

VON DER TEILSTROMBEHANDLUNG ZUR ABWASSERFREIEN FABRIK

R. Otterpohl und J. Behrendt

Arbeitsbereich kommunale und industrielle Abwasserwirtschaft, Technische Universität Hamburg-Harburg, D 21071 Hamburg, Germany (otterpohl@tuhh.de)

Key words: source control, sustainable technology, industrial wastewater, water reuse

EINLEITUNG

Mit der zunehmende Industrialisierung in Europa stiegen auch die Umweltbelastungen in Form von Luftverschmutzung, Verschmutzung der Gewässer und einer drastischen Zunahme an Abfällen. Da diese Auswirkungen von den Bürgerinnen und Bürgen nicht weiter akzeptiert wurden, hat der Gesetzgeber Richtlinien zur Begrenzung der Emissionen aufgestellt. Dies führte zu einer regen Bautätigkeit, i.d.R. von End-of-pipe Behandlungsanlagen, die eine deutliche Umweltentlastung brachten. Allerdings wurden die Umweltbelastungen (Immissionen, wie beispielhaft die Eutrophierung der Küstengewässer) auf diese Weise nicht zufriedenstellend gelöst, was zu vermehrten Auflagen und somit zu großem Aufwand für die Behandlungsanlagen führte. Die kommunalen und industriellen Kläranlagen wurden für N- und P-Elimination ausgelegt, was zu einem immensen Investitionsschub führte und eine deutliche Verbesserung der Gewässerqualität bewirkte. Einige Stoffgruppen werden von den Kläranlage nicht im gewünschten Umfang zurückgehalten. Daher wurden vermehrte Anstrengungen unternommen, diese Stoffe (AOX, Schwermetalle, N ...) durch eine Teilstrombehandlung an der Quelle zu eliminieren. Hierfür wurden mit großem Elan Behandlungsmethoden entwickelt, die oft auf einer Kombination von chemischen Oxidationsverfahren mit biologischen Abbau basieren. Es zeigte sich jedoch, dass die Abwasserbehandlung, auch im Teilstrom, sehr aufwendig ist und es daher angezeigt ist, die Abwasserbelastung von vornherein zu reduzieren und das aufwendig gereinigte Abwasser wiederzuverwenden. Damit war der produktionsintegrierte Umweltschutz geboren.

Da in Deutschland die Produktion von der Entsorgung getrennt geregelt war, wurden Prozessänderungen mit dem Ziel der Vermeidung von Kontamination und von Ressourcenschonung nur recht zögerlich vorgenommen. Mit der Einführung von Umweltmanagementsystemen und der damit verbundenen Dokumentation wurden Ansätze zur Verbesserung des produktionsintegrierten Umweltschutzes herausgearbeitet. Im folgenden Kapitel werden kurz Methoden zur Beurteilung und Ansätze, die zu einer nachhaltigen Produktion führen können, dargestellt. Anschließend erfolgt die Diskussion einiger Beispiele unterschiedlicher Branchen, anhand derer die Beurteilungsmethoden vertieft und die Schwierigkeiten der Umsetzung aufgezeigt werden. Einige Gedanken zu den Grenzen der Einsparmöglichkeiten folgen dann, um abzuleiten, wie abwasserfreie Fabriken realisiert werden können.

METHODEN ZUR ANALYSE DES PRODUKTIONSPROZESSES

Die meisten Methoden, die zur Analyse und Bewertung von Produkten und Produktionsprozessen entwickelt wurden, gehen von Input/Output-Analysen aus. Hierfür ist es in jedem Fall nötig, den Herstellungs- und Verwertungsprozess genau zu beschreiben und alle Stoffströme zu quantifizieren. Da diese Daten selten zentral vorgehalten wurden, war es schwer möglich produktionsintegrierte Maßnahmen zur Entlastung der Umwelt zu ergreifen und der Aufbau eines Umweltinformationssystems war geboten. Öko-Audits wurden im großen Umfang durchgeführt und Betrieben konnten sich zertifizieren lassen, wenn zugelassene externe Auditoren

eingeschaltet werden. Hiermit wurde zumindest eine Logistik geschaffen, die Zusammenhänge zwischen Stoff- und Materialinput zu den Produkten und Umweltbelastungen herstellt. Ein gewisser Nachteil dieser Herangehensweise ist, dass die Resultate nicht sehr reproduzierbar sind und die Bewertung auf Modeerscheinungen, wie z.B. der „Schadstoff der Woche“, basiert [1]. U.a. auch diese Überlegungen führten zu einer reproduzierbaren Methodik, die die Umweltbelastung von Produkten und Dienstleistungen ermöglicht: MIPS oder LIPS (Material/Land Intensität per Service) u.a.. Es werden hierbei eindeutige Kennzahlen, Tonnen pro Produkt, gebildet, die einen direkten Vergleich ermöglichen; ein Maß für Nachhaltigkeit direkt daraus abzuleiten, ist aber ebenfalls nicht schwierig [2].

Im zunehmenden Maße bedient sich die (Groß)industrie der Ökoeffizienzanalyse zur Entscheidungsfindung. In Abb. 1 ist beispielhaft aus [3] ein Variantenvergleich mittel „Ökologischem Fingerabdruck“ dargestellt. Dabei wird der Wert der schlechtesten Variante für ein Umweltmerkmal auf eins gesetzt. In diesem Beispiel ist leicht zu erkennen, dass die Alternative 1 in allen relevanten Bereichen die geringsten Umweltauswirkungen hat und daher zu bevorzugen ist. Leider ist das Ergebnis einer Ökoeffizienzanalyse selten so eindeutig, so dass wiederum andere Kriterien herangezogen werden müssen. Für die Industrie ist hierbei natürlich der Kostenaspekt von besonderer Bedeutung und wird als weiteres Kriterium herangezogen. Grafisch veranschaulicht ergibt sich für die Indigo-Färbung die Abb. 2 (ebenfalls aus [3]). Hierbei zeigt sich, dass die Farbstoffextraktion als Pflanzen die teuerste Variante ist und überraschenderweise auch die größten Umweltauswirkungen hat.

