

Dekontamination von Altholz

D. Baier und K. Soyez

Zusammenfassung

Altholz stellt ein wesentliches Potential für die Verwertung dar. Dafür muß es von Schadstoffen aus der Nutzung entfrachtet werden. Für die Entfrachtung von Schwermetallen eignen sich mechanische Verfahren und Extraktionsverfahren. Für die Extraktion können Abfallsäuren, z.B. Milchsäure aus Silagesickerwässern, eingesetzt werden. Ein Abbau von PAK wird durch einfache Rotteprozesse bewirkt. Dabei sind Abbauleistungen von 99 % erzielbar.

Summary

Waste wood material is a significant potential for re-use activities. For that reason, it is to be decontaminated. Heavy metals can be decontaminated by mechanical processes, by which means a concentration of the metal in the fraction below 1,6 mm is reached. Wood protection agents can be eluted by organic acids. Waste acids, as lactic acid from silage production, are applicable. PAH's can be destructed in quite simple composting plants. A 99 % decontamination was reached in technical scale experiments.

Einleitung

Dekontaminationsprozesse sind in den Bereichen Wasser, Luft und Boden Stand der Technik und weit verbreitet; im Bereich Altholz trotz erheblicher Mengen aber eher selten.

Das Problem bei der Verwertung von Altholz, einem an sich biologisch gut verwertbaren Material, besteht in seiner Behandlung mit Lacken, Farben, Lasuren, Holzschutzmitteln u.ä., die zur Verlängerung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer angewendet werden. Die meisten dieser Stoffe enthalten anorganische (Schwermetalle, Halogene) oder organische (Teeröl, PCP, Lindan, PCB, DDT) Komponenten, die nach der Behandlung im Holz verbleiben und dann Schadstoffe darstellen, an denen eine spätere Altholzverwertung häufig scheitert.

Das Gesamtaufkommen an Altholz, bestehend aus unbelasteten und belasteten Sortimenten, lag 1998 in Deutschland bei 7,7 Mio Tonnen. Davon wurden 5,6 Mio Tonnen deponiert (72 %). Bei einer Verwertungsquote von 28 % entfallen 1,4 Mio Tonnen auf den stofflichen und lediglich 0,7 Mio Tonnen auf den energetischen Bereich [SUNDERMANN 99]. Dabei erbringt für die stoffliche Verwertung in der Spanplattenindustrie aufbereitetes Altholz Erlöse von 10 - 20 DM/t. Andere Entsorgungsalternativen erfordern dagegen Zuzahlungen zwischen 30 DM/t für unbehandeltes und 400 DM/t für kontaminiertes Altholz.

Die Gründe für die geringen Verwertungsquoten sind plausibel: Zum einen gibt es mit der Deponierung eine preiswerte Entsorgungsmöglichkeit, zum anderen ist unbelastetes Holz kostengünstig und in ausreichenden Mengen auf dem Markt. Durch neue gesetzliche Regelungen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, TA Siedlungsabfall), die auf eine Minderung von Umweltbelastungen durch Schonung natürlicher Ressourcen zielen, ist allerdings ein Deponieren von Altholz ab dem Jahr 2005 ohne aufwendige Vorbehandlung nicht mehr möglich. Eine drastische Erhöhung der Entsorgungsgebühren, die entsprechend dem Kontaminationsgrad erfolgen wird, ist abzusehen.

Die Herausforderung besteht darin, eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle und realisierbare Alternative zur Deponierung zu schaffen. Diese muß die berechtigten Forderungen des KrW-/AbfG nach Verwertung und Produkthaftung erfüllen und gleichzeitig eine wirtschaftlich vorteilhafte Lösung bieten. Bislang bestand kein zwingender Anlaß, belastete Althölzer zu dekontaminieren. Mit dem Wegfall der Beseitigung durch Deponierung und den damit verbundenen steigenden Kosten könnte diese Verfahrensweise ein interessanter Lösungsansatz sein, derartige Sortimente kostengünstiger und ökologisch verträglicher zu entsorgen.

Material und Methoden

Im folgenden dargestellten Untersuchungen zielen darauf ab, unter Nutzung von biologischen, chemischen und physikalischen Wirkprinzipien eine kostenmäßig günstige Entfrachtung zu erzielen. Sie soll die weitgehende Nutzbarkeit des dekontaminierten Altholzes sicherstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß auch die Einordnung in bessere Schadstoffklassen nach der Behandlung bereits erhebliche wirtschaftliche Effekte erbringen kann. Demgemäß steht nicht die vollständige Entfrachtung in jedem Falle im Vordergrund. Hinzuweisen ist noch auf die Forderung, die entstehenden Abprodukte ihrerseits umweltgerecht zu entsorgen und Wertstoffe zurückzugewinnen.

Schadstoffanreicherung durch Klassierung

Die Verteilung von Schadstoffen (Farben, Lacke, HSM) erstreckt sich in der Regel auf den Oberflächenbereich. So haften Anstriche nach Beendigung der Nutzung oft nur noch schwach am Holz. Zudem sind sie spröder als das übrige Holz, und sie lassen sich leichter zerkleinern. Die Holzoberfläche ist in vielen Fällen durch Verwitterungsvorgänge instabil geworden. All das führt dazu, daß sich die Oberflächenkontaminationen nach der Zerkleinerung verstärkt in der Feinfraktion wiederfinden. Durch Abtrennung (Siebung, Sichtung) dieser Feinfraktion läßt sich eine erhebliche Schadstoffentfrachtung erreichen. Tabelle 1 zeigt dazu beispielhaft die Zinkgehalte in den einzelnen Fraktionen eines zerkleinerten Altholzsortiments [BAIER 96].

Tab. 1: Zinkgehalte in verschiedenen Fraktionen eines Altholzsortiments

Fraktion (mm)	Zn (mg/kgTS)
> 10	14
> 6,3	39
> 4,0	76
> 2,5	194
> 1,6	656
< 1,6	4.600

Der Zinkgehalt in der Feinfraktion übersteigt den der anderen Fraktionen um ein Vielfaches. Bei Abtrennung der Feinfraktion ist eine signifikante Schadstoffanreicherung möglich. Das Beispiel Zn ist auch auf die anderen Schwermetalle und auch auf viele organische Schadstoffe übertragbar.

Die Abtrennleistung ist im starken Maße von der Holzart und der Feuchte abhängig. Ein Vergleich verschiedener Altholzsortimente sowie von Waldrestholz zeigt, daß sich getrocknete Sortimente wie Parkett, Fenster und Kantholz bei gleichen Zerkleinerungsbedingungen in der Spangröße und -form nur unwesentlich voneinander unterscheiden und durch relativ glatte Spankanten gekennzeichnet sind. Im Gegensatz dazu weist zerkleinertes Frischholz aus der Waldpflege eine andere Granulometrie mit einem Wechsel zwischen Dünn- und Massivholz mit unterschiedlichen Feuchten auf und hat ausgefranzte Spankanten. Die Rückstandssummenkurven verschiedener zerkleinerter Sortimente aus einem einfachen Shredderprozeß zeigt Abbildung 1.

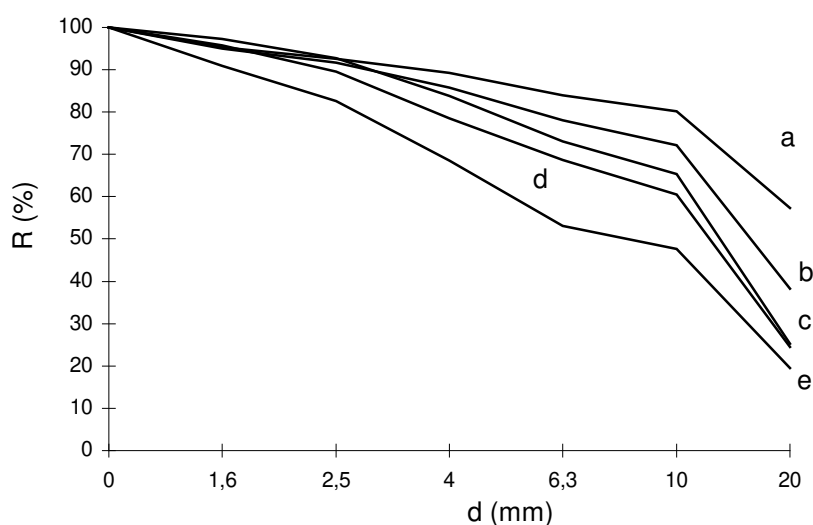


Abb. 1: Rückstandssummenkurven verschiedener geschredderter Holzsortimente
a) Holz Waldpflege b) Parkett c) Fenster d) Kantholz 1 e) Kantholz 2

In Verbindung mit der Kenntnis der Schadstoffgehalte erlauben diese Rückstandssummenkurven in den einzelnen Fraktionen eine Abschätzung, welche Mengen bei den verschiedenen Siebschnitten entfernbar wären. Die Schadstoffe lassen sich in der Feinfraktion aufkonzentrieren, so daß für die übrigen Fraktionen eine Verwertung in stofflichen und thermischen Verfahren möglich ist. Für die belastete Fraktion ist ein geeigneter Verwertungs- bzw. Entsorgungsweg zu ermitteln.

Das Klassierungsverfahren ist immer dann sinnfälliger, wenn für den anschließenden Verwertungsprozeß ein zerkleinertes Sortiment (z.B. Spanplattenindustrie) ohnehin erforderlich ist.

Schadstoffanreicherung durch Extraktion

Die meisten chemischen Dekontaminationsverfahren sind durch eine Extraktion der Schadstoffe aus der Holzmatrix mit Hilfe geeigneter Agenzien (z.B. Säuren, organische Lösungsmittel) gekennzeichnet. Bei der Entfernung von Schwermetallen wurden gute Ergebnisse mit Milchsäure erzielt [BAIER 96], wo die Schwermetalle ohne Zugabe anderer Agenzien als Laktate ausfallen und leicht abgetrennt werden können. Milchsäure ist allerdings sehr teuer, und daher wurde überprüft, ob sich auch milchsäurehaltige Abwässer zur Extraktion verwenden lassen. Dabei erwies sich die Eignung verschiedener Silagesickerwässer. In der Abbildung 2 sind die Anreicherungsraten von Zink und Chrom unter Verwendung von Sickerwasser dargestellt. Altholz wurde dabei in zerkleinerter Form eingesetzt.

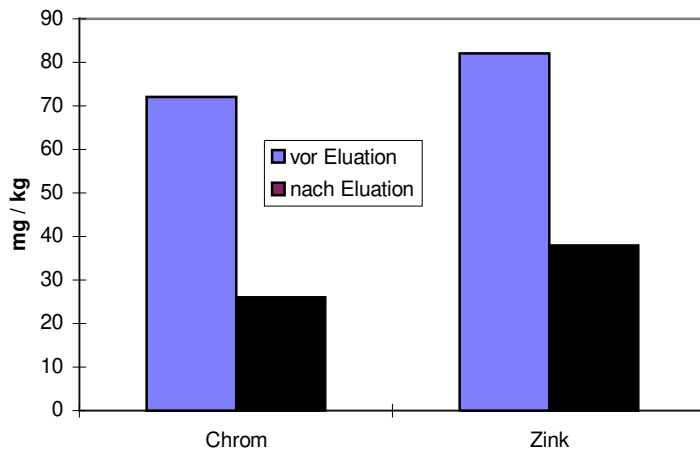


Abb. 2: Abreicherung von Chrom und Zink aus einem Altholz unter Einsatz von Sickerwasser

Zu den ökologischen und ökonomischen Vorteilen dieser Verfahrensweise kommt ein hohes Maß an Arbeitssicherheit, da weder Verfahren noch Einsatzstoffe ein relevantes Gefährdungspotential darstellen.

Mechanisch-biologische Schadstoffabreicherung

Die große Menge an mit Teeröl behandelten Bahnschwellen, die zur Entsorgung anstehen, hat dieses Sortiment für eine Schadstoffabreicherung besonders interessant gemacht. Von entscheidender Relevanz ist dabei die Substanzklasse der PAK, die als mutagen und kanzerogen bekannt sind. Um den mikrobiellen PAK-Abbau unter aeroben Bedingungen zu untersuchen, erfolgte die Behandlung von zerkleinertem Bahnschwellenholz in einer offenen Tafelmiete, wie sie als Low-Tech-Varianten aus der Kompostierung bekannt sind [BAIER 99]. Zur Verbesserung der Abbauleistungen wurden Holz/Kompost-Gemische eingesetzt. Nach einer Behandlungsdauer von 205 Tagen lag der Abbau der Gesamt-PAK-Belastung zwischen 98,69 und 99,47 % (Abbildung 3). Bereits nach 22 bzw. 23 Tagen war ein Abbau zwischen 60,9 und 95,6 % zu verzeichnen.

Das Low-Tech-Verfahren hat damit eine erstaunliche Leistungsfähigkeit nachgewiesen. Allerdings sind Fünf- und Sechs-Ring-PAK noch in relevanten Größenordnungen vorhanden.

Weitere Verbesserungen der Abbauleistung sind zu erwarten, wenn eine Optimierung der mechanisch-biologischen Behandlung erfolgt. Ansatzpunkte dafür sind die Verlängerung der Prozeßdauer und die Steuerung des Prozeßregimes (z.B. Begasungsintensität, Einsatz adaptierter Bakterienkulturen, C/N-Verhältnis) sowie gegebenenfalls eine Kombination mit chemischen Verfahren.

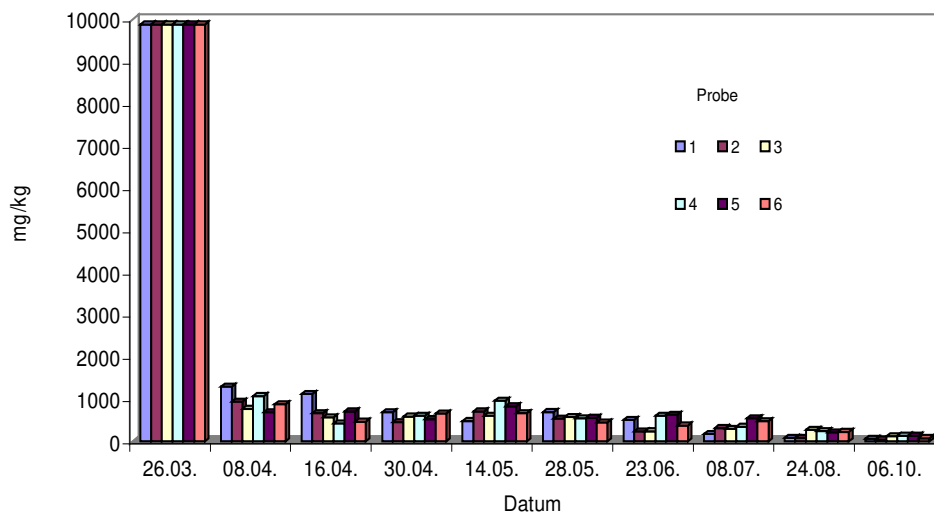


Abb. 3: PAK (16 EPA) - Abbau über einen Zeitraum von 205 Tagen

Ausblick

Dekontaminationsverfahren können belasteten Althölzern neue Verwertungswege eröffnen. Da die bisherige Entsorgungspraxis keine zwingende Notwendigkeit eröffnete, sind derartige Verfahren selten und wenig verbreitet. Ob Dekontaminationsverfahren im Zuge der neuen Rechtsverordnungen eine weite Verbreitung finden, wird entscheidend von den ökonomischen Rahmenbedingungen abhängen. Die untersuchten Verfahren zur mechanischen und biochemischen Schadstoffentfrachtung erbrachten günstige Resultate. Ein Vorrang eines bestimmten Verfahrens ist derzeit nicht auszumachen. Besonders geeignet sind diese Verfahren für eine Schwermetallabreicherung. Organische Schadstoffe lassen sich mit mechanisch-biologischen Verfahren abbauen, wobei der Abbau einiger schwer abbaubarer Verbindungen möglicherweise eine Kombination mit chemischen Verfahren erfordert.

Literatur

BAIER, D.; MEISTER, A.; SOYEZ, K. (1996): Untersuchungen zur Kompostierung am Standort Waldstadt Wünsdorf. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Universität Potsdam, 1996

BAIER, D., SOYEZ, K. (1999): Abbauverhalten ausgewählter Schadstoffe in Althölzern. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Universität Potsdam, 1999

SUNDERMANN, B. et al. (1999): Aufkommen und Verwertungswege für Altholz in Deutschland. Müll und Abfall, 1999/5, S. 269 - 274

Anschriften der Autoren

Dipl.-Ing. Dieter Baier
Gesellschaft für ökologische
Technologie und Systemanalyse
Büro Sachsen-Anhalt
Neue Straße 2
06869 Coswig/Anhalt

Dr. Konrad Soyez
Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
AG Ökotechnologie und
UP Transfer GmbH
Park Babelsberg 14
14482 Potsdam

Untersuchungen zur Kompostierbarkeit von paraffinbeschichteten Verpackungsmaterialien

D. Baier, K. Streurs, K. Soyez

Zusammenfassung

Für eine nachhaltige Wirtschaftsweise ist die Nutzung biologisch abbaubarer Materialien unumgänglich. Die geforderten Anwendungseigenschaften stehen dem Einsatz derartiger Materialien aber in manchen Fällen entgegen. Bei Verpackungen für Lebensmittel werden hydrophobe Eigenschaften verlangt. Dafür sind mit Paraffin beschichtete Papiere im Gebrauch. Die wasserabweisende Eigenschaft schränkt die Verwertung durch eine Kompostierung ein. Im Bericht wird die Kompostierbarkeit von paraffinbeschichteten Papieren nach den Vorhaben der DIN 56900 und der Bioabfallverordnung untersucht. Es zeigt sich, daß die Materialien in Mischungen mit Bioabfall bis zu einem Massenanteil von 10 % problemlos kompostiert werden können. Im Falle stark zerkleinerter Papiere werden die Paraffinüberzüge vollständig abgebaut, gefaltete und zerknüllte Papiere aber nur zu etwa einem Drittel bzw. einem Zehntel. Das belegt, daß diese Materialien bioabbaubar sind, aber eine Vorbehandlung oder Präparation der Beschichtung zweckmäßig ist.

Summary

Sustainable development in the technical sphere calls for the broader application of biodegradable material. As packaging material, papers coated with paraffins are widely used. To manage these materials in biowaste management systems, they have to be proven as compostible. In the paper, results of the investigation of the compostibility of paraffine coated packaging materials are reported. The research is done after the German Bioabfallverordnung and the DIN 56900. It is shown, that these materials can be composted in a mixture with source separated biowaste up to 10 % of mass. If papers pieces of about 25 sq. cm were used, the paper itself, as well as the paraffine coatings were totally degraded in a composting period of 100 days. But crushed and folded pieces, which normally occur in households, were degraded only by 34 resp. 8 %. The results thus indicate, that an application in this way is possible, but a pre-treatment and a certain preparation of the coated papers are necessary.

Einleitung und Zielstellung

Für eine nachhaltige Wirtschaftsweise ist die Nutzung biologisch abbaubarer Materialien unumgänglich (SOYEZ, 1998). Die geforderten Anwendungseigenschaften stehen dem Einsatz derartiger Materialien aber in manchen Fällen entgegen. Bei Verpackungen für Lebensmittel, wo der Schutz des Gutes höchstes Ziel ist, werden zum Beispiel hydrophobe Eigenschaften verlangt. Bereits seit längerem sind dafür mit Paraffin beschichtete Papiere im Gebrauch, z.B. für Fleischerzeugnisse und Backwaren. Die wasserabweisende Eigenschaft ist dem biologischen Abbau derartiger Verpackungen hinderlich. Das schränkt auch die schadlose Beseitigung nach deren Gebrauch ein.

Daher ist zu klären, inwieweit sie durch biologische Prozesse abgebaut werden. Das Verpackungsmaterial soll aber nicht nur biologisch abbaubar, sondern auch kompostierbar sein, um in die normalen Wege der Abfallentsorgung eingebunden zu werden. Der Nachweis der Kompostierbarkeit ist zu erbringen. Er soll zeigen, daß das Papier in der für das jeweilige Verfahren vorgesehenen Behandlungszeit abzubauen ist. Die Abbauprodukte im Kompost sollen optisch nicht als Verunreinigungen wahrgenommen werden und die Kompostqualität nicht ungünstig beeinflussen.

Seit 1998 ist dafür die DIN-Norm V 54900 „Prüfung der Kompostierbarkeit von Kunststoffen“ (DIN, 1998) verbindlich, die eine mehrstufige Prüfung der eingesetzten Materialien auf ihre biologische Abbaubarkeit einschließlich der Kompostierung in Intensiv- und in Extensivanlagen vorsieht. Bei letzteren handelt es sich z.B. um eine offene Mietenkompostierung, wie sie in der überwiegenden Zahl der Kompostierungsanlagen angewendet wird. Auch diese einfachen Anlagen müssen sicherstellen, daß ein praktisch rückstandsloser Abbau der Substanzen erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nicht das Material allein - in diesem Falle beschichtete Papiere -, sondern immer ein Gemisch von zu entsorgendem Material und den ohnehin über eine Kompostierung zu verwertenden Materialien verarbeitet wird. Das sind getrennt gesammelte Biomassen, landwirtschaftliche Abprodukte sowie Strukturmaterial. Im Falle von Papier und Pappe läßt die Bioabfallverordnung vom 1.10.98 die Zugabe des nur in kleinen Mengen, etwa 10 Massen-%, zu.

In dem hier dargestellten Vorhaben wurden paraffinbeschichtete Verpackungsmaterialien aus dem Lebensmittelbereich unter den genannten Rahmenbedingungen untersucht. Sie ergänzen bereits vorliegende Untersuchungen zur Kompostierbarkeit von Beschichtungen mit Palmfett, Stearin und Bio-wachs-Emulsionen (BAIER, 1998).

Die Untersuchungen sollen Auskunft über die Kompostierbarkeit der eingesetzten Papiere unter praxisrelevanten Bedingungen geben, insbesondere um zu überprüfen, ob offene Mieten für die Mitverwertung von beschichteten Abfallpapieren geeignet sind. Das bezog sich auf die generelle Eignung derartiger Systeme (Low-Tech-Anlagen), aber auch auf die zu erwartenden Effekte der Mitverwertung in Hinsicht auf die Kompostqualität und die möglichen Entsorgungsmengen.

Material und Methoden

In die Untersuchungen wurden Papiere mit einer Beschichtung mit einem Paraffin verwendet, das eine C-Verteilung gemäß Abbildung 1 (obere Kurve) aufwies. In vorgelagerten Untersuchungen waren die chemische Unbedenklichkeit und die vollständige biologische Abbaubarkeit des Paraffins bereits nachgewiesen (WENZEL-H., 1997). Die nachfolgenden Untersuchungen sollten daher Auskunft über die Kompostierbarkeit geben.

