, sollten **neben ökonomischen auch soziale und gesellschaftliche Aspekte**, wie beispielsweise Vorteile für die menschliche Gesundheit, Auswirkungen auf die Produktperformance bei den Endkund:innen oder Recyclingfähigkeit, **berücksichtigt werden** [5].

Die primäre Verantwortung für die Realisierung einer Substitution von gefährlichen Stoffen durch weniger gefährliche Alternativen liegt bei der Industrie [5]. Je klarer der Substitutionsprozess und dessen rechtlicher Rahmen sind, desto höher die Rechts- und Investitionssicherheit für Unternehmen und in der Folge die Geschwindigkeit der Umsetzung. Die **frühzeitige Wahrnehmung** von künftigen Entwicklungen **ermöglicht es**, Unternehmen **regulatorische Risiken** durch Verschärfung von Regulierungen **zu antizipieren**. Durch rechtzeitige Anpassung von Produktionsprozessen können in der Folge unternehmerische Risiken minimiert und Investitionen entsprechend geplant werden. Zusätzlich können durch den **Ersatz von gefährlichen Stoffen** in der Produktion bzw. in Produkten **Kosten** (z.B.: für Arbeitnehmer:innenschutz) **gesenkt** und ein **Wettbewerbsvorteil** erlangt werden (z.B.: Nachfrage nach Kosmetikprodukten ohne Phthalate oder Aluminiumsalze). Deshalb ist es im Interesse der Unternehmen, hier **eigenständig Innovationen voranzutreiben**, was von der **Politik und durch Maßnahmen gefördert** werden sollte [5]. Dabei sollte von der Politik ein **Mix aus freiwilligen und regulatorischen Ansätzen** verwendet werden. Maßnahmen wie beispielsweise Kooperationen, Forschungsförderung und Vernetzung von Industrie, Behörden und NGOs tragen entscheidend zum Erfolg von Substitutionsbemühungen bei [124].

Kein universelles Substitut möglich

Die Substitution von Chemikalien stellt eine Herausforderung für Unternehmen dar, da es **kein Universalsubstitut** für den zu substituierenden Stoff gibt. Die Suche nach einem geeigneten Substitut hängt vom jeweiligen Verwendungszweck, Produkt oder Verfahren ab. Daher ist eine **Einzelfallbeurteilung für jeden individuellen Anwendungsfall notwendig**, um das beste Substitut zu finden.

Ein weiteres Problem ist, dass viele potenzielle Substitute noch nicht bekannt sind und erst erforscht werden müssen. Dies kann zeitaufwendig und kostspielig sein. Darüber hinaus ist **der zu substituierende Stoff in der Regel besser erforscht als seine potenziellen Substitute**, da für diese oft keine Untersuchungen zu ihrer Toxizität und Ökotoxizität vorliegen [3]. Diese Tatsache macht es in der Regel **schwierig, ein Substitut zu finden, das bessere toxikologische Eigenschaften aufweist als der ursprüngliche Stoff, aber dennoch technisch und wirtschaftlich geeignet ist**.

Regrettable Substitution

Dadurch kann es auch vorkommen, dass ein Stoff durch einen anderen ersetzt wird und sich erst im Laufe der Anwendung herausstellt, dass das Substitut **gleich gefährlich oder sogar gefährlicher ist als der ursprüngliche Stoff**. In diesem Fall spricht man von einer sogenannten „**regrettable Substitution**“, die vermieden werden sollte. Ein prominentes Beispiel für eine „regrettable Substitution“ aus der Vergangenheit ist die Substitution von Bisphenol A (BPA), das hormonell wirksame Eigenschaften aufweist. Ein gängiges Substitut für BPA ist Bisphenol S (BPS), das (noch) nicht unter REACH reguliert ist. BPS wird derzeit in vielen Produkten eingesetzt, die als „BPA-frei“ vermarktet werden, obwohl davon auszugehen ist, dass es ähnliche hormonell wirksame Eigenschaften aufweist wie BPA. In diesem Fall wurde lediglich eine Substitution durch einen Stoff, der weniger Regulierungen unterliegt, vorgenommen und es konnten keine Verbesserungen in Bezug auf toxikologische Eigenschaften erzielt werden [3]. Aus diesem Grund sollte eine **Substitution nur dann durchgeführt werden**, wenn die **Verbesserung der ökologischen und sozialen Auswirkungen** und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit **geprüft und bestätigt sind** [5].

Ressourcen und Kosten

Schließlich sind die Forschung und Implementierung neuer Substitute für Unternehmen mit Kosten verbunden. Unternehmen müssen oft **erhebliche Ressourcen** bereitstellen, **um geeignete Substitute zu finden**, zu testen und zu implementieren. Darüber hinaus gibt es noch Forschungsbedarf, um neue und bessere Substitute zu finden. Da die derzeitigen Regelungen zur Chemikaliensubstitution Lücken aufweisen, **ist eine öffentliche Strategie** (z.B.: auf nationaler Ebene) **zur Substitution sinnvoll** um diese Herausforderungen zu bewältigen [5].

Vorschläge für das Design von Substitutionsempfehlungen

Der Prozess zur Substitution von Chemikalien ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Vorgehensweise beinhaltet für Unternehmen grundsätzlich die folgenden Schritte:

1. Sammeln von Informationen über die verwendeten Chemikalien
2. Identifizierung unerwünschter Stoffe
3. Suche nach verfügbaren Alternativstoffen oder neuen technischen Lösungen
4. Bewertung und Auswahl alternativer Stoffe oder neuer technischer Lösungen
5. Pilot-Tests und Implementieren der Substitution [125]–[127]

Hilfreiche Ressourcen für den Substitutionsprozess sind die **ECHA-Webseite**, das **PRIO-Tool** der Swedish Chemicals Agency und das **BizNGO Chemical Alternatives Assessment Protocol**. Eine Liste mit Links zu weiterführenden Informationen und unterstützenden Hilfestellungen ist in Tabelle 10 zusammengestellt.