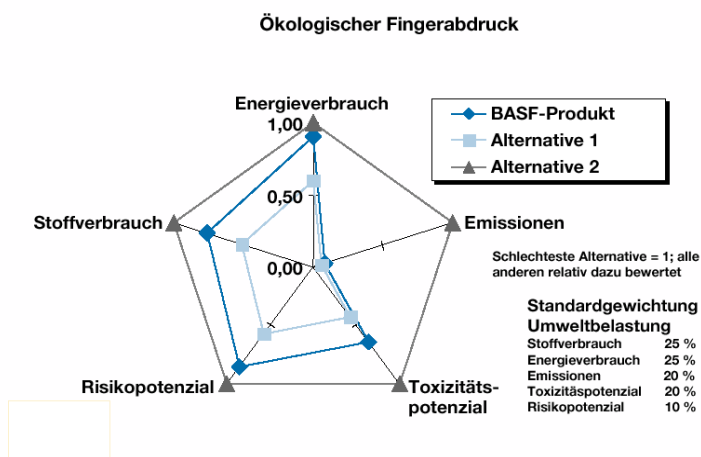


Abb. 1. Der „Ökologische Fingerabdruck“ zur Beurteilung der Umweltauswirkungen eines Produktes bzw. Produktionsverfahrens [4]

Es bleibt anzumerken, dass die Ökoeffizienzanalyse ein Methode ist, mit der eine Produkt bzw. Verfahrensumstellung bewertet werden kann und wird. Es wird allerdings eher für neu einzuführende Produkte benutzt oder zur Untermauerung der eigenen überlegenen Technologie (Marketing). Auch die chemische Industrie ist noch weit davon entfernt, alle Produkte und Prozesse einer Ökoeffizienzanalyse zu unterziehen und die Notwendigkeit der Produkte wird nicht in Frage gestellt.

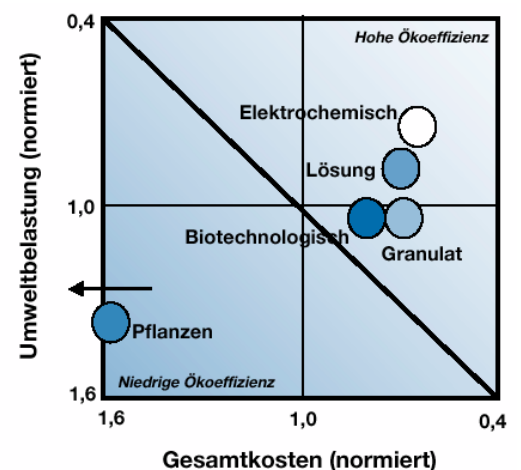


Abb. 2. Vergleich der Umweltbelastung mit den Gesamtkosten zur Beurteilung der Ökoeffizienz [4]

PRAKTISCHE BEISPIELE ZUR WASSEREINSPARUNG IN PRODUKTIONSPROZESSEN

Wasser wird in einer Vielzahl von Prozessen eingesetzt, u.a. weil es für viele Verbindungen ein gutes Lösungsmittel ist, durch seine hohe spezifische Wärmekapazität große Mengen an thermischer Energie aufnehmen und abgeben kann, keinerlei Gesundheitsgefahren oder Umweltgefährdungen hervorruft und in großen Mengen zu sehr günstigen Preisen zur Verfügung steht. Aus dem letzt genannten Grund wird Wasser

auch noch zu Transportzwecken eingesetzt. Im folgenden wird versucht, die Entwicklungen im Bereich der Teilstrombehandlung mit dem Ziel der Kreislaufführung beispielhaft herauszuarbeiten. Dabei werden die Limitierungen aufgezeigt und andere, weiterführenden Ansätze diskutiert.

Wasser wird nahezu immer als Reinigungsmittel eingesetzt, im besonderen Maße in der Lebensmittelindustrie, in Industrien mit nachwachsenden Rohstoffen aber auch in der chemischen Industrie (Chargenbetrieb). Hierfür werden dem Wasser Hilfsstoffe zugesetzt und das Wasser wird mit Produkten und Schmutzstoffen belastet. Um zu einer Umweltentlastung und Kostenreduktion zu gelangen, werden zwei Strategien verfolgt:

1. Wiederverwendung der Waschflüssigkeit (Wasser mit Hilfsstoffen)
2. Rezirkulation oder Verwertung des Produktes

Beide Strategien bedürfen einer Trenntechnik, die hier einen Aufwand darstellt, der sich gegenüber den Einsparungen und der Nutzung der Inhaltsstoffe rechnen muss. Durch die rasante Entwicklung der Membrantechnologie wird hier eine Trenntechnik zur Verfügung gestellt, die bereits jetzt intensiv, sogar in der Lebensmittelindustrie, die durch geringe Umsatzrenditen charakterisiert ist, eingesetzt wird.

In der Getränkeindustrie wird Wasser zur Reinigung überwiegend für zwei Teilbereiche eingesetzt:

1. Reinigung von Rohrleitungen und Apparaten (CIP-Verfahren (Cleaning in Place))
2. Flaschen bzw. Gläserreinigung

In beiden Fällen wird Lauge (NaOH 20 – 30 g/l) in den Waschgängen eingesetzt, wobei die Lösung sich mit den zu entfernenden Schmutzstoffen anreichert, aber auch ein Laugenverbrauch durch den Eintrag von CO₂ aus der Luft zu einer Carbonatbildung führt. In der Vergangenheit wurde die Lauge nach Erreichen der zulässigen Gesamtverschmutzung neutralisiert und der Kläranlage zugeleitet. Durch die Verfügbarkeit von chemikalien- und temperaturstabilen Nanofiltrationsmembranen, kann NaOH und Wasser von der verschmutzten Lösung abgetrennt und wiederverwendet werden. In Abb. 3 ist schematisch eine Laugen/

