

Know-how

Update Umweltwissen zur ECF- und TCF-Zellstoffbleiche

Verfasser

Daniela Zumstein
Emil Franov

Anzahl Seiten: 28
Basel, im Juni 2016

Impressum

Titel

Update Umweltwissen zur ECF- und TCF-Zellstoffbleiche

Autoren

Daniela Zumstein, Emil Franov

Kontakt

Daniela Zumstein
+41 61 206 95 55
d.zumstein@carbotech.ch

Unterstützung

Diese Arbeit wurde ermöglicht durch die Unterstützung der WEPA Hygieneprodukte GmbH und dem Carbotech Know-how Fonds.

Hinweis

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmitteln und Grundlagen. Die Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher Teile dieses Berichts basieren, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Leser nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar.

Nutzungsbedingungen

Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Sie kann für den Eigengebrauch verwendet werden. Firmen, welche uns unterstützt haben, können diese Arbeit auch direkt an Dritte weitergeben.

Bezugsquelle

Diese Publikation kann bei der Carbotech AG bezogen werden.

Version

1.0 (Carbotech Know-how: Update Umweltwissen ECF-TCF-Zellstoffbleiche v1.0)

Datum

Juni 2016

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Abkürzungen und Begriffserklärungen	7
1 Hintergrund und Ausgangslage	9
2 Vorgehen	10
2.1 Literaturrecherche	10
2.2 Ökobilanz	10
3 Einführung	11
3.1 ECF und TCF in der öffentlichen Diskussion	11
3.1.1 Die AOX-Problematik	11
3.1.2 Aussagen zu den Bleichmethoden	11
3.2 Herstellung von ECF- und TCF-Zellstoffen	13
3.2.1 Delignifizierung der Holzfasern	13
3.2.2 Bleiche	14
3.2.2.1 Herkömmliche elementar chlorfreie (ECF) Bleiche	14
3.2.2.2 Moderne elementar chlorfreie (mECF) Bleiche	14
3.2.2.3 Total chlorfreie (TCF) Bleiche	15
3.2.2.4 Vergleich der Bleichmethoden	16
3.3 Marktsituation	16
3.3.1 Angebot	16
3.3.2 Bleichmethoden als Kriterium in europäischen Standards	17
4 Ökologischer Vergleich zwischen TCF- und mECF-Bleichverfahren	19
4.1 Ergebnisse Literaturrecherche	19
4.1.1 Prozess	19
4.1.2 Wasseremissionen	19
4.1.3 Wasserbedarf	20
4.1.4 Ausbeute	20
4.1.5 Auswirkungen auf den Holzbedarf	21
4.1.6 Energiebedarf	22
4.1.7 Fazit	22
4.2 Ökobilanzen	23
4.2.1 Ökologische Bewertung der Unterschiede von mECF- und TCF-Bleichverfahren	23
4.2.2 Relevanz der AOX-Emissionen	24
5 Schlussfolgerungen	25
6 Literatur	26
Anhang	

Zusammenfassung

Insbesondere im deutschsprachigen europäischen Raum herrscht oft die Meinung vor, dass chlorfreies Bleichen (total chlorfrei / TCF) das ökologischste Verfahren zum Bleichen von Zellstoffen sei, weil keine chlororganischen Verbindungen (AOX) entstünden. Andererseits wird TCF-Zellstoff auf dem Markt immer knapper verfügbar und auch die weltweit produzierten Mengen werden im Vergleich zu den mit Chlordioxid gebleichten Zellstoffen (elementar chlorfrei / ECF) immer unbedeutender. Über 90 % des weltweit hergestellten chemisch aufgeschlossenen Zellstoffs wird mit dem ECF-Verfahren gebleicht; Tendenz steigend.

Vor dem Hintergrund dieser für umweltbewusste Zellstoffeinkäufer unbefriedigenden Situation soll diese Arbeit eine Antwort liefern auf die Frage, wie die Umweltbelastung von ECF-Zellstoffen im Vergleich zu TCF-Zellstoffen aussieht. Dafür wurden zum einen Aussagen aus der Fachliteratur zusammengetragen und diskutiert. Zum anderen wurde eine vereinfachte Ökobilanz durchgeführt.

Der Literatur ist zu entnehmen, dass die Umweltbelastung von verschiedenen ECF-Zellstoffwerken stark variieren kann, nicht zuletzt auch wegen verschieden hoher AOX-Emissionswerte im Abwasser. Im Gegensatz zur herkömmlichen ECF-Bleiche¹ weist die moderne ECF (mECF) Prozessmodifikationen in der Zellstoffproduktion auf, wie sie auch bei der TCF-Bleiche üblich sind und verwendet weniger Chlordioxid in der Bleiche. Dadurch sind die AOX-Emissionen von mECF tiefer als bei herkömmlichen ECF-Verfahren und werden in dieser Studie für mECF auf höchstens 0,2 kg/adt festgelegt.² Aus der Analyse von gängigen Aussagen gegen die ECF-Bleiche lässt sich schliessen, dass diese meistens auf Problemen mit herkömmlichen ECF gebleichten Zellstoffen basieren. Die ökologischen Unterschiede von mECF- und TCF-Verfahren sind heute relativ klein, so dass die beiden Verfahren als gleichwertig angesehen werden können. Es verbleibt die Kritik an den AOX-Emissionen von mECF-Zellstoffen auf der einen sowie an der tieferen Ausbeute bei TCF-Zellstoffen auf der anderen Seite. Ein Vergleich der AOX-Emissionen bei mECF-Zellstoffen mit dem höheren Holzverbrauch bei TCF-Zellstoffen mit einer vereinfachten Ökobilanz zeigt, dass die beiden Zellstoffarten als ökologisch gleichwertig angesehen werden können. Herkömmlicher ECF-Zellstoff hat eine höhere Umweltbelastung.

Weiter zeigt die Ökobilanz, dass AOX-Emissionen im Abwasser von mECF gebleichten Zellstoffen mit etwa 2 % nur einen relativ geringen Anteil der Umweltbelastung des Zellstoffs verursachen. Der Grossteil der Umweltbelastung wird durch die Emission anderer Schadstoffe und durch den Ressourcenverbrauch verursacht. Für die zukünftige Etablierung der mECF-Bleiche als ökologisch gleichwertige Alternative zur TCF-Bleiche sehen wir es als wichtig an, dass von verschiedenen Anspruchsgruppen Kriterien für die Abgrenzung von mECF gebleichten Zellstoffen zu herkömmlichen ECF-Zellstoffen genauer definiert und eingeführt werden.

¹ In diesem Bericht wird von „herkömmlichem ECF“ oder „ECF“ gesprochen, wenn es sich nicht um die Bleiche mit den Anpassungen moderner ECF-Verfahren handelt oder die Verfahren nicht genauer differenziert werden. Andere verwendete Begriffe sind „klassisches ECF“ (Verband Deutscher Papierfabriken VDP 2014), „straight ECF“ (Bergnor-Gidnert 2006), „traditional ECF“ (Ritchlin u.a. 1998).

² Der in dieser Studie verwendete maximale AOX-Wert von 0,2 kg/adt für mECF gebleichte Zellstoffe entspricht dem Grenzwert für AOX gemäss BREF (Referenzdokument zu den besten verfügbaren Techniken / BVT), den Abwässer aus der Zellstoffproduktion bei Einleitung in die Gewässer maximal aufweisen dürfen.

Abkürzungen und Begriffserklärungen

adt	<i>Air dry ton.</i> Lufttrockene Tonne Zellstoff, Papier etc.
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogenverbindungen. Summenparameter, der die Menge an halogenierten Stoffen in Gewässern und im Klärschlamm erfasst.
Beste verfügbare Techniken (BVT)	Beste verfügbare Techniken werden für verschiedenste Industriezweige vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission definiert und dienen als Referenz für die Festlegung, Umsetzung oder Bewertung von Umweltzielen. Die BVT werden im Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie BREF ausgeführt (hier zitiert als JRC 2015).
BREF	Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken (BVT).
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf. Mass für die Menge an Sauerstoff, die benötigt wird, um die organischen Verbindungen in Gewässern zu oxidieren.
ECF	Elementar chlorfrei. Bleichmethode, bei der Chlordioxid statt Chlorgas (elementares Chlor) als Bleichmittel verwendet wird. Wird in diesem Bericht als herkömmliches ECF bezeichnet.
ILCD 2011	Die ILCD-2011-Methode beruht auf bestehenden Ökobilanzierungsmethoden, die von der Europäischen Kommission im „International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook“ für die Ökobilanzierung empfohlen werden. Die hier verwendete Version (1.04) erlaubt die Normierung und Bewertung der einzelnen Indikatoren und so die Berechnung des Umweltfussabdrucks.
Kappa-Zahl	Mass für den Restligningehalt in Zellstoffen.
mECF	Modernes ECF. Wird in diesem Bericht verwendet für die Bleichmethode mit tieferen AOX-Emissionen als bei der herkömmlichen ECF-Bleiche. Als Bleichmittel werden neben Chlordioxid auch sauerstoffbasierte Chemikalien eingesetzt.
Ökobilanz	Eine Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse, engl. Life Cycle Assessment, LCA) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder anderen Systemen über den gesamten Lebensweg. Es werden verschiedene Bewertungsmethoden verwendet. Bei sogenannten Single-Score-Methoden wird das Resultat Umweltfussabdruck (engl. <i>environmental footprint</i>) genannt.
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine.
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane.
TCF	Total chlorfrei. Bleichmethode, bei der statt chlorhaltigen Bleichmitteln sauerstoffbasierte Bleichmittel wie beispielsweise Wasserstoffperoxid und Ozon verwendet werden.
UBP	Umweltbelastungspunkte. Einheit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP 2013).
UBP 2013	Die Methode der ökologischen Knappheit ermöglicht im Rahmen einer Ökobilanzierung die Bewertung der Wirkung von Schadstoffemissionen

	und der Entnahme von Ressourcen auf die Umwelt (Wirkungsabschätzung). Der resultierende Umweltfussabdruck wird in Umweltbelastungspunkten (UBP) angegeben.
Umweltfussabdruck	Mass für die Umweltbelastung eines Produkts über den gesamten Lebensweg, wird mit einer Ökobilanz berechnet. In diesem Bericht werden dafür die Bewertungsmethoden UBP 2013 sowie ILCD 2011 verwendet.
Verlängerte Delignifizierung	Prozessmodifikationen im Zellstoffaufschluss mit verlängertem und modifiziertem Kochen (extended modified cooking) und/oder Delignifizierung mit Sauerstoff (oxidative delignification).
Yield/Ausbeute	Anteil an brauchbaren Fasern nach Aufschluss und/oder Bleiche, ausgedrückt in Prozent des Rohmaterialinputs.