Die Kompostierung fand in Versuchseinrichtungen unterschiedlicher Art und Größe statt, um die Effekte der technischen Randbedingungen abzuklären, wie sie bei der Mitverwertung von derartigen Papieren in der Kompostierungspraxis vorliegen können – siehe Tabelle 1.

Tab. 1.: Verwendete Reaktorsysteme

Versuchseinrichtung	Art	Volumen (m ³)	Rottesteuerung	Zwangselüftung
Reaktor	Kleintechnisch	0,150	ja	Ja
Reaktor	Großtechnisch	60	ja	Ja
Trapezmiere	Großtechnisch	200	nein	Nein

In den Reaktorkompostierungen war die Behandlungsdauer auf 14 Tage begrenzt und zielte auf die Herstellung eines Frischkompostes. Im Vergleich mit den Mietenkompostierungen hatten diese Versuche lediglich orientierenden Charakter. Die Mietenkompostierung hatte die Herstellung eines Fertigkompostes bei einer Prozeßdauer von 100 Tagen zum Ziel.

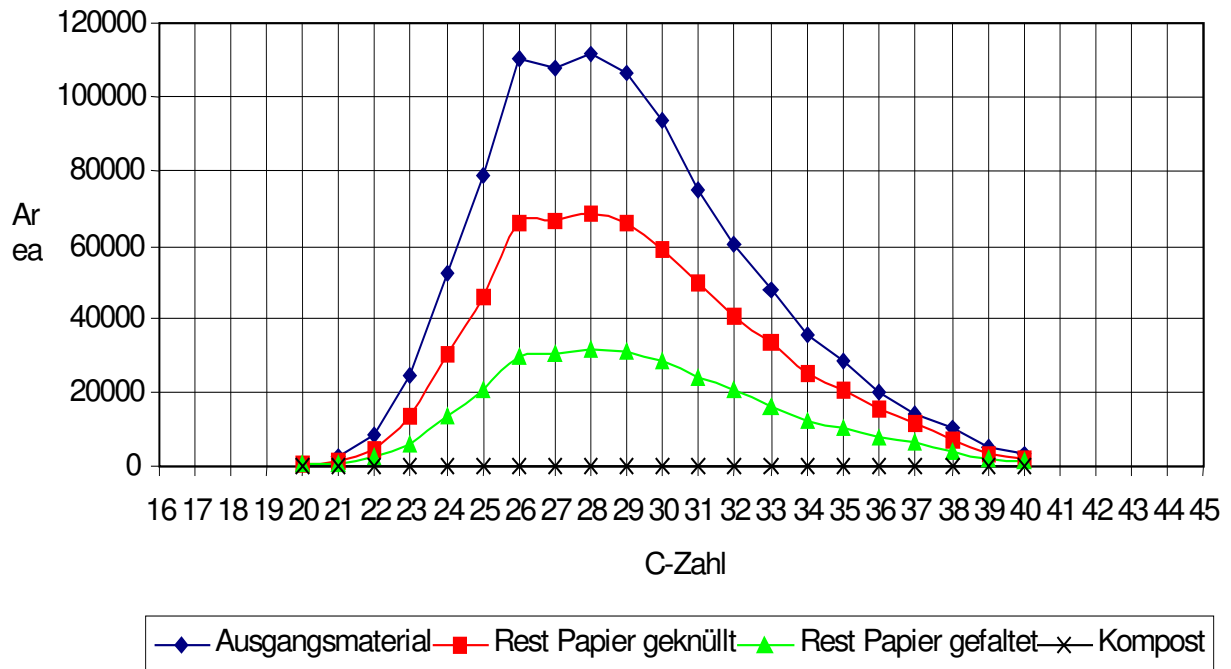


Abb. 1: C-Verteilung des Ausgangsmaterials und der abgebauten Materialien

Die Mischung der Kompostausgangskomponenten entsprach den Bedingungen des Routinebetriebes von entsprechenden Kompostierungsanlagen. In allen Fällen handelte es sich um Bioabfall- und Grün- gutmischungen, die einen Anteil von 20 Massen-% Strukturmaterial in Form von unbelasteten Alt- und Restholzpartien aufwiesen. Das C/N-Verhältnis lag bei 23.

Für die Untersuchungen wurde das Papier auf eine Stückgröße von etwa 25 cm² zerkleinert (Schnip- sel) und mit dem Kompostausgangsmaterial vermischt. Der Massenanteil Papier in der Mischung lag bei 10 %. Die fertige Mischung wurde in 30 l fassende Gazesäcke gefüllt und in die Trapezmiete ein- gebaut. Neben den Untersuchungen gemäß DIN V 54900 wurden zerknüllte und gefaltete Papiere untersucht, um zu prüfen, wie sich diese typischen Formen von Abfallpapieren aus Haushalten wäh- rend der Rotte verhalten.

Während der Kompostierung erfolgte die Erfassung der charakteristischen bioprozeßtechnischen Pa- rameter und Bilanzdaten im Rahmen der verfügbaren Meßtechnik sowie eine regelmäßige Bonitur und Analyse des Untersuchungsmaterials.

Ergebnisse

Nachfolgend steht die Behandlung von paraffinierten Papieren in offenen Mieten im Vordergrund. Die Auswertung erfolgte durch

- Eine Bonitur einschließlich der fotografischen Dokumentation des Abbauverhaltens
- Eine Einschätzung des Kompostierungsprozesses (Prozeßregime) und Bestimmung der Biopro- zeßparameter
- die Bestimmung des Paraffinabbaus
- die Untersuchung des Fertigungskompostes nach den Qualitätskriterien des LAGA-Merkblattes M10.

Bonitur

Die Bonitur der Proben erfolgte wöchentlich. Diese wurden visuell auf Farbe und Struktur untersucht. Nach etwa 4 Wochen war eine Gelbverfärbung der Papierschnipsel erkennbar. Damit ging auch eine deutliche Reduzierung der sichtbaren Anteile des Papiers einher. Nach 10 Wochen war kein Papier mehr erkennbar. Lediglich beim Auseinanderbrechen von Klumpen ließen sich Reste erkennen, aber nicht mehr sicher identifizieren. Die gefundenen Mengen waren visuell nicht als störend hinsichtlich der äußeren Qualität des Kompostes wahrnehmbar.

Anders sah es bei geknülltem bzw. gefaltetem Papier aus. Zwar zeigte die Oberfläche deutliche Erosionen, aber auch nach 10 Wochen waren die Papiere im Haufwerk noch deutlich erkennbar.

Einschätzung des Kompostierungsprozesses und Bioprozeßparameter

Diese Auswertungen dienten dem Ziel festzustellen, ob ein ordnungsgemäßer Kompostierungsprozeß stattgefunden hat und wo Optimierungspotentiale liegen. Während des Prozesses wurden die Reaktionsbedingungen so eingestellt, daß ein optimaler Kompostierungsprozeß durchlaufen werden konnte. Das praktizierte Fahrregime ist für den Routinebetrieb der Kompostierung vor Ort typisch und wurde während der Versuche unverändert beibehalten. Besondere äußere Bedingungen (z.B. starke Kälte oder Hitze) traten während der Rotte nicht auf.

Die bioprozeßtechnischen Parameter wurden ständig verfolgt. Die Temperatur wurde täglich gemessen und aufgezeichnet. Durch regelmäßige Probenahmen erfolgte die Bestimmung von Feuchte, Schüttgewicht, Glühverlust, pH-Wert und Rottegrad. Als Leitgröße für die Prozeßsteuerung diente die Temperatur. Bei Unterschreiten einer Temperatur von 52 °C erfolgte das Umsetzen, im Gesamtverlauf zweimal. Während des 100-tägigen Rotteprozesses war in der Miete eine normale Temperaturentwicklung zu verzeichnen. Der Temperaturverlauf läßt auf eine hohe biologische Aktivität des Rottegutes schließen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden sowohl das Material aus der Miete ohne Papierzusatz als auch der Inhalt der Probensäcke untersucht. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede bei den Bioprozeßparametern. Nach Ablauf der Kompostierung wurde der Rottegrad V erreicht, d.h. das paraffinierte Papier beeinflußt den Rottegrad des hergestellten Kompostes aus dem Bioabfall- und Papiergemisch im Vergleich zum Referenzmaterial ohne Papierzusatz nicht.

Bestimmung des Paraffinabbaus

Zur Bestimmung des Paraffinabbaus wurden die nach der Kompostierung noch auffindbaren Papierreste analytisch untersucht. Von den ursprünglich eingesetzten 6 kg Papierschnitzel konnten nach der Kompostierung nur noch 13,6 g (Kompost + geringe Anteile Schnipsel) wiedergefunden werden, während das geknüllte und auch das gefaltete Papier fast unverändert war.

Sowohl das Ausgangsmaterial (mit Paraffin beschichtetes Papier) als auch die noch auffindbaren Papierreste (Rest Papier geknüllt, Rest Papier gefaltet, Rest Papier Schnipsel) und der daraus resultierende Kompost wurden mit n-Hexan extrahiert und anschließend gaschromatographisch analysiert. Die Kohlenstoff-Verteilung der Materialien ist in Abbildung 1 im Vergleich zum Ausgangsmaterial dargestellt.

Bei den geschnipselten Papieren sind Paraffine praktisch nicht mehr nachweisbar, analog bei den mit diesen Beimengungen erzeugten Fertigkomposten. Die erzielten Abbauraten zeigt Tabelle 2.

Tab. 2: Abbaurate von unterschiedlich vorbehandeltem Papier

Kompostierungsprobe	Abbaurate [%]
Rest Papier geknüllt	34
Rest Papier gefaltet	8
Rest Papier Schnipsel	100
Kompost	100

Dabei ist die Abbaurate bei den gefalteten und geknüllten Partien auf den extrahierten Paraffinanteil des Ausgangsmaterials bezogen und bei den Papierschnipseln sowie dem resultierenden Kompost auf die Gesamtmenge Paraffin, die mit den 6 kg Papier eingebracht wurde.

Es zeigt sich deutlich, daß sich mit Paraffin beschichtetes Papier, das als Schnipsel mit dem Kompost vermischt wird, besser biologisch abbaut, als Papier, das geknüllt oder gefaltet in den Kompost eingebracht wird. Dabei ist bei dem geknüllten Papier die Angriffsfläche größer als bei dem gefalteten, so daß hier dort ein höherer Abbau des Paraffins festzustellen ist.

Untersuchung des Fertigkompostes nach Qualitätskriterien des LAGA – Merkblattes M 10

Sowohl mit als auch ohne Papierzusatz wird der in den Versuchen gewonnene Kompost den Qualitätsanforderungen des LAGA-Merkblattes M 10 gerecht. Die in der DIN V 54900 vorgeschriebene Prüfung der Pflanzenverträglichkeit ergab keine negativen Ergebnisse.

Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen belegen, daß die Kompostierung der paraffinbeschichteten Papiere grundsätzlich auch in Kompostierungsanlagen mit niedrigem technischen Standard erfolgen kann. Das zeigt, daß eine Mitverwertung von derartigen Papieren in der Biotonne möglich ist.

Da der Abbau nur dann vollständig war, wenn das Papier einlagig und kleinstückig in die Kompostierung gelangte, geknülltes und gefaltetes Papier aber nicht rückstandslos abbaubar war, sind Optimierungen erforderlich. Diese können sich auf die Vorbehandlung, den eigentlichen Kompostierungsprozeß, aber auch auf die Präparierung der Papiere beziehen.

Im Bereich der Vorbehandlung wäre auf eine Zerkleinerung durch Zerreißen von Verpackungen in den Haushalten zu orientieren. Das erscheint nicht als aussichtsreich, da üblicherweise Verpackungspapiere am ehesten zerknüllt in die Bioabfall gegeben werden. Eine Optimierung des Rotteprozesses in Hinsicht auf ein optimales C/N-Verhältnis, günstige Durchfeuchtung und angepaßte Temperaturführung ist ohnehin eine Forderung an jede Kompostierung. Der kleine Anteil von zu erwartendem Papier wird im praktischen Betrieb kaum eine sorgfältigere Prozeßführung als bei normalen Chargen bedingen. Aussichtsreich erscheint es, die Beschichtung an die speziellen Bedingungen anzupassen. Das soll durch die Entwicklung und Auswahl der Paraffine und die Minimierung der Beschichtungsstärke erreicht werden. Verfolgt wird weiter der Einbau von Fehlstellen in den Beschichtungen, durch die Feuchte und nachfolgend die Mikroorganismen bessere Angriffsbedingungen vorfinden, ohne daß dabei der Gebrauchswert der Papiere sinkt.

Vor dem Hintergrund einer generellen Abbaubarkeit, aber auch den technischen Problemen bei der Verwendung von derartigen Papieren erscheinen die Forderungen der Bioabfallverordnung (Bio-AbfVo vom 01.19 1998) als sinnvoll, die Zugabe von Papier und Pappe nur in kleinen Mengen (ca. 10

%) zu getrennt erfaßten Bioabfällen oder zur Kompostierung zuzulassen.

Literatur

BAIER, D.; SOYEZ, K. (1998): Technologien für die nachhaltige Bewirtschaftung von Konversionsstandorten. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. Potsdam

Prüfung der Kompostierbarkeit von Kunststoffen. Teil 3: Prüfung unter praxisrelevanten Bedingungen und der Qualität der Komposte. Vornorm, DIN V 54900-3

WENZEL-HARTUNG, R.; STREURS, K. (1997): Analytische Untersuchungen zur Kompostierbarkeit von Paraffinmischungen mit nachwachsenden Rohstoffen, wachsartigen Substanzen und damit beschichteten Papieren. Hamburg

SOYEZ, K.; BAIER, D.; TANNENBERGER, K.; PRAUSE, M.(1996): Untersuchungen zur Kompostierbarkeit von Beschichtungsmaterialien und beschichteten Papieren. Studie, Leipzig

SOYEZ, K. (1998: Anforderunroduktion und Technik für eine nachhaltige Entwicklung. In: Haase, W.; Soyez, K. (Hrsg.): Ökologische Technologien und nachhaltige Entwicklung. BUFZ Forschungstexte, Heft 3, Seite 54-68. Neuruppin

Anschriften der Autoren

Dipl.-Ing. Dieter Baier
Gesellschaft für ökologische
Technologie und Systemanalyse e.V.
Neue Straße 2
06869 Coswig/Anhalt

Dr. rer. nat. Kerstin Streurs
SCHÜMANN-SASOL Hamburg
Worthdamm 13-27
20457 Hamburg

Dr.-Ing. Konrad Soyez
Zentrum für Umweltwissenschaften und
UP transfer GmbH
AG Ökotechnologie
Park Babelsberg 14
14482 Potsdam

Zum Wasser- und Wärmehaushalt des Intensivrotteprozesses der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung

J. Kaiser, K. Soyez

Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt in mathematischer Form die thermodynamischen Grundlagen, die den Verlauf des Intensivrotteprozesses der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung bestimmen. Das Modell umfasst Stoff- und Wärmeaustausch, Wassersättigung von Prozessluft sowie Wandlung organischer Komponenten zu CO₂ und H₂O. Das Modell ermöglicht die Prognose einiger wesentlicher technischer Daten, z. B. der Ablufttemperatur und des Wasserzugabedarfs je nach Rohmaterialzusammensetzung und Belüftungsrate. Den Prognosen nach diesem Modell sind Ergebnisse zweier früherer großtechnischer Experimente gegenübergestellt, um das Maß der Übereinstimmung nachzuweisen.

Summary

The article presents a mathematical formulation of the thermodynamic fundamentals that govern the primary degradation process of mechanical-biological waste treatment. The model includes mass transfer, heat transfer, water saturation of process air, and conversion of organic compounds into CO₂ and H₂O. The model can predict some important process results such as temperature of outlet air, and need of water supply, depending on parameters like raw material composition, and air supply rate. The predictions by this model are contrasted to results of two earlier large scale experiments to check how realistic the model's assumptions are.

Einleitung

Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) ist ein Verfahren zur aeroben Behandlung von Siedlungsabfällen und somit dem traditionellen Verfahren der Kompostierung verwandt. Rohstoff der MBA ist die organische Fraktion des Siedlungsrestabfalls, die im Siebschnitt unterhalb etwa 40 mm enthalten ist. Wegen des Schadstoffgehalts der Ausgangsstoffe ist das Prozessresultat nicht wie bei der Kompostierung ein Wertstoff, sondern ein abzulagerndes Material. Es muss bestimmte Deponierungsbedingungen erfüllen, die durch gesetzliche Vorgaben beschrieben werden. Dabei ist ein niedriger Restkohlenstoffgehalt ausschlaggebend. Daneben ist der Schadstoffgehalt, insbesondere die Fracht an Schwermetallen, auf Minimalwerte zu reduzieren. Einzuhalten sind ferner mechanische Eigenschaften, die beim Bau der Deponie eine Rolle spielen.

Von ausschlaggebender Bedeutung für einen wirkungsvollen Prozess sind die richtige Einstellung der Feuchte des Materials sowie der Temperatur; sie bestimmen die Geschwindigkeit des Prozesses und haben Auswirkungen auf die Belastung der Abgasströme mit Schadstoffen.

Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von MBA-Anlagen gleichen naturgemäß weitgehend jenen von Kompostieranlagen (Kaiser 1999). Die größere Komplexität der chemischen und mikrobiologischen Vorgänge hat jedoch zur Folge, dass sich Kinetik und Dynamik der MBA einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Herleitung entziehen. Dass hingegen für den wichtigen Spezialaspekt „Wasser- und Wärmehaushalt“ eine Reihe von Berechnungsmöglichkeiten bestehen, soll diese Arbeit aufzeigen.

Die zunehmend verfügbar werdenden Daten großtechnischer MBA-Prozesse bieten Gelegenheit zum Vergleich von Theorie und Praxis. Aktuelle Daten liegen insbesondere als Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten Verbundvorhaben zur mechanisch-biologischen Behandlung vor (Soyez 1999).

Naturwissenschaftliche Verfahrensgrundlagen und physikalische Größen zur Charakterisierung des Prozesses

Das Rottegut. Die MBA zielt primär auf eine Stabilisierung des Rotteguts und sekundär auf eine Reduzierung von Masse und Volumen. Grundlegendes Verfahrensprinzip ist die mikrobielle Oxidation („kalte Verbrennung“) eines Teils der Inhaltsstoffe. Vor allem ein Teil der organischen Inhaltsstoffe, auch organische Substanz (oS) genannt, ist im MBA-Prozess biologisch abbaubar. Dabei fällt das Gros der Stoff- und Energiewandlung in den Prozessabschnitt „Intensivrotte“, der am Beginn des Stoffwandlungsprozesses der MBA steht.

Das Spektrum der „organischen Substanz“ des Rotteguts umfasst Stoffgruppen unterschiedlicher biologischer Abbaubarkeit. Dabei überwiegen im Regelfall jene Stoffgruppen, die von Mikroorganismen als alleinige Kohlenstoffquelle genutzt werden können, z.B. Glukose, Zellulose oder etwa Normalparaffine. Für diese Stoffgruppen ist – wenigstens theoretisch – ein Massenverlust von 100% im MBA-Prozess zu erzielen. Andere Stoffe sind bedingt (z.B. kometabolisch) abbaubar, wie Lignin oder einige komplexe Aromaten, ihr Massenverlust im MBA-Prozess liegt zwischen 0 und 100%. Schließlich bleibt auf die bioresistenten oder persistenten organischen Stoffe hinzuweisen, z. B. Huminstoffe oder synthetische Polymere: ihr Massenverlust im MBA-Prozess ist praktisch Null.

Die organische Substanz tritt in der Analytik als „flüchtiger Feststoff“ in Erscheinung, da sie bei einer Glühprobe ausgast. Entsprechend wird die anorganische Substanz des Rotteguts als Asche bezeichnet, da sie nach einer Glühprobe als Asche verbleibt.

Anschauliche und zweckmäßige Bezugsgröße für Stoff- und Energiefrachten des Rotteguts in der MBA ist das „Mg Anfangs-Feuchtmasse“ oder gleichbedeutend die „Tonne Anfangs-Feuchtmasse“, die „Tonne Anfangs-Feuchtsubstanz“ oder die „Tonne Anfangs-Frischsubstanz“, kurz „t Anfangs-FS“ oder „t Input“. In der Analytik wird wegen der großen Bedeutung wasserfreier Proben gewöhnlich die Trockenmasse als Bezugsgröße verwendet, also z. B. die „Tonne Trockenmasse“ = „t TS“ und die „Tonne Anfangs-Trockenmasse“ = „t Anfangs-TS“.

Für das Rottegut in Großversuchen wurden analytische Eckdaten nach Tabelle 1 ermittelt.

Tab. 1: Leistungsdaten von Großversuchen (Fricke und Müller, 1999)

Versuch	Glühverlust GV_0 (vor Rottebeginn)	Glühverlust GV_1
Mietenrotte HV 1-1	54	31%(nach 17 Wochen):
Rottecontainer ROCO 4	54%	32%(nach 18 Wochen):

Dabei sind hier die Zeitspannen von 17 bzw. 18 Wochen nicht nach der (vorgeplanten) Dauer der Intensivrotteprozesses gewählt, sondern entsprechen der (aus den Analysedaten erkennbaren) Zeitspanne des Organikabbaus.

Aus den Daten zum Glühverlust lässt sich der Massenverlust an organischer Substanz ableiten, z. B. nach Pichler (1999):

$$L^{os} = \frac{GV_0 - GV_1}{GV_0 \cdot \left(1 - \frac{GV_1}{100}\right)} \cdot 100 \%$$

Dies ergibt mit $GV_1 = 31\%$ für den Massenverlust der organischen Substanz: $L^{os} = 62\%$. Dies bedeutet weiter nach den Werten von Tab. 3 eine Reduzierung der Konzentration oS von 324 um 200 auf 124 kg/(t Input).

Mit einem angenommenen konstanten Wassergehalt (Feuchtegrad) von 40% ergibt sich für das Rottegut – je nach Konzentrationsmaß – die Prozess-Ergebnisbilanz von Tab. 2 bzw. Tab. 3.