Chemikalien-Substitution

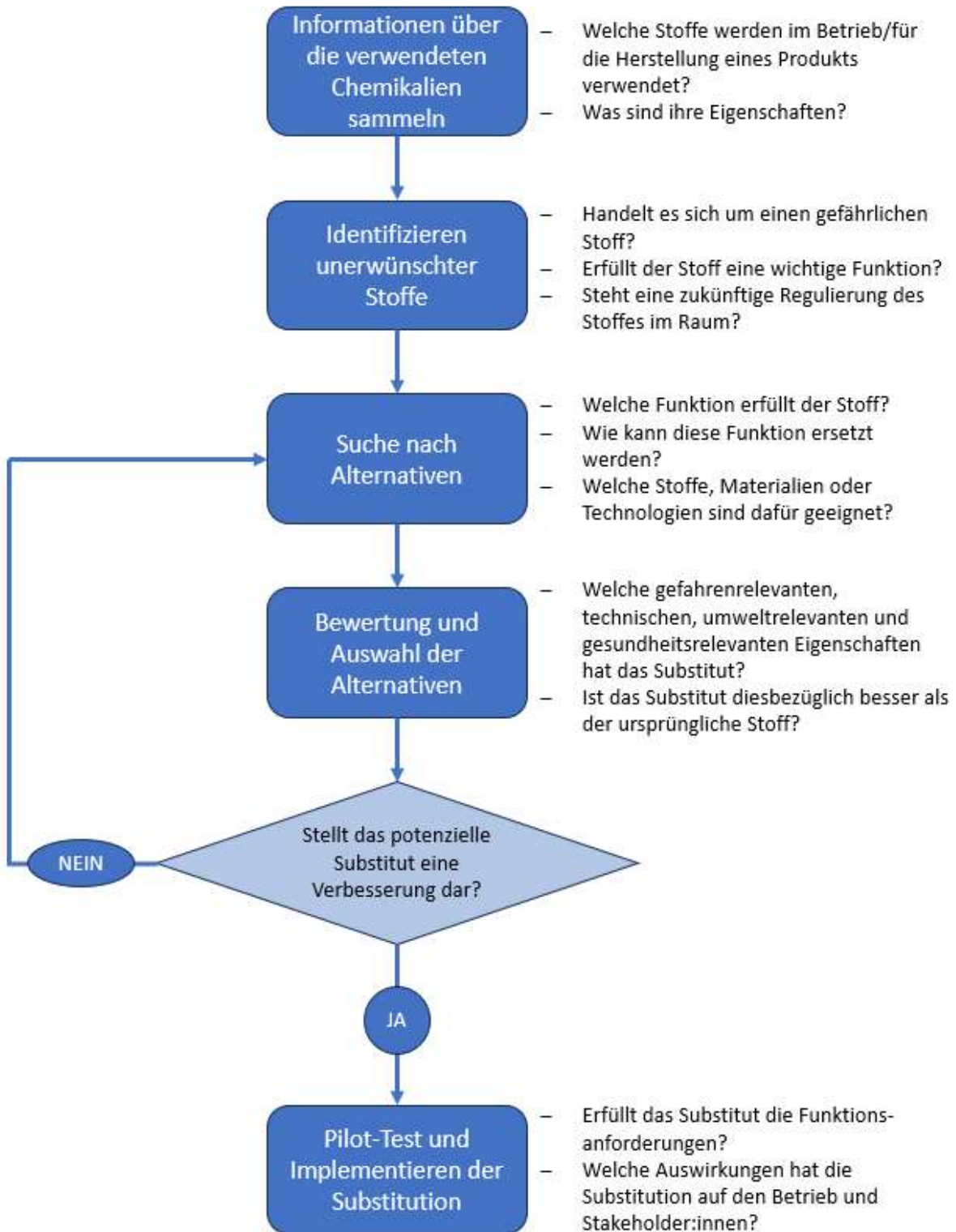


Abbildung 2: Grafische Darstellung des Substitutionsprozesses von Chemikalien

Schritt 1: Sammeln von Informationen über verwendete Chemikalien

Zu Beginn des Substitutionsverfahrens ist zu entscheiden, ob die Suche nach geeigneten Substituten für alle unerwünschten Stoffe, die im Betrieb verwendet werden oder beispielsweise für unerwünschte Stoffe, die bei der Herstellung eines bestimmten Produkts eingesetzt werden, erfolgen soll. Danach wird eine vollständige Liste der (beispielsweise im Betrieb oder bei der Produktherstellung) verwendeten Stoffe zusammengestellt. Der Zweck der Chemikalienliste besteht darin, zu erfassen, welche Chemikalien im Unternehmen gehandhabt werden und ob sie ein Risiko darstellen. Die Chemikalienliste kann beispielsweise in Excel erstellt werden. Das **PRIO-Tool** der Swedish Chemicals Agency bietet ein Template zum [Download](#) [125].

Mögliche **Datenquellen für das Erstellen der Chemikalienliste** sind:

- Bereits im Betrieb **vorhandene Inventarlisten** von verwendeten Stoffen (z.B.: Kühlmittel, Pestizide, Reinigungsmittel)
- **Innerbetriebliche Stoffflüsse** (Welche Chemikalien werden in welcher Menge gekauft? Wo werden sie verwendet?)
- Informationen über die in zugekauften Gütern und Rohstoffen **enthaltenen Stoffe** (z.B.: auf Anfrage bei Lieferant:innen) [128]

Es wird empfohlen, in der Liste auch Informationen über den Stoffgehalt in Produkten und die Einstufung der Stoffe zu sammeln, da dies die Einhaltung von Gesetzen und Vorschriften im Chemikalienbereich erleichtert. Diese Informationen können beispielsweise den **Sicherheitsdatenblättern**, **ECHA-Daten** (z.B.: CLP-Einstufung, Liste der SVHC-Stoffe) oder verschiedenen **Online-Datenbanken** (z.B.: Datenbank des PRIO-Tools) entnommen werden [125]. Zusätzlich können auch die Anwendungszwecke oder Funktion der verschiedenen Stoffe in der Chemikalienliste angeführt werden [127].

Schritt 2: Identifizieren von unerwünschten Stoffen

Im zweiten Schritt werden die im Betrieb oder in Produkten **unerwünschten Stoffe identifiziert**, damit sie **in den weiteren Schritten substituiert werden können**. Dies erfolgt basierend auf der Chemikalienliste aus dem ersten Schritt. Basierend auf den Eigenschaften der identifizierten Stoffe wird entschieden, ob eine Substitution durchgeführt werden soll [125]. Stoffe, **die für eine Substitution priorisiert** werden sollten, sind:

- Stoffe, die als **besonders gefährlich** gelten
- Stoffe, die für die **Funktion eines Produkts nicht unbedingt erforderlich** sind
- Stoffe, die in **naher Zukunft Gegenstand von Regulierungsmaßnahmen** oder Marktdruck sein könnten [126]

Tabelle 9 enthält verschiedene Datenquellen zur Recherche, ob die betreffenden Kriterien für den jeweiligen Stoff vorliegen.

Tabelle 9: Mögliche Kriterien für die Notwendigkeit einer Substitution und mögliche Datenquellen für die Recherche

Kriterium	Datenquellen
Listen von Stoffen mit gefährlichen Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - ECHA-Liste der SVHC-Stoffe - ECHA-Liste der nach REACH zulassungspflichtigen Stoffe - ECHA-Liste der nach REACH beschränkten Stoffe - Trade Union Priority List for REACH Authorisation - Safer Chemical Ingredients List der Europäischen Umweltschutzbehörde - OSH-Wiki für gefährliche Stoffe
Stoffe, die im Fokus neuer Regulierungen stehen	<ul style="list-style-type: none"> - Fortlaufender Aktionsplan der Gemeinschaft (CoRAP) - ECHA Registry of restriction intentions until outcome - ECHA Public Activities Coordination Tool (PACT)
Sonstige Tools zur Auswahl der zu substituierenden Stoffe	<ul style="list-style-type: none"> - PRIO-Tool: Unterteilung in Phase-out-Substanzen und vorrangige Stoffe zur Risikominderung

Schritt 3: Suche nach verfügbaren Alternativstoffen oder neuen technischen Lösungen

In diesem Schritt sollen Möglichkeiten für das Ersetzen gefährlicher chemischer Stoffe durch weniger gefährliche oder nicht-chemische Alternativen gefunden werden [129]. Dabei werden zuerst die folgenden Fragestellungen betrachtet:

- **Warum** ist der betreffende Stoff ein Problem (z.B.: wegen seiner gefährlichen Eigenschaften für Mensch und/oder Umwelt)?
- **Wo** kommt es zu Problemen (z.B.: während der Produktion, der Endanwendung, der Abfallbehandlung)?
- **Wer** ist davon betroffen (z.B.: Mitarbeitende, Endanwender:innen)?
- **Welche Funktion** erfüllt der Stoff im Produkt bzw. im Betrieb und wie wichtig ist diese Funktion? [129]

Basierend darauf werden mögliche Substitute identifiziert und gesammelt. Diese Substitute sollen den technischen Anforderungen entsprechen und die Funktion, die der zu substituierende Stoff erfüllt, ersetzen können. Außerdem sollen die **Substitute ein geringeres Gefährdungspotenzial** als der zu ersetzende Stoff aufweisen [130]. Zur Substitution von Chemikalien gibt es **mehrere Möglichkeiten**:

- **Ersetzen** eines Stoffes durch einen anderen Stoff **mit einem geringeren Gefährdungspotenzial** (z.B.: Einsatz von Glycerinacetat als Alternative zu Phthalat-Weichmachern in Beschichtungen [131])
- **Substitution** durch einen anderen **Werkstoff, der den zu ersetzenden Stoff nicht enthält** (z.B.: auf BPA kann verzichtet werden, wenn stattdessen Kunststoffe eingesetzt werden, die kein BPA enthalten [61])
- **Substitution bzw. Vermeidung durch einen anderen Prozess** (z.B.: auf gefährliche Tintenentwickler kann verzichtet werden, indem Kund:innen einen elektronischen Zahlungsbeleg erhalten [126] oder Tiefgefrieren biologischer Proben anstelle von Konservierung mit Formaldehyd [131])

Eine gute erste Anlaufstelle für die Suche nach möglichen Substituten ist der **ChemSec Marketplace** (siehe Tabelle 10). Dies ist eine Website mit von Nutzer:Innen erstellten Inhalten, auf der Unternehmen eigene Anzeige erstellen können - um zu vermarkten, dass Sie entweder eine Alternative zu verkaufen haben oder eine kaufen möchten [124].

Schritt 4: Bewertung und Auswahl alternativer Stoffe oder neuer technischer Lösungen

Die identifizierten Alternativen werden nun bewertet und mit dem zu substituierenden Stoff verglichen. Dabei sollten folgende Aspekte erhoben werden:

- Gefahrenrelevante Eigenschaften der Stoffe
- Relative Exposition (z.B.: Vergleich des Unterschieds der Gesamtexposition von zu substituierendem Stoff und potenziellem Substitut)
- Technische Eigenschaften
- Umweltrelevante Eigenschaften
- Kosten [125]

Aspekte wie Energiebedarf, Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen, Recyclingfähigkeit und soziale Auswirkungen sollten dabei ebenfalls beachtet werden [126]. Hilfreiche Tools und Methoden zur Bewertung der gefahrenrelevanten Eigenschaften sind **GreenScreen**, das **Quick Chemical Assessment Tool**, das **GHS-Spaltenmodell** oder das **Pollution Prevention Options Analysis System (P2OASys) Tool**. Als Hilfestellung für die sozioökonomische Analyse kann der **Leitfaden der ECHA** verwendet werden [126]. Die umweltrelevanten Eigenschaften können mittels **Ökobilanzierung** [132] oder dem **Guide on Sustainable Chemicals** des deutschen Umweltbundesamt bewertet werden. Dieser Guide geht auf Nachhaltigkeitsaspekte wie Ökotoxizität, Ressourcenverbrauch, Treibhausgasemissionen und Verantwortung entlang der gesamten Lieferkette ein [133]. Im **OECD-Leitfaden** „Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives“ sind Bewertungsindikatoren für Humantoxizität, Umweltgefährdung und physikalische Gefährdung aufgelistet und die Bewertung von Stoffen bezüglich ihrer Sicherheit wird erläutert [132]. Tabelle 10 enthält eine kurze Beschreibung, sowie Links zu den jeweiligen Tools und Leitfäden. Weitere Tools und Methoden sind auf der **Übersichtsseite der ECHA zur Chemikaliensubstitution** aufgelistet.