1 Hintergrund und Ausgangslage

Carbotech hat schon für viele Kunden Ökobilanzen von Papieren und Zellstoffen durchgeführt. Immer wieder werden wir auf die Relevanz des Aspektes der chlorfreien (TCF), respektive elementarchlorfreien Zellstoffbleiche (ECF) angesprochen, auch weil von verschiedenen Seiten TCF oft als eines der Hauptkriterien für umweltfreundliches Papier genannt wird. Sind TCF-gelaberte Papiere wirklich ökologisch vorzuziehen? Ist die ECF-Bleiche mittlerweile nicht ähnlich gut? Wie wichtig ist die Frage der Bleichmethode bei der ökologischen Papierauswahl noch? Dieser Carbotech Know-how Berichtsband soll eine aktuelle wissenschaftliche Grundlage liefern zur Beantwortung dieser Fragen.

Oft wird im deutschsprachigen Raum seitens des Handels, insbesondere auf dem Markt der Hygienepapiere, gefordert, dass ökologische Frischfaser-Papierprodukte aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff hergestellt sein müssen, ausgelobt als TCF. Das alternativ ausgelobte ECF gilt z.B. bei NGOs als weniger umweltfreundlich und hat in der Öffentlichkeit einen schlechteren Ruf. Wesentliches Argument ist dabei die Verwendung von chlorhaltigen Verbindungen (wie Chlordioxid) in der Bleiche. Dadurch entstehende chlororganische Verbindungen (AOX) geraten über das Abwasser in die Umwelt, weshalb das ECF-Verfahren im Vergleich zur TCF-Bleiche als schädlicher gilt.

Ziel des vorliegenden Wissens-Updates ist es, ökologische Unterschiede bei der Produktion von TCF- und ECF-Zellstoffen aufzuzeigen, wobei zwischen mECF-Bleiche und herkömmlicher ECF-Bleiche differenziert wird. Die verschiedenen Umwelteinflüsse von mECF- und TCF-Verfahren werden anhand einer Literaturrecherche zusammengetragen, verglichen und die wichtigsten mit einer Ökobilanz bewertet. Des Weiteren wird der Beitrag von AOX-Emissionen (bei mECF) an den Umweltfußabdruck von Zellstoff berechnet und bezüglich Relevanz beurteilt. Zusätzlich wird die Verfügbarkeit der verschiedenen Zellstoffarten auf dem Markt abgeklärt.

2 Vorgehen

2.1 Literaturrecherche

Der Kontext der Bleichmethoden sowie wichtige Faktoren bezüglich der Umweltwirkungen von ECF- und TCF-Verfahren wurden mit Hilfe einer Literaturrecherche zusammengetragen und einander gegenübergestellt. Diese berücksichtigt, soweit vorhanden, neuere Studien und Berichte, primär aus dem europäischen oder nordamerikanischen Raum. Die Quellen liefern teilweise widersprüchliche Informationen, wobei versucht wurde, die Breite der Aussagen aufzuzeigen. Die in der Ökobilanz verwendeten Aussagen orientieren sich in den Grundzügen an der Argumentation des BREF³ zur Zellstoff-, Papier- und Kartonproduktion.

2.2 Ökobilanz

Um die in der Literatur beschriebenen Unterschiede zu bewerten und in den Kontext der gesamten Zellstoffproduktion zu stellen, wurden Ökobilanzen erstellt.

Als funktionelle Einheit wird die Herstellung von einer Tonne luftgetrocknetem Zellstoff (adt) verwendet. Als Datengrundlage für die vorgelagerten Prozesse wurde auf Standarddaten aus ECOINVENT 2.2 zurückgegriffen. Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgte anhand der Methoden UBP 2013 (Methode der ökologischen Knappheit) und ILCD 2011.

Methode der ökologischen Knappheit 2013 („UBP 2013“)

Die Methode der ökologischen Knappheit ist eine in der Schweiz etablierte Methode, die Umweltbelastungspunkte (UBP) zur Bewertung für die verschiedenen Umweltwirkungen verwendet. Sie existiert seit 1990 und wurde 2006 und 2013 aktualisiert. Die Bewertungsmethode widerspiegelt die Umweltpolitik der Schweiz und bewertet die verschiedenen Umweltwirkungen nach einer „distance-to-target“-Methode. Für die Bewertung von Prozessen, deren Umweltbelastung ausserhalb der Schweiz erzeugt wird, gilt die Annahme, dass die für die verschiedenen Umweltprobleme die gleiche politische Priorisierung gilt wie in der Schweiz und somit gleiche Bewertungsfaktoren für die Umweltbelastung verwendet werden können (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013).

ILCD 2011

Die Europäische Kommission veranlasste die Ausarbeitung eines Handbuchs als internationale Referenz für Ökobilanzen (International Reference Life Cycle Data System ILCD Handbook) zur einheitlichen Kommunikation der integrierten Produktpolitik (IPP). In der dazu entwickelten Bewertungsmethode werden bestehende Modelle und Charakterisierungsfaktoren für die Berechnung der Wirkungsbilanz festgelegt. Die Umweltauswirkungen werden in dieser Methode mit verschiedenen Indikatoren dargestellt, zum Beispiel: Treibhauspotenzial, Ozonabbau, Bildung von Photosmog, lungengängige anorganische Stoffe, ionisierende Strahlung, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial, Human- und Ökotoxizität, Land- und Ressourcenverbrauch. Die hier verwendete Version 1.04 umfasst zusätzlich eine Normalisierung anhand des Referenzflusses pro Person und Jahr in den EU-27-Ländern und die Gewichtung der 16 Wirkungskategorien. Damit können die Wirkungskategorien zu einer Kennzahl zusammengefasst werden (European Commission-Joint Research Centre, 2011).

³ Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken (BVT)

3 Einführung

3.1 ECF und TCF in der öffentlichen Diskussion

3.1.1 Die AOX-Problematik

ECF ist die gängige Methode zum Bleichen von Zellstoffen und verwendet Chlordioxid als Bleichmittel. Chlordioxid kann das Lignin im Zellstoff lösen, wobei sich u.a. chlororganische Verbindungen bilden. Diese gehören zur Stoffgruppe der adsorbierbaren organisch gebundenen Halogene (AOX), die auch persistente, bioakkumulierende und toxische Stoffe (Dioxine, Furane etc.) beinhalten (Suess, 2010).

Durch die hohen Dioxinemissionen aus der Zellstoffbleiche mit Chlorgas (elementares Chlor) in den 1970er Jahren geriet auch AOX als Summenparameter in die öffentliche Kritik (Bajpai, 2012). Als Reaktion darauf ergriff die Zellstoffindustrie u.a. folgende Massnahmen: Chlorgas wurde durch Chlordioxid ersetzt, Bleichprozesse auf Sauerstoffbasis wurden entwickelt, die Abwasserreinigung wurde verbessert und Wasserkreisläufe wurden teilweise geschlossen (Suess, 2010). Die AOX-Emissionen im Abwasser sind dadurch stark gesunken und unterschreiten heute die gesetzlichen Vorschriften in vielen Ländern deutlich (JRC, 2015).

TCF bezeichnet die Bleichmethode, bei der auf sämtliche Chlorverbindungen verzichtet wird. Dadurch entstehen während der TCF-Bleiche keine AOX-Verbindungen. Weltweit wird nur ein kleiner Teil des Zellstoffs TCF gebleicht, dies vor allem in Europa.

In der öffentlichen Diskussion der 80er bis Anfang der 90er Jahre bestand in Europa weitgehend Einigkeit darüber, dass die Lösung der ökologischen Probleme der Zellstoffbleiche in der TCF-Methode liegt. Bereits Mitte der 90er Jahre wurde jedoch eine Untersuchung der AET (Alliance of Environmental Technology) veröffentlicht, die zum Schluss kam, dass eine ECF-Bleiche mit geringen AOX-Emissionen (vgl. 3.2.2.2) keine nachweisbaren Mengen an den problematischen chlorierten Dioxinen und Furanen freisetzt (Axegård & Bergnor, 2011).

Obwohl auf Produkten aus Zellstoff noch heute teilweise die Bleichmethoden angegeben werden und in der öffentlichen Diskussion unterschiedliche Meinungen dazu vertreten sind, scheint das Thema in den letzten Jahren mehr in den Hintergrund zu geraten. Vermehrt werden andere ökologische Fragen im Zusammenhang mit der Zellstoffproduktion diskutiert (z.B. Recycling- statt Frischfaser, Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung).

3.1.2 Aussagen zu den Bleichmethoden

Grundsätzlich sind ECF- und TCF-Bleichmethoden ökologisch gleichwertig, wenn die besten verfügbaren Techniken (gemäss BREF) angewendet werden (JRC, 2015). In der öffentlichen Diskussion sind verallgemeinernde Aussagen häufig zu finden, die zum Beispiel nicht zwischen BVT-ECF und herkömmlichem ECF unterschieden und deshalb vielfach nur begrenzt gültig oder sogar falsch sind. Dieses Kapitel listet gängige Aussagen auf (vgl. Tabelle 1) und ergänzt sie bei Bedarf mit Ausführungen.

Tabelle 1: Gängige negative Aussagen zur ECF- und TCF-Bleiche

ECF	TCF
<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Abwasserqualität: übelriechende Abwässer (allgemeine Verschmutzung), AOX-Emissionen, Freisetzung von Dioxinen und Furanen (Greenpeace Austria, 2011) • Wasser- und Energieverbrauch: 20-mal höher als beim TCF-Prozess (WWF, 2009) • Chlorchemie: Chlorelektrolyse verbraucht viel Energie und setzt Quecksilberverbindungen frei (Greenpeace Austria, 2011) • Chlordioxid gefährlicher für Arbeitskräfte in Zellstofffabrik als TCF-Bleichchemikalien (WWF, 2005) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefere Ausbeute: weniger Ertrag • Tiefere Qualität: beschränkte Anwendbarkeit der TCF-Bleiche für hochweisse Zellstoffe (JRC, 2015), geringere Faserlänge und -stärke, geringere Reißfestigkeit (CPI Confederation of paper industries, 2013) sowie höhere Viskosität (Bajpai, 2012)

Ausführungen zu den Aussagen gegen die ECF-Bleiche

Einleitend sei bemerkt, dass oft unpräzise Begriffe wie „Chlorbleiche“ (Greenpeace Austria, 2011) verwendet werden, bei denen unklar ist, ob neben der Chlorgasbleiche auch die Bleiche mit Chlordioxid (ECF) mit gemeint ist. Mit solchen unpräzisen Begriffen können ausschliesslich der Chlorgasbleiche zuzuordnende negative Umweltauswirkungen mit ECF in Verbindung gebracht werden.