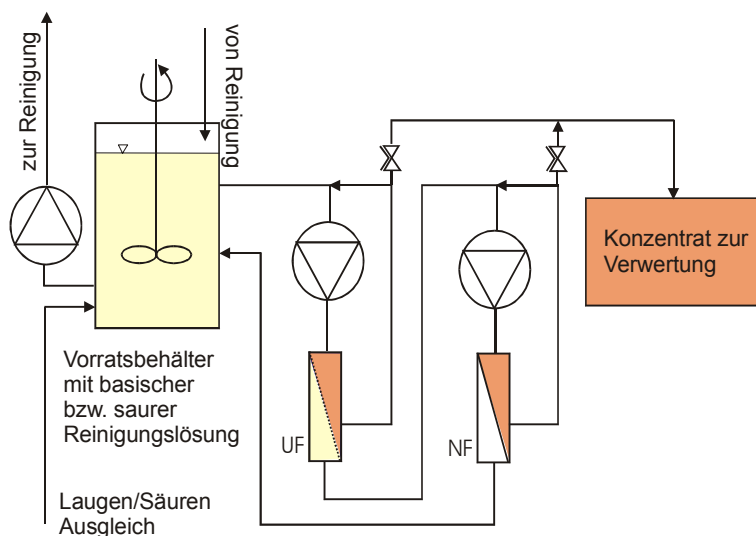


Abb. 3. Schematische Darstellung der Laugen/Säuren-Aufbereitung mittels Membranverfahren

Durch den modulhaften Aufbau einer NF-Filtration-Anlage kann sie in viele Prozesse integriert werden, wie dies auch bei der Flaschenreinigung meist schon geschehen ist. Hier kommt es, bedingt durch den Waschprozess, zu einer Verschleppung von Lauge und anderen Reinigungsmitteln, so dass mit Hilfe der Nanofiltration alleine keine 95%ige Wasser- und Laugeneinsparung möglich ist. Vielmehr muss diese Technologie mit einem Wassermanagementkonzept gekoppelt werden. Üblich sind heutzutage Kaskadenreinigungsanlagen [6], wie in Abb. 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lauge möglichst zurück-

Säuren-Aufbereitung durch Nanofiltration dargestellt. Für diesen Abwendungsfall rechnen [5] mit einer Wasser- und Laugeneinsparung von 95%. Viele Organische Verbindungen und auch die Carbonate werden von der NF-Membran zurückgehalten und daher aufkonzentriert. Insofern kommt neben der anaeroben Behandlung des Konzentrates auch eine Trocknung und Verwertung als Tierfutter in Betracht.

gehalten wird und dass der Frischwasserbedarf durch die Kaskadierung stark reduziert wird. Teilströme des Wasser werden mit den Flaschen verschleppt, werden zur Reinigung der Kästen benutzt oder werden dem System über die Abwasserbehandlung entzogen. Beim optimierten Waschgang fallen Abwässer, in Abb. 4 rot markiert, an, die folgendermaßen zu charakterisieren sind:

1. Entleerung von Resten in der Flasche, kann anaerob behandelt werden
2. kontinuierlicher Abwasseranfall zur Kläranlage; Feststoffe werden diskontinuierlich entfernt Abfall.
3. Das Laugenbad wird diskontinuierlich von Feststoffen, die als Abfall entsorgt werden, befreit
4. Spülwasser von der Kistenreinigung fließt zur Kläranlage

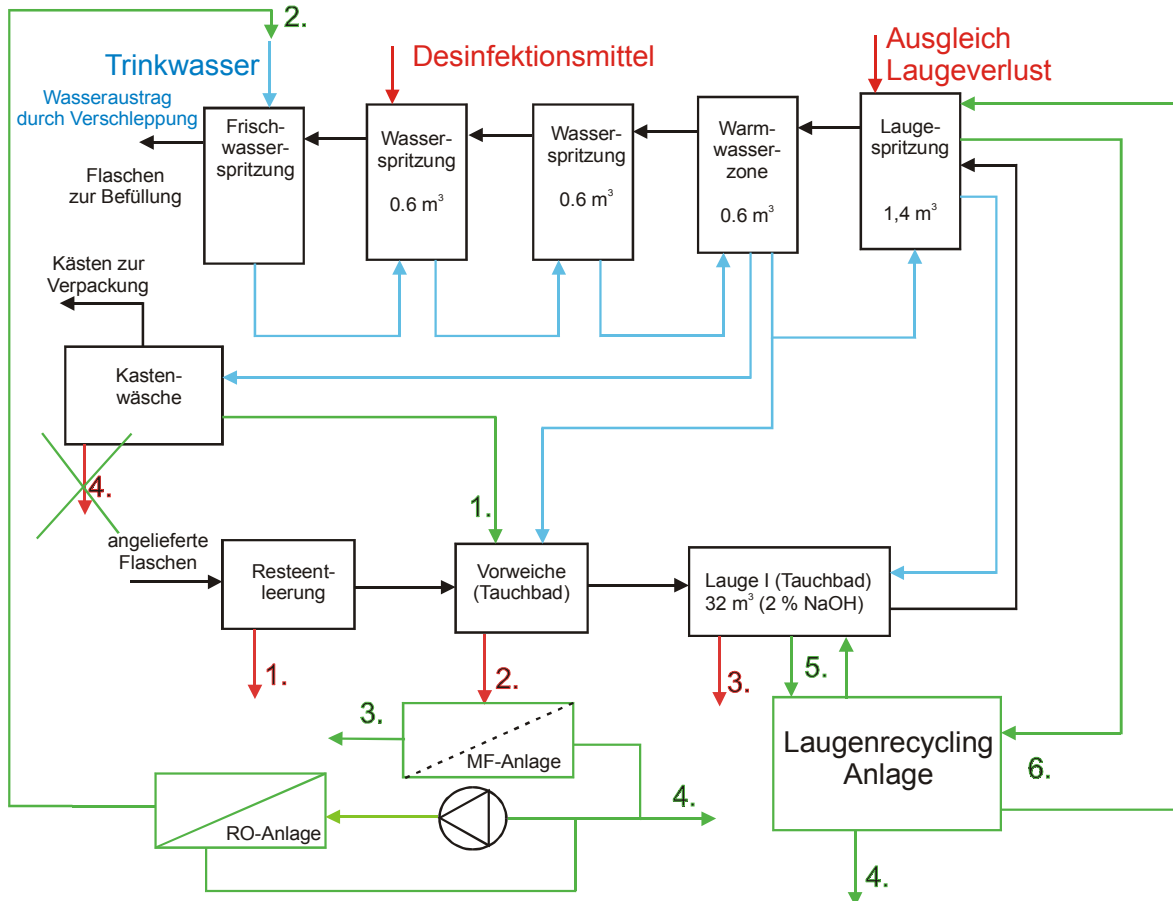


Abb. 4. Schematische Darstellung einer Flaschenwäsche in Kaskadenbetriebsweise in Anlehnung von [6], modifiziert nach [7] und angefügte Schließung des Wasserkreislaufes