Bei der Auswahl der Substitute sind nicht nur die Ergebnisse der oben erwähnten Bewertung zu betrachten, sondern auch, ob das Substitut die technischen Anforderungen des Produkts bzw. des Prozesses erfüllt und ob es mit bestehenden Prozessen und Produkten des Betriebs kompatibel ist. Anforderungen des potenziellen Substituts an Abfallentsorgung und Schutz von Mitarbeitenden sind ebenfalls zu berücksichtigen [130]. Die Bewertungsergebnisse der möglichen Substitute werden mit der Bewertung des zu substituierenden Stoffs verglichen (z.B.: in einer Bewertungsmatrix) [132]. Die **ausgewählten Substitute sollten technisch geeignet und ökonomisch umsetzbar sein** sowie bezüglich ihrer **toxikologischen und umweltrelevanten Eigenschaften eine Verbesserung** gegenüber dem ursprünglich verwendeten Stoff darstellen [125], [126].

Schritt 5: Pilot-Tests und Implementieren der Substitution

Anschließend werden die **ausgewählten Alternativen in einem Pilot-Test untersucht**. Dabei werden die **Funktionalität** des Substituts, mögliche **Auswirkungen** der Substitution (z.B.: auf die Lieferkette) und eventuell notwendige **organisatorische Änderungen** (z.B.: von Betriebsprozessen) geprüft. Nach dem erfolgreichen Pilot-Test kann die Substitution implementiert werden. **Stakeholder-Feedback** sollte dabei berücksichtigt werden (z.B.: von Kund:innen und Mitarbeitenden, die mit den jeweiligen Stoffen hantieren) [126].

Weiterführende Informationen und zusätzliche Ressourcen zur Chemikaliensubstitution

Tabelle 10: Weitere Informationen zur Chemikaliensubstitution in Unternehmen

Allgemeines zur Chemikaliensubstitution	
ECHA-Übersichtsseite zur Chemikaliensubstitution	Übersichtsseite der ECHA zur Vorgehensweise bei der Substitution von Chemikalien (mit weiterführenden Ressourcen)
OECD-Übersichtsseite	Liste verschiedener Rahmenwerke, Toolkits und Produktbewertungssysteme Leitfäden zur chemischen Substitution
Leitfäden und Tools zum Substitutionsprozess	
ECHA-Leitfaden zur Substitution von SVHC-Stoffen	Schritt-für-Schritt-Leitfaden zur Substitution von SVHC-Stoffen inklusive weiterführenden Tools (z.B.: zur Bewertung von Alternativen)
PRIO-Tool	Webbasiertes Tool, das hilft gefährliche Stoffe in Erzeugnissen oder chemischen Produkten zu finden und zu ersetzen
BizNGO Chemical Alternatives Assessment Protocol	Entscheidungsleitfaden für die Substitution von Chemikalien, die für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt bedenklich sind, durch sicherere Alternativen
OECD Substitution and Alternatives Toolbox (SAAToolbox)	Die Toolbox umfasst ein Online-Portal mit Informationen zu Instrumenten und Datenquellen, Rahmenwerke, Leitfäden, Toolkits und Bewertungssysteme, Instrumente zur Bewertung von Nicht-Gefahren sowie Fallstudien zur Substitution
OECD Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives	Allgemeiner Ansatz und Kriterien für die Auswahl sichererer Alternativen, mit Schwerpunkt auf chemischer Substitution
Hilfestellung für die Suche nach Substituten	
ChemSec Marketplace	Onlinebörse für die Suche nach sichereren Alternativen für Chemikalien und Kontaktaufnahme mit Anbietern
Methoden und Tools zur Chemikalienbewertung	
GreenScreen	Instrument zur vergleichenden Gefahrenbewertung, Alternativen zu bedenklichen Chemikalien werden auf der Grundlage von 18 Gefahrenendpunkten bewertet
Quick Chemical Assessment Tool	Eine vereinfachte Version der GreenScreen for Safer Chemicals-Methode zur Gefahrenbewertung, die es KMU ermöglicht, eine schnelle Bewertung von Alternativen für bedenkliche Chemikalien durchzuführen
GHS-Spaltenmodell	Anhand weniger Informationen über die betreffenden Produkte können mit Hilfe dieser Tabelle Ersatzstoffe bewertet werden
Pollution Prevention Options Analysis System (P2OASys)	Ein Tool, das Unternehmen hilft, die Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsmerkmale von Chemikalien, Produkten und Änderungen des Produktionsprozesses zu vergleichen
Guide on sustainable chemicals	hilft Herstellern, Formulierer:innen und Endverbraucher:innen von Stoffen, die nachhaltigste Lösung zu wählen, mit Fokus auf umweltrelevante Aspekte
Leitfäden für die sozioökonomische Bewertung	
ECHA-Leitfaden für die sozioökonomische Analyse	Leitfaden für die Erstellung von sozioökonomischen Analysen als Teil eines Antrags auf Genehmigung

Mögliche Rollen der Gesetzgebung bei der Substitution

Gesetzliche Regulierungen sind die Hauptmotivation für Unternehmen, ihre verwendeten Stoffe zu substituieren [134]. In Einzelfällen **können Regulierungen jedoch auch zu einer „regrettable Substitution“ beitragen**. Ein **Beispiel dafür ist der Stoff Blei**, der durch mehrere EU-weite Einschränkungen in der metallverarbeitenden Industrie als Legierungselement in Stahl, Kupfer- sowie Aluminiumlegierungen (ELV – End of Life Vehicles Direktive) und in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS – Restriction of Hazardous Substances Direktive) reguliert ist [135]. Zusätzlich steht die Aufnahme von Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1) auf die Liste der zulassungspflichtigen Stoffe (REACH Annex XIV) im Raum [136]. Manche **Unternehmen nutzten deshalb Bismut als Substitut** für Blei. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Einsatz von Bismut negative Folgen in Bezug auf Recycling und Nachhaltigkeit hatte. Schon geringe Bismutkontamination von bismutfreien Werkstoffen führt zu erheblichen Verarbeitungsproblemen und verschlechtert die Materialeigenschaften. Deshalb müssen beim Recycling bismuthaltige Rücklaufmaterialien streng von anderen Werkstoffen getrennt werden (z.B.: durch einen separaten Rückführungskreislauf). Außerdem wird Bismut zum Großteil als Nebenprodukt der Bleiproduktion gewonnen. Um 1 Tonne Bismut zu erhalten, müssen 30 bis 200 Tonnen Blei produziert werden. Die **Substitution von Blei mit Bismut führt also zu nicht zu einer Verringerung der produzierten Bleimengen** [137]. Darum empfehlen die Autor:innen dieser Studie, dass **für gesetzliche Regulierungen von Stoffen zusätzlich eine Folgenabschätzung durchgeführt** werden sollte. So können ökonomische, soziale und ökologische Auswirkungen der Regulierung frühzeitig erhoben und durch Anpassung der Regulierung vermieden werden.

Die OECD führte eine länderübergreifende Analyse der Vorgehensweisen bei der Substitution von Chemikalien durch [124]. Diese Erhebung kam zu dem Ergebnis, dass eine Kombination aus freiwilligen und regulatorischen Ansätzen zur Förderung von Substitutionsbemühungen am effektivsten ist. Während gesetzliche Regulierungen eine starke (und oft notwendige) Motivation sind, um Unternehmen zur Substitution von Chemikalien zu bewegen, bieten sie den Unternehmen keine praktische Unterstützung für den Substitutionsprozess. Freiwillige Initiativen - meist von NGOs oder der akademischen Forschung - **können bei entsprechend konstruktiven Vorschlägen das Risiko einer „regrettable Substitution“ reduzieren, wenn sie konkrete Unterstützung** bei der Chemikalienbewertung und Kriterien und Standards als Leitlinien für Unternehmen (z.B.: in Form von Tools oder Plattformen) **anbieten** [124].

Während gesetzliche Regulierungen ein wesentlicher Treiber für die Chemikaliensubstitution sind [134], **sind sie allein nicht ausreichend**, um die Substitution von Stoffen und die Durchführung von Assessments der potenziellen Alternativen durchzuführen. Der Grund dafür ist, dass es den Unternehmen **in der Praxis an Anreizen, Leitlinien, technischer Unterstützung und Instrumenten für die Umsetzung fehlt**. Es **braucht hier somit einen Mix aus regulatorischen und freiwilligen Instrumenten**, um Unternehmen bei der nachhaltigen Chemikaliensubstitution zu unterstützen [138]. Für die praktische Umsetzung von Substitutionsprozessen fehlt es meist an einheitlichen Leitlinien (z.B.: Bewertungsmethoden von möglichen Substituten, siehe Schritt 4) für Unternehmen [138], [139]. Eine weitere **Hürde ist die unzureichende Verfügbarkeit von spezifischen Stoffdaten** (z.B.: zu Toxizität) [124], [138] und die für den Substitutionsprozess notwendigen **Fachkenntnisse**, die insbesondere **in KMUs nicht** immer direkt im Unternehmen **vorhanden sind** [138].