Tab. 2: Zusammensetzung des Rotteguts, Trockensubstanz-bezogen

	Konzentration (Ma.-% TS)	
	Prozessbeginn	Prozessende
oS (Glühverlust)	54	31
Asche (Glührückstand)	46	69

Tab. 3: Zusammensetzung des Rotteguts, Input-bezogen bei 40% Feuchte

	Konzentration (kg/(t Input))	
	Prozessbeginn	Prozessende
oS	324	124
Asche	276	276
Wasser	400	267
<i>Summe</i>	<i>1000</i>	<i>667</i>

Rotteluft. Die Prozessluft der MBA ist den Gesetzen der Thermodynamik von Feuchtluft unterworfen. Auf diesem Spezialgebiet ist das „kg Trockenluft“ die gebräuchlichste Bezugsgröße für Stoff- und Energiefrachten von Luftmengen, da der Wert der Trockenluftmasse ($N_2 + O_2 +$ ggf. CO_2 usw.) zwischen Input und Output eines Prozesses wenigstens näherungsweise konstant bleibt, gemessen an den Alternativen Feuchtluftmasse oder Feuchtluftvolumen.

Eine Übersicht relevanter Eigenschaften gesättigter Feuchtluft unter MBA-typischen Druck- und Temperaturverhältnissen gibt Tab. 9 (Anhang), darunter Wasser- und Wärmefrachten. Einige dieser Abhängigkeitsverhältnisse sind zugleich in Abb. 5 bis Abb. 9 (Anhang) dargestellt.

Welche Rottegut-Input-bezogenen Luftmengen verlangt die MBA? In der Bemessung des Luftdurchsatzes besteht prinzipiell ein weiter Spielraum. Minimum ist dabei die Deckung des biologischen Sauerstoffbedarfs: bei dieser minimalen Bemessung akkumuliert die Prozesswärme im Rottegut – sofern sie nicht auf anderem Wege abgeführt wird – so weit, dass die Temperatur auf Werte um $80^\circ C$ ansteigt, was den Bioabbau stark verzögert. Zum Erreichen der größtmöglichen Prozessgeschwindigkeit ist eine Prozessführung bei biologischer Optimaltemperatur erforderlich: diese ist nur mit mehrfach

größerem Luftdurchsatz zu erreichen. Finstein & al. (1986) empfehlen einen 9-fach größeren Luftdurchsatz.

Wiemer (1999) stellt fest, dass nach den Ergebnissen des BMBF-Vorhabens verschiedene Autoren sinngemäß 15000 bis 35000 m³ Luft / (t Input) als Prozessluftbedarf ansetzen, obwohl der Luftbedarf zur O₂-Versorgung weit darunter liegt. Weiter nach Wiemer (1999) ergeben sich davon abweichend rechnerisch aus dem Auslegungswert für den Betrieb der Trockenstabilatanlage in Aßlar (Hessen) nur 3000 m³ Luft / (t Input). Das in Aßlar angewandte Verfahrensprinzip der Kreislaufführung schließt allerdings Maßnahmen zur Abführung der Prozesswärme ein: Doedens und Cuhls (2000) nennen „Kühlung von Umluft“.

Unter „Luft“, speziell „Zuluft“, wird bei der MBA atmosphärische Luft unter Normalbedingungen verstanden. In den o. g. thermodynamischen Größen formuliert, entsprechen:

3000 m³ Luft = ca. 4000 kg Trockenluft, 30000 m³ Luft = ca. 40000 kg Trockenluft.

Der Luftbedarf der MBA lässt sich somit auf 4000 bis 40000 kg Trockenluft pro Tonne Rottegut-Input beziffern.

Ein Luftdurchsatz von 3000 m³ Luft bzw. 4000 kg Trockenluft pro Tonne Input wird im Folgenden als „minimale Belüftung“ bezeichnet, und 30000 m³ Luft bzw. 40000 kg Trockenluft als „maximale Belüftung“. Minimale Belüftung hat eine Sauerstoff-Restkonzentration in der Abluft von (nahezu) Null zur Folge – lediglich Sauerstofflimitation und erst recht Anaerobie muss vermieden werden. Maximale Belüftung hat entsprechend eine Minderung des Sauerstoffgehalts der Abluft gegenüber der Zuluft von einem Zehntel zur Folge, also von 21% auf ~19%.

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe „minimale“ und „maximale“ Belüftung berücksichtigen nur die Notwendigkeiten von Sauerstoffzufuhr und Wärmeabfuhr – der Bestimmung einer engeren Spanne nach weiteren Kriterien soll damit nicht vorgegriffen werden.

Stoff- und Wärmebilanzen für den MBA-Prozess

Aus den Eckdaten des Prozesses nach Tab. 3 folgen jene physikalischen Größen, die die Bilanz der Stoff- und Energiewandlung kennzeichnen. Tab. 4 listet sie in der logischen Reihenfolge ihrer Herleitung auf.

Tab. 4: Physikalische Größen zur Stoff- und Energiewandlung im MBA-Prozess, bezogen auf 1 t Input bei 40% Feuchte

Physikalische Größe	Wert	Berechnungsgleichung, Anmerkungen
C-Verlust m_C^{bio}	120 kg	200kg·60%, wegen Verlust oS = 264kg und C-Gehalt der oS: 60%. Vergleichswerte: C-Gehalt von Zellulose ca. 44%, Rottegut QB 1-1 nach Pichler, 1999: 55% (Anfang), 61% (Ende)
CO ₂ -Gewinn $m_{\text{CO}_2}^{\text{bio}}$	440 kg	120kg·(44/12) : Molmassen!
O ₂ -Verbrauch $m_{\text{O}_2}^{\text{bio}}$	320 kg	120kg·(32/12) : Molmassen!
H ₂ O-Gewinn $m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{bio}}$	80 kg	200kg-120kg
Energieverlust, Wärme-gewinn Q^{bio}	4480 MJ	320kgO ₂ ·14000kJ/kgO ₂ nach Finstein & al., 1986

Hier liegt die Beobachtung zugrunde, dass die Stoffwandlung im Intensivrotteprozess der MBA nahezu ausschließlich durch den Betriebsstoffwechsel der Mikroorganismen bewirkt wird, demgegenüber der Baustoffwechsel vernachlässigt werden kann. Deshalb fußt die Berechnung auf der Modellvoraus-

setzung eines vollständigen Abbaus der Verlust-oS zu CO₂ und H₂O. Weiter wird angenommen, dass analog zur Oxidation der Glukosen $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ der C-freie Rest des oxidierten MBA-Substrats als H₂O verbleibt, d. h.

$$m_{H_2O}^{bio} = m_{oS}^{abgebaut} - m_C^{bio}, \text{ hier } m_{H_2O}^{bio} = 200\text{kg} - 120\text{kg} = 80\text{kg}.$$

So entstehen als Konsequenz der höheren C-Anteils der MBA-oS gegenüber der Glukose (~60 Ma.-% gegenüber 40 Ma.-%) nur ~0,4 Mol H₂O pro Mol CO₂, während bei der Oxidation der Glukose genau 1 Mol H₂O pro Mol CO₂ entsteht.

Der Energieverlust des Rotteguts wird praktisch vollständig als Wärmegewinn der Prozessluft wirksam, vor allem in Form von Verdampfungswärme von Wasser. Sonstige Wege des Wärmeaustrags sind im großtechnischen Maßstab der MBA vernachlässigbar, auch spezielle technische Maßnahmen zum Wärmeaustrag bleiben in dieser Arbeit außer Betracht.

Die im vorherigen Abschnitt genannte Prozessluftmenge mit Trockenluftgehalt zwischen 4000 und 40000 kg wird demnach mit 4480 MJ beladen. Die Konsequenzen dieser Beladung für die Einstellung der (durchschnittlichen) Ablufttemperatur sind in Tab. 5 wiedergegeben. Mit der Temperatur der Abluft sind dann weitere Eigenschaften ableitbar:

Tab. 5: Eigenschaften der Abluft im MBA-Prozess, bezogen auf 1 t Input

Physikalische Größe	Wert		Berechnungsgleichung, Anmerkungen
	bei 4000kg TL	bei 40000kg TL	
Temperatur	76 °C	35 °C	interpoliert nach Tab. 9
Wasseraustrag pro kg TL	0,396 kg	0,0329 kg	nach Tab. 9
Wasseraustrag gesamt	1585 kg	1315 kg	0,396kg·4000; 0,0329kg·40000

Der zur Interpolation beider Ablufttemperaturen verwendete Temperaturwert der Zuluft von 6,7°C beeinflusst die Ergebnisse nicht wesentlich.

Damit sind die Wasser- und Wärmebilanzen des Intensivrotteprozesses für den Fall „Rottegutfeuchte = 40%“ vollständig (Abb. 1). Weitere Fallstudien sind im Anhang zu finden (Abbn. 10-21).

Bemerkenswert ist der Wert des Wasseraustrags, der – unabhängig von der eingesetzten Prozessluftmenge – 1300 kg/(t Input) übersteigt. Da das Rottegut dazu voraussetzungsgemäß nur (400-267) = 133 kg/(t Input) beisteuert (nach Tab. 2), der biologische Wassergewinn $m_{H_2O}^{bio}$ nur 80 kg/(t Input) beträgt (Tab. 4) und der Eintrag per Zuluft nur 26,8 bzw. 268 kg/(t Input) ausmacht (bei 4000 bzw. 40000 kg TL), muss der verbleibende Wasserbedarf von ca. 1000 kg/(t Input) aus anderer Quelle gedeckt werden.

Analoge Berechnungen mit weiteren Werten des Parameters Rottegutfeuchte führen auf die Resultate von Tab. 6 und Tab. 7 bzw. Abb. 2 und Abb. 3. Dabei findet man generell, dass die eingesetzte Prozessluftmenge starken Einfluss auf die resultierende Ablufttemperatur hat (und damit auf die Prozessgeschwindigkeit), jedoch nur geringe Auswirkung auf den Wasserzugabedarf. Der Wasserzugabedarf hängt vielmehr ganz wesentlich von der Feuchte des Rotteguts (also insbesondere der Anfangsfeuchte) ab. Unterschiedliche praktische Erfahrungen zum Wasserzugabedarf verschiedener Anlagen finden möglicherweise darin eine Erklärung.

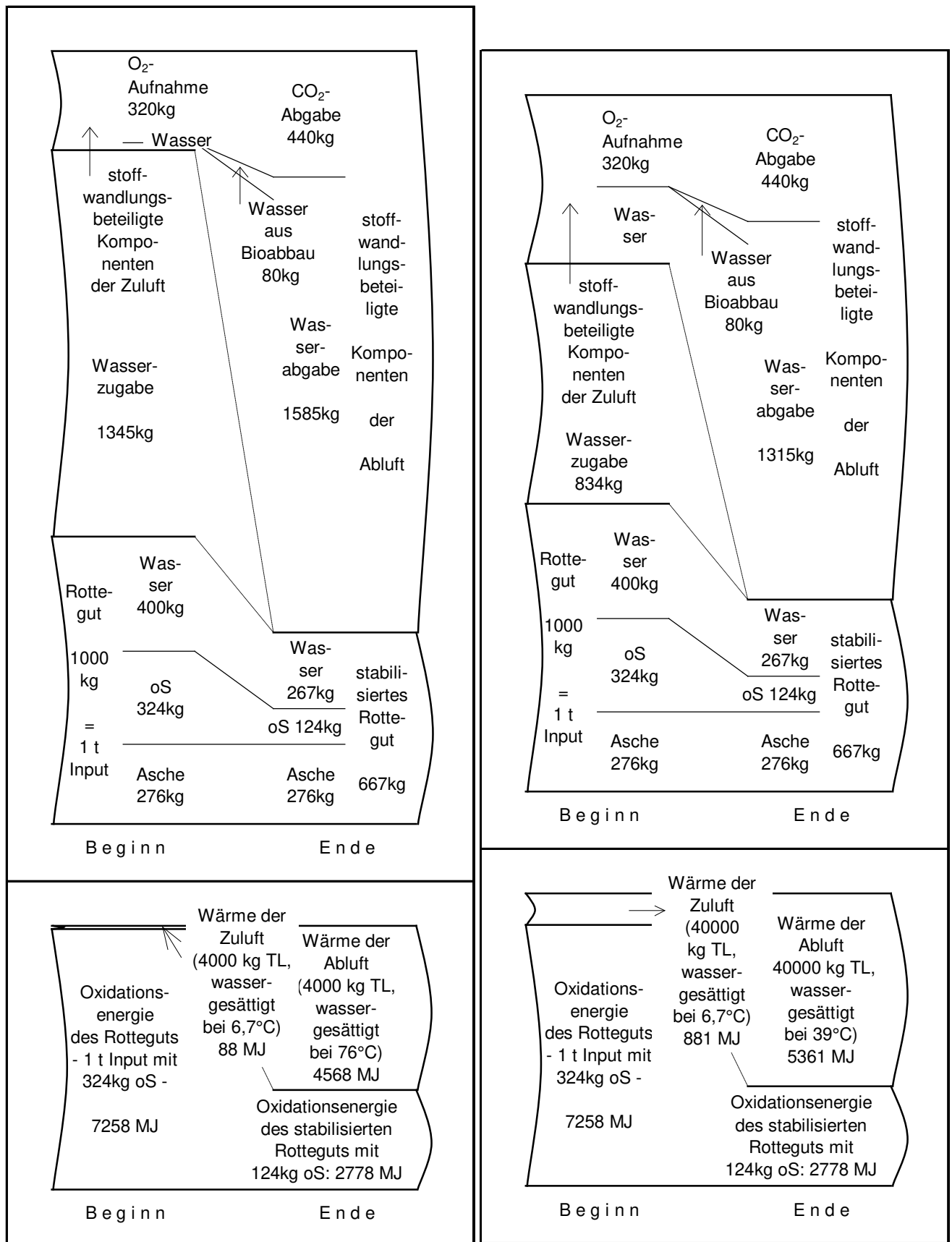


Abb. 1: Stoffbilanz (oben) und Energiebilanz (unten) eines MBA-Prozesses bei minimaler Belüftung (links) und des analogen MBA-Prozesses bei maximaler Belüftung (rechts), jeweils bei 40% Rottegutfeuchte

Tab. 6: Berechnete Ablufttemperatur (°C) bei minimaler und maximaler Belüftung in Abhängigkeit von der Rottegutfeuchte

	Feuchte = 20%	Feuchte = 40%	Feuchte = 60%
Belüftung 4000 kg TL / (t Input)	80	76	69
Belüftung 40000 kg TL / (t Input)	40	35	29

Tab. 7: Berechneter Wasserzugabebedarf (kg/(t Input)) bei minimaler und maximaler Belüftung in Abhängigkeit von der Rottegutfeuchte

	Feuchte = 20%	Feuchte = 40%	Feuchte = 60%
Belüftung 4000 kg TL / (t Input)	1940	1345	758
Belüftung 40000 kg TL / (t Input)	1423	834	217

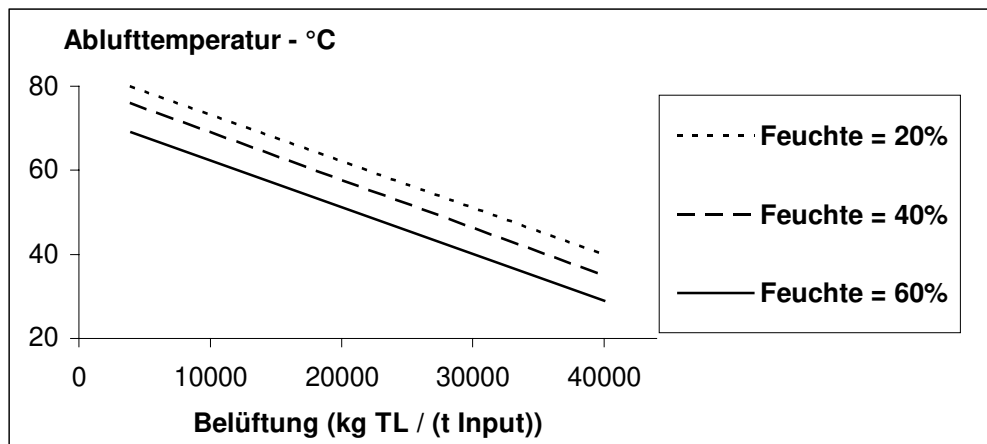


Abb. 2: Berechnete Ablufttemperatur in Abhängigkeit von Belüftung und Rottegutfeuchte

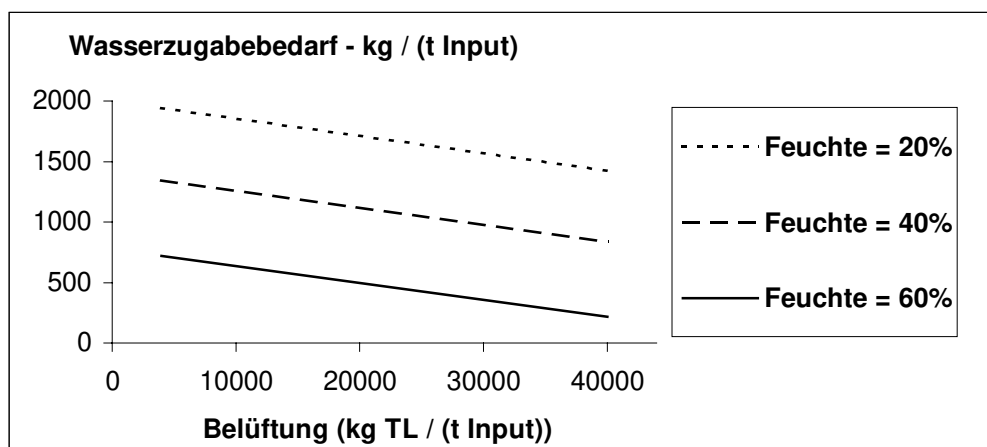


Abb. 3: Berechneter Wasserzugabebedarf in Abhängigkeit von Belüftung und Rottegutfeuchte

Vergleich des Wasserhaushalts der MBA nach modellgestützter Prognose und Großversuchen

Ein Teil der für den Wasser- und Wärmehaushalt der MBA maßgeblichen physikalischen Größen ist der messtechnischen Erfassung zugänglich und dokumentiert (Fricke und Müller, 1999). Einige besonders charakteristische Daten sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8: Daten zum Wasser- und Wärmehaushalt von Großversuchen

physikalisch-technische Größe	Versuch HV 1-1 (Miete)	Versuch ROCO 4 (Container)
Fassungsvermögen (m ³)	250	50
Füllmenge, Input, Anfangs-Feuchtsubstanz (t)	168	11,3
Anfangs-Schüttvolumen (m ³)		15,94
betrachtete Prozessdauer („Intensivrotte“, Wochen)	17	18
Belüftungsrate (m ³ /m ³ h)		0-27
mittlere Belüftungsrate (m ³ /m ³ h)		10,34
→ gesamte Luftmenge (m ³)	918000	71202****
→ spezifische Luftmenge (m ³ /(t Input))	5464	6301*****
→ spezifische Luftmenge (kg TL / (t Input))	7064***	8147*****
Rottegutfeuchte (%)	34-45	34-52
mittlere Rottegutfeuchte (%)	37,7	45
wöchentliche Wasserzugabe (kg)	0-39740	0-1290
gesamte Wasserzugabe (kg)	79480	3640
→ spezifische Wasserzugabe ((kg / (t Input))	473	322

* $918000 = 2250 \cdot 17 \cdot 24$

** $5464 = 918000 / 168$

*** $7064 = 5464 \cdot 1,293$

**** $71202 = 10,34 \cdot 18 \cdot 24 \cdot 15,94$

***** $6301 = 71202 / 11,3$

***** $8147 = 6301 \cdot 1,293$

Ausblick

Modellprognose und experimentelle Daten beider Großversuche zum Wasser- und Wärmehaushalt stimmen gut überein und geben Sicherheit bezüglich der mathematischen Modellbasis. Die Autoren hoffen, mit dieser Arbeit ein wenig zur Objektivierung der Diskussion um Möglichkeiten und Grenzen der MBA beizutragen, und der weiteren ingenieurtechnischen Entwicklung von MBA-Anlagen ein nützliches Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen.

Über kleinere Differenzen zwischen berechneten und Meßdaten bleibt zu diskutieren, insbesondere auch vor dem Hintergrund der spezifische Probleme bei der Auswertung von großtechnischen Versuchen.

Anhang

- (a) Eigenschaften gesättigter Feuchtluft unter Normaldruck (Lindner, 1969) bei verschiedenen MBA-typischen Temperaturen
- (b) Stoff- und Wärmebilanzen für den MBA-Prozess – sechs Fallstudien

Der Anhang im Umfang von 17 Seiten ist bei den Autoren erhältlich.