An einer weiteren Schließung des Wasserkreislaufes wird gearbeitet. So kann eine Laugenrecyclinganlage, wie sie in Abb. 3 dargestellt ist, auch an das Laugentauchbad angeschlossen werden und dessen Standzeit erhöhen (5) [7]. Für die Laugespritzung (6) gilt dies ebenso, wird bisher aber nur im Technikumsmaßstab. Das Konzentrat aus der Laugenrecycling-Anlage (4) kann dann einer anaeroben Behandlung zugeführt werden. Der Abwasseranfall bei der Kistenreinigung ist unnötig und könnte direkt für die Vorweiche verwendet werden. Hier könnte durch ein mehrstufiges Aufbereitungsverfahren, was mit einer Umkehrosmoseanlage abschließt, Wasser in Trinkwasserqualität gewonnen werden und Leitungswasser ersetzen. In diesem Fall wäre auch eine biologische Behandlung des Wasser in einem Membranbioreaktor als Vorbehandlung lohnend, wie dies für das gesamte Abwasser einer Brauerei schon untersucht wurde [8]. Dies wird aus Kosten und energetischen Gründen bisher nicht gemacht. Versuche werden zur Kombination von Elektrodialyse mit Nanofiltration unternommen, um so ein günstiges Verfahren zur Schließung des Wasserkreislaufes bereitzustellen [7].

Der Einsatz der Nonofiltration kann optimal dort eingesetzt werden, wo Säuren, Laugen oder andere "kleinen Moleküle" aus einer Matrix komplexer organischer, partikulärer oder kolloidaler Verbindungen notwendig ist. Weitere Anwendungsbeispiele sind:

- Regeneration des PVPP-Filters (Polyvinylpyrrolidon) bei der Entfernung polyphenolischer Substanzen aus Bier mit Natronlauge [5], [7]
- Aufbereitung von Beizbäder bei der Metallverarbeitung [9]

Eine weiteres wichtiges Problem bei der Rezirkulierung von Wasser stellen gelöste Inhaltsstoffe dar, die sich nur schwer entfernen lassen und/oder in sehr hohen Konzentrationen vorliegen. Dies ist häufig bei der Verarbeitung nachwachsender Roststoffe der Fall. Daher soll anhand der Zellstoffindustrie diese Problematik diskutiert werden. Der große Bedarf an Zellstoff geht hauptsächlich von der Papierindustrie aus. Trotz immer besserer Wiederverwendungsmöglichkeiten und einer weitgehenden getrennten Sammlung von Altpapier, werden in Deutschland ca. 23% Zellstoff in der Papierherstellung eingesetzt, wobei besonders anzumerken ist, dass hiervon lediglich 5% in Deutschland produziert werden [10]. Mit dem immensen Zellstoffimport geht natürlich auch ein entsprechender Export an Umweltbelastung einher.

Als Rohstoff zur Zellstofferzeugung wird überwiegend Holz eingesetzt, weil Holz in gemäßigten Zonen im ausreichenden Maße und unabhängig von der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Alternativen Fasern wird von Seiten der Deutschen Papierforschung wenig Marktchancen eingeräumt, u.a. weil auch in tropischen Ländern in Holzplantagen ein sehr hoher Ertrag erzielt werden kann und die Fasern anderer Pflanzen i.d.R. einen zu hohen Silikatgehalt aufweisen [10]. Neben Holz wird hauptsächlich Baumwolle zur Zelluloseproduktion verwendet, wobei diese Qualität "zu gut" für die Papierherstellung ist und hauptsächlich in der Textilproduktion eingang findet [11]. Demgegenüber vertreten andere Autoren [12] die Auffassung, das andere Fasern genauso geeignet sind, bei der Ernte in großen Mengen anfallen und als Abfall entsorgt werden müssen und auch der Fasergehalt deutlich höher ist als bei Holz. Festzustellen bleibt, dass Zellstoff nur ca. 30% vom Holz ausmacht und der Rest daher abgetrennt werden muss. Dies geschieht durch Auflösen des Lignins (Kochung) entweder in Schwefelsäure mit Sulfiten (Sulfit-Verfahren, das hauptsächlich in Deutschland angewendet wird), oder in Natronlauge mit Sulfaten (Kraft-Verfahren, das in Skandinavien und Nordamerika Anwendung findet) bei 130 bis 180 °C [11]. Anschließend werden die Zellulosefasern abgetrennt und gebleicht, wobei chemisch/oxidative Verfahren zum Einsatz kommen, die wiederum einen Teil der Fasern und Begleitkomponenten in Wasser lösen. Daher liefern Zellstofffabriken bezogen auf die Produktion eine Menge hochkonzentrierter Abwässer mit sehr problematischen Inhaltsstoffen, Ligninsulfonsäuren und AOX, speziell wenn als Oxidationsmittel Chlor eingesetzt wird.

Um zu einer Reduzierung der Abwasserbelastung zu kommen, müssen daher bei der Kochung Prozessbedingungen gewählt werden, die der Entstehung problematischer Verbindungen entgegenwirkt und idealerweise eine Nutzung der organischen Verbindungen und eine Wiederverwendung der Aufschlusschemikalien in der Kochlösung erlauben. In Tab. 1 sind die typische Konzentrationsangaben für die entstehenden Inhaltsstoffe angegeben. Den größten Anteil bilden die Ligninderivate, die schwer abbaubar sind. Versuche hierzu wurden mit Weisfäulepilzen unternommen, die zeigen konnten, dass ein biologischer Abbau möglich ist [13] und auch Kombinationen aus Ozonung und biologischem Abbau, die die organische Belastung stark reduzieren konnten [14], aber in die übliche Technologie keinen Einzug fanden. Es ist auch sinnvoll die Inhaltsstoffe zu nutzen, was bei neueren Ansätzen der Fall ist, allerdings nur thermisch. Beim thermischen Trennprozess kann auch eine Rückgewinnung von SO₂ integriert werden, was sich positiv auf die Ressourcenausnutzung auswirkt. Um die AOX-Bildung zu vermeiden, wird auf den Einsatz von elementarem Chlor verzichtet (ECF). Im deutschsprachigen Raum sind chlorhaltige Chemikalien weitgehend

durch H_2O_2 /Sauerstoff Bleichung verdrängt (TCF). Auch weiter Bleichmethoden mit dem Ziel der Kreislaufschließung werden untersucht, wie der Einsatz von Enzymen [15] und weiters alternative Oxidationsmittel wie Ozon, Dimethyldioxyran, Peroximonschwefelsäure, Peroxycarbonsäuren u.ä [16] werden untersucht.