Die Aussagen zur schlechten Abwasserqualität bei der ECF-Bleiche in Tabelle 1 werden getrennt voneinander besprochen, weil sie für die Bleichmethoden unterschiedlich wichtig sind.

Eine allgemein schlechte Abwasserqualität ist auf nicht optimierte Produktionsprozesse und ungenügende Abwasserreinigung zurückzuführen. Unabhängig von der Bleichmethode konnten diesbezüglich durch stärkere Delignifizierung des Holzes vor der Bleiche, durch möglichst hohe Prozesswasserrückführung und durch verbesserte Abwasserreinigung grosse Fortschritte erzielt werden (JRC, 2015).

Die AOX-Bildung bei der ECF-Bleiche ist abhängig von Art und Menge der organischen Substanzen im Prozesswasser zum einen und von den verwendeten chlorhaltigen Bleichmitteln zum anderen. Die Abwasserreinigung vor der Einleitung in Gewässer kann den AOX-Emissionswert noch verringern. Zahlen zur Grössenordnung der AOX-Emissionen liegen zwischen $< 0,1$ kg/adt (Trauth & Schönheit, 2004) und ca. 2 kg/adt (DOE, 2005).⁴ In der Literatur finden sich verschiedene Meinungen, ab welcher Konzentration AOX für die Umwelt schädlich ist (vgl. 4.1.2). Weitgehend Einigkeit besteht darin, dass die Toxizität des Abwassers von ECF gebleichten Zellstoffen bei geringen AOX-Emissionen ($< 0,2$ kg/adt) gegenüber TCF gebleichten Zellstoffen nicht erhöht ist (JRC, 2015).

Polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) und -furane (PCDF) sind unter den AOX-Verbindungen besonders umweltschädlich (Axegård & Bergnor, 2011). Bei der ECF-Bleiche können PCDD und PCDF entstehen, wenn Chlordioxid mit Chlorgas verunreinigt ist (LaFleur, 1996). In der modernen ECF-Bleiche wird die Bildung von PCDD und PCDF durch möglichst reines Chlordioxid und durch einen tiefen Gehalt an organischen Verbindungen (potenzielle AOX-Vorläufersubstanzen) im Prozesswasser so stark reduziert, dass sie nicht mehr nachweisbar sind (Axegård & Bergnor, 2011; JRC, 2015).

Die Aussage eines erhöhten Energie- und Wasserverbrauchs der ECF-Bleiche wird von anderen Quellen nicht gestützt (vgl. 4.1.3, 4.1.6).

Bezüglich Arbeitssicherheit schätzt Beca Amec (2006) in einer Studie für eine nationale Behörde die Risiken im Umgang mit Bleichchemikalien für ECF- und TCF-Verfahren vergleichbar hoch ein.

⁴ Die Bleiche mit Chlorgas führt im Vergleich zur ECF-Bleiche zu höheren AOX-Emissionen. Zahlen dazu finden sich bei IIED (1996): Dort werden AOX-Emissionen von 8–9 kg/adt genannt, welche sich bei teilweisem Ersatz des Chlorgases mit Chlordioxid auf ca. 2–3 kg/adt reduzieren.

Ausführungen zu den Aussagen gegen die TCF-Bleiche

Zur Ausbeute von TCF gebleichten Zellstoffen im Vergleich zu ECF gebleichten sind in der Literatur unterschiedliche Aussagen zu finden. Die Zahlen zum Ausbeuteverlust bei der TCF-Bleiche variieren von 0 bis 10 %, die häufigsten Nennungen liegen im Mittel bei etwa 2 % (vgl. 4.1.4). Eine tiefere Zellstoff-Ausbeute bedeutet einen höheren Verbrauch an Holz, womit der ökologische Druck auf den Wald erhöht wird.

Es wurden keine Studien gefunden, welche die Aussage über die tiefere Qualität von TCF-Zellstoff quantifizieren, weshalb sie hier nicht weiter behandelt werden.

3.2 Herstellung von ECF- und TCF-Zellstoffen

Dieses Kapitel bezieht sich auf das Sulfat-Verfahren, welches zum chemischen Aufschluss (Pulping) von Holz weltweit am häufigsten (80 %) verwendet wird (JRC, 2015). Bedeutend seltener wird das Sulfitverfahren angewendet. Sulfitzellstoff wird zumindest in Europa ausschliesslich chlorfrei gebleicht (CEPI, 2009).

3.2.1 Delignifizierung der Holzfasern

Im Sulfatverfahren wird der Holzrohstoff (z.B. Sägemehl oder gehäckseltes Holz) zum Aufschluss mit Natronlauge und Natriumsulfit bei hohem pH-Wert „gekocht“. Ziel des Kochens ist es, Lignin von den Holzfasern (Cellulose und Hemicellulose) zu lösen, ohne dass diese durch den Prozess angegriffen werden und sich somit die Ausbeute verringert. Die entstehende Schwarzlauge (Black Liquor) wird rückgeführt und aufbereitet, so dass die darin gelösten Chemikalien wiederverwendet und die gelösten organischen Bestandteile (ca. 50 % des Holzes) zur Energieerzeugung genutzt werden können (JRC, 2015).

Die Qualität des Kochprozesses wird insbesondere durch zwei Parameter bestimmt. Erstens soll der Ligningehalt nach dem Kochen möglichst tief sein, weil dadurch das Bleichen erleichtert wird. Zweitens soll die Kochlauge (Schwarzlauge) mit möglichst wenig Wasser verdünnt werden, um die Chemikalienrückgewinnung und die nachfolgende Aufkonzentration für die Energiegewinnung zu vereinfachen. Im Optimalfall werden bis zu 99 % der Bleichchemikalien zurückgewonnen, was zu tieferem Chemikalienverbrauch und entsprechend tieferen Chemikalienrückständen im Abwasser führt. Als Mass für den Anteil an im Zellstoff verbleibendem Lignin wird die Kappa-Zahl verwendet. Durch Prozessmodifikationen wie verlängertes und modifiziertes Kochen (extended and modified cooking) kann der Ligningehalt zusätzlich reduziert werden.

Nach dem Kochen folgt häufig eine Delignifizierung mit Sauerstoff (oxidative delignification), bei der weiteres Lignin mit Natronlauge, Natriumthiosulfat und gelöstem Sauerstoff entfernt wird.

Es liegt nun ein ungebleichter Zellstoff vor. Das bis zu diesem Punkt gebrauchte Wasser kann zurückgeführt und darin enthaltene Chemikalien können zurückgewonnen werden, während das in der Bleiche verwendete Wasser meist als Abwasser anfällt. Aus Sicht der Abwasserquantität und -belastung ist es darum von Vorteil, möglichst viel Lignin vor der Bleiche zu entfernen (tiefe Kappa-Zahl), damit im Bleichprozess weniger Wasser und Chemikalien benötigt werden. Je stärker allerdings im Aufschluss delignifiziert wird, desto eher werden Holzfasern angegriffen, wodurch Ausbeute und Qualität der Fasern abnimmt (JRC, 2015).

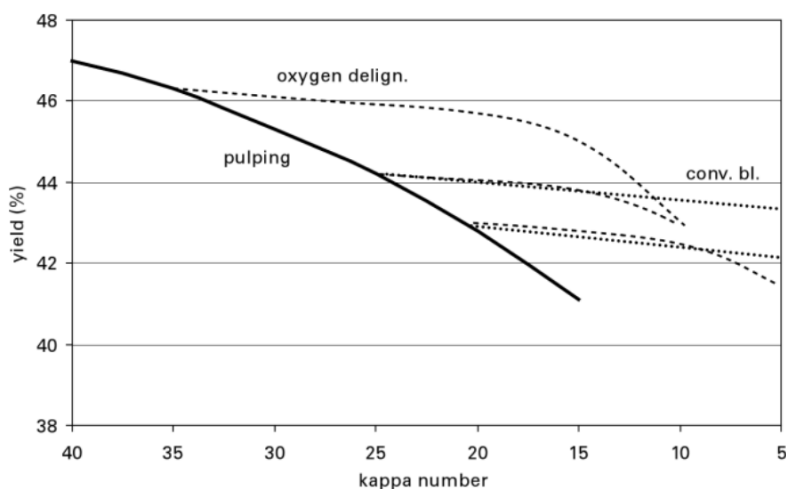


Abbildung 1: Ausbeute in Abhängigkeit der Kappa-Zahl bei verschiedenen Verfahren zur Delignifizierung

Die Ausbeute an Zellstoff nach dem Aufschluss ist abhängig vom gewählten Verfahren zum Lösen des Lignins. Bei tiefer Kappa-Zahl wirkt sich die weitere Delignifizierung stärker auf die Ausbeute aus als die Bleiche. Moderne Verfahren weisen nach dem Aufschluss häufig einen geringeren Ligningehalt auf als herkömmliche Verfahren. (Grafik: (Suess, 2010))

Es gibt diverse Möglichkeiten, mit denen bei der Zellstoffherstellung gemäss BVT die Umweltauswirkungen reduziert werden können: Erhöhung der Energieeffizienz, Reduktion von Wasser-, Lärm- und Luftemissionen, Verringerung von Abwasservolumen und Abfall etc. Die meisten können unabhängig von der Bleichmethode angewendet werden und sind so für den Vergleich von ECF und TCF nicht relevant.

3.2.2 Bleiche

In der Bleiche wird weiteres Lignin vom Zellstoff gelöst, bis der gewünschte Weissgehalt erreicht ist. Der Bleichprozess besteht aus mehreren Schritten, in denen Lignin zuerst freigesetzt und dann extrahiert wird. Das im Bleichprozess verwendete Wasser kann nicht oder nur teilweise mit dem Waschwasser des Aufschlusses zusammengeführt werden und fällt daher als Abwasser an (JRC, 2015).

Im Folgenden werden die ECF-Bleichmethoden (mit Unterscheidung zwischen herkömmlich ECF und modern ECF) sowie die TCF-Bleichmethode beschrieben.