Symbole

ρ^{TL}	Dichte von Trockenluft = 1,293 kg/m ³ bei p=1atm und T= 0°C
c_p^{TL}	spezifische Wärme von Trockenluft bei 0°C = 1,004 kJ / (kg Trockenluft K)
c_p^{Dampf}	spezifische Wärme von Wasserdampf bei 0°C = 1,92 kJ / (kg Wasserdampf K)
FS	Feuchtsubstanz, Original-Rottegut
GV	(eigentlich c^{oS}) fachsprachlich Glühverlust bzw. korrigierter Glühverlust, Konzentration der organischen Substanz in der Rottegut-Trockenmasse (Masse-% , d. h. 100%·(kg oS) / (kg TS))
GV ₀ , GV ₁	Glühverlust vor und nach der Intensivrotte
h	Gesamtenthalpie der Luft (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{Trockenluft}$	partielle Enthalpie Trockenluft (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{Dampferwärmung}$	partielle Enthalpie Dampferwärmung (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{Verdampfung}$	partielle Enthalpie Verdampfung (kJ / (kg Trockenluft))
L ^{oS}	Massenverlust der organischen Substanz im Prozessergebnis (% , d. h. 100%·(Masse oS vor dem Prozess - Masse oS nach den Prozess) / (Masse oS vor dem Prozess)) (so bei Pichler 1999), Abbau oTS (%) (so bei Fricke und Müller 1999)
m_C^{bio}	C-Verlust durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{CO_2}^{bio}$	CO ₂ -Gewinn durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{H_2O}^{bio}$	H ₂ O-Gewinn durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{O_2}^{bio}$	O ₂ -Verbrauch durch Bioabbau von oS (kg)
oS	organische Substanz
p	Druck (atm)
$p_{sat} = p_{sat}(T)$	Sättigungspartialdruck von Wasser (atm) als Funktion der Temperatur, Dampf kurve von Wasser
Q ^{bio}	Wärmegewinn durch Bioabbau von oS (MJ)
r ₀	Verdampfungswärme des Wassers bei 0°C = 2502 kJ / (kg Wasser(-dampf))
$x_{sat} = x_{sat}(T)$	Sättigungsbeladung (kg Wasser / kg Trockenluft) als Funktion der Temperatur
T	Temperatur (°C)
TL	Trockenluft als Bestandteil von Feuchtluft
TS	Trockensubstanz, getrocknetes Rottegut
V	Gesamtvolumen (m ³)
V ^{TL}	Partialvolumen Trockenluft (m ³)
V ^{Dampf}	Partialvolumen Dampf (m ³)

Literatur

- BAEHR, H. (1996): Thermodynamik: e. Einf. in die Grundlagen und ihre techn. Anwendungen. 9. Aufl., Springer, Berlin. (Kap. 5.3 Feuchte Luft, 5.3.5 Die Wasserbeladung)
- DOEDENS, H.; C. CUHLS (2000): Möglichkeiten und Grenzen der Abluftbehandlung von MBV-Anlagen. In: R. Stegmann (Hrsg.), Deponietechnik 2000. Hamburger Ber., Bd. 16, Stuttgart: 105 - 120
- FINSTEIN, M. S.; C. F. MILLER; P. F. STROM (1986): Waste treatment composting as a controlled system. In: W. Schönborn (Hrsg.), Biotechnology., vol. 8 (Biodegradations.) - VCH, Weinheim: 363 - 398. (Kap. III.E. Relationship between Removing Heat and Supplying Oxygen)

FRICKE, K.; W. MÜLLER (1999): Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung. Endbericht zum Teilvorhaben Nr. 1480945 des BMBF-Verbundvorhabens „Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“. IGW Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH, Witzenhausen

KAISER, J. (1999): Ein Simulationsmodell des Kompostierungsprozesses und seine Anwendung auf Grundfragen der Verfahrensgestaltung und Verfahrensführung. Bd. 10 der Reihe „Beiträge zur Abfallwirtschaft“ (B. Bilitewski & D. Weltin, Hrsg.), Techn. Univ. Dresden

LINDNER, H. (1969): Lehrbuch der Physik. Kap. Wärmelehre. 3. Auflage. VEB Fachbuchverlag, Leipzig

PICHLER, M. (1999): Humifizierungsprozesse und Huminstoffhaushalt während der Rotte und Deponierung von Restmüll. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 15 (Umwelttechnik), Nr. 213. VDI Verlag, Düsseldorf

SOYEZ, K. (Hrsg.) (1999): BMBF-Verbundvorhaben "Mechanisch-biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen". Beiträge der Ergebnispräsentation, 7. - 8. September 1999, Univ. Potsdam

WIEMER, K. (1999): Praxisgerechter Wert. Durch Kreislaufführung kann die mechanisch-biologische Aufbereitung den Standard der Abluft-Emissionsbegrenzung nach 17. BImSchV problemlos einhalten. In: Müllmagazin 4/1999: 41 - 42

Anschrift der Autoren

Dr. Jürgen Kaiser
Dr. Konrad Soyez
Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
AG Ökotechnologie
Park Babelsberg 14
14482 Potsdam

Green Biorefinery European Network for the Implementation of Biorefineries (NIB)

B. Kamm, M. Kamm, S. Kromus, M. Narodoslowsky

Zusammenfassung

Das 'European Network for the Implementation of Biorefineries (NIB)' ist ein Forum für den interdisziplinären Austausch von Informationen. BioRaffinerien repräsentieren ein komplexes System ökologischer Technologien für eine ganzheitliche stoffliche und energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Grünen und Abfallbiomassen) aus einer im Ziel nachhaltigen Landnutzung. Das thematische und wissenschaftliche Netzwerk vereinigt WWW-Aktivitäten, interdisziplinäre Workshops, Anrainerinteressen sowie Umwelt- und Sozio-ökonomische Bewertungen. Um nachhaltig und ökonomisch erfolgreiche landwirtschaftliche Systeme in strukturell weniger entwickelten europäischen Regionen zu etablieren, ist es notwendig, Strategien zur Produktion von Non-Food-Produkten auf Basis von Grüner Biomasse zu entwickeln.

Summary

The European Network for the Implementation of Biorefineries (NIB) is a platform for interdisciplinary exchange of information. Biorefineries represent a complex system of ecological technologies for the comprehensive material and energetic utilization of renewable raw materials (green and waste biomass), targeting sustainable land utilization. The Thematic Network and Scientific Network comprises WWW Activity, Interdisciplinary Workshops, Stakeholder Involvement and Environmental and Socio-Economic Benchmarking. To establish sustainable and economically successful agricultural systems in less favoured European Regions, it is necessary to find strategies to implement the production of non-food products based on Green Biomass.

Introduction

Technology:

Biorefineries represent a complex system of ecological technologies for the comprehensive (holistic) material and energetic utilization of renewable raw materials and natural compounds in form of green and waste biomass, targeting sustainable land utilization. Green biomass stands for grass from cultivation of permanent pasture and ecological land, green crops such as lucerne, clover, immature cereals from extensive land cultivation and vegetable residues e.g. different kinds of straw and fibres (maize, grain, rape, hemp, flax, etc.), potato industry wastes and molasses. The main focus is directed to products such as lactic acid, other organic acids, proteins, amino acids, carotenoids, other pigments, alcohols, monosaccharides and fibres and the resulting applications. During the last ten years, the activities

in the field of Biorefinery Systems grew more and more and developed into an independent line within the large field of biomass technologies. Beside raw material and technological aspects, Biorefinery Concepts are particularly characterised by the approach of consideration and attention of criteria of sustainability and incorporation of technologies in regional structures summarized under the key word sustainable regional development [1]. Biorefineries are small and medium scaled systems that are operated and maintained by farmers, micro-enterprises, or SMEs.

The NIB will integrate not only concepts explicitly labelled as Biorefineries but also related technological concepts and fundamental research (Tab. 1).

Table 1: Biorefinery Concepts in Europe (not completely)

Country	Biorefinery Concepts	Research and Development Associations	Informations
Austria	Green Biorefinery for Feldbach	TU Graz, Association Sustain	[6], [7]
Denmark	Bioraf Danmark	Bioraf Danmark Foundation	[2]
Denmark	Biorefinery South Jutland,	Dansk Biomass A/S	[3], [4]
Germany	Green BioRefinery Brandenburg, Havelland-Typ	R&D Association Green BioRefinery Brandenburg	[1]
Iceland	Icelandic BioRefinery	Icelandic Biomass A/S	
Switzerland	Grass-Refinery, Region Thurgau	2B AG Bioenergy and Biomass	[5]

Environmental and Socio-Economic Assessment and Implementation Strategies:

In Europe, no consensus on Environmental Assessment tools has been achieved yet. Life Cycle Assessment (LCA) [8] is an approach very well elaborated but is more a descriptive tool compared to Sustainability Indicators like the SPI [9] and Environmental Pressure Indicators or the Function and Services of Nature [10] concept that allow a statement about the degree of sustainability attained. For sound Environmental Assessment and the integration of Socio-Economic cost/benefit analysis by also internalizing external costs [11], probably a combination of tools is necessary. Existing Environmental Assessment case studies will serve as starting point for the evaluation of Biorefinery concepts. E.g. LCA studies for oilseed products [12] and experiences with the implementation strategies of Biogas Production and Biomass Combustion as well as the implementation of the Utilization of Solar Energy will be used for the NIB.

INNOVATION ASPECTS

The NIB is one of the first attempts to establish a comprehensive network, mainly based on the World Wide Web to integrate information exchange of Technology Development, Environmental and Socio-Economic Assessment and Implementation Strategies. The information provided serves for concept discussions and will help to choose applicable methods as well as a platform for co-operation of researchers with users in the field of sustainable regional development and the economical production of non-food products based on extensive agriculture. Practical outcome of the NIB is a stakeholder feedback influenced Environmental and Socio-Economic Benchmarking of different European Biorefinery initiatives elaborated by elected NIB representatives. The achieved Benchmarks can be used as reference easily accessible via the Internet. The NIB offers the opportunity to find partners for future RTD projects as well as it increases the knowledge of Biorefineries. Finally, the NIB will facilitate regions with principal decision factors on Biorefinery concepts. A high potential for tailor made solutions including process design, environmental and socio-economic evaluation, and the best methods and tools for implementation in European rural areas will be the output of the activity. The NIB is a great opportunity for farmers to achieve practical information very quickly and directly based on research results (see fig. 1)

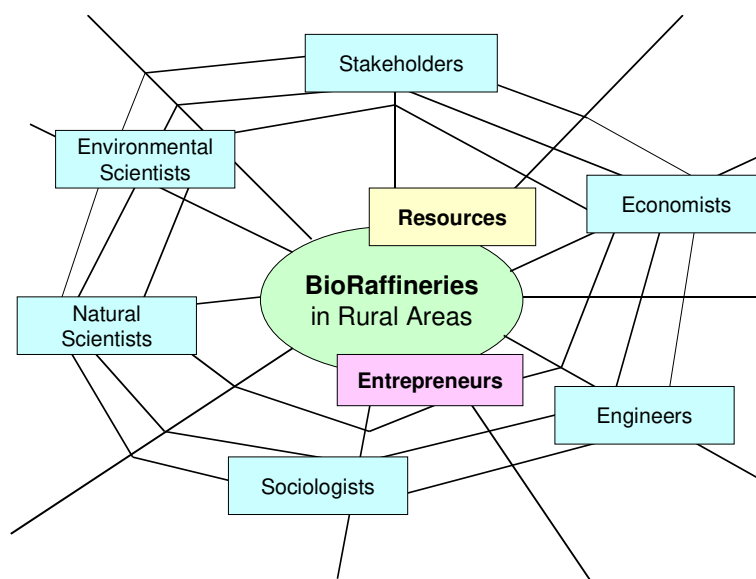


Fig. 1: Thematic Network (NIB): Integration of Biorefineries in Rural Areas

Beginning of the Project

The NIB was founded in the end of the year 1999 after the 2nd International Symposium “Green Biorefinery” in Feldbach, Austria (October 13-14, 1999). Initiator is the Technical University of Graz, Institute of Chemical Engineering Fundamentals and Process Technology and SUSTAIN, the Austria Association for the co-ordination of research on sustainable development, Graz. Co-Initiator is the University of Potsdam with the Institute of Organic Chemistry and Structure Elucidation, Research Group Bio-Organic Synthetic Chemistry and the Centre of Environmental Sciences, Working Group Green Biorefinery.

Project Management and Consortium

The consortium of the NIB is an interdisciplinary alliance of excellent experts from the fields of Natural Sciences, Social Sciences, Economic Sciences, Technology and Engineering in a European dimension. The NIB ensures that the know will be available on a central platform and thus efficiency will be increased.

Today over 50 participants from 12 European countries are involved in vivid and controversial discussions and accelerate the knowledge transition to the relevant regions and users. It will be possible to provide knowledge from all fields touched by the Biorefinery concepts. The Key Group Representatives and the National Team Leader have been appointed due to their special experience in carrying out complex development tasks in a European magnitude.

Project Workplan

The key focus of the Network for the Implementation of Biorefineries (NIB) is to establish a platform for interdisciplinary exchange of information. As Biorefineries include not only the application of complex technologies but also environmental and socio-economic assessment it is urgent to communicate in a channelled way across Europe. Micro-Enterprises and SMEs (Small and Middle Enterprises) can only compete with large companies if they are able to develop innovative products and services (including environmental services) and find an economic niche. Such enterprises must be considered being too small to cover complex research on Biorefineries. But also single research institutions are overtaxed conducting scientific work on such a large field. Therefore, and to achieve the target of

sustainable regional development operationalised by farmers, micro-enterprises and SMEs a broad basis of co-operation is compelling.

• **Organizational Structure** – Standardization of dissemination activity

Ensuring an effective communication among the European countries organizational structures will be set up at first. This task will be carried out via Internet.

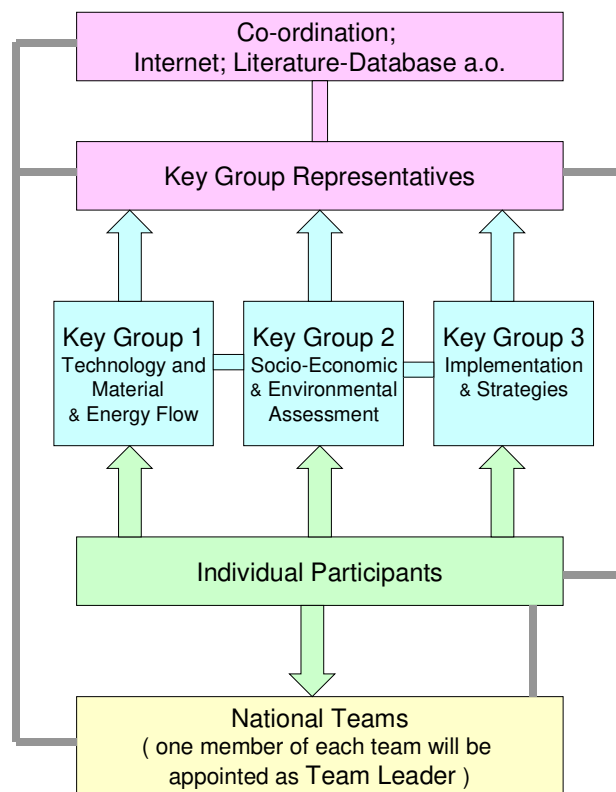


Fig. 2: Organisational Structure

All participants will be divided into 3 Key Groups as well as into National Teams as shown in the description of the participants (table 2 & 3, figure 2).

1. Key Group 1: Technology and Material & Energy Flow
2. Key Group 2: Environmental and Socio-Economic Assessment
3. Key Group 3: Implementation Strategies

Table 2: Key Group Representatives

Function	Name	Institute Name	Country
Co-ordinator	M. Narodoslowsky, S. Kromus	Graz University of Technology	Austria
Key Group 1	B. Kamm, M. Kamm	University of Potsdam	Germany
Key Group 2	M. Hanegraaf, H. van Zeijts	Stichting Centrum voor Landbouw en milieu (CLM)	Netherlands
Key Group 3	A. Buttimer, K. Dawson	National University of Ireland	Ireland

For each Key Group the Representative will be introduced as well as the final appointment of the National Team Leaders will be carried out.

Table 3: National Team Leader

Country	Name	Institute Name	Co
Austria	M. Narodoslowsky, S. Kromus	Graz University of Technology	A
Denmark	P. Kiel	South Denmark University, Esbjerg	DK
Finland	K. Pahkala, A.J. Soukannas	Agriculture Research Centre of Finland	FIN
Germany	B. Kamm, M. Kamm	University of Potsdam	D
Hungary	K. Reczey	Technical University of Budapest	HU
Iceland	A. Leifsson, V.K. Jónsson	Icelandic Biomass A.S.; University of Iceland, Reykjavik	IS
Ireland	A. Buttimer, K. Dawson	National University of Ireland	IRL
Latvia	M. Bekkers, U. Visturs	University of Lativa	LV
Netherlands	R.S. de Groot, J. v.d. Perk	Foundation for Sustainable Development	NL
Switzerland	P.H. Müller, S. Grass	2B AG Biomass and Bioenergy; ETH Zürich	CH
Portugal	V. Rodrigues	ENERAMB-Technologia	P
United Kingdom	D. Wilman	University of Wales	UK

For all papers results and summaries published and disseminated by the NIB, standards, reporting system and distribution structures will be elaborated integrating also Internet activities. These standards are applicable for all further activities.

• **World Wide Web Activity**

The communication tool most efficient and demanding the least financial resources is obviously the Internet. Therefore it is planned to create an Internet-Homepage (Subcontracting). (E.g. www.biorefinery.net). This well maintained homepage will be structured in five categories:

1. **Main Homepage** including Biorefinery initiatives in Europe, Involved Regions, description of participants and their approaches to the different tasks, publications for download, links to participants' own homepages, links to homepages generally related to the topic and the NIB schedule.
2. **“Farmer’s Section”**: On this part of the homepage popularly scientific information and overviews will be published. Including contact addresses for each country.
3. The Internet Homepage will serve as **dissemination platform** of NIB activity results. Via this section it will be possible to download information or to order printed versions of the most important deliverables.
4. Two distinct **Newsgroups** will serve as discussion platform – one for Users to ask questions and to receive individual information and one for scientific exchange of information. Via the scientific newsgroup different approaches to the NIB tasks will be discussed.
5. To increase scientific efficiency it is necessary to ensure quick access to information that is globally available, therefore a **Literature Database (Other Specific Project)** will be installed and regularly updated. Participants will have the opportunity to annotate the different articles.

• **Interdisciplinary Workshops (WS)**

The successful fruition of the NIB requires an effective organisation and a common base of communication. Still, personal communication cannot be substituted by electronic tools completely. Thus Workshops will provide the possibility for live and controversial discussions and elaboration of a workplan for Environmental and Socio-Economic Assessment case studies as well as about resulting implementation strategies. A series of workshops (WS) concentrating on technological set up and implementation tools will be the cornerstone of the Thematic Network. Although some WS will deal with specific topics it is thought to organise all of them interdisciplinary (e.g. in case of focusing on technological issues, NIB participants from rural development should also give inputs). This will enable an interactive planning process where possible errors can be avoided on a very early stage.

1. **Interdisciplinary WS 1**: Green Biomass Utilization Technology in European Regions; Biorefinery Initiatives – Continuation of discussing Socio-Economic and Environmental Evaluation Methods and Implementation Tools, already started in the Internet. Regions with the most concrete initiatives will be selected where Key Group Representatives plus the Co-ordinator will carry out case studies.
2. **Interdisciplinary WS 2**: Open Meeting for Participants and Stakeholders → Presentation of Results of Key Group Activity (Environmental and Socio-Economic Benchmarking)
Discussion of Implementation Tools including already received feedback. Selected stakeholders will be invited.
3. **Interdisciplinary WS 3**: Final Meeting (always after a period of 1 or 2 years)– Discussion of results; Agreement on further Research Activities. Technology Concepts, Socio-Economic and Environmental Benchmarks, Stakeholder Feedback, and Discussions will be prepared for publication. The aim is to elaborate a decision base for politicians, companies and farmers for investment or research support. WS3 can also be seen as an opportunity to initiate research partnership and RTD groups.

• **Stakeholder Identification and Initiation of Involvement → Discussions**

National Team Leaders will identify relevant stakeholders or representing organisations and inform them about the ongoing Network activity. National Teams prepare the mission of the Key Group Representatives and the Co-ordinator to the selected regions. Stakeholders will be informed about the forthcoming of the NIB. First feedback on the Biorefinery Initiatives will be collected. Stakeholders will be motivated to take part on discussions via Internet or personally with NIB participants and Key Group Representatives.

After WS2, National Teams will inform stakeholders who could not attend WS2. Feedback of this information incentive will be introduced into the final report. The received feedback will also enable the selection and adjustment of Biorefinery implementation strategies.

Key Questions are

- ✗ Minimum size of Biorefineries?
- ✗ Will farmers directly hold shares or do they ‘just’ deliver the raw material (including capital risk and responsibilities); → Organisational Structure of Biorefineries and legal status. (Company, Association, etc.)?
- ✗ Listing different preferences in Europe

- **Short Term Staff Exchange** – Data Collection in selected Regions

For Socio-Economic and Environmental Assessment it is of importance to collect data directly in the region of concern. Thus the Key Group Representatives plus the Co-ordinator will travel to the selected regions (see WS1). Data collection will cover the fields Material & Energy Flow; Socio-Economic Data; Environmental Data. Stakeholders who are already involved by the National Teams will be informed about the different Initiatives in Europe and the possibility of discussions will be offered.

After finishing the staff exchange a short report will be published via Internet mainly focusing on Technology. All gathered data will be incorporated in the elaboration of Socio-Economic and Environmental Assessment and the discussion of different Implementation Tools. The aim is to achieve Socio-Economic and Environmental Benchmarks of the different Biorefinery initiatives as well as to provide the network participants with complex information for further project implementation.

- **Environmental and Socio-Economic Benchmarking** of selected 'Biorefinery Initiatives'

Applying a reasonable combination of several existing Environmental Assessment tools like the SPI (Sustainable Process Index), Life cycle assessment, or Integrated Environmental Assessment and Nature Valuation will provide all participants with environmental benchmarks in a European dimension. The combination of the methods applied will be elaborated through the ongoing discussion and judgement of approaches via the Internet.

At WS3 the results will be discussed and agreement upon a general environmental interpretation of the Biorefinery shall be achieved. The benchmarks can be used as reference for the judgement of any other similar European projects.

The cultural landscape is a spatial system of activity that is perceived by human beings as a unit and results from man's interaction with what is to be found in his natural environment. Sustainable cultural landscapes should be characterised by an optimal mix of ecological land (not used), permanent pasture (used by humans), forests, arable land, and commerce & industry with the task of ensuring a high degree of biodiversity, and living standard for the citizens, as well as the closing of material, and energy flow cycles to provide future generations with all resources they will request.

Thus talking of sustainable regional development of less favoured areas in Europe it is meant to preserve or restore the optimal mix of land use by increasing the economic living standards at the same time. Environmental benchmarking therefore will also be an indicator showing the degree of preservation or restoration of sustainable cultural landscapes. With it the potential of Biorefineries to preserve or restore the optimal mix of land utilisation is measured (e.g. increasing the amount of permanent pasture by reducing the area of arable land).

Again, co-ordination of the benchmark elaboration will be carried out via Internet.