Tab. 1. Entstehung von Nebenprodukten beim der Zellstoffproduktion nach dem Sulfit-Verfahren und dem Kraft-Verfahren. Daten aus [11]

Sulfit-Verfahren (schwach sauer)		Kraft-Verfahren (alkalisch)	
Produkt	Menge kg/t Zellstoff	Produkt	Menge kg/t Zellstoff
Methanol	7 - 10	Methanol	5
Essigsäure	30 - 90	Acetat	100 - 200
Ameisensäure	0,5 - 1	Kohlenhydrat Abbauprodukte (Zuckersäuren, Lactone u.a.)	350 - 400
Formaldehyd	2 - 6	Aliphatische Schwefelverbindungen (Methylmercaptan, Dimethylsulfid, Dimethyldisulfid)	1
Furfural	5 - 6		
Zuckersulfonsäuren und Aldonsäuren	150 - 250		
Zucker	20 - 400	Terpene	8 - 10
Cymen	0,3 - 1	Holzöl	20 - 100
Ligninsulfonsäuren	600 - 800	Alkalische Lignine	400 - 600

Die größte Wassereinsparung bei der Zellstoffherstellung wurde durch die Integration der Bleiche in die Gegenstromwäsche erzielt und ist Stand der Technik. Eine Verwertung der anderen Holzinhaltstoffe erfolgt i.d.R. thermisch, wobei ein teil der Aufschlusschemikalien zurückgewonnen wird. In Abb. 5 ist ein Schema zur Zellstoffproduktion mit integrierter Chemikalien- und Wasserrückgewinnung dargestellt.

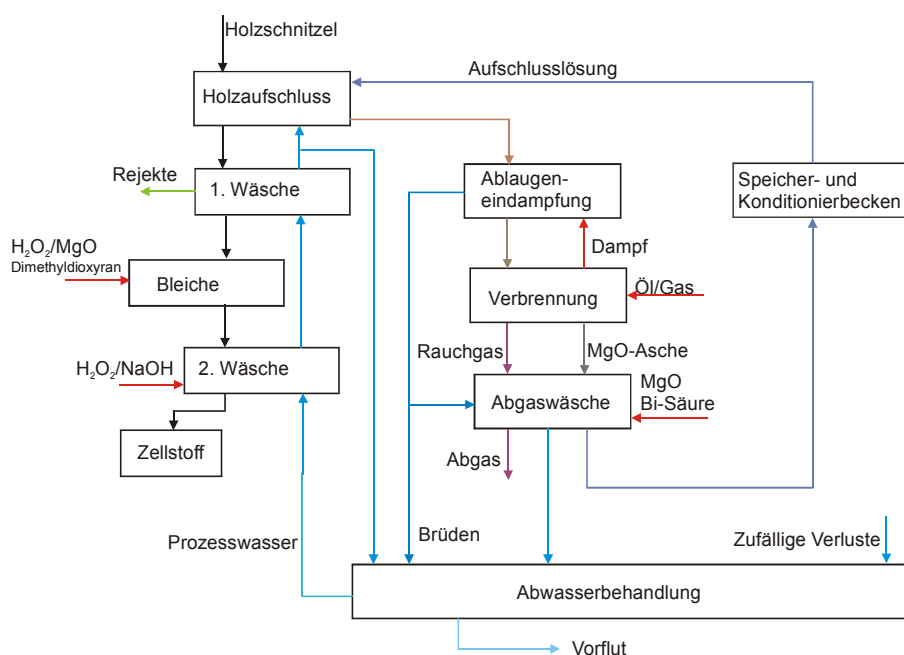


Abb. 5. Schematische Darstellung der State-of-the-art Zellstoffherstellung mit dem Sulfit-Verfahren (abgewandelt nach [17])

Ein Optimierungspotential ergibt sich bei der Nutzung der Holzchemikalien. Wie aus Tab. 1 ersichtlich ist, entstehen bei der Zellstoffgewinnung Nebenprodukte in der selben Größenordnung wie der Zellstoff selbst. Je nach Prozessbedingungen können bis zu 400 kg Zucker pro Tonne Zellstoff entstehen. Diese Zucker sind für die Lebensmittelindustrie nutzbar z.B. Xylitol (Kaugummi). In Abb. 6 sind mögliche Verwertungsweg der Ablauge zusammengestellt. Als weitere Nutzung wird die Fermentation der Zucker, die nicht weiter verwertet werden zu Ethanol, das destillativ getrennt wird, vorgeschlagen. Man könnte auch auf dem Ethanol und den Zuckern Hefe wachsen lassen, die dann als proteinreicher Futterzuschlagsstoff genutzt werden kann. Gleichzeitig lassen sich weitere Lösungsmittel gewinnen.