3.2.2.1 Herkömmliche elementar chlorfreie (ECF) Bleiche

In der ECF-Bleiche wird auf den Einsatz von elementarem Chlor verzichtet. Das wichtigste Bleichmittel ist in der Regel Chlordioxid⁵ und wird meist in mehreren Schritten eingesetzt. Häufig kommen auch weitere Chemikalien zum Einsatz (JRC, 2015).

3.2.2.2 Moderne elementar chlorfreie (mECF) Bleiche

In diesem Bericht wird der Ausdruck modernes ECF-Bleichen für ECF-Zellstoffe verwendet, welche die für die Bleiche relevanten Anforderungen gemäss BVT erfüllen.⁶ Diese Anforderungen definieren einen maximalen AOX-Gehalt im Abwasser von 0,2 kg/adt bei der Einleitung in die Gewässer. Die Reduktion der AOX-

⁵ Teilweise wird auch von CDB (chlorine dioxid bleaching) gesprochen.

⁶ Auf modernen Anlagen gemäss BVT müssen viele weitere Aspekte bzgl. Abwasserreinigung, Abfallvermeidung, Luftreinhaltung etc. berücksichtigt werden, die jedoch in der Diskussion (m)ECF/TCF keine zusätzlich zu berücksichtigenden Diskussionsfaktoren darstellen bzw. sich für (m)ECF und TCF nicht unterscheiden.

Bildung kann einerseits durch den teilweisen Ersatz von Chlordioxid erreicht werden⁷ (Abbildung 2), andererseits ist die verlängerte Delignifizierung eine Technik, welche die Senkung des Chlordioxidverbrauchs begünstigt (EC, 2014; JRC, 2015). Durch die beschriebenen Massnahmen ist es möglich, die verwendete Menge an Chlordioxid von 50–60 kg auf 5–10 kg pro Tonne Zellstoff zu reduzieren (Suess, 2010).

ECF: moderne Bleichabfolgen

O/OEDDP	O/OAEDD	O(OPDQ)(PO)
O/ODED	O/OZEDD	OQ(PO)(DQ)(PO)
O/OEDDD	O/OADPZP	OQXOP/ODEDP _{Paa}
O/OAEDDP	O/OZDP	O/O(Q)OPDPO

TCF: Bleichabfolgen

	<i>Nadelholz</i>	<i>Laubholz</i>
Q(OP)(ZQ)(PO)	Q(EP)(EP)(EP)	QPZP
Q(EOP)Q(PO)	Q-OP-(Q+P _{aa})-PO	O/OZPZP
Q(OP)ZQ(PO)	O/O(Q)OP(P _{aa} /Q)PO	OmPZPZP

A = Säurestufe, um Metalle zu entfernen, D = Chlordioxid-Bleichstufe, E = alkalische Extraktionsstufe, EO = alkalische Extraktionsstufe mit gasförmigem Sauerstoff als Verstärkungsmittel, EP = alkalische Extraktionsstufe mit gasförmigem Wasserstoffperoxid als Verstärkungsmittel, EOP = alkalische Extraktions- und Bleichstufe mit Sauerstoff und Wasserstoffperoxid als Verstärkungsmittel, mP = modifizierte Peroxidbleiche, O = Sauerstoffbehandlung, P = Wasserstoffperoxid (H₂O₂), P_{aa} = Peressigsäure, Q = Komplexbildner (EDTA, DPTA), X = Xylanase, Z = Ozonbleiche, ZD = Bleich mit Ozon und Chlordioxid abwechslungsweise beigegeben, PO = Peroxidbleiche unter Druck

Abbildung 2: mögliche Bleichsequenzen bei mECF- und TCF-Zellstoffen

Im Vergleich zu herkömmlichen ECF-Bleichabfolgen (DEDED o.Ä.) sind mECF-Bleichabfolgen meist länger und verwenden die Chemikalien, welche auch bei TCF-Bleichabfolgen verwendet werden. Die Anwendung von Chlordioxid beschränkt sich bei mECF auf 1–2 Schritte. Bei fast allen TCF-Abfolgen werden Chelate (Q) eingesetzt, was bei ECF-Sequenzen seltener der Fall ist. (Grafik nach (JRC, 2015))

Für die vorliegende Arbeit wurde der Ausdruck „modernes ECF“ (wie er von der Europäischen Kommission verwendet und definiert wird) gewählt, weil er für eines der ökologisch fortschrittlichsten Verfahren zur ECF Bleiche steht. In der Literatur wurden verschiedene weitere Bezeichnungen gefunden, welche zum Ziel haben, ECF-Bleichmethoden mit eher tiefen Umweltwirkungen begrifflich gegenüber der herkömmlichen ECF-Bleiche abzugrenzen. Tabelle 5 im Anhang liefert einen vergleichenden Überblick.

3.2.2.3 Total chlorfreie (TCF) Bleiche

TCF⁸ wird ein Bleichprozess bezeichnet, bei dem keine Chlorverbindungen verwendet werden. Das Abwasser einer TCF-Bleiche enthält demnach kein AOX bzw. nicht nachweisbare Mengen oder nur natürlich vorkommende Mengen (Bajpai, 2012).

Im TCF-Bleichprozess werden als Bleichmittel Sauerstoff, Wasserstoffperoxid, Ozon und Peressigsäure eingesetzt. Im TCF gebleichten Zellstoff kann ein hoher Weissgehalt erzielt werden, wenn eine mehrstufige verlängerte Delignifizierung durchgeführt und dadurch mehr Lignin entfernt wird. Auch Peroxide werden eingesetzt, um in der TCF-Bleiche sehr hohe Weissgehalte zu erreichen. Dafür müssen vorgängig

⁷ Dies, „indem einer der folgenden Bleichschritte oder eine Kombination davon angewendet werden: Sauerstoffbehandlung, Heißsäure-Hydrolyse, Ozonbehandlung bei mittlerer und hoher Stoffdichte und Behandlung mit atmosphärischem und mit komprimiertem Wasserstoffperoxid oder mit heißem Chlordioxid.“ Richtlinie 2010/75/EU, BVT 1.7.2.1

⁸ Wird manchmal auch als OCB bezeichnet: oxygen chemical bleaching.

Übergangsmetalle (z.B. Mn^{2+}) durch Komplexbildner (EDTA, DPTA) oder durch eine saure Hydrolyse entfernt werden, weil die Peroxide sonst zerfallen. Typische Bleichabfolgen für TCF-Zellstoffe sind in Abbildung 2 zu sehen (JRC, 2015).

3.2.2.4 Vergleich der Bleichmethoden

Der zusammenfassende Vergleich der unterschiedlichen Bleichmethoden (Tabelle 2) bezüglich umweltrelevanter Faktoren zeigt, dass der mECF-Bleichprozess insbesondere bei den Schadstoffemissionen annähernd mit TCF vergleichbar ist. Ob ein ökologischer Unterschied zwischen mECF und TCF besteht und wie gross er ist, wird in Kapitel 4 mit einer Ökobilanz genauer untersucht. Auf die herkömmliche ECF-Bleiche wird nicht weiter eingegangen, da sie umweltbelastender ist als die beiden anderen Bleichverfahren.

Tabelle 2: Übersicht über die erwähnten Unterschiede zwischen den Bleichmethoden

	herkömmliches ECF	mECF	TCF
Prozessintegrierte Techniken	in der Regel keine	verlängerte Delignifizierung	
Bleichchemikalien	in der Regel ausschliesslich Chlordioxid	Chlordioxid und sauerstoffbasierte Bleichchemikalien	sauerstoffbasierte Bleichchemikalien
AOX-Emissionen	von verschiedenen Faktoren im Prozess abhängig; bis ca. 2 kg/adt bzw. je nach gesetzlichen Grenzwerten	< 0,2 kg/adt	keine, nicht nachweisbare Mengen
Entstehung TCDD/TCDF	geringe Mengen möglich	nicht nachweisbar	

3.3 Marktsituation

3.3.1 Angebot

Die folgenden Zahlen zur weltweiten Produktion von Zellstoff basieren auf unterschiedlichen, meist unvollständigen Daten und variieren entsprechend. Die auf dem Markt verfügbaren Mengen (aufgeschlüsselt nach Bleichmethoden) sind Abschätzungen.

Von der FAO wird jährlich eine Statistik publiziert, welche die weltweite Zellstoffproduktion nach den Aufschlussmethoden unterscheidet. Die Statistik beruht auf der freiwilligen Teilnahme der Produktionsländer. Sie deckt rund 85 % der weltweiten Produktionsmenge ab und beziffert die ganze weltweite Zellstoffproduktion auf 170–180 Mio. Tonnen (FAO, 2015). Mehr als 100 Mio. Tonnen davon sind chemisch aufgeschlossen. Der Anteil des Chemiezellstoffs, der gebleicht und auf dem Markt gehandelt wird, liegt schätzungsweise zwischen einem Drittel und der Hälfte (FAO, 2014). Mit ungefähr 100 Mio. Tonnen schätzt die AET die Produktion an gebleichtem, chemisch aufgeschlossenem Zellstoff höher ab.⁹ Ihre Hochrechnungen basieren auf Informationen der nordamerikanischen und der brasilianischen Pulp and Paper Associations sowie von einzelnen Unternehmen und der Datenbank von Fisher International. Die AET unterscheidet zusätzlich nach Bleichmethoden, wobei der ECF gebleichte Zellstoff rund 93 % ausmacht, während TCF und mit Chlorgas gebleichte Zellstoffe jeweils weniger als 5 % ausmachen (Abbildung 3). Der mit Chlorgas gebleichte Zellstoff stammt dabei grösstenteils aus Asien und Russland. In Europa wird nicht mehr mit Chlorgas gebleicht, in Nord- und Südamerika sind die Anteile dieses Zellstoffs sehr gering. Die Produktion von TCF-Zellstoffen konzentriert sich auf Europa (AET, 2012), worauf auch die von Environmental Paper Network (2015) präsentierten Zahlen deuten. Environmental Paper Network unterscheidet zwar Produktionsmengen nach verwendeten

⁹ Angabe umfasst in Papierfabriken integrierte Zellstoffproduktion und die Produktion von Marktzellstoff (nicht in Papierfabriken integrierte Produktion).

Bleichmethoden, allerdings lassen sich Zellstoff und Recyclingfasern nicht genau trennen. Auch Krücke (2015) schätzt die Verfügbarkeit von TCF gebleichtem Marktzellstoff mit wenigen Millionen Tonnen als gering ein.