References

- [1] KAMM, B.; KAMM, M.: The Green Biorefinery – Principles, Technologies and Products; In: SUSTAIN (ed.), Proceedings, 2nd Int. Symposium on "The Green Biorefinery" Oct. 13-14 1999; Feldbach (A) 1999, 46 - 69
- [2] LOEFQUIST, B.; FUGLSANG, H.; SCHADE, J. R.; PAPTATHEOFANOUS, M. G.; KOULLAS, D. P.; KOUKIOS, E. G.: The Whole Crop Biorefinery Project; Bioraf Danmark Foundation, Aakirkeby (DK) 1995
- [3] ANDERSEN, M.; KIEL, P.: Lactic Acid as a central chemical compound in an integrated utilisation of grass, clover and alfalfa in the green biorefinery; in: Delegate Manual 6th Symposium

- on Renewable Resources for the Chemical Industry together with the 4th Symposium on Industrial Crops and Products, 23-25 March 1999, Bonn; Elsevier Science Ltd.; Bonn (D) 1999
- [4] DERKSEN, J. T.-P.: Industrial applications for biopolymers: the versatility of proteins; in: Results, European Conference on Renewable Raw Materials, Oct. 6-8 1998, Gmunden (A); Austrian Federal Ministry of Agriculture and Forestry; Vienna (A) 1998
- [5] GRASS, S.; HANSEN, G.: Production of Ethanol or Biogas, Protein Concentrate and Technical Fibers from Clover/Grass; in: Biomass Congress of the Americas, Proceedings; Oakland (USA) 1999
- [6a] KROMUS, S.; NARODOSLAWSKY, M.: Elaboration of a decentralised 'Green Biorefinery for the Austrian region of 'Feldbach'. MSc-Thesis and Report, 1998 [University of Technology Graz, Institute of Process Engineering (M. Narodoslowsky, Supervisor of the Thesis), 1998]
- [6b] KROMUS, S.: A Concept of a Decentralised Green Biorefinery for the Austrian region Feldbach In: SUSTAIN (ed.), Proceedings, 2nd Int. Symposium on "The Green Biorefinery" Oct. 13-14 1999; Feldbach (A) 1999, 32 - 45
- [7] FAIR-CT96-3026: Fractionation of lucerne juice to create nutritional and functional protein ingredients for food and non-food industry
- [8] HAUSCHILD, M.; WENZEL, H.: Environmental Assessment of Products, Volumes 1 and 2; Chapman & Hall, Thompson Science, London (UK) 1997
- [9] KROTSCHKE, C.; NARODOSLAWSKY, M.: The Sustainable Process Index, A new dimension in ecological evaluation: in: Ecological Engineering, 6 (1996) pp. 241 - 258, Elsevier Science B.V.; GB 1996
- [10] DE GROOT, R. S.: Functions of Nature – Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making; Wolters Noordhoff BV; Groningen 1992
CRITNIC PL9702076: Making Sustainability Operational: Critical Natural Capital and the Implications of a Strong Sustainability Criterion; May 1998 - May 2000
- [11] CONSTANZE, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R. S.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M.: The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital; in: Nature V. 387/15, May 1997; USA, 1997
- [12] WIGHTMAN, P. S.; EAVIS, R. M.; WALKER, K. C.; BATCHELOR, S. E.; CARRUTHERS, S. P.: A comparative LCA of hydraulic lubricants made from mineral oil and rapeseed oil; in: Delegate Manual 6th Symposium on Renewable Resources for the Chemical Industry together with the 4th Symposium on Industrial Crops and Products, 23-25 March 1999, Bonn; Elsevier Science Ltd.; Bonn (D) 1999

Addresses of the authors

Prof. Dr. Michael Narodoslowsky
Graz University of Technology
Dep. of Chemical Engineering, Institute of Fundamentals and Process Technology
Inffeldgasse 25/C/II, A-8010 Graz,
tel. ++43+316-873-7464,
e-mail: naro@glvt.tu-graz.ac.at

Dr. Birgit Kamm
University of Potsdam, Centre of Environmental Sciences, Working Group Green Biorefinery, Research Centre Teltow-Seehof,
Kantstraße 55, D-14513 Teltow,
tel. ++49+3328-46531,
e-mail: kamm@rz.uni-potsdam.de

MSci Stefan Kromus
SUSTAIN, Association for the co-ordination of
research on sustainable development
Kaingasse 5, A-1210 Vienna
tel. ++43+1-294 92 03
e-mail: stefan.kromus@utanet.at

DC Michael Kamm
University of Potsdam, Institute of Organic
Chemistry and Structure Elucidation,
Research Group Bio-Organic Synthetic Chemistry
Research Centre Teltow-Seehof, Kantstraße 55,
D-14513 Teltow, tel. ++49+3328-46425,
e-mail: mkamm@rz.uni-potsdam.de

Grüne Bioraffinerie Brandenburg

Beiträge zur Produkt- und Technologieentwicklung sowie Bewertung

B. Kamm, M. Kamm, K. Richter, B. Linke, I. Starke, M. Narodoslawsky, K.-D. Schwenke, S. Kromus, G. Filler, M. Kuhnt, B. Lange, U. Lubahn, A. Segert, I. Zierke

Zusammenfassung

Die AG Grüne Bioraffinerie präsentiert das Konzept Grüne Bioraffinerie Brandenburg (GBR-B) und erste Daten von primären und sekundären GBR-Technologien, die zu technisch und wirtschaftlich sinnvollen Zwischenprodukten und Endprodukten führen. Hauptaugenmerk liegt auf den GBR Produkten Milchsäure, Aminosäuren, Chlorophyll, Kohlenhydrate, Proteine und Fasern. Grüne Biomassen, wie Gras oder grüne Wirtschaftspflanzen, wie Luzerne, Klee, unreifes Getreide aus einer extensiven (oder wenig intensiven) Landbewirtschaftung sind ein exzellenter Bioraffinerie-Rohstoff. Mit Hilfe von Methoden der Biotechnologie, der Prozesstechnologie, der ‚Sanften‘ und der ‚Grünen‘ Chemie, der Nicht-klassischen Chemie wird versucht, diese Wertstoffe naturbelassen zu isolieren und durch sanfte, schonende Konversionen einer wirtschaftlichen Nutzung zuzuführen. Erste Resultate von Implementierungsstrategien der Technologien in Kombination mit einem Grüngut-Trockenwerk werden beschrieben.

Summary

The AG Grüne Bioraffinerie presents the concept ‘Green BioRefinery Brandenburg’ (BBR-B) and first data of primary and secondary GBR-technologies as well as technologically and economically meaningful intermediate and final products. The main focus is directed to GBR-products, such as lactic acid, amino acids, chlorophyll, carbohydrates, proteins and fibers. Green Biomass for example grass or green crops, such as lucerne, clover, immature cereals from extensive (or less intensive) land cultivation are an excellent raw material of Green Biorefinery. By the help of the biotechnology, the processing technologies, the ‘soft’ and ‘green’ chemistry, these valuable materials can be isolated in their natural form, or via mild conversion carefully be devoted to an economical utilization. First results of strategies of implementation of technologies and products combined with a green crop drying industry were described.

Einleitung

Die Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen ist ein wesentlicher Politikbereich einer umweltverträglichen, nachhaltigen Entwicklung, der mit der Agenda 21 als Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert von mehr als 170 Staaten im Juni 1992 in Rio de Janeiro verabschiedet wurde. Dies beinhaltet neue Lösungen zu suchen, um den derzeitigen Prozess des rasanten Verbrauchs an fossilen, nicht erneuerbaren Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien) zu entschleunigen. Wesentlich wird

dabei sein, inwieweit es gelingt, die derzeitige auf fossilen Rohstoffen basierende Produktion von Waren und Dienstleistungen schrittweise auf eine auf biologische Rohstoffe basierende industrielle Produktion von Waren und Dienstleistungen umzustellen. International einig ist man sich darin, dass von dieser Umstellung die Weiterentwicklung der menschlichen Zivilisation und die Weltökonomie abhängig sein wird. Ein nachhaltiges ökonomisches Wachstum erfordert sichere, nachhaltige Rohstoffressourcen für die industrielle Produktion. Der heute vorherrschende industrielle Rohstoff Erdöl ist weder nachhaltig, da endlich, noch umweltfreundlich. Die Umstellung ganzer Volkswirtschaften auf biologische Rohstoffe als Wertschöpfungsquelle erfordert jedoch ganz neue Ansätze in Forschung und Entwicklung. Zum einen kommen den Biologischen Wissenschaften eine führende Rolle bei der Formierung der Zukunftsindustrien des 21. Jh. zu. Zum anderen müssen neue Wege des Zusammenwirkens der biologischen, physikalischen, chemischen und technischen Wissenschaften erarbeitet und gefunden werden. Und dies im Verbund mit neuen Verkehrstechnologien, Medien- & Informationstechnologien, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Die Entwicklung von Bioreaffinerien wird dabei „der Schlüssel für den Zugang zu einer integrierten Produktion von Nahrungsmitteln, Futtermitteln, Chemikalien, Werkstoffen, Gebrauchsgütern und Brennstoffen auf Basis biologischer Rohstoffe der Zukunft sein“ (*National Research Council, USA, 2000 [19]*).

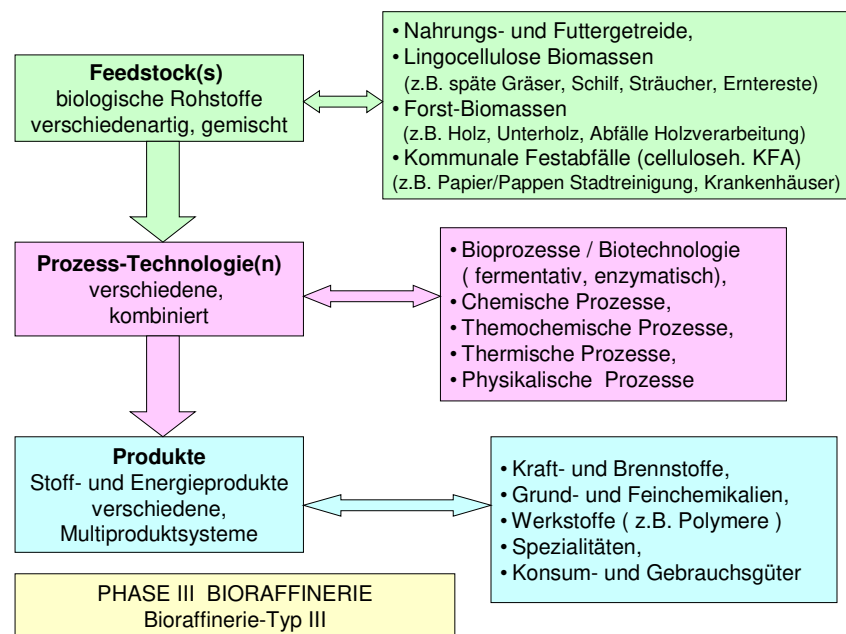


Abb. 1: Grundprinzipien einer Bioreaffinerie (Phase III /Typ III-Bioreaffinerie)

Bioreaffinerie, Bioreaffinerieprozesse und Bioreaffinerieprodukte

Arbeiten an Bioreaffinerie-Konzepten, d.h. zunächst die Fraktionierung von Biomasse in Anlehnung an die Physiologie und biologisch-chemische Vielfalt der Inhaltsstoffe und entsprechende Nutzung und Verarbeitung der so erhaltenen Fraktionen gab es schon lange, bevor der Name Bioreaffinerie/biorefinery etwa ab der Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts in der Fachwelt auftauchte. Wissenschaftlich lassen sich solche Arbeiten bis zu den französischen Chemikern *G.F. & H.M. Roule* 1773 (Herstellung von Proteinextrakten aus Luzerneblättern) zurückverfolgen (vgl. *Kamm, 1999 [1]*). Zu erwähnen seien an dieser Stelle — aus Platzgründen stellvertretend — die Arbeiten von *Osborn* 1920; *Slade & Birkinshaw, 1939, [2]*, *Pirie, 1937, 1942 [3]* (vgl. *Pirie, 1975 [4]* und *Schwenke, 1985 [5]*) zur Gewinnung von Proteinfractionen (ursprünglich zum Zweck der Gewinnung von Nahrungsmitteln) aus grünen Pflanzen, wie Luzerne; die Entwicklung der Gewinnung von Protein-Xanthophyll-Konzentraten zur Großtechnologie (Proxan®- und Alfaprox®-Verfahren, 1972-73 [6]); die amerikanischen und chinesischen Verwertungskonzepte für schnellwachsende Holzgräser (*Shen,*

1982, 1984 [7]), die Agro-Konzepte zur gekoppelten Grünfütter- und Reststoffverwertung (Silage-, Rohprotein- und Biogas-Erzeugung, *Heier*, 1983 [8]). Wesentlich zur Entwicklung von Bioraffinerie-Systemen, insbesondere von Grünen Bioraffinerien trugen die Arbeiten von *Carlsson* bei, welcher die Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit solcher Systeme, insbesondere aus pflanzenphysiologischer und ökologischer Sicht begründete (*Carlsson*, 1982 [9], 1989 [11]). Nicht zuletzt trugen zur Etablierung heutiger Bioraffinerie-Konzepte — auch hier stellvertretend — die biotechnologisch-chemischen Verwertungskonzepte von Melasse — einem Bulk-Nebenprodukt der Zuckerraffination (vgl. Amino-GmbH Frellstedt, in *Kamm*, 1997 [12]) — und die Getreide-Nassmahlverfahren mit angeschlossenen biotechnologischen und chemischen Produktlinien (*Hacking*, 1986 [13], vgl. **Abb. 3**) bei.

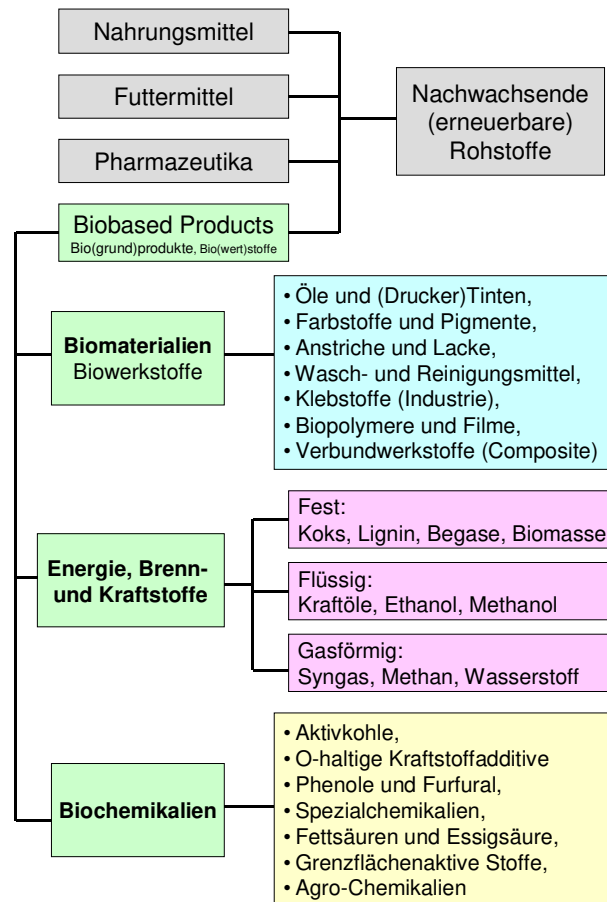


Abb. 2: Gegenwärtig hergestellte Produkte bzw. Produktklassen auf Basis biologischer Rohstoffe

Biologische Rohstoffe und Biologische Grundprodukte (biobased products)

Die Mehrzahl der biologischen Rohstoffe werden in der Landwirtschaft, der Waldwirtschaft und durch mikrobielle Systeme produziert. Waldbaupflanzen sind ein hervorragender Rohstoff für die Papier- und Pappenindustrie, der Bauwirtschaft und der chemischen Industrie. Ackerfrüchte bilden einen organisch-chemischen Pool, aus welchem Kraft- und Brennstoffe, Chemikalien und Chemieprodukte sowie Biomaterialien (vgl. **Abb. 2** & [14]) produziert werden können. Abfallbiomassen sowie Biomassen der Natur- und Landschaftspflege sind wertvolle organische Rohstoffreservoirs und entsprechend ihrer Zusammensetzung zu nutzen. Im Zuge der Entwicklung von Bioraffinerie-Systemen wird der Begriff Abfallbiomasse mittelfristig veralten. Viele biobasierende Industrieprodukte sind Ergebnisse einer direkten physikalischen oder chemischen Be- oder Verarbeitung von Biomasse: z.B. Cellulose, Stärke, Öle, Proteine, Lignin und Terpene. Andere werden indirekt aus Kohlenhydraten unter Nutzung von biotechnologischen Verfahren, wie mikrobiellen und enzymatischen Prozessen produ-

ziert (Szamant, 1987 [15], Richter & Kamm, 1997. [16], Danner & Brown, 1999 [17]). Heute werden bereits eine Vielzahl an Produkten und Produktklassen auf Basis biologischer Rohstoffe produziert (Abb. 2.). Andererseits werden gegenwärtig lediglich 7% der auf Pflanzen basierten Weltbiomasseproduktion von $6,9 \times 10^{17}$ kcal/Jahr (1997) verwertet bzw. genutzt. 93% des erneuerbaren Rohstoffreservoirs bleiben ungenutzt. Für die USA heißt dies beispielsweise: 1996 wurden weniger als 1% an produzierter Biomasse energetisch und weniger als 5% stofflich genutzt (NCGA-USA, 1998 [18]). Warum ist dies so? Der Marktpreis von biologisch basierenden Industrieprodukten, Konsumgütern und Dienstleistungen hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab: (1) von den Kosten der biologischen Rohstoffe, aus denen ein Produkt hergestellt wird und (2) von den Kosten der Prozesstechnologie die benötigt wird, um den Rohstoff in das gewünschte Produkt zu konvertieren. Auch sind der gegenwärtigen fossil based Weltökonomie Entwicklungshemmnisse anzulasten.

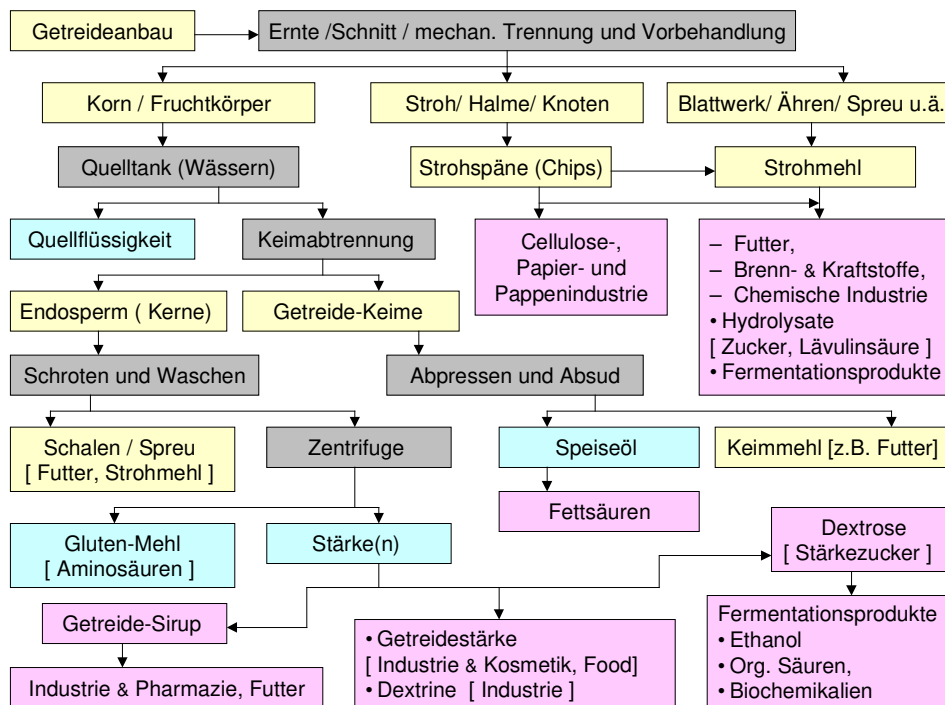


Abb. 3: Beispiel für eine Bioraffinerie auf Basis einer Getreide-Nassmühle (Phase II-Bioraffinerie)

Das Bioraffinerie Konzept (BR-Konzept)

Gegenwärtig erzeugen Erdöl-Raffinerien sehr effizient eine Vielzahl von Produkten für nahezu alle Lebensbereiche. Der fossile Rohstoff ist billig, steht jedoch nur begrenzt zur Verfügung. Die Entwicklung von vergleichbaren Bioraffinerien wird notwendig, um viele biologische Produkte konkurrenzfähig zu ihren auf fossile Rohstoffe basierenden Äquivalentprodukten zu machen. Jede Bioraffinerie raffiniert und konvertiert ihre jeweiligen biologischen Rohstoffe in eine Vielzahl von Wertprodukten. Die Produktpalette einer Bioraffinerie umfasst nicht nur solche Produkte, die in einer Erdölraffinerie hergestellt werden, sondern im besonderen auch solche, die Erdölraffinerien nicht produzieren können. Einige Beispiele an bekannten und potentiellen Bioraffinerieprodukten seien im folgenden aufgeführt: (1) Fermentations-feedstocks [Stärke, Dextrose, Saccharose, Cellulose, Hemicellulose, Melasse, Proteine]; (2) Food-Produkte [Öle, Stärken, Süßstoffe]; (3) Nonfood-Industrieprodukte [Füll- und Dämmmaterialien, Papier und Pappenformate, Textilformate, Klebstoffe und Bindemittel]; (4) Chemische Grund- und Zwischenprodukte [Milchsäure, Essigsäure, Zitronensäure, Bernsteinsäure, Aminosäuren]; (5) Kraft-/Brennstoffe [Ethanol, Aceton, Butanol]; (6) Lösungsmittel [Ethanol, Butanol, Aceton, Ester]; (7) industrielle Enzyme; (8) bioabbaubare Polymere [Gummen/Elaste & Plaste].

Bioraffinerie-Design

Um solche Produktziele zu erreichen, ist es notwendig, dass zum einen neue Bioraffinerie-Basistechnologien entwickelt und zum anderen die heute bekannten Technologien kombinatorisch eingesetzt werden. Viele Bioraffinerie-Endprodukte werden erst durch eine sinnvolle nachhaltige und ökonomische Kombination verschiedener Prozesse und Methoden (z.B. thermische, mechanische, chemische und biologische Verfahren und Technologien) herstellbar. Das Entwickeln von tragfähigen Bioraffinerien erfordert ein hochgradig interdisziplinäres Zusammenspiel der verschiedensten Fachdisziplinen in Forschung und Entwicklung. Es erscheint daher zulässig von *Bioraffinerie-Design* zu sprechen. Bioraffinerie-Design heißt: auf fundierter, seriöser wissenschaftlicher und technologischer Basis, praxisnah und anwendungsorientiert Technologien, Prozesse, Produkte und Produktlinien zu Bioraffinerien zusammenzuführen. Design-Konzepte werden zukünftig u.a. aufbauen auf: **(1)** die Lignocellulose-Feedstock-Konversion [LCF-Bioraffinerie, LCF-Vorbehandlung, effektive Trennung der LCF in Lignin, Cellulose und Hemicellulose (Abb. 4)]; **(2)** die Weiterentwicklung von thermischen, chemischen und mechanischen Prozessen [z.B. neue Aufschlussmethoden, Vergasung (Synthesegas) und Verflüssigung von Biomasse]; **(3)** die Weiterentwicklung biologischer Prozesse [Biosynthese, Stärke- und Celluloseabbauende Bakterien u.a.]; **(4)** die Kombination von Stoffwandlungen [z.B. biotechnologischer und chemischer]; **(5)** Grüne Bioraffinerie-Konzepte; **(6)** die Forcierung von F&E auf Phase III/Typ III-Bioraffinerien [Feedstock-Mix + Prozess-Mix → Produkt-Mix, (Abb. 1, 3-5)].