Es konnten folgende Erfolgsfaktoren für die Förderung von Substitutionsbemühungen identifiziert werden, aus denen Handlungsempfehlungen für die Gesetzgebung abgeleitet werden können:

- Anreize zur Substitution durch politische Maßnahmen schaffen, diese können ordnungsrechtliche Instrumente oder Anreizsysteme wie Förderungen bzw. Unterstützungen sein [124], [134], [138]
- Zusammenarbeit von Industrie, Behörden und NGOs fördern, um Sichtweisen abzugleichen, Argumentationen frühzeitig zu kennen und darauf reagieren zu können, was das Identifizieren und Implementieren nachhaltiger Alternativen erleichtert und eine „regrettable Substitution“ zu vermeiden hilft [124]
- Förderung von F&E-Tätigkeiten zur Bewertung von Alternativen und der Substitutionsforschung (z.B.: durch gezielte Förderprogramme) [124]
- Zugang zu themenrelevanten Tools und Leitfäden für Unternehmen [124]
- Nationale Kontaktstellen, die Anfragen von Unternehmen beantworten und Unterstützung leisten können [124]
- Tools zur Nachhaltigkeits- und Risikobewertung von Stoffen (nicht nur im Kontext der Bewertung möglicher Substitute) sollten bei den Unternehmen beworben und gefördert werden, lange bevor es zu tatsächlichen Regulierungen kommt [138]
- Alle Maßnahmen (z.B.: Förderprogramme, Kooperationen, Kontaktstellen) müssen bei den Unternehmen bekannt gemacht werden [124]

Zusätzlich sollten Maßnahmen zur Substitutionsförderung in andere Bereiche des nachhaltigen Chemikalienmanagements (z.B.: Grüne Chemie, Kreislaufwirtschaft) integriert werden [139]. Hier bestehen beispielsweise Überschneidungen mit der **Chemicals Strategy for Sustainability (CSS)** als Teil des EU-Green Deals. Diese Strategie sieht im Rahmen des **Safe and Sustainable by Design (SSbD)**-Programms eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung von Chemikalien vor [140]. Hier könnten Synergien für den Substitutionsprozess genutzt werden.

Abschließendes Fazit

Die Chemikaliensubstitution ist ein **komplexer Prozess, der sich nicht einfach systematisieren lässt**. Die Suche nach geeigneten Substituten ist für Unternehmen mit einem **hohen Zeit- und Kostenaufwand** verbunden. Die Recherche nach möglichen Substituten ist oft schwierig, da es hierzu kaum verfügbare Daten gibt. Ein Grund dafür ist, dass Unternehmen in vielen Fällen die Ergebnisse ihrer eigenen F&E-Ergebnisse aus diesem Bereich unter Verschluss halten, da sie viel Zeit und finanzielle Mittel darin investiert haben und sich dadurch einen Vorteil am Markt sichern wollen. Viele mögliche Substitute sind derzeit noch nicht bekannt oder noch nicht ausreichend erforscht. Vor allem die **geringe Verfügbarkeit stoffspezifischer Daten** (z.B.: zur Toxizität) von neuen oder bisher kaum verwendeten Stoffen **erhöht das Risiko einer „regrettable Substitution“**, also der Substitution eines Stoffes durch einen anderen Stoff, der gleichwertig oder sogar schlechter hinsichtlich des Gefährdungspotenzials und auch der Funktionalität ist. Dafür sollten in diesem Bereich der **Wissenstransfer und die Kooperation von Wirtschaft und Forschung gefördert** werden. Hier besteht großer **Forschungsbedarf**, insbesondere bei Chemikaliensubstitutionen im Bereich der Umstellung auf eine nachhaltige Wirtschaftsweise und die **Erfüllung der Green-Deal Ziele**. Damit die notwendigen Umstellungen für die Betriebe leistbar und wirtschaftlich erfolgreich sein können, sollten **konterkarierende Regulierungen jedenfalls vermieden** werden. Beim Design von Fördermaßnahmen von nachhaltigen Technologien sind die in dieser Studie **identifizierten Schwierigkeiten** bei der Substitution oder dem Verzicht von Chemikalien **einzubeziehen**. Vor dem Hintergrund des internationalen Wettbewerbs und der aktuellen Industriepolitik (Net Zero Industry Act, Critical Raw

Materials Act, ...) sollten die daraus entstehenden **Abhängigkeiten von Rohstoffen und Technologien berücksichtigt** werden.

Für die meisten Stoffe gibt es **kein „Universalsubstitut“**. Es muss immer für den konkreten Einzelfall beurteilt werden, ob ein Substitut geeignet ist oder nicht. Dies hängt von vielen Faktoren, wie beispielsweise der Zusammensetzung des Produkts, der Funktion die der Stoff im Produkt oder im Prozess erfüllt oder den Produktionsprozessen, die der Stoff durchlaufen soll, ab. Potenzielle **Substitute** müssen **auf ihre technische Eignung getestet** werden. Dabei kann sich herausstellen, dass beispielsweise für die **Aufrechterhaltung der Funktion** des Produkts, in dem der Stoff substituiert wird, **die Produktzusammensetzung geändert** werden muss. Ebenso können Änderungen der Produktzusammensetzung eine **Änderung des Herstellprozesses** notwendig machen. Solche **Prozessumstellungen sind oft sehr kostenintensiv**. Die dadurch anfallenden Kosten übersteigen die ursprünglichen Chemikalienkosten meist deutlich.

Der Substitutionsprozess ist für jeden Stoff, jeden Verwendungszweck und jedes Unternehmen anders. Zwar gibt es eine Vielzahl an theoretischen Leitfäden, Tools und Ressourcen zu diesem Thema, allerdings ist es ohne fachliche Expertise schwierig, diese einzuordnen. Mit **zunehmenden und komplexeren Regulierungen** wird es **schwierig für Unternehmen** die für sie **am besten geeigneten Instrumente auszuwählen**. Eine **frühzeitige Etablierung von Methoden zur Chemikalienbewertung** (z.B.: in Bezug auf Risikomanagement, Gefährdungspotenzial, Nachhaltigkeit) **kann helfen** die Unternehmen **frühzeitig auf Marktdruck** durch Konsument:innenwünsche oder zukünftige Regulierungen **vorzubereiten** und sich anzupassen. Auch im Kontext geplanter Maßnahmen wie beispielsweise der Ökodesign-Richtlinie, der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) oder des Safe and Sustainability by Design (SSbD) Programms kann das von Vorteil sein. **Zur Information und Bewusstseinsbildung sind Hilfestellungen für Unternehmen förderlich** (z.B.: in Form von Plattformen, Workshops, einem nationalen Helpdesk).

Gesetzliche Regulierungen allein sind nicht ausreichend, um nachhaltig Substitutionsbemühungen bei Unternehmen zu fördern. Eine **Kombination aus regulatorischen und freiwilligen Ansätzen** ist dafür notwendig. **In der Substitutionsforschung gibt es großen Forschungsbedarf**, welcher durch **gezielte Förderprogramme adressiert** werden sollte. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die **Förderung des Wissenstransfers**. Dies sollte insbesondere **zwischen den Unternehmen** erfolgen, **da viele Unternehmen im Bereich der Chemikaliensubstitution sehr engagiert sind**. Zusätzlich sollte auch der **Austausch von Unternehmen, Behörden, NGOs und akademischer Forschung gefördert** werden. So können Unternehmen gezielt über Vorgehensweise, Tools und Methoden für den Substitutionsprozess informiert werden. Zusätzlich sollte auch ein **Raum zum Austausch von Wissen und Erfahrungen** (z.B.: Best Practice Beispiele) **im Kontext der Chemikaliensubstitution** geschaffen werden.