Die ECF-Bleiche hat in den vergangenen Jahren im Vergleich zur TCF-Bleiche weiter an Bedeutung gewonnen (Axegård & Bergnor, 2011). So wechselte das Zellstoffwerk Rauma von Metsä Fibre (vormals Metsä Botnia) von TCF- auf ECF-Bleiche (Botnia Echo, 2007). Auch plant Södra, ein bedeutender Hersteller von TCF gebleichten Zellstoffen, eine Kapazitätserweiterung für ECF-Zellstoffe (Södra, 2014).

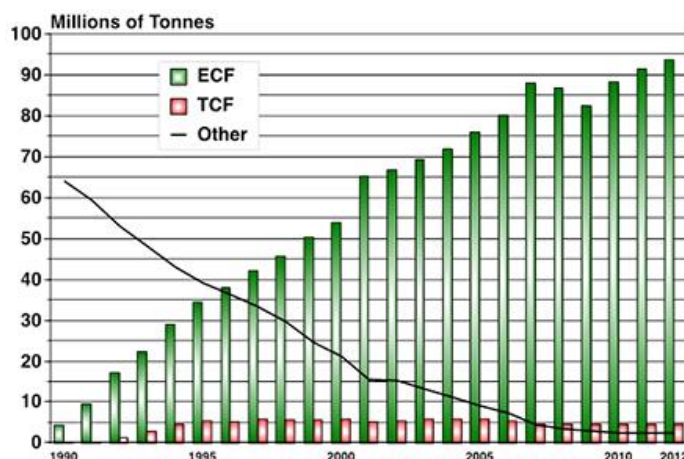


Abbildung 3: Entwicklung der weltweiten Produktion von gebleichtem Chemiezellstoff

Entwicklung der Zellstoffmengen (Marktzellstoff und integrierte Produktion) zeigt die Ablösung der Chlorgasbleiche durch die ECF-Bleiche ab 1990. (Grafik: (AET, 2012)

In einer Umfrage des IPPC¹⁰-Büros bei 36 vorwiegend europäischen Zellstoffproduzenten in den Jahren 2007 bis 2009 lagen die AOX-Emissionen von 25 Zellstoffproduzenten unter 0,2 kg/adt, bei den verbleibenden unter 0,3 kg/adt. Dies deutet darauf hin, dass zumindest in Europa sehr viele Zellstoffproduzenten mECF-Bleichprozesse anwenden. Eine Untersuchung von EEB und BEUC¹¹ aus dem Jahr 2003 bestätigt die tiefen AOX-Emissionen europäischer ECF-Zellstoffproduzenten: Die durchschnittlichen AOX-Emissionen betragen 0,15 kg/adt und bei 80 % der Produzenten liegen die Werte unter 0,2 kg/adt.

Entsprechende Studien für andere Kontinente liegen nicht vor. Der relativ hohe Anteil an mECF-Zellstoff in Europa lässt nicht auf die mECF-Weltproduktion schliessen, weil z.B. Umweltvorschriften in den meisten anderen Weltregionen weniger streng sind.

3.3.2 Bleichmethoden als Kriterium in europäischen Standards

BVT: Beste verfügbare Technik

Als BVT gilt der effizienteste und fortschrittlichste Entwicklungsstand von Tätigkeiten und Methoden, der die Auswirkungen auf die Umwelt mindert. Der Stand der Technik zur Emissionsminderung aus Industrieanlagen in der EU wird durch die BVT-Schlussfolgerungen¹² als verbindliche Referenz festgehalten. Demnach gehören TCF- und mECF-Produktion in Kombination mit einer geeigneten Abwasserreinigung (chemisch-physikalische Vorreinigung, sekundäre biologische Reinigungsstufe) zu den BVT zur Reduktion des Frischwasserbedarfs sowie der Nähr- und Schadstoffe in den Abwässern.

¹⁰ Integrated Pollution Prevention and Control. Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU)

¹¹ EEB: European Environmental Bureau; BEUC: Bureau Européen des Unions de Consommateurs

¹² Durchführungsbeschluss (2014/687/EU) zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Herstellung von Zellstoff, Papier und Karton, 26. September 2014

EU-Umweltzeichen, Nordic Ecolabel

In den relativ ähnlichen Umweltzeichen der EU¹³ und der skandinavischen Länder¹⁴ werden die Bleichmethoden ECF und TCF nicht explizit als Kriterien genannt. Beide Label schliessen jedoch die Verwendung von elementarem Chlor zur Zellstoffbleiche aus. Allerdings definieren die Richtlinien Grenzwerte für die AOX-Emissionen. Diese liegen im EU-Umweltzeichen bzw. Nordic Ecolabel bei 0,12 kg/adt bzw. 0,17 kg/Tonne Papier, wobei in beiden Labels kein einzelner Zellstoff höhere AOX-Emissionen als 0,25 kg/adt Zellstoff aufweisen darf.

Blauer Engel

Der „Blaue Engel“ kennzeichnet überwiegend Papier und Tissue aus Altpapier. Einzig bei Druck- und Pressepapieren¹⁵ sind Anteile an Frischfasern erlaubt. Dabei dürfen sowohl bei der Aufbereitung der Altpapiere wie auch beim Zellstoff keine halogenierten Bleichchemikalien verwendet werden.

¹³ Beschluss der Kommission vom 2. Mai 2014 zur Festlegung von Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für weiterverarbeitete Papiererzeugnisse. Entscheidung der Kommission vom 9. Juli 2009 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens für Hygienepapier.

¹⁴ Nordic Ecolabelling of Paper Products – Basic Module Version 2.0, 22 June 2011 – 30 June 2014

¹⁵ Vergabegrundlage für Umweltzeichen Druck- und Pressepapier überwiegend aus Altpapier RAL-UZ 72. Der Blaue Engel. Ausgabe Juli 2014 (verfügbar unter www.blauer-engel.de).

4 Ökologischer Vergleich zwischen TCF- und mECF-Bleichverfahren

In diesem Kapitel werden zuerst in der Literatur aufgeführte Unterschiede zwischen TCF- und mECF-Bleichverfahren und ihre Auswirkungen auf die Umwelt beschrieben und dann mit Hilfe von Ökobilanzen bewertet.

4.1 Ergebnisse Literaturrecherche

4.1.1 Prozess

Die Herstellung von sehr hellen TCF-Zellstoffen verlangt – anders als bei ECF-Zellstoffen – eine verlängerte Delignifizierung, meist mit modifiziertem Kochen und Delignifizierung mit Sauerstoff (Suess, 2010). Die mECF-Verfahren umfassen auch mindestens einen dieser Schritte, um den Verbrauch von Chlordioxid und anderen Bleichchemikalien sowie die Abwassermenge und -verschmutzung zu reduzieren.

4.1.2 Wasseremissionen

Abwasser entsteht in der Zellstoffproduktion vor allem im Bleichprozess. Die Menge der einhergehenden Schadstoffemissionen ist u.a. abhängig von der Kappa-Zahl (Restligningehalt) des ungebleichten Zellstoffs, von der Menge, der Art und der Abfolge der Bleichmittel und vom Schliessungsgrad des Wasserkreislaufs in der Bleiche.

Eine verlängerte Delignifizierung, die Wiederverwendung von Prozesswasser in der Bleiche und der Einsatz von Bleichmitteln auf Sauerstoffbasis sind wesentliche Merkmale der Herstellung von TCF und mECF gebleichten Zellstoffen. Durch die verlängerte Delignifizierung und die partielle Schliessung des Wasserkreislaufs in der Bleiche wird das Abwasser weniger mit organischen Verbindungen (tieferer Chemischer Sauerstoffbedarf / CSB), Nährstoffen und Metallen belastet als bei herkömmlichen ECF-Zellstoffen (JRC, 2015). Untersuchungen zur Ökotoxizität von Abwässern aus der Zellstoffproduktion können sich bezüglich der betrachteten Parameter (geklärte und ungeklärte Abwässer, unterschiedliche Bleichprozesse und Bleichsequenzen, verarbeitete Baumarten) und bezüglich der verwendeten Methoden unterscheiden, weshalb sie nur bedingt vergleichbar sind. Lethinen und Tana (1998) fanden beispielsweise mit „multispecies mesocosms“- und „fish biomarker“-Tests bezüglich Umweltwirkung sowohl auf individueller Ebene wie auch auf Ebene des Ökosystems keine relevanten Unterschiede zwischen Low-AOX- und TCF-Bleichprozessabwässern. Sie stellten toxische Effekte bei allen untersuchten Gruppen fest, wobei die Unterschiede nur in 9 der 27 betrachteten Parameter mehr als 20 % betrugten und sich nicht eindeutig auf die Bleichmethode zurückführen liessen. In ihrer Untersuchung kamen sie zu dem Schluss, dass die Toxizität von Abwässern aus der Zellstoffherstellung mit tiefen AOX-Emissionen eher mit der CSB-Konzentration als mit der AOX-Konzentration korreliert. Vidal und Diez (2003) untersuchten unterschiedliche Bleichabwässer auf ihre Toxizität gegenüber anaeroben Mikroorganismen und konnten dabei keinen direkten Zusammenhang zwischen den Bleichsequenzen und der Toxizität feststellen.

In der Fachliteratur wird mehrheitlich die Meinung vertreten, dass sich mECF- und TCF-Bleichabwässer bezüglich ihrer Toxizität nicht eindeutig unterscheiden (JRC, 2015).

AOX-Emissionen

Das Abwasser aus der TCF-Bleiche enthält keine AOX-Emissionen bzw. die AOX-Konzentration entspricht den natürlich vorkommenden Mengen (Strömberg u. a., 1996), bei mECF-Bleichverfahren liegen die AOX-Emissionen unter 0,2 kg/adt. PCDD und PCDF sind in mECF-Abwässern analytisch nicht mehr messbar (JRC, 2015). Die AOX-Konzentration, unter der keine negativen Umweltwirkungen auftreten, ist nicht genau bekannt. Je nach Untersuchung variieren die genannten AOX-Mengen zwischen 0,8 und 2 kg/adt. Tarkpea u.a. (1999) finden selbst bei einem gereinigten ECF-Abwasser mit AOX-Emissionen von 0,2 kg/adt eine gegenüber TCF erhöhte Toxizität. Allerdings muss bei der Interpretation dieser konträren Resultate berücksichtigt werden, dass bei den Untersuchungen die Rahmenbedingungen (z.B. die Konzentration weiterer Abwasserschadstoffe) nicht identisch sind.