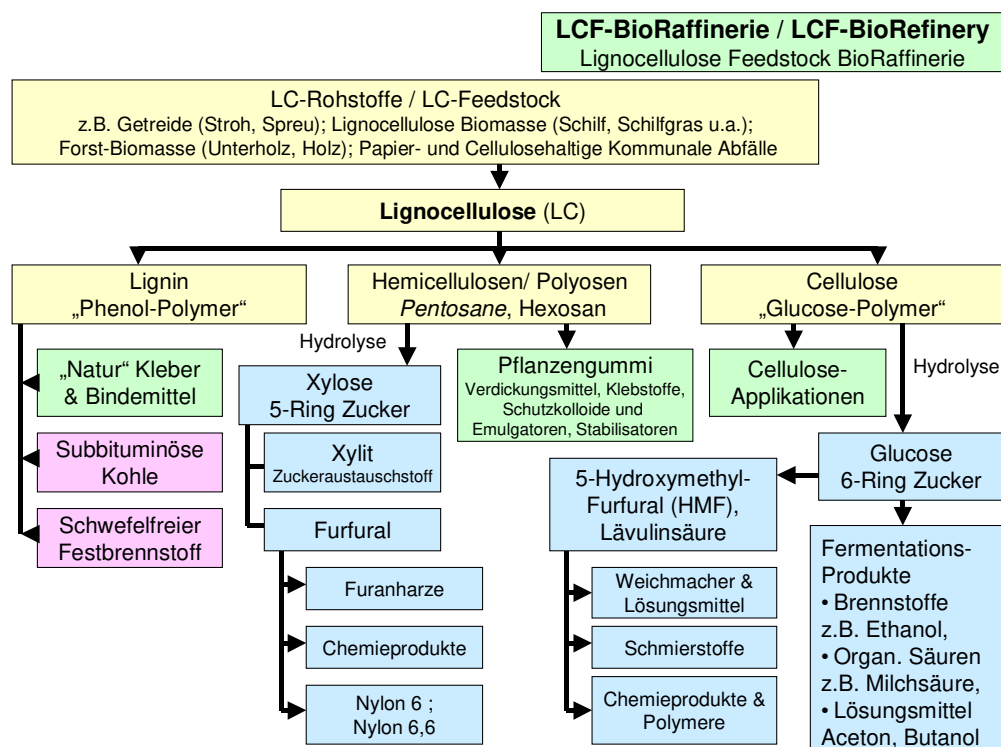


Abb. 4: Bioraffinerie-Design; Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie (LCF-Bioraffinerie, Phase III)

Schlüsseltechnologien sowie Forschungs- Entwicklungsfelder werden dabei sein (Auswahl): **(a) Up-Stream-Prozesse:** Industrielle enzymatische Hydrolyse von Cellulose & Hemicellulose **(b) Bioprozesse:** Monitoring biologischer Prozesse, Bioreaktoren für Wärme-, Schwingungs- und viskose Reaktionen; Fest-Flüssig-Fermentation, Prozesskontrolle (Komponentenanalyse), Kombination biologischer, physikalischer und chemischer Operationen. **(c) Mikrobielle Systeme:** Identifikation von Mikroorganismen, Studium der fundamentalen Prinzipien mikrobieller Physiologie und Wechselwirkungen (Umwelt, Metabolismus und Physiologie). **(d) Enzyme:** Entwicklung preisgünstiger industrieller

Enzyme, neue Enzyme für biologische Produkte. (e) **Down-Stream-Prozesse:** Extraktion mittels superkritischer Lösungsmittel (z.B. CO₂), selektive permeable Membrane, Kombination und Integration verschiedener Trennmethode(n) (z.B. Flüssigextraktion und Membrantechnologie). Eine Prioritätenliste wurde u.a. 1999 durch den *National Research Council* der USA erarbeitet (NRC, 2000 [19]).

Das Grüne Bioraffinerie Konzept (GBR-Konzept)

Als Grüne Bioraffinerie werden komplexe Systeme nachhaltiger, umwelt- und ressourcenschonender Technologien zur umfassenden *stofflichen und energetischen* Nutzung bzw. Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen in Form von Grünen und organischen Abfallbiomassen aus einer im Ziel nachhaltigen regionalen Landnutzung bezeichnet (Kamm *et al.*, 1997 [10]).

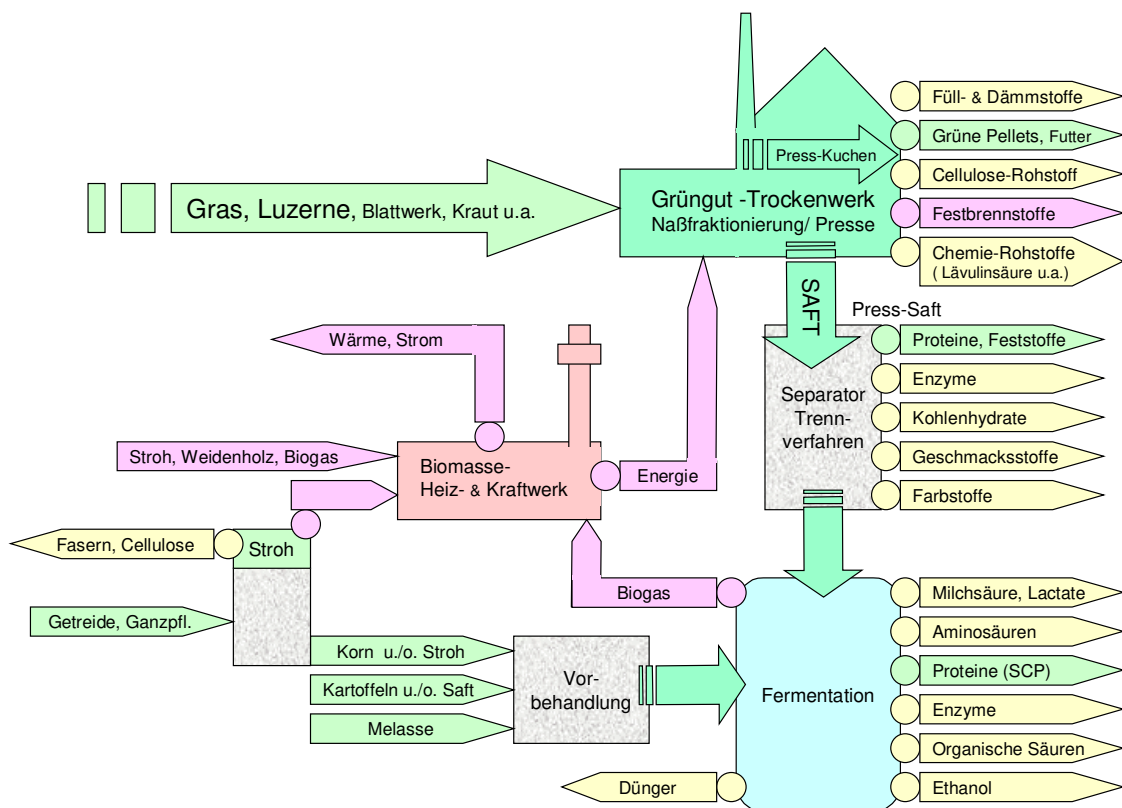


Abb. 5: Ein System Grüne Bioraffinerie, Integrierter Prozess zur Produktion von Food und Non-Food-Produkten sowie Energie auf Basis grüner Biomasse (nach Kiel, Kamm in [1])

Grüne Bioraffinerien (GBR) sind ebenso wie Bioraffinerien Multiprodukt-Systeme und richten sich in ihren Raffinerie-Schnitten, -Fraktionen und -Produkten nach der Physiologie des Pflanzenmaterials, das heißt am Erhalt und Nutzung der Vielfalt der durch die Natur erbrachten Syntheseverleistungen. In Erweiterung des Bioraffinerie-Konzepts orientieren sich Grüne Bioraffinerien sehr stark an den Nachhaltigkeitsprinzipien (Nachhaltige Landnutzung, Nachhaltige Rohstoffe, Schonende Technologien, autarke Energieversorgung, etc.) bzw. beziehen diese mit ein. Steht bei Bioraffinerien *derzeit* die Ökonomie im Vordergrund, ist man mit Grünen Bioraffinerie-Konzepten schon konzeptionell um eine Gleichgewichtung zwischen Ökonomie und Ökologie bemüht. Übersichten zu GBR-Konzepten, Inhalten und Zielen sind zu finden unter Kamm, 1999 [1]; ARGE Bioraffinerie, 1999 [20]; Kromus, 1999 [21]; Kiel, 1999 [22]; Kamm, 1997 [10]; Kiel, 1997 (vgl. [22]); Carlsson, 1989 [11].

Grüne Biomassen sind beispielsweise Gras aus einer Bewirtschaftung von Dauergrünland, Stilllegungsflächen, Naturschutzflächen oder grüne Feldfrüchte, wie Luzerne, Klee, unreifes Getreide aus einer extensiven Landbewirtschaftung. Grüne Pflanzen sind eine natürliche Chemie- und Lebensmittel-

telfabrik. Um ihre wertvollen Inhaltsstoffe in einer weitestgehenden Naturbelassenheit zu isolieren, verwendet man in der ersten Stufe (Primärraffination) die schonende Technologie der Nass- oder Trockenfraktionierung. Bei der Nass-Fraktionierung wird das grüne Erntegut oder das feuchte organische Anfallgut in einen faserreichen Presskuchen (PK) und in einen nährstoffreichen Saft (Green Juice, GJ; Presssaft, PS) getrennt. Der Presskuchen enthält neben Cellulose und Stärke auch wertvolle Farbstoffe, Arzneistoffe und andere Organika. Der GJ/PS enthält Kohlenhydrate, Proteine, freie Aminosäuren, organische Säuren, Farbstoffe, Enzyme, Hormone, Arzneistoffe, weitere organische Substanzen und Mineralien. Diese primären und sekundären Pflanzeninhaltsstoffe werden nach den bereits beschriebenen BR-Technologien in einer GBR fraktioniert, isoliert und zu Produkten konvertiert (**Abb. 5 & Abb. 2**). Rohstoffe wie Gras haben auch physiologische Vorteile. Sie enthalten wertvolle Inhaltsstoffe, die in den artverwandten Kulturpflanzen Getreide bereits herausgezüchtet worden sind.

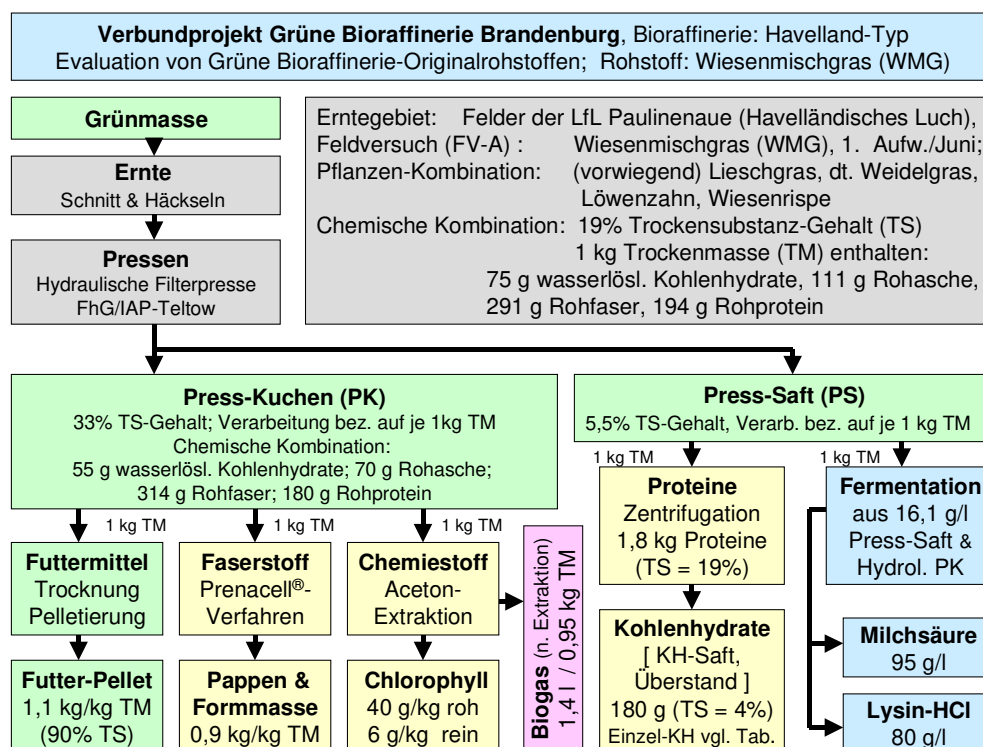


Abb. 6: Evaluierung der Potentiale einer Primärraffinerie und einigen Bioraffinerie-Produktlinien

Grüne Bioraffinerie – Der Havelland-Typ (GBR-HVL-Typ)

Der Charakter einer Bioraffinerie wird letztendlich durch das Umfeld des potentiellen Bioraffinerie-Standortes bestimmt. Der regionale Bezug ergibt sich schon daraus, dass sich die i.A. feste Biomassen sinnvoll nicht wie Erdöl oder Gas transportieren lassen. Zu den Standort-Parametern zählen weiterhin Rohstoffe (Art und Verfügbarkeit), Infrastruktur (Landwirtschaft, Industrie, Handel, Verkehr, Wissenschaft und Bildung), Humankapital, Produktlinien, Produktinnovationen, regionaler Markt.

Arbeiten an Bioraffinerie-Systemen sind innovativ und immer hochgradig interdisziplinär. Die grundlegenden fachspezifischen Arbeiten finden somit örtlich verteilt in den Universitäten, Instituten und Forschungsunternehmen statt. So auch in Brandenburg. Um diese Arbeiten praxisrelevant zu bündeln, wurde im Jahre 1999 der Forschungs-, Entwicklungs- und Praxisverbund „Grüne Bioraffinerie Brandenburg“ gegründet. Als potentielle Region wurde das Havelland (Region und Gebietskörperschaft im Land Brandenburg, westlich von Berlin) gewählt. Die Region/der Landkreis Havelland (59% der Fläche landwirtschaftlich genutzt, 61.000 ha als Ackerland, 31.000 ha als Grünfläche) bietet mit dem Havelländischen Luch, mit der zentralen Agro-Einheit Futtermittelwerk Selbelang (Verarbeitungskapazität 6 bis 8 x10³ t Trockengutpellet/Jahr), dem ehemaligen Chemiefaserwerk Premnitz (heute Che-

miepark), dem hohen Wissensstand der Agroindustriellen Forschungs- und Bildungseinrichtungen u.a., ideale Standortbedingungen. Die Forschungs- und Entwicklungskonzeption wurde Grüne Bioraffinerie „Havelland-Typ“ genannt (ARGE Bioraffinerie, 1999 [20]). Eine regionale Übertragbarkeit der Konzeption ist dieser innewohnend.

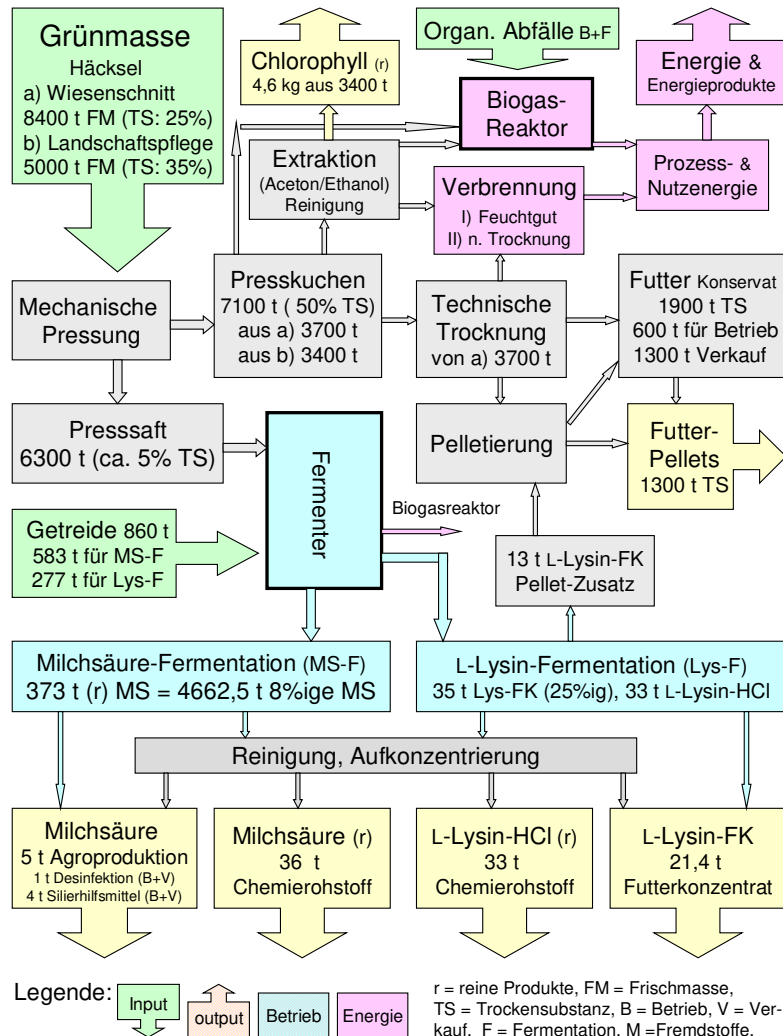


Abb. 7: Einordnung einer GBR-Press-Saftlinie in einen landwirtschaftlichen Betrieb

Evaluierung der Potentiale einer Bioraffinerie des Havelland-Typ

Um das komplizierte Zusammenspiel der verschiedenen Technologien und Produktlinien praxisnah vorzubereiten, wurde im Technikums- und Kleintechnikumsmaßstab ein potentiell Regime mit dem Originalrohstoff Wiesenmischgras (WMG) gefahren. Die experimentelle Evaluierung betraf Primärraffinerie-Stufen (Grasernte, Häckseln, Transport, Fraktionierung in Press-Kuchen und Press-Saft, Lagerung) und die Sekundärraffineriestufen bzw. Produktlinien: Proteinabtrennung, Kohlenhydratisierung, Saftfermentation zu Milchsäure und der Aminosäure L-Lysin (Press-Saftlinie) sowie die Blattfarbstoffextraktion, Herstellung von Futterpellets, Faserstoffgewinnung sowie die Reststoffverwertung zu Biogas (Press-Kuchenlinie). Erste Ergebnisse sind in der **Abb. 6** zusammengefasst. Um eine weitestgehende Vergleichbarkeit zu gewähren wurden die Ergebnisse der einzelnen Verfahrensstufen auf jeweils 1 kg Trockenmasse (TM) umgerechnet. In der 2. Evaluierungsstufe wurden die Verfahren und Produktlinien in die Struktur eines Landwirtschaftlichen Betriebes eingearbeitet. Das Ergebnis ist in **Abb. 7** dargestellt. Dabei ging es nicht um eine Produktmaximierung sondern um eine Evaluierung des Modellprojektes „Landwirtschaftlicher Betrieb als Erzeuger von Non-Food-Produkten“. In einer

ersten Bewertung konnte gezeigt werden, das Wiesenmischgras sich zu einem durchaus effizienten Grüne-Bioraffinerie-Rohstoff entwickeln kann. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass das Implementieren von Bioraffinerien in Agrarbetriebe mittlerer Größe ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein kann. Eine ausführliche Beschreibung der Evaluierung sowie verschiedener Bioraffineriesysteme befindet sich in Vorbereitung. Forschungs- und Entwicklungsbedarf hat sich dabei aufgezeigt.

Literatur

- [1] KAMM, B.; KAMM, M.: The Green Biorefinery – Principles, Technologies and Products, 2nd International Symposium Green Biorefinery, October, 13-14, 1999, SUSTAIN, Verein zur Koordination von Forschung über Nachhaltigkeit (Hrsg.), Feldbach, Austria, **1999**, S. 46-69
- [2] SLADE, R.E.; BIRKINSHAW, J.H. (ICI): Improvement in or related to the utilization of grass and other green crops. *Brit. Pat.* **BP 511,525** (1939)
- [3] PIRIE, N.W.: *Chem. Ind.*, **61** (1942) 45 & *Nature*, **149** (1942) 251
- [4] PIRIE, N.W.: Leaf protein: a beneficiary of tribulation. *Nature*, **253** (1975) 239-241
- [5] SCHWENKE, K.-D.: Eiweisquellen der Zukunft [Aulis-Verlag Deubner, Köln, **1985**, ISBN 3-7614-0858-7] pp. 82
- [6] KNUCKLES, B.E.; BICKOFF, E.M.; KOHLER, G.O.: *J. Agri. Food Chem.*, **20** (1972) 1055
- [7] SHEN, S.: Biological Technologies for a Sustainable Production of Biomass. In: Biodiversity [E.O. Wilson (ed.), National Academy Press, Wahington, D.C, **1988**] 404 ff.
- [8] HEIER, W.: *Grundlagen der Landtechnik* **33** (1983) 45-55
- [9] CARLSSON, R.: Trends for future applications green crops. In: Forage Protein Conservation and Utilization. [Proceedings of EFC Conf., Dublin, Ireland ,**1982**] 57-81
- [10] KAMM, B.; KAMM, M.; SOYEZ, K.: Die Grüne Bioraffinerie-Ein ökologisches Technologiekonzept. In: Die Grüne Bioraffinerie, Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 4-17
- [11] CARLSSON, R.: Green Biomass of Native Plants and new Cultivated Crops for Multiple Use: Food, Fodder, Fuel, Fibre for Industry, Photochemical Products and Medicine. In: New Crops for Food and Industry [Wickens et al., Chapman and Hall, London, **1989**].
- [12] KAMM, M.: Pflanzliche Aminosäuren als Chemierohstoff. In: Die Grüne Bioraffinerie. Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 150-184
- [13] HACKING, A.J.: The American wet milling industry In: Economic Aspects of Biotechnology [Cambridge University Press, New York, **1986**] 214-221
- [14] MORRIS, D. J.; AHMED, I.: The Carbohydrate Economy: Making Chemicals and Industrial Materials from Plant Matter. [Biotechnology Institute of Local Self Reliance, Wahington D.C. **1992**]
- [15] SZMANT, H.H.: Industrial Utilization of Renewable Resources. [Technomic Publishing, Lancaster, Pa.; **1987**]
- [16] RICHTER, K.; KAMM, B.; KAMM, M.: Biotechnologische Erzeugung von Milchsäure und Ammoniumlactaten aus Getreidestärke In: Biokonversion Nachwachsender Rohstoffe Bd. 10 [Land-

wirtschaftsverlag Münster, **1997**, ISBN 3-7843-2926-8] 293-315

- [17] DANNER, H.; BROWN, R.: Biotechnology for the production of commodity chemicals from biomass. Chemical Society Reviews, 6 (**1999**)
- [18] NATIONAL CORN GROWERS ASSOCIATION (NCGA, USA): Plant/Crop-based Renewable Resources 2020: A Vision to Enhance U.S. Economic Security through Renewable Plant/Crop-based Resources Use [NCGA-paper DOE/GO-10097-385, **1998**] 25 pp.
- [19] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC, USA): Biobased Industrial Products: Priorities for Research and Commercialization [National Academic Press, Washington D.C., **2000**]
- [20] ARGE Grüne Bioraffinerie Brandenburg (Hrsg.); Die Grüne Bioraffinerie- Entwicklung und Etablierung eines Systems „Grüne Bioraffinerie“ in der Region Havelland. BMBF-Vorlage [Teltow-Selbelang, **1999**] 30 Seiten, (zu beziehen über B.Kamm, 03328-46531, Teltow)
- [21] KROMUS, S.: A Concept of a Decentralised Green Biorefinery for the Austrian Region of Feldbach. 2nd International Symposium Green Biorefinery, October, 13-14, 1999, SUSTAIN, Verein zur Koordination von Forschung über Nachhaltigkeit (Hrsg.), Feldbach, Austria, **1999**, S. 32-45
- [22] KIEL, P.: The Green Biorefinery in Denmark - Utilisation of green and brown juice as fermentation media. -Ibid-

Wir danken allen Institutionen, Forschungsgruppen und Einzelwissenschaftlern, welche die AG Grüne Bioraffinerie in ihrer Arbeit unterstützen. Besonderer Dank gilt den nachfolgend aufgeführten Personen und Einrichtungen (Institute und Einrichtungen in alphabetischer Reihenfolge):

PD Dr. habil Bernd Linke, Dr. sc. Klaus Richter [ATB - Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim, Abt. Bioverfahrenstechnik]; Prof. Dr. Gerhard Muschiolik, Dr. Jörg Beckmann, [biopos-Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e.V., Teltow]; Dr.-Ing. Ernst-Peter Jeremias [entec Ingenieurgesellschaft mbH Neuruppin und wiss. Leiter BUFZ e.V., Alt Ruppin]; Dr. Hermann Lang [Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP), Teltow und Potsdam-Golm]; Dipl.-Ing. Bernd Müller [FMS - Futtermittelwerk Selbelang GmbH, Selbelang]; Prof. Dr. Klaus Jaster [Humboldt Universität zu Berlin (HUB), Institut für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus]; Dr. Frank Hertwig, Dr. Jürgen Pickert [Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Abt. Grünland- und Futterwirtschaft, Paulinenaue]; Dr. Klaus-Dieter Robowsky [Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Abt. Analytik, Potsdam]; Prof. Dr. Klaus-Dieter Schwenke [Institut für Angewandte Proteinchemie, Kleinmachnow]; Dr. Manfred Fechner [Paulinenaauer Arbeitskreis Grünland- und Futterwirtschaft e.V., Paulinenaue]; Prof. Dr. Erich Kleinpeter, Prof. Dr. Martin G. Peter [Universität Potsdam, Institut für Organische Chemie und Strukturanalytik], Dr. sc. Wolfgang Seyfarth [ZALF, Müncheberg].