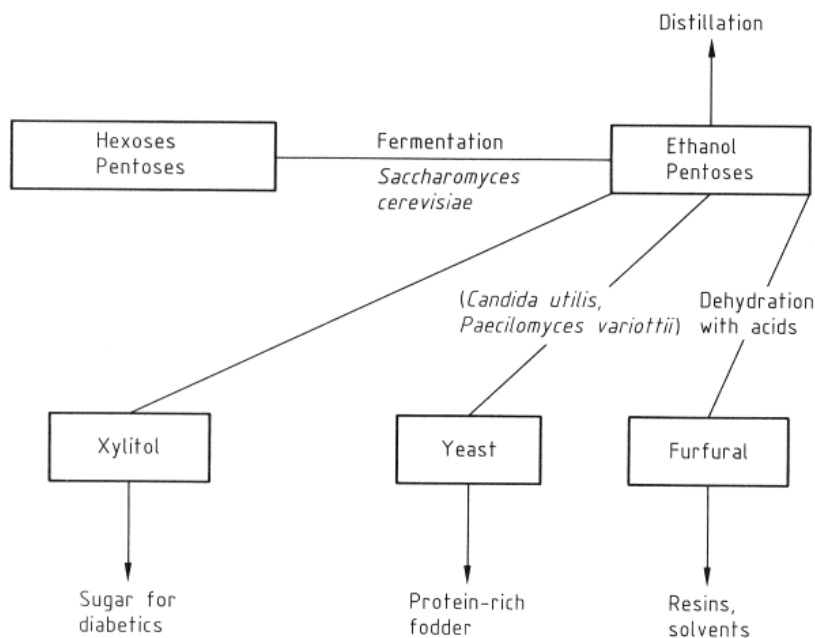


Abb. 6. Möglichkeiten der Wertstoffgewinnung aus Ablauge der Zellstoffherstellung (aus [11])

keine nennenswerte Anwendung, weil der Preis des Lignins nicht mit petrochemischen Produkten konkurrieren kann. Der Einsatz von Alkoholen hat viele Vorteile, denn der Alkohol kann durch Destillation leicht zurückgewonnen werden und es entstehen keinerlei schädliche Nebenprodukte. Nachteilhaft ist der Einsatz von NaOH, da hierdurch die Kohlenhydrate zersetzt werden und somit nicht weiter genutzt werden können und die Rückgewinnung des NaOH durch Elektrolyse ist sehr energieaufwendig. Bisher wurde der Einsatz der Nanofiltration (s. Abb. 3) hier noch nicht untersucht, so dass noch ein weiterer Forschungsbedarf besteht, um die gesamte Biomasse effektiv nutzen zu können. Ganz abwasserfrei wird die Zellstoffproduktion auch nicht realisierbar sein, weil mit dem Rohstoff Holz oder anderer Pflanzen Wasser in den Prozess eingetragen wird, der im Produkt nicht mehr vorhanden ist. Daher muss das Wasser so aufbereitet werden, dass es wiederum dem Wasserkreislauf zugeführt werden kann.

Ein weiteres wichtiges Feld industrieller Aktivität ist die Auswahl von Rohstoffen, wobei derzeit aus Kostengründen meist fossile Stoffe eingesetzt werden meist. Dabei führt die Synthese von Produkten aus den Rohstoffen nicht auf direktem Weg und vor allem nicht ausschließlich zu den gewünschten Stoffen. Um zu einer Abwasser- und Abfallfreiheit zu kommen, müssen Maßnahmen ergriffen werden, die zu einer deutlichen Reduzierung der Menge bzw. Vermeidung an Nebenprodukten führen oder deren Wiederverwendung in anderen Produktionsprozessen erlauben [18]. Folgen Maßnahmen können hierfür ergriffen werden:

Weitere Überlegungen zu einer optimalen Nutzung des Holzes bzw. der Biomasse gehen mit einer Modifikation des Aufschlusses einher [11]. So sind Verfahren bekannt, die anstelle von SO₂ salpetrige Säure verwenden. Diese reagiert mit dem Lignin und den Zuckern zu stickstoffreichen Substanzen, die als Langzeitdünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden könnten. Eine Umsetzung scheitert allerdings am Preis für salpetrige Säure.

Auch können Alkohole oder Essigsäure eingesetzt werden. Auf diese Weise können die Lignine relativ rein gewonnen werden und zu anderen Produkten verarbeitet werden. Dies findet bisher

1. Umstellung des Herstellungsprozesses. Dies kann durch die Entwicklung neuer Synthesewege geschehen, aber auch durch die Auswahl anderer Rohstoffe und schließlich durch die Substitution des Produktes durch ein anderes (Kunststoffherstellung aus Ligninen anstelle von petrochemischen Produkten).
2. Durch Verschiebung des Gleichgewichtes auf die Seite des Produktes. Schon aus ökonomischen Gründen werden günstige Temperatur und Druckbereiche gewählt. Wenn das Produkt sich gut von einem Edukt trennen lässt, kann dieses im Überschuss zugegeben werden und das Produkt dann prozessintegriert abgetrennt werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Methyacetattherstellung mit dem Eastman-Kodak-Reaktivdestillationsverfahren (s. [Abb. 7](#)). Hier sind Synthese und Produktabtrennung miteinander verbunden, so dass die Ressourcenausnutzung nahezu bei 100% liegt. Eine ursprünglich vorgesehene Methanolrückgewinnung ist meistens außer Betrieb und beim Einsatz reiner Essigsäure und Methanols ist die Abtrennung von Verunreinigungen ebenfalls entbehrlich.
3. Verbesserung der Selektivität von Katalysatoren, Trennverfahren und der Prozesstechnik
4. Entwicklung oder Nutzung neuer Katalysatoren, wie z.B. bei der PP-Produktion, bei der beim Einsatz metall-organischer Katalysatoren kein Abwasser mehr anfällt oder auch der Einsatz von Enzymen, die Reaktionsbedingungen bei vorteilhaften Temperaturen und Drücken ermöglichen.
5. Wechsel des Reaktionsmedium. Hierbei gibt es ein großes Potential. Es kann nicht nur Wasser durch ein organische Lösemittel ersetzt werden, wobei dieses Lösemittel leichter vom Produkt und Nebenprodukten abgetrennt und in den Prozess zurückgeführt werden kann, sondern die Synthesen können auch in Salzschnmelzen, überkritischen Fluiden, kondensierten oder homogen Gasphasen oder in Mikroemulsionen durchgeführt werden [19] (hier sind auch konkrete Beispiele aufgeführt). Auch wird Wasser oftmals zu Transportzwecken eingesetzt, was z.B. durch den Vakuumtransport zu umgehen wäre.
6. Substitution von umweltgefährdenden Hilfsstoffe wie beispielhaft chlororganische Lösungsmittel.
7. Prozessoptimierung