Quellen

- [1] LAGuS, „Gefährliche Stoffe“, *Landesamt für Gesundheit und Soziales Mecklenburg-Vorpommern*, s.a. <https://www.lagus.mv-regierung.de/Arbeitsschutz/Gefaehrliche-Stoffe/> (zugegriffen 7. Juni 2023).
- [2] REACH & CLP Helpdesk Luxembourg, „Substitution gefährlicher Stoffe“, *REACH & CLP Helpdesk Luxembourg*, 13. Dezember 2021. <https://www.reach.lu/de/substitution-gefaehrlicher-stoffe/> (zugegriffen 7. Juni 2023).
- [3] D. Drohmann und F. Hernández, „Risk of Regrettable Substitution under EU REACH: Level Playing Field in the EU Regulatory Context“, *International Chemical Regulatory and Law Review*, Bd. 3, Nr. 1, S. 25–35, 2020, doi: 10.21552/icrl/2020/1/6.
- [4] O. Mantyranta, „Chemikalien im Alltag – Besorgniserregende Stoffe – SVHC“, *ECHA*, 2017. <https://echa.europa.eu/de/-/chemicals-in-our-life-chemicals-of-concern-svhc> (zugegriffen 7. Juni 2023).
- [5] J. Lhotellier und S. Vandenbroucke, „Belgian roadmap for substitution of SVHC“. RDC Environment SA, 2019.
- [6] SPIN, „Substances in Preparations in Nordic Countries“, 2022. <http://www.spin2000.net/spinmyphp/> (zugegriffen 1. Juli 2022).
- [7] BAuA, „Verwendung von Trichlorethen in geschlossenen technischen Systemen - Biomonitoring der Systembediener und Bystander“, *BAuA: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, s.a. <https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2379.html> (zugegriffen 16. Februar 2023).
- [8] Chemwatch, „Trichlorethylen“, *Chemwatch*, 2022. <https://www.chemwatch.net/de/resource-center/trichloroethylene/> (zugegriffen 16. Februar 2023).
- [9] ECHA, *Impacts of REACH authorisation of trichloroethylene: case study*. LU: Publications Office, 2022. Zugegriffen: 16. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2823/8510>
- [10] ECHA, „Substance Infocard Trichlorethylen“, s.a. <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.001.062> (zugegriffen 16. Februar 2023).
- [11] H. Joël Tchognia Nkuissi, F. Kouadio Konan, B. Hartiti, und J.-M. Ndjaka, „Toxic Materials Used in Thin Film Photovoltaics and Their Impacts on Environment“, in *Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules*, A. Gok, Hrsg., IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.88326.
- [12] J. Bilbao, G. Heath, A. Norgren, M. Lunardi, A. Carpenter, und R. Corkish, „PV Module Design for Recycling Guidelines“, NREL/TP-6A20-80984, 1832877, MainId:79760, Okt. 2021. doi: 10.2172/1832877.
- [13] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, und C. M. Chong, „A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 109, S. 532–550, Juli 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.020.
- [14] T. Doi, I. Tsuda, H. Unagida, A. Murata, K. Sakuta, und K. Kurokawa, „Experimental study on PV module recycling with organic solvent method“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 67, Nr. 1–4, S. 397–403, März 2001, doi: 10.1016/S0927-0248(00)00308-1.
- [15] I. Andersson und D. Slunge, *Substitution of trichloroethylene in metal parts cleaning in the European Union*. 2021. Zugegriffen: 17. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://echa.europa.eu/documents/10162/17228/substitution_tce_metal_parts_cleaning_en.pdf/a2a92dc2-f9d2-5260-dd51-6aa29b261225?t=1625675357307
- [16] ECHA, „SEAC Opinion on an Application for Authorisation for Trichloroethylene: Use of Trichloroethylene in Industrial Parts Cleaning by Vapour Degreasing in Closed Systems where specific requirements (system of use-parameters) exist“. ECHA, 2015. Zugegriffen: 17. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/18a240f5-d83d-40ff-bde9-d4ae1f5e9904>

- [17] ECHA, „Perfluoralkylchemikalien (PFAS)“, ECHA, 2023. <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas> (zugegriffen 3. Juli 2023).
- [18] ECHA, „ANNEX XV RESTRICTION REPORT PROPOSAL FOR A RESTRICTION SUBSTANCE NAME(S): Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)“. ECHA, 2023. Zugegriffen: 3. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/1c480180-ece9-1bdd-1eb8-0f3f8e7c0c49>
- [19] B. Stöffler, „Substitution von Gefahrstoffen: gefährliche Stoffe und Verfahren ersetzen - TRGS 600 umsetzen“, *Gefahrstoff-Entsorgung*, 2020.
- [20] A. Alisov und M. P. Wistuba, *Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)*. in Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, no. S 111. Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1852/file/S111_barrierefreies_ELBA_PDF.pdf
- [21] ECHA, „Datenbank des C&L-Verzeichnisses - ECHA“, 2023. <https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/cl-inventory-database> (zugegriffen 27. Februar 2023).
- [22] ECHA, „Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe“, ECHA, 2023. https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table?p_p_id=disslists_WAR_disslistsportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&disslists_WAR_disslistsportlet_javax.portlet.action=searchDissLists (zugegriffen 24. Februar 2023).
- [23] ECHA, „Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe“, ECHA, 2023. <https://echa.europa.eu/de/authorisation-list/-/dislist/details/0b0236e1804df205> (zugegriffen 24. Februar 2023).
- [24] ECHA, „Liste der Beschränkungen - ECHA“, ECHA, 2023. <https://echa.europa.eu/de/substances-restricted-under-reach> (zugegriffen 31. März 2023).
- [25] U.S. Environmental Protection Agency, „Nonylphenol (NP) and Nonylphenol Ethoxylates (NPEs) Action Plan“, 2010, Zugegriffen: 22. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rin2070-za09_np-npes_action_plan_final_2010-08-09.pdf
- [26] Cosmetic Ingredient Review, „Safety Assessment of Nonoxynols as Used in Cosmetics“. Cosmetic Ingredient Review, 2015. Zugegriffen: 23. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.cir-safety.org/sites/default/files/nonoxy062015tent.pdf>
- [27] Australian Industrial Chemicals Introduction Scheme, „Nonylphenol and octylphenol ethoxylates and related compounds: Human health tier II assessment“. 2019. Zugegriffen: 24. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/Nonylphenol%20and%20octylphenol%20ethoxylates%20and%20related%20compounds_Human%20health%20tier%20II%20assessment.pdf
- [28] H. A. Waxman, E. J. Markey, und D. DeGette, „Chemicals used in Hydraulic Fracturing“. US House of Representatives Committee on Energy and Commerce, 2011. Zugegriffen: 24. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://ecolo.org/documents/documents_in_english/gas-Hydraulic-Fract-chemicals-2011-report.pdf
- [29] H. G. Meiners, „Fracking in unkonventionellen Erdgas-Lagerstätten in NRW - Kurzfassung zum Gutachten“. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2012. Zugegriffen: 24. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/gutachten_fracking_nrw_2012.pdf
- [30] ECHA, „ANNEX XVII TO REACH – Conditions of restriction entry 46“. 2016. Zugegriffen: 24. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/e5842a1e-e9f9-6096-2829-72f71c00eaab>

- [31] Center for Biologics Evaluation and Research, „Influenza A (H1N1) 2009 Monovalent Vaccines Descriptions and Ingredients“, *FDA*, Apr. 2019, Zugegriffen: 23. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/vaccines/influenza-h1n1-2009-monovalent-vaccines-descriptions-and-ingredients>
- [32] Novartis Vaccines and Diagnostics Limited, „Influenza A (H1N1) 2009 Monovalent Vaccine“. Novartis Vaccines and Diagnostics Limited, 2009. Zugegriffen: 23. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fda.gov/media/77422/download>
- [33] U.S. Environmental Protection Agency, „Learn About Design for the Environment (DfE) Certification“, 26. Juni 2015. <https://www.epa.gov/pesticide-labels/learn-about-design-environment-dfe-certification> (zugegriffen 27. Februar 2023).
- [34] U.S. Environmental Protection Agency, *DfE Alternatives Assessment for Nonylphenol Ethoxylates*. s.l.: United States Environmental Protection Agency, 2012.
- [35] J. Liu, C. Ren, Y. Xia, X. Hu, und Y. Fang, „Nonylcyclohexanol ethoxylates, a green alternative of nonylphenol ethoxylate, on the interfacial physicochemical properties aspects“, *J Surfact & Detergents*, Bd. 25, Nr. 1, S. 17–26, Jän. 2022, doi: 10.1002/jsde.12543.
- [36] D. A. Leisewitz und D. W. Schwarz, „Stoffströme wichtiger endokrin wirksamer Industriechemikalien (Bisphenol A; Dibutylphthalat/Benzylbutylphthalat; Nonylphenol/Alkylphenoethoxylate)“. Umweltbundesamt, 1997. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/vollendokrin.pdf>
- [37] IHS Markit, „Bisphenol A. Chemical Economics Handbook“. 2022. Zugegriffen: 4. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/bisphenol-chemical-economics-handbook.html>
- [38] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Health and Consumer Protection, *Updated European Union risk assessment report : 4,4'-isopropylidenediphenol (bisphenol-A) : environment addendum of February 2008*. AT: Publications Office, 2010. Zugegriffen: 27. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/40195>
- [39] ECHA, „Bisphenole - ECHA“. <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/bisphenols> (zugegriffen 27. März 2023).
- [40] ECHA, „ANNEX XVII TO REACH – Conditions of restriction entry no. 66“, 2017. <https://echa.europa.eu/documents/10162/1451b2a8-117e-e179-cfcd-c57214bb4adf> (zugegriffen 27. März 2023).
- [41] European Commission, „Bisphenol A: EU ban on baby bottles to enter into force tomorrow“, *European Commission - European Commission*, 2011. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_11_664 (zugegriffen 28. März 2023).
- [42] EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids (CEP) *u. a.*, „Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs“, *EFSA*, Bd. 21, Nr. 4, Apr. 2023, doi: 10.2903/j.efsa.2023.6857.
- [43] EFSA, „Bisphenol A | EFSA“, *European Food Safety Authority*, 25. Mai 2022. <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/bisphenol> (zugegriffen 28. März 2023).
- [44] European Commission, „Commission Regulation (EU) 2018/213 of 12 February 2018 on the use of bisphenol A in varnishes and coatings intended to come into contact with food and amending Regulation (EU) No 10/2011 as regards the use of that substance in plastic food contact materials (Text with EEA relevance)“, *OJ L 38, 13.2.2018, p. 6–10*, 2018, Zugegriffen: 28. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0213&from=EL>
- [45] ECHA, „Registry of restriction intentions until outcome - Bisphenols with endocrine disrupting properties for the environment and their salts“, 2023. <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1853413ea> (zugegriffen 27. März 2023).
- [46] European Commission, *Commission Staff Working Paper. Analysis associated with the Roadmap to a Resource Efficient Europe Part I. Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social*