Anschrift der erstgenannten Autorin

Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
AG Grüne Bioraffinerie
Dr. Birgit Kamm
c/o Forschungsstandort Teltow-Seehof
Kantstraße 55, D-14513 Teltow
tel. ++49+3328-46531,
e-mail: kamm@rz.uni-potsdam.de
<http://www.Bioraffinerie.de>

Entscheidungshilfen für die ökologische Optimierung der Entsorgung häuslicher Restabfälle

M. Koller, T. Hermann

Zusammenfassung

Auch die Restabfallentsorgung muß dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung Rechnung tragen. Dieses beinhaltet die weitgehende Minimierung von Umweltbelastungen, die Schließung von Stoffkreisläufen und die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz. Unter Berücksichtigung der einzelfallspezifischen Rahmenbedingungen sind aus der Vielzahl möglicher Entsorgungvarianten diejenigen Konzepte zu ermitteln, die in der Gesamtbilanz die günstigsten Ergebnisse liefern. Mit der Methodik der Ökobilanzierung steht dafür ein geeignetes Werkzeug zu Verfügung. Für charakteristische Optionen der Restabfallentsorgung wurden die potentiellen Umweltwirkungen auf der Basis eines ökobilanziellen Bewertungsansatzes ermittelt und ihre Bedeutung im nationalen Kontext diskutiert. Die Ergebnisse zeigen, daß kein Entsorgungsweg in allen Bewertungsgrößen vorteilhaft ist, daß aber solche Behandlungsverfahren ökologische Vorteile haben, die möglichst große Fraktionen des Restmülls einer stofflichen oder energetischen Verwertung zuführen. Die Substitution von fossilen Energieträgern und stofflichen Ressourcen führt bei diesen Verfahren auch bei Berücksichtigung der zusätzlichen Aufwendungen zu entscheidenden Gutschriften in der Ökobilanz. Unter Ausschöpfung der Potentiale eines stoffstromorientierten Behandlungsansatzes kann die ökonomisch deutlich günstigere mechanisch-biologische Restabfallbehandlung damit zu gleichwertigen Ergebnissen gelangen wie die vollständige Verbrennung des Restabfalls.

Summary

The disposal of municipal solid waste has to comply with the requirements of a sustainable development. The environmental impacts must be minimized and the recovery and reuse of materials and energy resources must be enhanced. Under consideration of the site and case specific conditions those treatment options have to be identified, which show the most favourable overall results. The methodology of life cycle assessment (LCA) represents a suitable tool for this. The paper describes the procedure and results of the LCA for waste management systems. The paper characterizes typical waste treatment options with respect to their potential environmental impacts and discusses their relevance within the national context. The results indicate, that there isn't any best treatment system, but a trend that systems with a higher rate of recovery and reuse of waste fractions are favourable, even when the higher expenditure is taken into consideration. The substitutions of fossil resources result in significant environmental benefits and advantages in the overall results. The mechanical biological pre-treatment of MSW, which is far cheaper than the traditional waste combustion, can catch up with the incineration by implementing waste fraction specific treatment options.

Einleitung

In Deutschland beträgt das jährliche häusliche und hausmüllähnliche Restabfallaukommen ca. 40 Mio. Mg. Das entspricht einem Pro-Kopf-Betrag von etwa 500 kg Restabfall (Glas, Papier, Verpackungsmaterialien, Batterien, Haushaltschemikalien). Die Technische Anleitung für Siedlungsabfälle (TASi) von 1993 schreibt vor, dass diese Abfälle vor der Deponierung behandelt werden, um die Umweltverträglichkeit der Restabfallentsorgung zu gewährleisten. Für eine Reduzierung der Gasemissionen und der organischen Sickerwasseremissionen des Deponiekörpers ist eine Stabilisierung, d.h. eine Oxidation der organischen Fracht des Restabfalls vorzunehmen. Die Stabilisierung kann sowohl über eine Verbrennung als auch über einen biologischen Abbau der organischen Substanz erfolgen. Neben der Stabilisierung kann die Vorbehandlung auch Maßnahmen zur energetischen und/oder stofflichen Nutzung des Restabfalls oder einzelner Bestandteile umfassen. Die Verwertungsmöglichkeiten für Restabfälle liegen im stofflichen Bereich in einer Rückführung verbleibender Wertstoffe in die Produktionsprozesse sowie im energetischen Bereich in der Oxidation der fossilen und nativ-organischen Bestandteile mit dem Ziel der Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie (vgl. Abbildung 1). Während für die energetische Verwertung der fossilen Organik nur thermische Verfahren wie die Müllverbrennung (MVA) in Frage kommen, kann die nativ-organische Fraktion auch in sogenannten mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) abgebaut werden, auf aerobem Wege in Rotteverfahren oder auf anerobem Wege in der Vergärung.

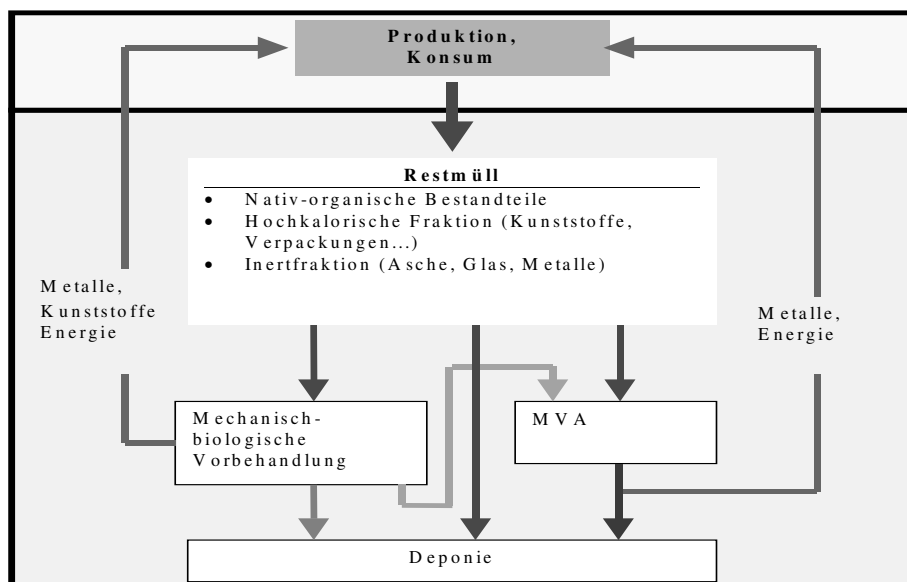


Abb. 1 Stoffstromoptionen der Restabfallbehandlung

Ziel einer nachhaltigen Restabfallentsorgung muss es sein, aus der Vielzahl der potenziellen Entsorgungsoptionen zu einem Entsorgungskonzept zu finden, das unter den gegebenen abfallwirtschaftlichen, infrastrukturellen und stoffwirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Gesamtbilanz die geringsten Umweltbelastungen und hinsichtlich der Energie- und Ressourceneffizienz die größten Vorteile aufweist. Als hilfreiches Werkzeug für die ökologische Analyse und Bewertung hat sich die Methodik der Ökobilanzierung erwiesen. Die ökobilanzielle Betrachtung erlaubt es, die möglichen Umweltwirkungen der betrachteten Entsorgungsoptionen systematisch zu analysieren und zu quantifizieren und Hinweise auf Schwachstellen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Damit können den Entscheidungsträgern in der Abfallwirtschaft dringend benötigte Entscheidungsgrundlagen für eine nachhaltige Restabfallentsorgung an die Hand gegeben werden. Im Folgenden werden die im Rahmen einer solchen Vorgehensweise ermittelten Ergebnisse zur ökologischen Gesamtbewertung und zur stoffstromspezifischen Optimierung der häuslichen Restabfallentsorgung unter besonderer Berücksichtigung mechanisch-biologischer Verfahren vorgestellt.

Ökobilanzieller Bewertungsansatz

Die wesentlichen Schritte einer ökobilanziellen Betrachtung sind

- die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
- die Sachbilanz,
- die Wirkungsabschätzung
- und die Auswertung.

Die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen betrifft u. a. das Ziel der ökobilanziellen Untersuchung, die funktionelle Einheit des betrachteten Systems, die Systemgrenzen und weitere Festlegungen zu Annahmen und Einschränkungen, Datenanforderungen, Bewertungsgrößen und methodischen Fragen.

Die Sachbilanzierung liefert aus der Bilanzierung aller systemrelevanten Transporte, Speicherungen und Wandlungen von Stoffen und Energien eine auf das untersuchte System und die Bezugsgröße (funktionale Einheit) bezogene Zusammenstellung von Emissionen, Flächen- und Ressourcenverbräuchen. Diese Daten bilden die Grundlage für die Wirkungsabschätzung und die Auswertung.

Bei der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz im Hinblick auf die (ökologischen) Schutzziele beurteilt und Umweltproblembereichen, sogenannten Wirkungskategorien, zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen Schutzziele, Umweltwirkungen und den hierfür verantwortlichen Schadstoffen wird in Abbildung 2 veranschaulicht.

Schutzziele:

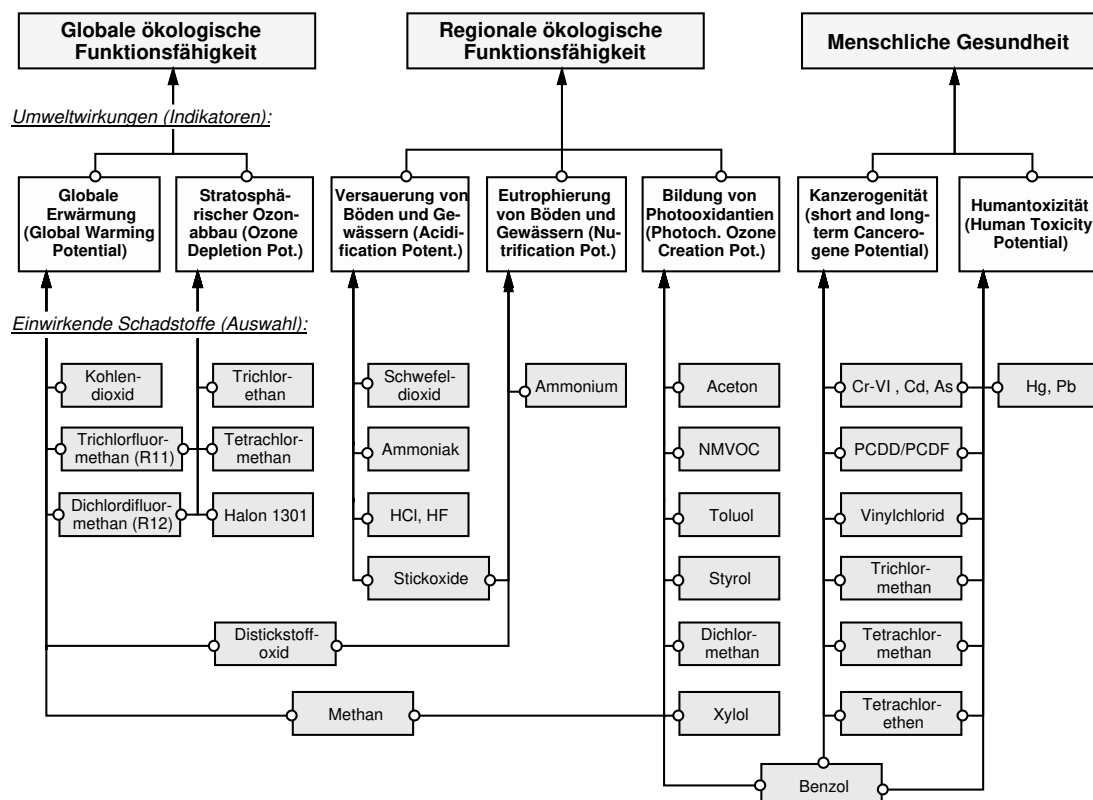


Abb. 2 Zusammenhang zwischen Schadstoffemissionen und Schutzziele

In der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen zusammengefasst. Davon ausgehend können unter

Berücksichtigung von Sensitivitäts- und Optimierungsanalysen ggf. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsfindungen abgeleitet werden.

Vergleichende Betrachtung der Umweltrelevanz der Restabfallentsorgung

Beschreibung der Standardvarianten

Für eine vergleichende Betrachtung der Umweltrelevanz der Restabfallentsorgung wurden 5 typische Entsorgungsoptionen ausgewählt und auf der Basis durchschnittlicher Leistungswerte berechnet. Die Varianten direkte Deponierung (Dir_Dep) und MVA stellen dabei die Grenzen bezüglich des Abbaus der organischen Materie dar, innerhalb derer sich die verschiedenen Optionen der mechanisch-biologischen Vorbehandlung (MBV) bewegen und dienen als Vergleichsmaßstab für die Einordnung der mechanisch-biologischen Verfahren. Während bei der direkten Deponierung überhaupt kein Organikabbau vor der Deponie stattfindet, wird bei thermischer Behandlung die Organik nahezu vollständig vor der Deponie umgesetzt.

Innerhalb dieser Grenzen bewegt sich die MBV, die in der biologischen Stufe einen Teil der biologisch zugänglichen Organik abbaut und darüber hinaus häufig einen Teil der fossilen Organik für stoffliche oder thermische Verwertung ausschleust. Die Extensivvariante (Ext_MBA) steht als Vertreter für Verfahren, die bei geringem baulichen Aufwand auf eine Intensivierung des Rotteprozesses verzichten, und die in der Regel weder eine umfangreiche mechanische Behandlung mit dem Ziel der Ausschleusung von verwertbaren Fraktionen noch eine Fassung und Reinigung der Abluft vorsehen. Hier ist mit Behandlungszeiten von mindestens 52 Wochen zu rechnen. Die zwei Intensivvarianten (Int_MBA; erw. Int_MBA) repräsentieren Anlagen der mechanisch-biologischen Vorbehandlung, in denen durch eine intensive mechanische Vorbehandlung (Zerkleinerung, Homogenisierung, Sichtung etc.) und durch eine Zwangsbelüftung eine Optimierung des Rotteprozesses und damit ein beschleunigter Abbau erreicht wird. Diese Anlagen sind mit einer Abluffassung und -reinigung ausgestattet. Die beiden Varianten unterscheiden sich hinsichtlich des Ausmaßes, in dem einzelne Fraktionen des Restmülls für eine stoffliche oder energetische Nutzung aufbereitet und ausgeschleust werden. Während in Variante Int_MBA nur eine Abscheidung der Fe-Fraktion vorgenommen wird, beinhaltet die Variante erw. Int_MBA auch eine Vergärungsstufe für die organische Feinfraktion und die Ausschleusung einer hochkalorischen Fraktion für die Verwertung in industriellen Feuerungsanlagen (Zementwerk).

In den Untersuchungen berücksichtigt sind die betrieblichen Aufwendungen für Vorbehandlung und Deponie, soweit sie Energieträger betreffen (z. B. Öl und Gas für die Stützfeuerung in MVAs) und deren Emissionen, sowie (je nach Entsorgungslinie) Gutschriften für eine stoffliche und/oder energetische Nutzung bzw. Verwertung von Fraktionen des Restmülls. Bezugsgröße für die Bewertungsergebnisse ist die jährlich in Deutschland zu entsorgende Restabfallmenge.

Die Ergebnisse zeigen, dass kein Entsorgungsweg in allen obengenannten Bewertungskriterien eindeutig vorteilhaft ist, vielmehr zeigen sich im Vergleich untereinander Vor- und Nachteile. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3 anhand der spezifischen Beiträge zu den Bewertungskriterien dargestellt. Allerdings ist auch zu erkennen, dass die direkte Deponierung und die Extensivvariante in keinem Kriterium Umweltvorteile erzielen, während die Intensiv-MBA, besonders wenn Stoffströme für eine Verwertung ausgeschleust werden und die MVA in einzelnen Kriterien auch Entlastungseffekte für die Umwelt aufweisen.

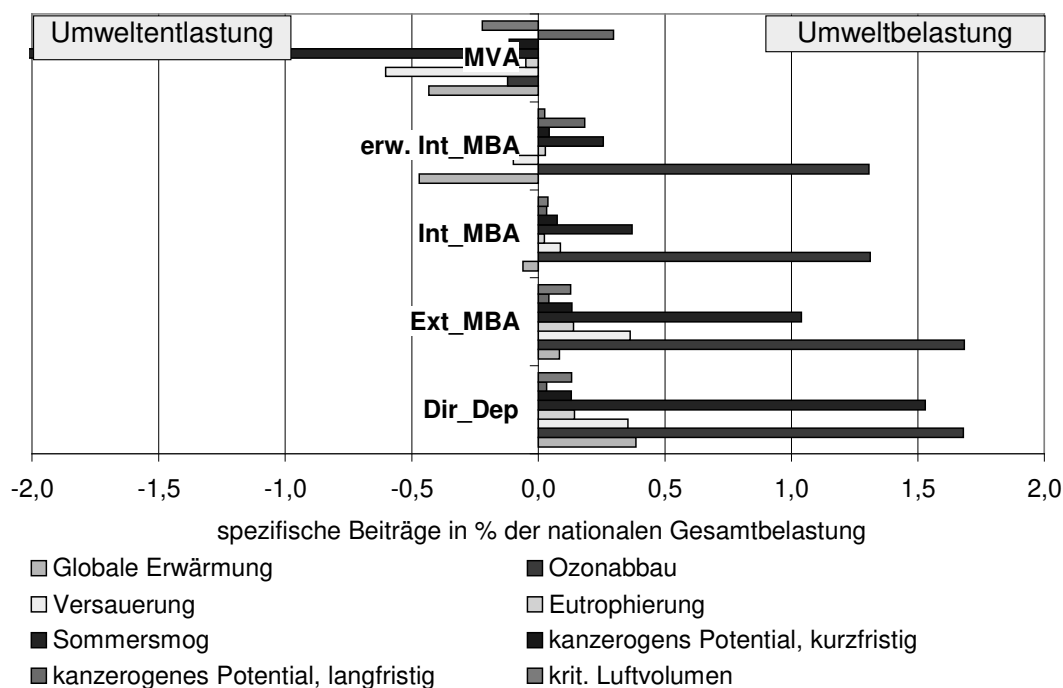


Abb. 3 Entsorgungswege im Vergleich

Ökologische Charakterisierung

Globale Erwärmung. Wesentliche Einflussgrößen bezüglich der globalen Erwärmung sind die CO₂ und CH₄-Emissionen bzw. –Gutschriften. Es zeigen sich Vorteile für die Varianten, die Stoffströme für eine energetische oder stoffliche Verwertung ausschleusen. Die Beiträge zum globalen Erwärmungspotenzial bei der direkten Deponierung (*Dir_Dep*) resultieren im wesentlichen aus den Methanemissionen aus der Deponie. Die Gutschriften für die energetische Verwertung des Deponiegases gleichen diese Belastungen bilanziell nicht aus. Die mechanisch-biologische Vorbehandlung in einer extensiven Anlage ohne Stoffstromausschleusung (*Ext_MBA*) kann zwar die potenziellen Methanemissionen aus der Deponie und damit mögliche Beiträge zur Globalen Erwärmung reduzieren, aber die verbleibenden Methanemissionen und die mit dem Energieverbrauch verbundenen klimarelevanten Emissionen werden aufgrund fehlender Verwertungsmaßnahmen nicht ausgeglichen. Die Intensiv-MBA-Varianten (*Int_MBA*, *erw. Int_MBA*) und die thermische Behandlung (*MVA*) weisen in der ökobilanziellen Gesamtbetrachtung eine Umweltentlastung auf. Diese resultieren aus der Minderung der Inanspruchnahme fossiler Ressourcen (bzw. der mit ihrer Inanspruchnahme verbundenen Umweltbelastungen).