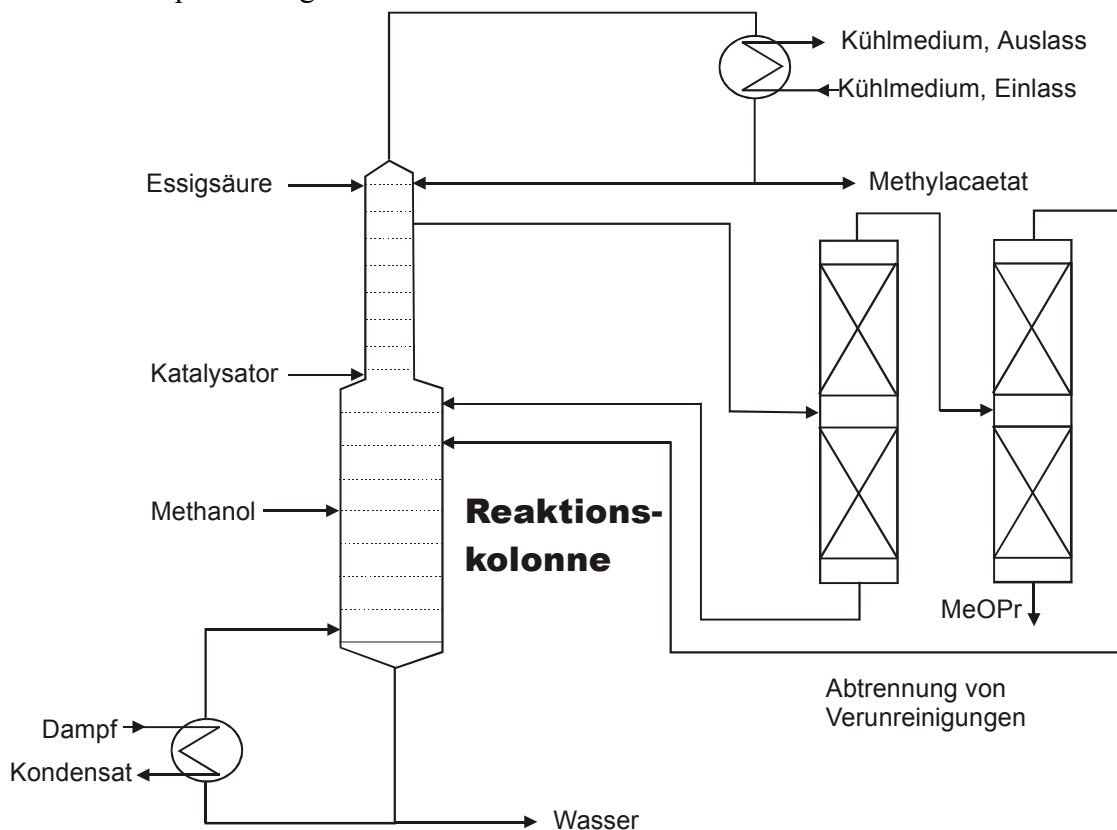


Abb 7. Fließschema einer Methyacetatanlage aus [19]

Trotz aller Bemühungen wird es nicht gelingen, ohne Begleitkomponenten auszukommen, weswegen nach internen Rezykulationsmöglichkeiten zu suchen ist. Beispielsweise kann das Reaktionsmedium nach Aufbereitung wieder in den Prozess zurückgeführt werden, z.B. Natronlauge zur Reinigung s.o.

Oftmals kann eine Wiederverwendung von Neben- oder Aufbereitungsprodukten nicht direkt verwendet werden. Hier müssen Produktionscluster geschaffen werden, um diese Stoffe in anderen Prozessen einsetzen zu können, um eine Vermarktung mit der dafür notwendigen Logistik zu vermeiden. Beispielsweise wird in Raffinerien Ammonium aus dem Abwasser gestrippt und direkt wieder zur Entstickung der Abgase eingesetzt [20]. Der aus den Crackprozessen freigesetzte und aus Abwasser gestrippte Schwefelwasserstoff wird im Clausprozess [21] direkt zu marktfähigem Schwefel verarbeitet [22]. Dieser so gewonnen Schwefel deckt in Deutschland ca. 50% des Schwefelbedarfes zur Schwefelsäureproduktion ab. Eine weitere wichtige Quelle ist die Aufbereitung von "Dünnsäure", wie sie z.B. bei der Titandioxidproduktion anfällt [18]. Theoretisch wird genügend Schwefel durch die Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt und könnte den weltweiten Bedarf an Schwefelsäure abdecken. Verfahren zur Separation von SO₂ aus Rauchgasen stehen zur Verfügung; aus Kostengründen wird der Schwefel mit anderen Methoden entfernt und als z.B. Gips in die Baustoffindustrie gegeben [11].

GRENZEN DER ABWASSERFREIEN FABRIK

Das Ziel der Abwasserfreiheit sollte eine Komponente in einem abgestimmten Gesamtkonzept sein. Der große Vorteil liegt in der Abkoppelung von der Abwassergesetzgebung und bei den Indirekteinleitern zusätzlich von den Abwassergebühren. Bei zu einseitiger Orientierung auf Abwasserfreiheit kann an anderer Stelle ökologischer Schaden entstehen, etwa durch excessiven Energiebedarf. Daher ist fraglich, ob eine abwasserfreie Fabrik immer erstrebenswert ist. Fest steht, dass oft mit den verwendeten Materialien Wasser in den Produktionsprozess gelangt, dass im Produkt nicht unbedingt zu finden sein wird. In diesem Fall muss Wasser ausgeschleust werden. Idealerweise kann dieses Wasser in einen anderen Produktionsprozess einfließen, bei dem Wasser verbraucht wird. Die Einsparmöglichkeiten für Wasser sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft, denn es gibt noch ein großes Potential für die Nutzung alternativer Medien. Problematisch ist die komplette Rezykulation von Wasser im Lebensmittelbereich, weil aus emotionalen Gründen immer der Einsatz von Frischwasser gefordert sein wird. Es ist daher nötig das Prozesswasser soweit aufzubereiten, dass es nicht als Abwasser sondern als Wasser anzusehen ist. Dann kann es wiederum dem Wasserkreislauf zugeführt werden. Dabei ist auch der Energieeinsatz zur Vermeidung oder Aufarbeitung zu berücksichtigen. Prozesse oder die Herstellung von Produkten, bei denen keine "sinnvolle" Vermeidung oder Aufarbeitung möglich sind, sollten grundsätzlich überdacht werden. Die Wahl von Rohstoffen und Produkten ist letztlich der wesentliche Faktor einer Gesamt-Optimierung.