- Committee and the Committee of Regions Roadmap to a Resource Efficient Europe*. Brussels: European Commission, 2011.
- [47] A. S. Budiman u. a., „Enabling lightweight polycarbonate-polycarbonate (PC-PC) photovoltaics module technology – Enhancing integration of silicon solar cells into aesthetic design for greener building and urban structures“, *Solar Energy*, Bd. 235, S. 129–139, März 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.018.
- [48] S. Qusai, S. Esraa, und R. Aseel, „Polycarbonate Bladed Highway Wind Turbine: A Case Study“, in *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, Amman, Jordan: IEEE, Apr. 2021, S. 1–5. doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427820.
- [49] Röchling, „Plastics for efficient and low-maintenance wind turbines“. Röchling Group, 2018. Zugegriffen: 29. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.roechling.com/fileadmin/downloads/Roechling_Industrial/Brochures/EN/Windpower-EN.pdf
- [50] FIBOX, „Polycarbonate Enclosures for Wind Power Fibox non-metallic NEMA enclosures“, *Fibox non-metallic NEMA enclosures*, 22. Februar 2023. <https://www.fiboxusa.com/enclosures-for-wind-power/> (zugegriffen 28. März 2023).
- [51] Integra Enclosures, „Advantages of Polycarbonate“. Zugegriffen: 28. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.integraenclosures.com/wp-content/uploads/2022/11/Advantages-of-Polycarbonate.pdf>
- [52] Polycase, „Polycarbonate Enclosures: Features, Benefits and Common Applications“, *TechTalk Blog*, 16. Oktober 2018. <https://www.polycase.com/techtalk/plastic-electronic-enclosures/polycarbonate-enclosures-features-benefits-and-common-applications.html> (zugegriffen 28. März 2023).
- [53] European Commission, „Bisphenol A in medical devices - Is exposure to BPA through the use of medical devices safe for humans?“ European Commission, 2015. Zugegriffen: 28. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/docs/citizens_bpa_en.pdf
- [54] Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, „Potential alternatives to bisphenol A“, *Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail*, 12. Oktober 2017. <https://www.anses.fr/en/content/potential-alternatives-bisphenol> (zugegriffen 30. März 2023).
- [55] M. K. Moon, „Concern about the Safety of Bisphenol A Substitutes“, *Diabetes Metab J*, Bd. 43, Nr. 1, S. 46, 2019, doi: 10.4093/dmj.2019.0027.
- [56] H. Zhang, „BPA replacement linked to increased cardiovascular disease“, *Environmental Health News*, 2022. <https://www.ehn.org/bpa-replacement-2656483035.html> (zugegriffen 30. März 2023).
- [57] K. G. Harnett, A. Chin, und S. M. Schuh, „BPA and BPA alternatives BPS, BPAF, and TMBPF, induce cytotoxicity and apoptosis in rat and human stem cells“, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Bd. 216, S. 112210, Juni 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112210.
- [58] U.S. Environmental Protection Agency, „Bisphenol A Alternatives in Thermal Paper“. United States Environmental Protection Agency, 2015. Zugegriffen: 30. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/bpa_final.pdf
- [59] E. Stoye, „BPA substitute made from paper industry leftovers“, *Chemistry World*, 2014. <https://www.chemistryworld.com/news/bpa-substitute-made-from-paper-industry-leftovers/7177.article> (zugegriffen 30. März 2023).
- [60] Y. Peng, K. H. Nicastro, T. H. Epps, und C. Wu, „Evaluation of Estrogenic Activity of Novel Bisphenol A Alternatives, Four Bioinspired Bisguaiacol F Specimens, by in Vitro Assays“, *J. Agric. Food Chem.*, Bd. 66, Nr. 44, S. 11775–11783, Nov. 2018, doi: 10.1021/acs.jafc.8b03746.
- [61] W. Goodmann, „Food Grade Plastic: Which Plastics Are Safe For Food Storage“, *Palmetto Industries*, 11. März 2022. <https://www.palmetto-industries.com/safe-food-grade-plastic/> (zugegriffen 30. März 2023).
- [62] RPA, „Substitution of Chemical Substances of Potential Concern“. 2018.

- [63] N. Kindermann, À. Cristòfol, und A. W. Kleij, „Access to Biorenewable Polycarbonates with Unusual Glass-Transition Temperature (T_g) Modulation“, *ACS Catal.*, Bd. 7, Nr. 6, S. 3860–3863, Juni 2017, doi: 10.1021/acscatal.7b00770.
- [64] bioplastics magazine, „Researchers developing BPA-free polycarbonate from limonene and CO₂“, 2017. <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20170718-BPA-free-polycarbonate-based-on-limonene-and-CO2-under-development.php> (zugegriffen 4. April 2023).
- [65] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, „Datenblatt 1-Methyl-2-pyrrolidon“. 2018. Zugegriffen: 5. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.reach.baden-wuerttemberg.de/documents/11233/367355/1Methyl2pyrrolidon_872504.pdf/207425d8-b69e-4eb3-9274-534c1e3c1590#:~:text=1%2DMethyl%2D2%2Dpyrrolidon%20findet%20haupts%C3%A4chlich%20Anwendung%20als%20L%C3%B6sungsmittel,in%20Arzneimitteln%20und%20in%20Agrochemikalien.
- [66] T. Farmer, L. Gootjes, M. van Leeuwen, D. van Es, F. Byrne, und J. Sherwood, „Renewable solvents with high performance in application and improved toxicity profile. D3.6 - Application of NMP replacement solvents“. University of York, 2020. Zugegriffen: 7. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cf65328a&appId=PPGMS>
- [67] ECHA, „Annex XVII to REACH - Conditions of restriction. Entry 71“. ECHA. Zugegriffen: 5. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/5161f2bf-503c-2107-ab54-c087017d11c9>
- [68] R. Sliz *u. a.*, „Suitable Cathode NMP Replacement for Efficient Sustainable Printed Li-Ion Batteries“, *ACS Appl. Energy Mater.*, Bd. 5, Nr. 4, S. 4047–4058, Apr. 2022, doi: 10.1021/acsaem.1c02923.
- [69] Recharge und EUROBAT, „Position paper Recommendation about n-methyl-pyrrolidone (NMP; CAS no. 872-50-4) proposal for inclusion in Annex XIV for authorization.“ The Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association & Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers, 2017. Zugegriffen: 5. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2020/01/2017-05-24-RECHARGE-position-NMP.pdf>
- [70] A. Avdeef, „Solubility of sparingly-soluble ionizable drugs“, *Advanced Drug Delivery Reviews*, Bd. 59, Nr. 7, S. 568–590, Juli 2007, doi: 10.1016/j.addr.2007.05.008.
- [71] Sh. Soltanpour, B. Jafari, M. Barzegar-Jalali, und A. Jouyban, „Solubility of Glibenclamide in the Aqueous Mixtures of Polyethylene Glycol 400, Propylene Glycol and N-Methyl-Pyrrolidone at 298.2K“, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Bd. 24, Nr. 1, S. 111–115, 2014, doi: 10.1016/S1773-2247(14)50016-0.
- [72] S. S. Godavarthy *u. a.*, „Design of improved permeation enhancers for transdermal drug delivery“, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Bd. 98, Nr. 11, S. 4085–4099, Nov. 2009, doi: 10.1002/jps.21940.
- [73] P. J. Lee, R. Langer, und V. P. Shastri, „Role of n-methyl Pyrrolidone in the Enhancement of Aqueous Phase Transdermal Transport“, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Bd. 94, Nr. 4, S. 912–917, Apr. 2005, doi: 10.1002/jps.20291.
- [74] P. J. Lee, N. Ahmad, R. Langer, S. Mitragotri, und V. Prasad Shastri, „Evaluation of chemical enhancers in the transdermal delivery of lidocaine“, *International Journal of Pharmaceutics*, Bd. 308, Nr. 1–2, S. 33–39, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.ijpharm.2005.10.027.
- [75] K. M. Yerramsetty, B. J. Neely, S. V. Madihally, und K. A. M. Gasem, „A skin permeability model of insulin in the presence of chemical penetration enhancer“, *International Journal of Pharmaceutics*, Bd. 388, Nr. 1–2, S. 13–23, März 2010, doi: 10.1016/j.ijpharm.2009.12.028.
- [76] M. Fujii *u. a.*, „Effect of N-methyl-2-pyrrolidone on the skin permeation of estradiol and levonorgestrel from adhesive strips prepared using Eudragit EPO“, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Bd. 16, Nr. 2, S. 121–125, 2006, doi: 10.1016/S1773-2247(06)50018-8.