Verschiedene Quellen vertreten die Ansicht, dass die Langzeiteffekte der Chlorverbindungen im Abwasser heute noch nicht genügend bekannt sind (EEB & BEUC, 2010).

Chlorat

Die Verwendung von Chlordioxid führt zur Freisetzung von Chlorat, das giftig ist für Bakterien und Plankton. Bei funktionierenden Abwasserreinigungsanlagen stellt die Konzentration von Chlorat keine Gefahr für die Umwelt dar (JRC, 2015).

Komplexbildner: EDTA, DTPA

In TCF-Bleichabfolgen, teilweise auch bei ECF-Bleichabfolgen, werden Peroxide eingesetzt (vgl. Abbildung 2). Damit diese nicht zerfallen, muss die Verfügbarkeit von Metallkationen vorgängig durch Komplexbildner (meist EDTA und DTPA) verringert werden. Üblicherweise liegen die verwendeten Mengen an Komplexbildnern bei TCF im Bereich von 0–4 kg/adt. Vergleichswerte für die Anwendung bei mECF liegen keine vor, dürften jedoch in der gleichen Grössenordnung oder nur geringfügig darunter liegen. EDTA und DTPA im Abwasser gelten als problematisch, weil sie schwer biologisch abbaubar sind und im Verdacht stehen, Schwermetalle zu mobilisieren (JRC, 2015). Es sind jedoch keine Untersuchungen bekannt, die deren negative Auswirkungen in den Abwässern der Zellstoffproduktion nachgewiesen haben.

4.1.3 Wasserbedarf

Der Wasserbedarf der Zellstoffproduktion beträgt 20–90 m³/adt, wobei der Verbrauch bei einer verlängerten Delignifizierung und der teilweisen Schliessung der Wasserkreislaufs in der Bleiche meist deutlich unter 50 m³/adt liegt (JRC, 2015).

Eine Zellstoffproduktion mit geschlossenem Wasserkreislauf wird seit langem diskutiert (closed-loop, effluent-free). Sie gilt als die Lösung der Abwasserprobleme der Zellstoffproduktion. Die vollständige Rückführung der Bleichabwässer scheitert bislang an der Anreicherung von Nicht-Prozess-Elementen und organischen Verbindungen, was u.a. einen steigenden Chemikalienverbrauch bewirkt. In der Literatur besteht Uneinigkeit darüber, ob die ECF- oder die TCF-Bleiche ein grösseres Potenzial zur Schliessung des Wasserkreislaufs aufweist (Beca Amec, 2006; Hamm & Göttching, 2003; JRC, 2015; National Council for Air and Stream Improvement, 2013). Bei der ECF-Bleiche wird als Hindernis zur Schliessung des Wasserkreislaufs die erhöhte Korrosion durch Chlorverbindungen genannt, während bei der TCF-Bleiche die höhere Konzentration an Nicht-Prozess-Elementen die Stabilität von Ozon und Peroxid gefährdet.

4.1.4 Ausbeute¹⁶

Je nach Dichte, Holzart etc. kann aus 3–6 m³ Holz eine Tonne Zellstoff gewonnen werden. Damit der Verlust an Fasern während Aufschluss und Bleiche möglichst gering ist und so eine möglichst hohe Ausbeute erzielt wird, muss das Lignin während dieser Prozesse möglichst selektiv behandelt werden (JRC, 2015). Dies

¹⁶ Yield: Anteil an brauchbaren Fasern nach Aufschluss und/oder Bleiche ausgedrückt in Prozent des Rohmaterialinputs (JRC, 2015)

scheint bei der ECF-Bleiche besser umsetzbar, weil der TCF-Bleiche häufig eine tiefere Ausbeute nachgesagt wird (vgl. Tabelle 3).

In den meisten Quellen besteht Einigkeit darüber, dass die verlängerte Delignifizierung und nicht der Bleichprozess an sich für Unterschiede in der Ausbeute zwischen ECF und TCF verantwortlich ist. Dies wird damit erklärt, dass bei TCF-Zellstoffen in der verlängerten Delignifizierung vorgängig mehr Lignin entfernt werden muss (und so auch mehr Fasern), damit aufgrund des Verzichts auf Chlordioxid in der Bleiche der gleiche Weissgehalt wie bei einem ECF-Zellstoff erreicht werden kann (National Council for Air and Stream Improvement, 2013). Ein TCF-Zellstoff hat vor der Bleiche ein um eins bis zwei Einheiten tieferes Kappa als ein noch ungebleichter ECF-Zellstoff (Beca Amec, 2006). Im BREF wird ein möglicher Ausbeuteverlust von 1,5–2,5 % genannt, welcher durch verlängertes Kochen und die Sauerstoff-Delignifizierung vor der eigentlichen Bleiche verursacht wird (JRC 2015).

Als Beispiel für einen Ausbeute-Verlust bei TCF wird oft der Umstieg im Zellstoffwerk Rauma von Metsä Fibre (vormals Metsä Botnia) von der TCF- zur ECF-Bleiche 2007 genannt, bei dem u.a. eine höhere Ausbeute als Grund für den Umstieg angegeben wurde (Botnia Echo, 2007).

Tabelle 3: Zitate und Aussagen aus der Literatur zur Ausbeute (Yield) von ECF und TCF

- “[Extended delignification] The overall pulp yield might decrease by 1,5 – 2,5 % and there is still lignin left that has to be removed by other means when high brightness pulp is demanded.” (JRC, 2015)
 - “Current TCF sequences are likely to have lower yields than ECF sequences when the bleach sequences have the same incoming bleach plant kappa and final brightness target. Very few literature data are available, however, to enable direct comparison of yields between ECF and TCF bleaching sequences.” (National Council for Air and Stream Improvement, 2013)
 - “The yield loss in bleaching is in the range 1-3 % (on wood) and is most likely independent on whether an ECF or TCF sequence is employed. There is a tendency for increased yield loss if alkaline peroxide bleaching is carried out. This is particularly noticeable in the bleaching of hardwood pulps. Because TCF bleached pulps tend to have lower oxygen-delignified pulp kappa number, they have a lower overall bleached yield than ECF bleached” (Beca Amec, 2006; Bergnor-Gidnert, 2006)
 - “If ozone is used in one of the bleaching stages, the yield can be up to 6-10 % lower than that of ECF bleached pulp. However, not all mills experience such large losses in pulp yield when carrying out TCF bleaching. These losses are primarily due to overextending cooking in the digester.” (Beca Amec, 2006)
 - “Maximising the efficiency of fibre resource use can, therefore, be regarded as a central focus of a sustainable and environmentally acceptable primary pulp and paper production cycle. This can potentially be affected by both pulping and bleaching methods.” (Ritchlin u. a., 1998)
 - “Against these dual backgrounds, claims of a 5-10 % yield loss in TCF bleach based systems need to be taken seriously. In fact, it seems that these estimates have been made on the basis of yield losses in rarely used extended delignification practices coupled with assumed losses for TCF bleaching. These have then been compared with high kappa ECF bleach processes. It is important to differentiate between pulping yields and actual bleaching yields. These estimates ignore the fact that pulping to kappa 30-40, followed by oxygen delignification is now common at TCF and ECF mills attempting effluent closure, and that this pulping process actually increases yield.” (Ritchlin u. a., 1998)
 - „While there is undoubtedly a need to evaluate the yield aspect in greater detail, on the basis of the available evidence, yield loss does not appear to be a significant factor detracting from the use of TCF bleach processes.” (Ritchlin u. a., 1998)
 - TCF Hardwood: ca. 2 % weniger Ausbeute als ECF, TCF Softwood: ca. 4 % weniger Ausbeute als ECF (CPI Confederation of paper industries, 2013)
 - [TCF bleaching, extended pulping, oxygen delignification] “The target is to achieve the lowest possible kappa number, which just allows the maintenance of an acceptable quality and does not sacrifice too much pulp yield. There can be no doubt about a negative impact on pulp yield. [...] Low kappa is achieved at the expense of a lower yield” (Suess, 2010)
-

4.1.5 Auswirkungen auf den Holzbedarf

Eine Einbusse in der Ausbeute, wie sie durch die Anwendung der TCF-Methode verursacht wird (Kap. 4.1.4), bedeutet einen entsprechend erhöhten Holzverbrauch für die Herstellung einer Tonne Zellstoff.

4.1.6 Energiebedarf

Die Zellstoffherstellung benötigt ungefähr 10–14 GJ/adt Wärme (ohne Dampf für die Stromerzeugung) und 600–800 kWh/adt Strom (JRC, 2015).

Zellstofffabriken mit mECF- und TCF-Verfahren weisen im Vergleich zu herkömmlichen ECF- und Chlorgas-Verfahren einen deutlich (36 bis 47 %) tieferen Energiebedarf auf (Folke u. a., 1996; National Council for Air and Stream Improvement, 2013).

Tendenziell scheint der Stromverbrauch in der TCF-Bleiche bei längeren Bleichsequenzen höher zu sein (National Council for Air and Stream Improvement, 2013), über die ganze Zellstoffherstellung unterscheiden sich ECF und TCF jedoch nicht signifikant (JRC, 2015).

4.1.7 Fazit

Als Zusammenfassung der vorangehenden Kapitel zeigt Tabelle 4 die Ergebnisse der Literaturrecherche als Vergleich der Bleichmethoden im Hinblick auf verschiedene Umweltaspekte. Daraus wird ersichtlich, dass mECF- und TCF-Bleichverfahren bezüglich der meisten betrachteten Faktoren ökologisch nicht unterscheidbar sind. Dem häufig genannten Nachteil der AOX-Emissionen bei der ECF-Bleiche steht bei TCF eine Einbusse in der Ausbeute gegenüber. Um die Relevanz dieser verbleibenden Unterschiede herauszufinden, werden diese Aspekte mit einer Ökobilanz beurteilt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Unterschiede von TCF und mECF bezüglich wichtiger Umweltaspekte

Die meisten betrachteten Aspekte weisen keine eindeutigen Unterschiede zwischen TCF und mECF auf. Verbleibende positive bzw. negative Aspekte der jeweiligen Methoden sind grün bzw. rot gekennzeichnet.