VISION FÜR DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

Trotz der von industrieller Seite dargestellten großen Fortschritte in der Wassereinsparung und der noch größeren Reduktion von Schadstoffemissionen, ist bei grossem Potential noch viel zu tun. Dabei dominieren nicht die technischen Probleme, denn viele Veränderungen sind bereits heute technisch möglich [23] bzw. vorstellbar. Die Probleme liegen eher in den politischen und ökonomischen Strukturen, die immer mehr an einem kurzfristigen Erfolg von ausschließlich monetär interessierten Aktionären orientiert sind. Daher ist die Politik gefordert, die Rahmenbedingung so zu gestalten, dass auch mittelfristig ökonomisch sinnvolle Maßnahmen ergriffen werden. Der erfolgsversprechendste Weg scheint in der Stärkung der Regionen zu liegen, in denen versucht wird das Konzept der Nachhaltigkeit zu etablieren [2]. Hier könnte versucht werden

die lokalen Potential auszuschöpfen und ein hocheffizientes komplexes Netzwerk von Stoff- und Energieströmen zu schaffen. Diese können eine Vorbildfunktion haben und diese auch im Marketing nutzen. Hier sind die Medien gefordert von der "Skandalsuche" zur positiv orientierten Information überzugehen.

Literatur

- [1] SCHMIDT-BLEEK, F. (1993). *Wieviel Umwelt braucht der Mensch? : MIPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften*. Birkhäuser, Berlin; Basel; Boston
- [2] MOSER, F. (1996). *Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Entwicklung*. Vol. 2, (5), S. 1059-1153, Springer Verlag, Berlin
- [3] KICHERER, A., Pfisterer, H.-E., und Staudacher, R. (1999). *Die Ökoeffizients-Analyse der BASF*. Vol. Im Dialog, BASF AG, Ludwigshafen
- [4] KICHERER, A., Pfisterer, H.-E., und Staudacher, R. (1999). *Die Ökoeffizients-Analyse der BASF*. Vol. Im Dialog, BASF AG, Ludwigshafen
- [5] BAUER, B. und Danz, K. (1997). *Wasser- und Laugenmanagement in der Getränkeindustrie*. S. C41-C58, IUUV Uni Bremen und GVC-VDI, Bremen
- [6] PLUTA, H., Krause, H., und Thiele, D. (1998). *Abwässer aus der Flaschen- und Behälterreinigung und der Desinfektion in der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie*. Umweltbundesamt, Berlin
- [7] KASCHEK, M., Mavrov, V., Kluth, J., Rögener, F., und Chmiel, H. (1997). *Membranverfahren zur Laugenaufbereitung in der Getränkeindustrie mit dem Ziel der Kreislaufführung*. S. C59-C78, IUUV Uni Bremen und GVC-VDI, Bremen
- [8] BROCKMANN, M., Kraft, A., und Meußdoerffer, F. (1999). *Kreislaufschließung im Brauwesen - Darstellung verschiedener Ansätze*. S. 961-970, GVC, Düsseldorf
- [9] DANZ, K. und Bauer, B. (1998). *Säuren- und Laugen-Management mittels Membrantrennverfahren*. S. B49-B66, IUUV Uni Bremen und GVC-VDI, Bremen
- [10] RAHM, H. (1996). *Entwicklung des Zellstoffeinsatzes für die Papiererzeugung in der Welt, in Europa und Deutschland*. S. 1-1-1-24, Papiertechnische Stiftung, München
- [11] (2001). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany
- [12] PAULI, G. (1998). *UpCycling. Wirtschaften nach dem Vorbild der Natur für mehr Arbeitsplätze und eine saubere Umwelt*. Vol. 1. Auflage, Riemann Verlag
- [13] BERGBAUER, M., Eggert, C., und Kalnowski, G. (1992). *Biotreatment of Pulp Mill Bleachery Effluents with the Coelomycetous and Fungus *Stagonospora Gigaspora**. *Biotechnological Letters*, Vol. 14, S. 317-322
- [14] JEKEL, M. und Beulker, S. (1993). *Reinigung von Abwässern aus der Zellstoffindustrie -Fällung und Ozonung in Kombination mit biologischen Abbau-*. S. 41-51, TU Berlin, Berlin
- [15] BORCHERS, B. (1996). *Möglichkeiten der enzymatischen Bleiche von Zellstoffen*. S. 5-1-5-16, Papiertechnische Stiftung, München
- [16] FIEHN, G. (1996). *Trendbetrachtungen zur Entwicklung von ECF-, TCF- und TEF-Bleiche*. S. 9-1-9-15, Papiertechnische Stiftung, München
- [17] SPÖRL, R. und Alber, W. (1996). *Reststoff- und Abwassersituation hinsichtlich der Entwicklung der TEF-Erzeugung*. S. 10-1-10-23, Papiertechnische Stiftung, München
- [18] CHRIST, C. (1999). *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*. Wiley-VCH, Weinheim
- [19] ZLOKARNIK, M. (1996). *Produktionsintegrierter Umweltschutz in der chemischen Industrie*. Vol. 2, (5), S. 444-515, Springer Verlag, Berlin
- [20] ELSTER, J. (1993). *Special Cleaning of Petroleum Industry Wastewaters with Particular Regard to Product Recovery and Waste Minimization*. *OIL GAS-European Magazine*, (1), S. 31-37
- [21] DELTA CONTROLS CORPORATION (1998). *Claus Process*. <http://www.deltacnt.com/00-htp26.htm>
- [22] STEIN, C., Elster, J., Hene, I., Sachse, J., und Peper, H. (1998). *Entfernung von Ammonium-Stickstoff und Schwefelwasserstoff aus Raffinerieabwässern*. *Erdöl Erdgas Kohle*, Vol. 114, (10), S. 501-506
- [23] WEIZÄCKER, E. U. von, Lovins, A. B., und Lovins, L. H. (1997). *Faktor vier. Doppelter Wohlstand - halbiertes Verbrauch*. Droemer Knaur, München