- [77] S. A. Akhter und B. W. Barry, „Absorption through human skin of ibuprofen and flurbiprofen; effect of dose variation, deposited drug films, occlusion and the penetration enhancer *N*-methyl-2-pyrrolidone“, *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, Bd. 37, Nr. 1, S. 27–37, Apr. 2011, doi: 10.1111/j.2042-7158.1985.tb04926.x.
- [78] Deutsche Apothekerzeitung, „Prostatakarzinom: FDA erteilt Zulassung für Leuprorelinacetat“, *DAZ.online*, 17. Februar 2002. <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2002/daz-8-2002/uid-5540> (zugegriffen 6. April 2023).
- [79] R. Sanghvi, R. Narazaki, S. G. Machatha, und S. H. Yalkowsky, „Solubility Improvement of Drugs using *N*-Methyl Pyrrolidone“, *AAPS PharmSciTech*, Bd. 9, Nr. 2, S. 366–376, Juni 2008, doi: 10.1208/s12249-008-9050-z.
- [80] Integrated Chemicals, „NMP Alternatives: Dioxolane & TOU“, *Integrated Chemicals*. <https://www.icspecialties.com/en/products/solvents/alternatives-nmp/en/products/solvents/alternatives-nmp/> (zugegriffen 7. April 2023).
- [81] Gaylord Chemical Company, „Replace NMP“, *Gaylord Chemical*. <https://www.gaylordchemical.com/replace-nmp/> (zugegriffen 20. März 2023).
- [82] L. Germán, J. M. Cuevas, R. Cobos, L. Pérez-Alvarez, und J. L. Vilas-Vilela, „Green alternative cosolvents to *N*-methyl-2-pyrrolidone in water polyurethane dispersions“, *RSC Adv.*, Bd. 11, Nr. 31, S. 19070–19075, 2021, doi: 10.1039/D1RA03157K.
- [83] G. R. Court, C. H. Lawrence, W. D. Raverty, und A. J. Duncan, „Method for converting lignocellulosic materials into useful chemicals“, US20120111714A1, 10. Mai 2012 Zugegriffen: 6. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/US20120111714A1/en>
- [84] J. Sherwood u. a., „Dihydrolevoglucosenone (Cyrene) as a bio-based alternative for dipolar aprotic solvents“, *Chem. Commun.*, Bd. 50, Nr. 68, S. 9650–9652, 2014, doi: 10.1039/C4CC04133J.
- [85] W. Fang und H. Sixta, „Advanced Biorefinery based on the Fractionation of Biomass in γ -Valerolactone and Water“, *ChemSusChem*, Bd. 8, Nr. 1, S. 73–76, Jän. 2015, doi: 10.1002/cssc.201402821.
- [86] D. M. Alonso, S. G. Wettstein, und J. A. Dumesic, „Gamma-valerolactone, a sustainable platform molecule derived from lignocellulosic biomass“, *Green Chem.*, Bd. 15, Nr. 3, S. 584, 2013, doi: 10.1039/c3gc37065h.
- [87] Chemsec Marketplace, „Cyrene a biobased alternative to NMP, DMF and similar solvents“. <https://marketplace.chemsec.org/Alternative/Cyrene-a-biobased-alternative-to-NMP-DMF-and-similar-solvents-75> (zugegriffen 7. April 2023).
- [88] National Institute for Occupational Safety and Health, „Glutaraldehyde | NIOSH | CDC“, *Centers for Disease Control and Prevention*, 2019. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/glutaraldehyde/default.html> (zugegriffen 27. April 2023).
- [89] ECHA und Biocidal Products Committee (BPC), „Opinion on the application for approval of the active substance: Glutaraldehyde. Product type: 4“. ECHA, 2014. Zugegriffen: 27. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/14bb65b3-2ee9-4f83-83e7-cd89cc0674ad>
- [90] Deutscher Bundestag, „Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, Rainder Steenblock, Undine Kurth (Quedlinburg), Cornelia Behm und der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN – Drucksache 16/7935 – Reinigung der geplanten Gazprom-Gaspipeline mit Glutaraldehyd“. Deutscher Bundestag 16. Wahlperiode, 2008. Zugegriffen: 27. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/16/080/1608041.pdf>
- [91] BLC Leathertech, „Glutaraldehyde was listed on the Substances of Very High Concern (SVHC) candidate list“, *BLC Leathertech*, 2021. <https://www.blcleathertech.com/news/glutaraldehyde-is-now-listed-on-the-svhc-list> (zugegriffen 27. April 2023).
- [92] Cantel Medical, „High Level Desinfektion“, *Cantel Medical*. <https://www.cantelmedical.eu/de/high-level-desinfektion/> (zugegriffen 27. April 2023).
- [93] Royal College of Nursing, „Is there an alternative to glutaraldehyde? A review of agents used in cold sterilisation“. Royal College of Nursing, 2000. Zugegriffen: 27. April 2023. [Online].

- Verfügbar unter: <https://www.saude.sc.gov.br/index.php/informacoes-gerais-documentos/vigilancia-em-saude/ceciss/materiais-seminario-ceciss/palestras-i-seminario/marcos-david-somberg/palestras-micobacteria-ceciss/36-2000-is-there-an-alternative-to-glutahaldeyde-s-trabalhador/file>
- [94] C. Schilliger-Musset, „Inclusion of substances of very high concern in the Candidate List for eventual inclusion in Annex XIV (Decision of the European Chemicals Agency)“. 2021.
- [95] ECHA, „Substance Regulatory Obligations - Glutaral“, 2022. <https://echa.europa.eu/de/legislation-obligation/-/obligations/100.003.506> (zugegriffen 28. April 2023).
- [96] National Institute for Occupational Safety and Health, „Glutaraldehyde: occupational hazards in hospitals.“, 2014. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-115/default.html> (zugegriffen 27. April 2023).
- [97] Zielinski, Andreas, „Toxizität von Glutaraldehyd und deren Reduktion durch Quervernetzung mit bovinem Kollagen und Dentin in chemischen und zellbiologischen Verfahren“, 2010, doi: 10.5283/EPUB.12853.
- [98] D. Chakraborty, A. H. Quadery, und M. A. K. Azad, „Studies on the Tanning with Glutaraldehyde as an Alternative to Traditional Chrome Tanning System for the Production of Chrome Free Leather“, *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, Bd. 43, Nr. 4, S. 553–558, 2009, doi: 10.3329/bjsir.v43i4.2246.
- [99] Md. M. Uddin, Md. J. Hasan, Y. Mahmud, F. Tuj-Zohra, und S. Ahmed, „Evaluating Suitability of Glutaraldehyde Tanning in Conformity with Physical Properties of Conventional Chrome-Tanned Leather“, *TLR*, Bd. 3, Nr. 3, S. 135–145, Sep. 2020, doi: 10.31881/TLR.2020.09.
- [100] U.S. Environmental Protection Agency, „Replacing Ethylene Oxide and Glutaraldehyde“, *Environmental Best Practices for Health Care Facilities*, 2002, [Online]. Verfügbar unter: https://noharm-uscanada.org/sites/default/files/documents-files/918/Replacing_Eth_Oxide_and_Glut.pdf
- [101] F. Eftekharizadeh, R. Dehnavieh, S. Noori Hekmat, und M. H. Mehrolihasani, „Health technology assessment on super oxidized water for treatment of chronic wounds“, *Med J Islam Repub Iran*, Bd. 30, S. 384, Juni 2016.
- [102] M. Uhl, O. Gans, B. Grillitsch, M. Fürhacker, und N. Kreuzinger, „Grundlagen zur Risikoabschätzung für quaternäre Ammoniumverbindungen“. Umweltbundesamt, 2005. Zugegriffen: 28. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/be271.pdf>
- [103] S. E. Walsh, J. Maillard, und A. D. Russell, „Ortho-phthalaldehyde: a possible alternative to glutaraldehyde for high level disinfection“, *Journal of Applied Microbiology*, Bd. 86, Nr. 6, S. 1039–1046, 2001, doi: 10.1046/j.1365-2672.1999.00791.x.
- [104] J. E. Bennett, R. Dolin, und M. J. Blaser, Hrsg., *Mandell, Douglas, and Bennett's principles and practice of infectious diseases*, Eighth edition. Philadelphia, PA: Elsevier/Saunders, 2015.
- [105] S. Mattern, „Pflanzliche Gerbung von Häuten mittels verdichtetem Kohlendioxid“, Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Fraunhofer UMSICHT, 2008. Zugegriffen: 15. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/b188462f-0efc-4eb9-86cd-9af36591f913/content>
- [106] REACHLaw Ltd, „Substitution Plan: Use number 3“. ECHA, 2020. Zugegriffen: 3. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/8a611ed4-d1c0-23ca-fd91-16e4328acaf4>
- [107] ECHA, „Chromium trioxide widely used in plating and surface treatment“, 2021. <https://echa.europa.eu/de/-/chromium-trioxide-widely-used-in-plating-and-surface-treatment> (zugegriffen 2. Mai 2023).
- [108] WKO, „FAQ - Fragen und Antworten zu Chromtrioxid“, 2021. <https://www.wko.at/branchen/gewerbe-handwerk/metalltechniker/fragen-und-antworten-zu-chromtrioxid.html> (zugegriffen 2. Mai 2023).