Wichtige Umweltaspekte	TCF	mECF
Wasserbedarf	kein eindeutiger Unterschied	
AOX-Emissionen ins Wasser	keine, resp. nicht nachweisbare Mengen	< 0,2 kg/Tonne Zellstoff
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane	nicht nachweisbar	
weitere Abwasserschadstoffe	kein eindeutiger Unterschied	
	eher mehr Komplexbildner (EDTA/DTPA)	Chloratemissionen möglich
Toxizität Wasseremissionen	kein eindeutiger Unterschied	
	auftretende Effekte und ihre Stärke lassen keine klare Unterscheidung bezüglich der Abwasser-Toxizität zu	
Holzbedarf	höher (ø ca. 2 %)	tiefer
	Rohstoffbedarf wird durch die Effizienz der Zellstoffproduktion (Ausbeute) und die Qualität des Produkts beeinflusst	
Energiebedarf	kein eindeutiger Unterschied	
	mögliche auftretende Unterschiede gleichen sich über den gesamten Produktionsprozess aus	

4.2 Ökobilanzen

4.2.1 Ökologische Bewertung der Unterschiede von mECF- und TCF-Bleichverfahren

Die ökologischen Unterschiede von mECF- und TCF-Verfahren sind heute relativ klein, so dass die beiden Verfahren im BREF als gleichwertig angesehen werden. Es verbleibt die Kritik an den AOX-Emissionen von mECF-Zellstoffen auf der einen sowie an der tieferen Ausbeute bei TCF-Zellstoffen auf der anderen Seite.

Um diese zwei wichtigsten Unterschiede besser in ihrer Relevanz für den Vergleich der Bleichverfahren mECF und TCF beurteilen zu können, wird für beide eine Ökobilanz erstellt. Eine Ökobilanz erlaubt einen quantitativen Vergleich auch von sehr unterschiedlichen Umweltauswirkungen. Dabei wird geprüft, wie hoch die negativen Umweltauswirkungen der AOX-Emissionen der mECF-Bleiche im Vergleich zu den ökologischen Folgen einer tieferen Ausbeute bei der TCF-Bleiche sind.

Die Resultate in Abbildung 4 zeigen eine Abschätzung für die relative Bedeutung der AOX-Emissionen einer mECF-Bleiche (0,1–0,2 kg/adt) im Vergleich zum Ausbeuteverlust (und somit einen Mehrverbrauch an Holz) eines TCF-Zellstoffs (1–3 %). Die Bereiche, in denen die Umweltbelastungen mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen, sind mit Säulen dargestellt, im linken Teil der Grafik für die Bewertungsmethode UBP 2013, im rechten Teil für die Bewertungsmethode ILCD 2011. Die Umweltbelastung der betrachteten Effekte liegt demnach bei beiden Methoden in der gleichen Grössenordnung (sich überschneidende Resultatbalken bedeuten, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Vergleichsvarianten besteht). Die AOX-Emissionen bei mECF sind also aus ökologischer Sicht etwa gleich relevant wie ein Mehrverbrauch von Holz bei TCF.

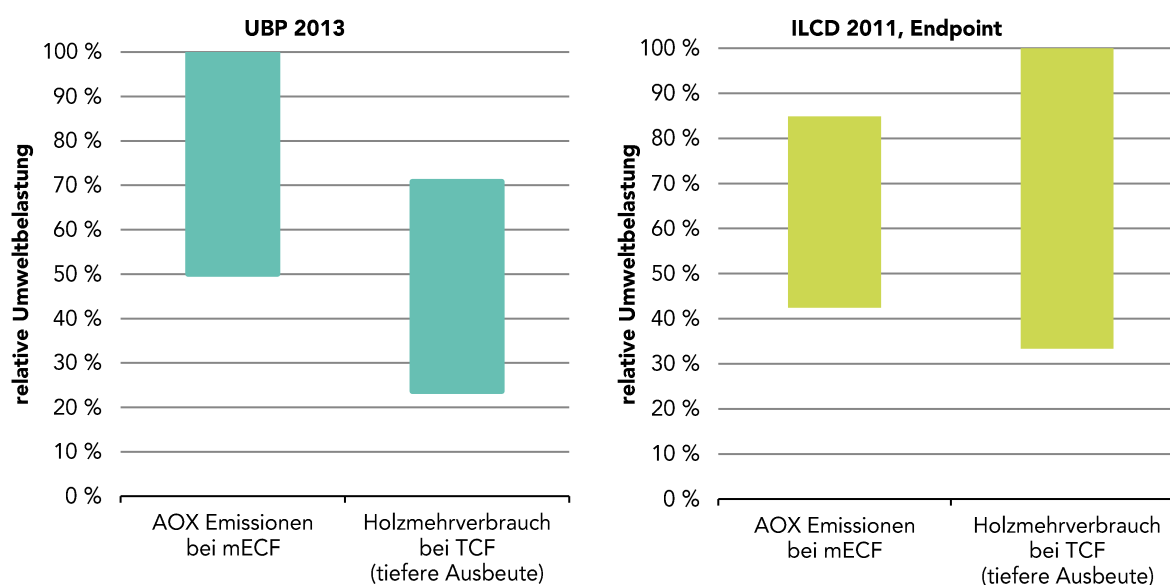


Abbildung 4: Abschätzung der relativen Umweltbelastung der AOX-Emissionen mECF im Vergleich zum Holzmehrverbrauch TCF

Mittlerer bis maximaler Bereich der AOX-Emissionen eines mECF gebleichten Zellstoffs (0,1–0,2 kg/adt) im Vergleich zum zusätzlichen Holzverbrauch aufgrund einer potenziell geringeren Ausbeute bei TCF-Zellstoffen (1–3 %). Die Bereiche, in welchen die Umweltbelastungen mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen, sind mit Säulen dargestellt. Sich überschneidende Säulen indizieren bei einem Vergleich keinen signifikanten Unterschied. Die Angaben sind normiert auf den Höchstwert der absoluten Werte für die Umweltbelastung.

4.2.2 Relevanz der AOX-Emissionen

Um die ökologische Relevanz der AOX-Emissionen bei der mECF-Bleiche abschätzen zu können, muss die Umweltbelastung dieses Teilaspekts mit der gesamten Umweltbelastung des Zellstoffs in Relation gebracht werden. Mit Hilfe einer Ökobilanz eines durchschnittlichen mECF-Zellstoffs wird ermittelt, welchen Anteil die AOX-Emissionen an der gesamten Umweltbelastung haben.

Dazu wurde der AOX-Emissionen-Maximalwert für mECF-Zellstoffe verwendet (0,2 kg/adt). Die Umweltbelastung einer Tonne mECF-Zellstoff wurde mit dem Ecoinvent-Datensatz für ECF-Sulfatzellstoff abgeschätzt, wobei der AOX-Wert entsprechend angepasst wurde. Die Bewertungsmethode UBP 2013 erlaubt die direkte Berechnung der Umweltbelastung von AOX-Emissionen, während bei der Bewertungsmethode ILCD 2011 eine konservative Näherung über eine Charakterisierungssubstanz (Trichlorbenzol) vorgenommen werden musste.

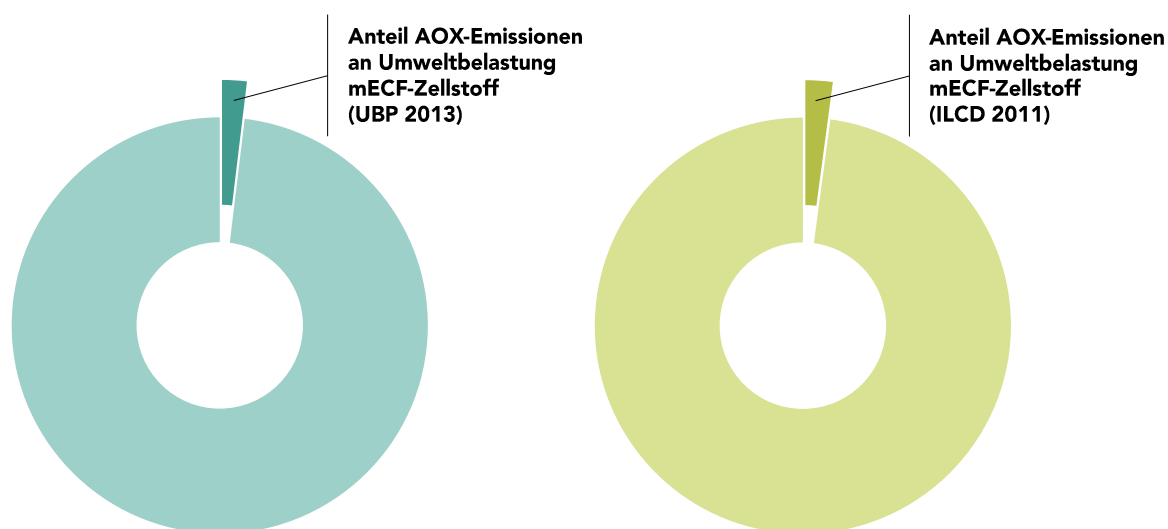


Abbildung 5: Ökologische Relevanz der AOX-Emissionen

Abschätzung der Relevanz der AOX-Emissionen an der gesamten Umweltbelastung eines durchschnittlichen mECF gebleichten Zellstoffs mittels Ökobilanz.

Mit ca. 2 % des Umweltfussabdrucks ist der Anteil der AOX-Emissionen beim mECF-Zellstoff gering (Abbildung 5). Der Grossteil der Umweltbelastung wird durch andere Schadstoffemissionen und Ressourcennutzungen verursacht. Bei der Diskussion über ökologische Nachhaltigkeit von mECF-Zellstoffen sind AOX-Emissionen kein entscheidender Faktor.

5 Schlussfolgerungen

Für die Beantwortung der Frage, ob zwischen ECF und TCF gebleichten Zellstoffen ein ökologischer Unterschied besteht, ist eine Differenzierung zwischen herkömmlicher und moderner ECF-Bleiche sinnvoll. Anhand der in dieser Arbeit geprüften Quellen und eines Vergleichs der AOX-Emissionen bei mECF-Zellstoffen mit dem höheren Holzverbrauch bei TCF-Zellstoffen mit Hilfe einer vereinfachten Ökobilanz können die beiden Zellstoffarten als ökologisch gleichwertig angesehen werden. Herkömmlicher ECF-Zellstoff hat eine höhere Umweltbelastung.

Weiter zeigt die Ökobilanz, dass AOX-Emissionen im Abwasser von mECF gebleichten Zellstoffen mit etwa 2 % einen relativ geringen Anteil der Umweltbelastung des Zellstoffs verursachen. Der Grossteil der Umweltbelastung wird durch die Emission anderer Schadstoffe und durch Ressourcenverbrauch verursacht; dort liegt das Potenzial für weitere relevante Senkungen des Umweltfußabdrucks von mECF-Zellstoffen.

Für die zukünftige Etablierung der mECF-Bleiche als ökologisch gleichwertige Alternative zur TCF-Bleiche sehen wir es als wichtig an, dass von verschiedenen Anspruchsgruppen Kriterien für die Abgrenzung von mECF gebleichten Zellstoffen zu herkömmlichen ECF-Zellstoffen genauer definiert und eingeführt werden.

6 Literatur

AET. (2012). Trends in World Bleached Chemical Pulp Production: 1990-2012. Alliance for Environmental Technology. Abgerufen von http://www.aet.org/science_of_ecf/eco_risk/2013_pulp.html

Axegård, P., & Bergnor, E. (2011). Environmental Performance of Modern ECF Bleaching. Gehalten auf der International Pulp Bleaching Conference (IPBC), Portland, Oregon, USA.

Bajpai, P. (2012). *Environmentally benign approaches for pulp bleaching* (2nd ed). Amsterdam; Boston: Elsevier.

Beca Amec. (2006). *Study report for Review of ECF and TCF bleaching processes and specific issues raised in the WWF report on Arauco Valdivia*. Abgerufen von http://www.aet.org/science_of_ecf/eco_risk/beca.pdf

Bergnor-Gidnert, E. (2006). STFI Packforsk Report.

Botnia Echo. (2007). Market-Driven Bleaching Change. *Botnia's customer magazine*. Abgerufen von http://www.metsafibre.com/News/Material%20Archive/ECHO_1_2007_en.pdf

CEPI. (2009). *Sustainability Report 2009*. Confederation of European Paper Industries.

CPI Confederation of paper industries. (2013). Environmental Aspects of ECF and TCF Chemical Woodpulp Bleaching. Abgerufen von http://www.paper.org.uk/information/factsheets/environmental_aspects_ECF_TCF.pdf

DOE. (2005). *Energy and Environmental Profile of the U.S. Pulp and Paper Industry*. U.S: Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Abgerufen von http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/pulppaper_profile.pdf

EC. Europäische Kommission: Durchführungsbeschluss der Kommission vom 26. September 2014 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäss der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Herstellung von Zellstoff, Papier und Karton, Pub. L. No. (2014/687/EU) (2014).

EEB, & BEUC. (2010). AOX requirements for Ecolabelled paper products - EEB and BEUC comments. Abgerufen von <http://www.eeb.org/?LinkServID=465DD665-96C5-681E-E0CD25ADAE28D6AF&show-Meta=0>

Environmental Paper Network. (2015). PulpWatch.org - Ratings Criteria. Abgerufen 27. Oktober 2015, von <http://pw.environmentalpaper.org/criteria.php>

European Commission-Joint Research Centre. (2011). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. (No. First edition November 2011. EUR 24571 EN.). Luxemburg: Publications Office of the European Union; 2011.

FAO. (2014). *Pulp and paper capacities survey 2013-2018*. [S.l.]: Food & Agriculture Org. Abgerufen von <http://www.fao.org/3/a-i3961t.pdf>

FAO. (2015). *Forest products statistics*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Abgerufen von <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>

Folke, J., Renberg, L., & McCubbin, N. (1996). Environmental aspects of ECF vs. TCF pulp bleaching. In M. R. Servos (Hrsg.), *Environmental fate and effects of pulp and paper mill effluents* (S. 681–691). Delray Beach, Fla.: St. Lucie Press.

Frischknecht, R., & Büsser Knöpfel, S. (2013). *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt.

Greenpeace Austria. (2011). Chlorchemie. Abgerufen 25. November 2014, von <http://www.greenpeace.org/austria/de/themen/umweltgifte/hintergrund-info/chlorchemie/>

Hamm, U., & Götttsching, L. (2003). ECF- und TCF-Sulfatzellstoffe: ein Vergleich ihrer Umweltbelastung. *International Paperworld*, 22–29.

IIED. (1996). *Assessment of Bleaching Technology and Emission Control in the Pulp and Paper Industry* (Sub-Study Series No. 8). Institute for Environment and Development. Pöyry Jaakko. Abgerufen von <http://pubs.iied.org/pdfs/8069IIED.pdf>

JRC. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board* (S. 853). Luxemburg: European Commission. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies. Abgerufen von http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP_revised_BREF_2015.pdf

Kinsella, S., Gleason, G., Mills, V., Rycroft, N., Ford, J., Sheehan, K., u. a. (2007). The State of Paper Industry - Monitoring the Indicators of Environmental Performance. Environmental Paper Network. Abgerufen von <http://www.greenpressinitiative.org/documents/StateOfPaperInd.pdf>

Krücke, B. (2015). Persönliche Mitteilung. *WEPA Hygieneprodukte GmbH*.

LaFleur, L. E. (1996). Sources of Pulping and Bleaching derived chemicals in Effluents. In *Environmental fate and effects of pulp and paper mill effluents* (S. 21–32). Delray Beach, Fla.: St. Lucie Press.

Lethinen, K. J., & Tana, J. (1998). Assessing the Aquatic Environmental Impact of ECF and TCF Pulping Operations Using Multispecies Mesocosms and Fish Biomarker Tests. In *Chlorine and Chlorine Compounds in the Paper Industry* (S. 151–168). Chelsea, Michigan: Ann Arbor Press.

National Council for Air and Stream Improvement. (2013). Environmental Footprint Comparison Tool - Effects of Decreased Release of Chlorinated Compounds. Abgerufen von http://www.paperenvironment.org/PDF/chcompounds/CC_Full_Text.pdf

Ritchlin, J., Johnston, P., Greenpeace Foundation., Reach for Unbleached! Foundation., & Zero Toxics Alliance Pulp Caucus. (1998). *Zero discharge: technological progress towards eliminating kraft pulp mill liquid effluent, minimising remaining waste streams and advancing worker safety*. Whaletown, B.C.: Reach for Unbleached Foundation. Abgerufen von <http://www.rfu.org/navigation/Librarydocs/zerodisch.pdf>

Södra. (2014). About bleaching with chlorine dioxide. Abgerufen 9. Dezember 2014, von <http://www.sodra.com/en/pulp/Our-Pulp-Mills/Sodra-Cell-Varo/Expansion-Sodra-Cell-Varo/About-bleaching-with-chlorine-dioxide/>

Strömberg, L., Mörek, R., de Sousa, F., & Dahlman, O. (1996). Effects of internal process changes and external treatment on effluent chemistry. In *Environmental fate and effects of pulp and paper mill effluents*. Delray Beach, FL.: St. Lucie Press.

Suess, H. U. (2010). *Pulp Bleaching Today*. Walter de Gruyter.

Tarkpea, M., Eklund, B., Linde, M., & Bengtsson, B.-E. (1999). Toxicity of conventional, elemental chlorine-free, and totally chlorine-free kraft-pulp bleaching effluents assessed by shortterm lethal and sublethal bioassays. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(11), 2487–2496.

Trauth, J., & Schönheit, E. (2004). *Kritischer Papierbericht 2004* (S. 43). Initiative 2000 Plus.

Verband Deutscher Papierfabriken VDP. (2014). Projektbeschreibung – Ökologie und Marketing – Neuer Ansatz für die Kommunikation von Bleichverfahren im Bereich Tissue?

Vidal, G., & Diez, M. C. (2003). Influence of feedstock and bleaching technologies on methanogenic toxicity of kraft mill wastewater. *Water Science and Technology*, 48(6), 149–155.

WWF. (2005). *Findings and Recommendations Report WWF International Assessment Mission for the Carlos Anwandter Nature Sanctuary and CELCO pulp mill controversy in Valdivia, Chile*. Abgerufen von http://awsassets.panda.org/downloads/final_wwf_rio_cruces_report_english.pdf

WWF. (2009). *Hygienepapier-Konsum und die Schweiz - Waldzerstörung ab Rolle*. Abgerufen von http://assets.wwf.ch/downloads/final_tissuestudie_schweiz_2009__2__1.pdf

Anhang

Tabelle 5: Vergleichender Überblick verschiedener Bezeichnungen von ECF-Verfahren mit eher tiefen Umweltwirkungen.

	Modifizierter Aufschluss	Bleichprozess	Emissionen
Modernes (fortschrittliches) ECF (EC, 2014)	Modifiziertes Kochen oder Sauerstoff-Delignifizierung	Teilweises Recycling des Prozesswassers in der Bleichanlage, mind. einer der folgenden Schritte: Sauerstoffbehandlung, Heissäure-Hydrolyse, Ozon- oder Wasserstoffperoxidbehandlung, heisses Chlordioxid	AOX < 0,2 kg/adt
ECF-light (JRC, 2015)	Kappa-Zahl reduziert (verlängertes Kochen, Sauerstoff-Delignifizierung)	ClO ₂ in höchstens zwei Schritten	AOX < 0,2 kg/t sehr tiefe AOX-Werte
ECF Pulping with reduced kappa number (Bajpai, 2012)	Sauerstoff-Delignifizierung		
“low AOX“-ECF (Verband Deutscher Papierfabriken VDP, 2014)			
Low-AOX sequences (IIED, 1996)		Bleichsequenz beginnend mit Sauerstoff, Ozon und/oder Peroxiden	
Low effluent ECF (National Council for Air and Stream Improvement, 2013)		Mind. teilweise Rückführung des Bleichabwassers, evtl. Verwendung von Ozon und/oder Peroxid	
advanced ECF (low-flow) (Ritchlin u. a., 1998)	Sauerstoff-Delignifizierung	Teilweises Recycling des Abwassers (low-flow), evtl. Verwendung von Ozon und/oder Peroxid	
Enhanced ECF (EECF) (National Council for Air and Stream Improvement, 2013)	Verlängertes Kochen und/oder Sauerstoff-Delignifizierung	evtl. Verwendung von Ozon und/oder Peroxid	
Enhanced ECF (Environmental Paper Network, 2015)	mit Sauerstoff-Delignifizierung oder ausgedehntem Kochen	Ozon oder Peroxid in erstem Bleichschritt	
Enhanced ECF with ozone (Kinsella u. a., 2007)	Verlängertes Kochen oder Sauerstoff-Delignifizierung	Erster Bleichschritt mit Ozon	
Modified ECF-Sequences (Bajpai, 2012)		Effizientere ClO ₂ -Verwendung, oft in Kombination mit Ozon und/oder Peroxid	
low-impact AOX, low OX-ECF (Beca Amec, 2006)			