- [109] Zentralverband Oberflächentechnik e.V., „Chromtrioxid und REACH“, *Zentralverband Oberflächentechnik e.V.*, 2020. <https://www.zvo.org/politik/international/chromsaure-und-reach> (zugegriffen 2. Mai 2023).
- [110] M. Thalheim, „Erste Zulassung von Chromtrioxid für fünf Verwendungen erteilt“, *IHK Chemnitz*, 2021. <https://www.ihk.de/chemnitz/innovation/umweltschutz/reach/chromtrioxid-5075480> (zugegriffen 2. Mai 2023).
- [111] D. Wiethölter, „Die Chromtrioxid-Zulassung des CTACSub – und was daraus folgt!“, *WOTECH*, 2021. https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2021/04/20_wiethoelter_chrom_04j2021/20_wiethoelter_chrom_04j2021.php (zugegriffen 2. Mai 2023).
- [112] KEUCO GmbH & Co KG, „Analysis of Alternatives“. ECHA, s.a. Zugegriffen: 7. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/b3f6ec1b-d61e-50eb-270e-ea120772ce47>
- [113] REACH Baden Württemberg, „N,N-Dimethylacetamid“. REACH Baden Württemberg, 2018. Zugegriffen: 4. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.reach.baden-wuerttemberg.de/documents/11233/367355/NNDimethylacetamid_127195.pdf/0ee4e292-872f-4d61-8a40-6818a7f404a5
- [114] ECHA, „Draft background document for N,N-Dimethylacetamide (DMAC)“. ECHA, 2012. Zugegriffen: 4. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/75273ecf-4846-42cd-affa-420d425c1e6f>
- [115] Committee for Risk Assessment (RAC) und Committee for Socio-economic Analysis (SEAC), „Draft: Opinion on an Annex XV dossier proposing restrictions on N,N-dimethylacetamide (DMAC); 1-ethylpyrrolidin-2-one (NEP)“. ECHA, 2023. Zugegriffen: 4. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/164f46bf-c4ba-83bd-d8ff-909d9dd09470>
- [116] ECHA, „ECHA PROPOSES RESTRICTION ON N,N-DIMETHYLACETAMIDE (DMAC); 1-ETHYLPYRROLIDIN-2-ONE (NEP)“. ECHA, 2023. Zugegriffen: 4. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/a70333ce-6404-ecde-82eb-a29d6b802655>
- [117] ECHA, „Zu prüfende eingereichte Beschränkungen“, 2023. <https://echa.europa.eu/de/restrictions-under-consideration> (zugegriffen 4. Mai 2023).
- [118] Z. Li, M. Xing, L. Zhao, Z. Li, und Y. Wang, „Recovery of carbon fiber-reinforced polymer waste using dimethylacetamide base on the resin swelling principle“, *Front. Chem.*, Bd. 10, S. 1050827, Nov. 2022, doi: 10.3389/fchem.2022.1050827.
- [119] H. R. Verma, K. K. Singh, und T. R. Mankhand, „Comparative study of printed circuit board recycling by cracking of internal layers using organic solvents-dimethylformamide and dimethylacetamide“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 142, S. 1721–1727, Jän. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.118.
- [120] C. Zhou und Y. Wang, „Recycling of waste cotton fabrics into regenerated cellulose films through three solvent systems: A comparison study“, *J of Applied Polymer Sci*, Bd. 138, Nr. 48, S. 51255, Dez. 2021, doi: 10.1002/app.51255.
- [121] L. Wang, S. Huang, und Y. Wang, „Recycling of Waste Cotton Textile Containing Elastane Fibers through Dissolution and Regeneration“, *Membranes*, Bd. 12, Nr. 4, S. 355, März 2022, doi: 10.3390/membranes12040355.
- [122] Eastman, „Dimethylacetamide (DMAC)“, *Eastman*. [https://www.eastman.com/en/products/product-detail?product=71103648&pn=dimethylacetamide+\(dmac\)](https://www.eastman.com/en/products/product-detail?product=71103648&pn=dimethylacetamide+(dmac)) (zugegriffen 5. Mai 2023).
- [123] C. Ghayor, B. Gjoksi, J. Dong, B. Siegenthaler, A. Caflisch, und F. E. Weber, „N,N-Dimethylacetamide a drug excipient that acts as bromodomain ligand for osteoporosis treatment“, *Sci Rep*, Bd. 7, Nr. 1, S. 42108, Feb. 2017, doi: 10.1038/srep42108.
- [124] OECD, „Cross Country Analysis: Approaches to Support Alternatives Assessment and Substitution of Chemicals of Concern“, *Series on Risk Management*, Bd. 50, 2019, Zugegriffen: 8. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://one.oecd.org/document/env/jm/mono\(2019\)2/en/pdf](https://one.oecd.org/document/env/jm/mono(2019)2/en/pdf)

- [125] KEMI Swedish Chemicals Agency, „Substitution of hazardous substances“, 2021. <https://www.kemi.se/en/guidance-for-companies/substitution-of-hazardous-substances> (zugegriffen 9. Mai 2023).
- [126] ECHA, „Wie gehe ich vor? - ECHA“, ECHA. <https://echa.europa.eu/de/know-your-substances-and-needs-substitution> (zugegriffen 9. Mai 2023).
- [127] M. Rossi, C. Peele, und B. Thorpe, „BizNGO Chemical Alternatives Assessment Protocol“. Business-NGO Working Group, 2012. Zugegriffen: 10. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bizngo.org/images/ee_images/uploads/resources/BizNGOChemicalAltsAssessmentProtocol_04_12_12.pdf
- [128] KEMI Swedish Chemicals Agency, „PRIO: Inventory - the first step in the substitution work“, KEMI, 2022. <https://www.kemi.se/prioguiden/english/inventory> (zugegriffen 7. August 2023).
- [129] KEMI Swedish Chemicals Agency, „PRIO: Substitution“, KEMI, 2022. <https://www.kemi.se/prioguiden/english/substitute> (zugegriffen 8. August 2023).
- [130] C. C. for O. H. and S. Government of Canada, „CCOHS: Substitution of Chemicals - Considerations for Selection“, 5. April 2023. <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/substitution.html> (zugegriffen 10. Mai 2023).
- [131] EU-OSH, „Substitution of hazardous chemicals - OSHwiki | European Agency for Safety and Health at Work“, 2017. <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/substitution-hazardous-chemicals> (zugegriffen 8. August 2023).
- [132] OECD, „Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives“, *OECD Series on Risk Management, No. 60, Environment, Health and Safety, Environment Directorate*, 2021, Zugegriffen: 11. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/guidance-on-key-considerations-for-the-identification-and-selection-of-safer-chemical-alternatives.pdf>
- [133] Umweltbundesamt, *Guide on sustainable chemicals*. Umweltbundesamt, 2016. Zugegriffen: 10. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/guide-on-sustainable-chemicals>
- [134] Lowell Center for Sustainable Production, University of Massachusetts und Green Chemistry & Commerce Council, „An Analysis of Corporate Restricted Substance Lists (RSLs) and Their Implications for Green Chemistry and Design for Environment“. 2008. Zugegriffen: 8. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://greenchemistryandcommerce.org/downloads/RSLAnalysisandList_000.pdf
- [135] S. Koch, „Untersuchungen von bleifreien Aluminium-Automatenlegierungen“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2010. Zugegriffen: 11. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1847989/AC08215702n01vt.pdf>
- [136] ECHA, „Recommendation of the European Chemicals Agency of 12 April 2023 for the inclusion of substances in Annex XIV to REACH (List of Substances subject to Authorisation)“. ECHA, 2023. Zugegriffen: 11. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/ec9a9309-c2f4-c555-4364-1196ab02c1d1>
- [137] Deutsches Kupferinstitut, „Die Auswirkungen von Bismut als Bleiersatz“, 2019. https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/10/Factsheet_Bismut-als-Bleiersatz_final.pdf (zugegriffen 11. August 2023).
- [138] Government of Canada, „Examining opportunities to support the transition to safer chemicals in Canada“, 2017. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/chemical-substances/consulting-future-chemicals-management-canada/examining-opportunities-support-transition-safer-chemicals-canada.html> (zugegriffen 8. August 2023).
- [139] OECD, „Synthesis Report: OECD Workshop on Approaches to Support Substitution and Alternatives Assessment“, *Series on Risk Management*, Bd. 51, 2019, Zugegriffen: 8. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://one.oecd.org/document/env/jm/mono\(2019\)3/en/pdf](https://one.oecd.org/document/env/jm/mono(2019)3/en/pdf)
- [140] C. Caldeira u. a., *Safe and sustainable by design chemicals and materials: review of safety and sustainability dimensions, aspects, methods, indicators, and tools*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.