Ozonabbau. Das Ozonabbaupotenzial wird fast ausschließlich durch die FCKW R11, R12 gebildet, die in den üblichen Ablufteinigungsanlagen von MBAs (Biofilter bzw. Biowäscher) kaum zurückgehalten bzw. abgebaut werden, während sie bei der thermischen Behandlung zerstört werden. Im Vergleich zur thermischen Restabfallbehandlung weisen daher alle Verfahren der mechanisch-biologischen Behandlung und die direkte Deponierung ein höheres Ozonabbaupotenzial auf. Mit der Umsetzung des Montreal-Abkommens von 1989 und dem schrittweisen Ausstieg aus Produktion und Verwendung von FCKW ist für die nächsten Jahre aber ein Rückgang der FCKW-Belastung von Restabfällen und damit der bei der Entsorgung emittierten Frachten zu erwarten.

Sommersmog. Das Sommersmogpotenzial der mechanisch-biologischen Verfahren wird im wesentlichen durch eine Reihe leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe (LCKW) gebildet, die bei der Vorbehandlung freigesetzt werden und durch die (auch) nach der Vorbehandlung verbleibenden Methanemissionen aus der Deponie. Die derzeit in MBAs eingesetzten Biofilter reduzieren die Emissionen leicht-

flüchtiger Kohlenwasserstoffe nur teilweise. Nur bei einer Intensiv-MBA mit weitgehenden Verwertungsmaßnahmen (*erw. Int_MBA*) werden diese Emissionen durch entsprechende Gutschriften in der Gesamtbilanz ausgeglichen. Bei der thermischen Abfallbehandlung werden dagegen die LCKW nahezu vollständig zerstört. Hieraus und aus der höheren Energieausschleusung resultiert der Vorteil gegenüber den anderen Varianten.

Versauerung. Zum Versauerungspotenzial tragen vor allem SO_2 , NO_x und NH_3 -Emissionen bei. Es ergeben sich relative Vorteile für die Varianten, die Anteile des Restabfalls einer energetischen Nutzung zuführen. Die Gutschriften für eingesparte SO_2 , NO_x und NH_3 -Emissionen führen in der Gesamtbilanz allerdings nur bei der MVA und bei der Intensiv-MBA mit Stoffstromausschleusung und -verwertung (*erw. Int_MBA*) zu ökologischen Entlastungen.

Eutrophierung. Die Eutrophierungspotenziale werden vor allem durch Ammoniak/Ammonium- und Stickoxidemissionen verursacht. Sie bewegen sich für alle Entsorgungssysteme in einem vergleichsweise niedrigen Bereich mit Vorteilen für die Intensiv-MBA-Varianten und die MVA.

Die Bilanzen zum kanzerogenen Potenzial zeigen für alle betrachteten Systeme vergleichsweise niedrige spezifische Beiträge an den nationalen Gesamtbelastungen, in der Regel deutlich unter 0,5%. Das **langfristige kanzerogene Potenzial** wird von den Schwermetallen Nickel, Chrom VI und Cadmium dominiert. Diese werden bei den Verfahren, die den gesamten Restabfall oder Fraktionen einer energetischen Nutzung zuführen, in höherem Maße mobilisiert, als bei der Deponierung, bei der mit einer überwiegend langfristigen Festlegung zu rechnen ist. Die thermische Behandlung oder Verwertung von Restabfall oder Restabfallfraktionen in MVAs, Kraft- oder Zementwerken führt daher (auch bei Berücksichtigung von Strom- und Wärmegutschriften) zu insgesamt höheren Schwermetallemissionen und einem größeren langfristigen kanzerogenen Potenzial (Varianten *erw. Int_MBA*, MVA). Zum **kurzfristigen kanzerogenen Potenzial** trägt eine Reihe leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe bei, die während der Vorbehandlung emittiert werden. Angesichts der Unsicherheiten bei der Sachbilanzierung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Entsorgungswegen.

Die **kritischen Luftvolumina** werden von einer Vielzahl organischer und anorganischer Schadstoffe geprägt mit relativ hohen Anteilen von SO_2 und NO_x . Hier zeigen sich Vorteile für die Verfahren, die in größerem Umfang thermische oder elektrische Energie bereitstellen.

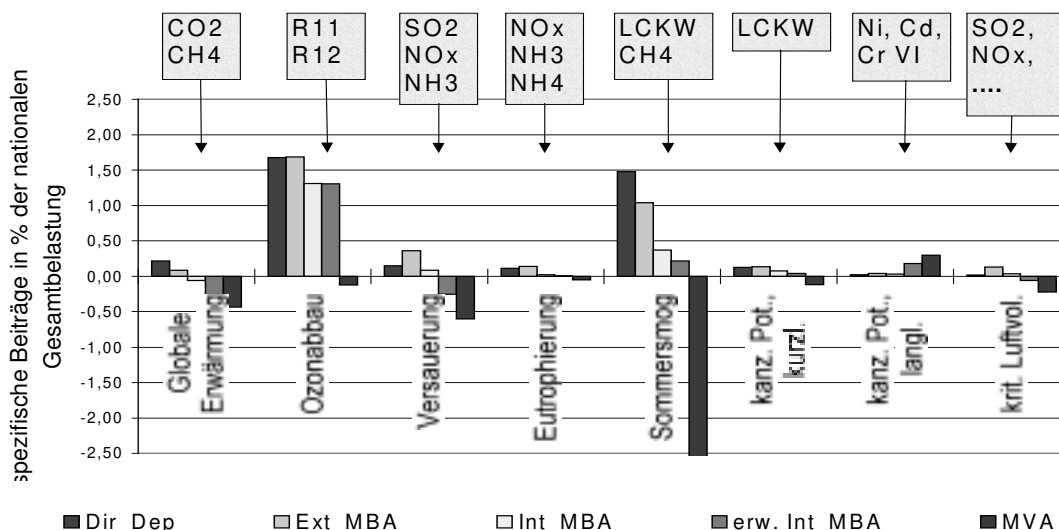


Abb. 4 Ökologische Charakterisierung unterschiedlicher Entsorgungsoptionen für Restabfall

Ökologische Optimierung durch Stoffstrommanagement

Stoffstromoptionen der Restabfallbehandlung

Restabfall enthält eine Reihe von Stoffen oder Fraktionen, die im Rahmen einer stoffstromspezifischen Behandlung ausgeschleust und stofflich oder energetisch genutzt werden können. Die Abscheidung von **Eisen-Metallen** ist bereits weitgehende Praxis in MBAs. Der Anteil der Metalle im Restabfall liegt zwischen 2,5 und 10 Gew.%. Mindestens 75% davon sind der Fe-Fraktion zuzurechnen. Diese kann aus den vorzerkleinerten und homogenisierten Abfällen vergleichsweise einfach über Magnetscheider abgegriffen werden; dabei werden Abscheidegrade von über 95% erreicht.

Nichteisen-Metalle können in mechanisch-biologischen Behandlungsstufen über Wirbelstromabscheider abgetrennt werden, was in der Praxis bislang jedoch kaum erfolgt. Der Anteil an Nichteisen-Metallen im Restabfall beträgt 0,6 bis 2,5% und besteht zu 30 bis 50% aus Aluminium. Auch für die Nichteisen-Fraktion kann bei einer entsprechenden Aufbereitung und Verfahrensgestaltung mit einer Abschöpfungsrate von über 95% gerechnet werden.

Die Vergärung der **organischen Feinfraktion** bietet gegenüber der aeroben Behandlung den Vorteil, dass im Prozess Biogas entsteht, das z.B. in Blockheizkraftwerken genutzt werden kann. Man kann damit von einer energetischen Nutzung des organischen Anteils des Restabfalls sprechen. Die Vergärung von Restabfällen wird bislang überwiegend in Versuchsanlagen erprobt. Vorliegende Daten lassen spezifische Gaserträge im Bereich von 27,5 - 96,6 m³/Mg MBA-Input bei einem Methangehalt von etwa 60 % erwarten.

Die Ausschleusung einer **heizwertreichen Leichtfraktion** (Kunststoffe, Papier und Kartons, Verpackungen und Verbundstoffe) erfolgt bislang vornehmlich zum Zweck einer thermischen Verwertung bzw. Beseitigung in Kraftwerken, industriellen Feuerungsanlagen (z. B. Zementwerken) oder Müllverbrennungsanlagen. Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen aus Restabfall in Industrief Feuerungen und in Kraftwerken wird kontrovers diskutiert: Neben Vorteilen hinsichtlich des Klimaschutzes durch die Nutzung des Heizwerts der Abfälle ist auch mit Nachteilen hinsichtlich humantoxischer Belastungen insbesondere durch zusätzliche Schwermetallemissionen zu rechnen, da Kraftwerke und industrielle Feuerungsanlagen oft nicht die hohen Emissionsstandards von MVAs einhalten. Neben der Ausschleusung für eine thermische Verwertung kommt bei den Kunststoffen auch eine stoffliche Verwertung in Betracht. Es kann mit einem Kunststoffanteil im Restmüll im Bereich von 7-15 Gew.% gerechnet werden. Für die Abschätzungen des ökologischen Potenzials wird im Folgenden angenommen, dass die Kunststofffraktion zu 80% abtrennbar ist, vollständig aus Polyethylen besteht und dass von den abgetrennten Kunststoffen 70% verwertbar sind.

Optimierungspotenziale durch Stoffstrommanagement

Die Auswertung der Bilanzierung zeigt, dass sich, auch bei verschiedenen Siedlungsstrukturen für alle zusätzlichen Varianten der Ausschleusung und Verwertung von Wertstoffen aus dem Restmüll (Stoffstromoptionen) positive Effekte einstellen. In Abbildung 6 ist dargestellt, welche ökologischen Effekte die einzelnen Stoffstromoptionen auf verschiedene Wirkungskategorien haben. Negative Werte bedeuten in der Gesamtbilanz eine Gutschrift und weisen auf eine Umweltentlastung hin. Die Umweltentlastungen entstehen dadurch, dass durch die Verwertungsmaßnahme Primärstoffe substituiert und dadurch die mit deren Herstellung verbundenen Emissionen und negativen Umwelteffekte eingespart werden. Außerdem werden bei der energetischen Verwertung der heizwertreichen Fraktion bzw. des bei der Vergärung gewonnen Biogases andere Energieträger substituiert. Mit Ausnahme der Verwertung einer hochkalorischen Fraktion in Zementwerken und der Biogasverwertung, ergeben sich bei keiner Variante zusätzliche Umweltbelastungen in den einzelnen Bewertungskriterien. Bei einer Verwertung hochkalorischer Fraktionen in Zementwerken erhöhen sich durch die Schwermetallemissionen die kritischen Volumina, das Sommersmog- und das Versauerungspotenzial. Bei der Verwertung von Biogas kann es zu geringfügigen Erhöhungen beim Eutrophierungspotenzial und bei der Emission langwirkender Kanzerogene kommen.

In Abbildung 7 werden verschiedene Varianten der Restabfallbehandlung bezüglich ihrer Umweltauswirkungen verglichen. Die zwei Intensivvarianten in der Abbildung (Intensiv-MBA bzw. optimierte Intensiv-MBA) repräsentieren in Bezug auf die Stoffausschleusung zwei gegensätzliche Entsorgungskonzepte. Während in der Variante Intensiv-MBA nur eine Abscheidung der Fe-Fraktion vorgenommen wird, beinhaltet die Variante optimierte Intensiv-MBA auch eine Vergärungsstufe für die organische Feinfraktion, die Ausschleusung von Aluminium für die Wiederverwertung, die Ausschleusung von Kunststoffen für eine Weiterverwertung und die Ausschleusung der (danach noch verbleibenden) hochkalorischen Fraktion für die Verwertung in industriellen Feuerungsanlagen (Zementwerk). Deutlich erkennbar sind Verbesserungen für die mechanisch-biologische Restabfallbehandlung, die bei einer Kombination verschiedener Verwertungsmaßnahmen erzielt werden können. Die MBV kann dadurch in fast allen Bewertungsgrößen in der Gesamtbilanz Umweltentlastungspotenziale erzielen und mit Ausnahme des Bewertungskriteriums Ozonabbau mit der MVA zumindest gleichziehen. Gegenüber der Intensiv-MBA ohne Stoffstromausschleusung kommt es nur hinsichtlich der Emission langfristig wirkender Kanzerogene zu einer Verschlechterung, die durch die vergleichsweise höheren Schwermetallemissionen bei einer Verwertung hochkalorischer Fraktionen im Zementwerk verursacht wird.

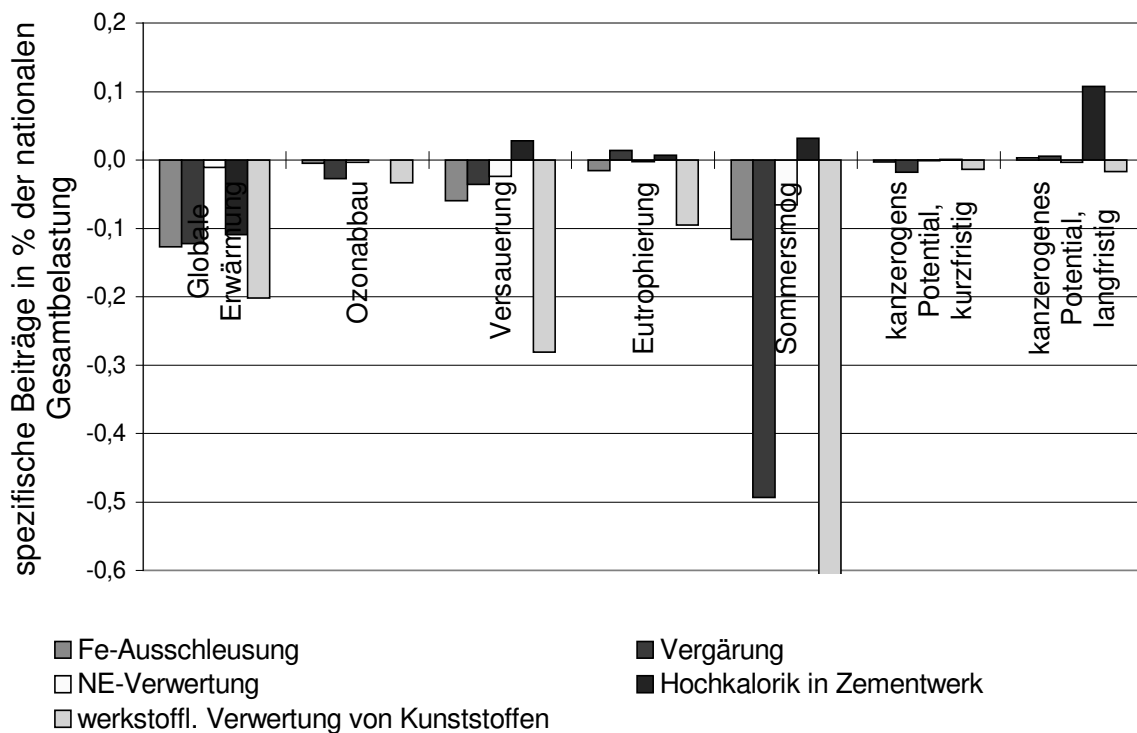


Abb. 6 Optimierungspotenziale durch stoffliche/energetische Nutzung von Restabfallfraktionen

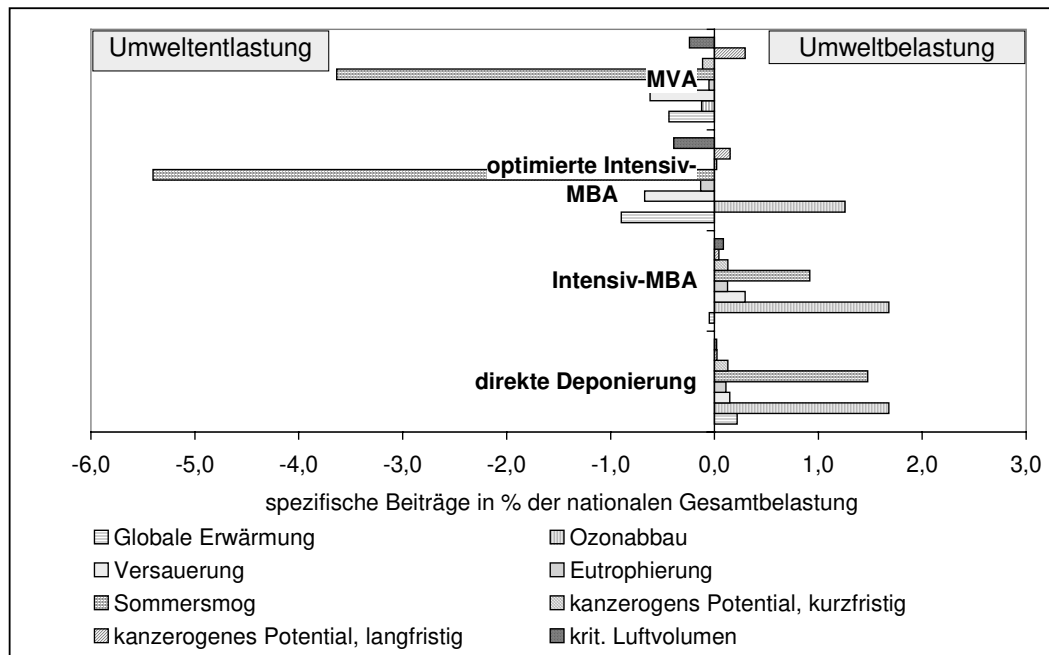


Abb. 7 Abfallentsorgungsoptionen im Vergleich

Literatur

FRICKE, K. et al. (1999): Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung. Kurzfassung des Endberichts zum BMBF-Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Teilvorhaben 2/1, Witzenhäuser, Juli 1999

KOLLER, M. et al. (1999): Ökologische Bewertung der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung, In: Tagungsband Ergebnispräsentation des BMBF-Verbundvorhabens, Potsdam, 7.-8.9.1999, S. 25 - 42

KOLLER, M. et al. (2000): Ökologischer Stellenwert anaerober Behandlungsstufen in der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. In: B. Bilitewski (Hrsg.): Anaerobe biologische Abfallbehandlung, Erfahrungen – Konzepte – Produkte, Dresden, 21.-22.2.2000

PLICKERT, S. (1998): Ermittlung des Hausmüllaufkommens aus dem Güterumsatz : Entwicklung eines Rechenmodells unter besonderer Berücksichtigung der Einflussgrößen in den Kreisen des Landes Brandenburg, Berlin: TU, Fachbereich 06, Diplomarbeit März 1998

SOYEZ, K. et al. (1999): Testphase abgeschlossen – Zur Einsatzfähigkeit der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung liegen jetzt umfangreiche Ergebnisse vor. In: Müllmagazin 4/1999. Rhombos-Verlag, Berlin 1999.

SOYEZ, K. et al. (1999a): Systembewertung der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung - Übersicht. In: Tagungsband Ergebnispräsentation des BMBF-Verbundvorhabens, Potsdam, 7. - 8.9.1999, S. 1-24

Anschrift der Autoren

Matthias Koller
Tim Hermann
UP Transfer
Park Babelsberg 14, Haus 7
D - 14482 Potsdam
Tel.: 0331/977-4447, Fax: 0331/977-4433
e-mail: koller@rz.uni-potsam.de, hermann@rz.uni-potsam.de

Solarthermie 2000

E. Schmeer

Zusammenfassung

Mit dem Förderprogramm "Solarthermie 2000" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) wird die aktive thermische Nutzung der Solarenergie durch solarthermische Anlagen (Fläche > 100 m²) in den fünf neuen Bundesländern und im östlichen Teil von Berlin untersucht. Die Universität Potsdam, Forschungsgruppe Solarenergie am Institut für Berufspädagogik, wurde mit der wissenschaftlich-technischen Programmbegleitung für die zu errichtenden Anlagen in den Ländern Brandenburg und Berlin beauftragt.

Summary

With the research program "Solarthermie 2000" of the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) the active thermal use of solar energy will be tested on solar thermal plants in the five new lands of the Federal Republic of Germany and in the eastern part of Berlin. The University of Potsdam, research team solar energy of the institute of vocational training, was engaged to realize the scientific-technical accompanying of the program for the solar thermal plants in Brandenburg and Berlin.

Projektbeschreibung

Mit dem Förderprogramm "Solarthermie 2000" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Beginn: 1994, Bundesministerium für Forschung und Technologie, dann BMBF) sollte im Rahmen der drei Teilprogramme die aktive thermische Nutzung der Solarenergie durch solarthermische Anlagen nachgewiesen werden.

Im Teilprogramm I konnten Effizienzuntersuchungen zur Betriebszuverlässigkeit und zum Alterungsverhalten an solarthermischen Versuchsanlagen durchgeführt werden, die im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms (ZIP) der Bundesregierung im Zeitraum 1978 bis 1983 in den alten Bundesländern errichtet wurden.

Für das Teilprogramm 3 wurde die Erstellung und Untersuchung von großen solarthermischen Anlagen in größeren Wohngebieten (Kollektorfläche > 1000 m²) vorgesehen, mit denen Untersuchungen zum Betriebsverhalten dieser Anlagen zur Warmwasserbereitung und zur Heizungsunterstützung und zur saisonalen Wärmespeicherung gewonnen werden sollten.

Das Teilprogramm 2 umfaßte die Installation von bis zu 100 solarthermischen Demonstrationsanlagen mit einer Kollektorfläche größer 100 m² in den fünf neuen Bundesländern und im östlichen Teil von

Berlin, die auf öffentlichen Gebäuden zu errichten sind und eine umfangreiche Meßtechnik erhalten sollen.

Die wissenschaftlich-technische Projektbegleitung für die im Rahmen des Förderprogramms "Solarthermie 2000, Teilprogramm 2" zu errichtenden solarthermischen Versuchsanlagen in Brandenburg und Berlin wurde der Universität Potsdam übertragen. Zu den Projektaufgaben gehören die Begutachtung und Bewertung von öffentlichen Gebäuden bezüglich der Errichtung von solarthermischen Anlagen, die Erstellung von Leistungsverzeichnissen und die Überprüfung von Ausschreibungen, die Installation von Meßsystemen und die Durchführung von wissenschaftlichen Meßprogrammen einschl. der Interpretation und Weiterverarbeitung der Meßergebnisse.

Aufgrund der Anforderungen des Demonstrationsprogramms "Solarthermie 2000" wurde eine Forschungs- und Versuchsanlage zur Solarthermie an der Universität Potsdam in Golm (Haus 8) errichtet, mit der das Betriebsverhalten von Solarkollektoren bei unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen und verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht werden sollte. Diese Forschungsanlage zur Solarthermie besteht aus drei parallel angeschlossen verschiedenartigen Solarkollektortypen (Absorber, Flachkollektor, Vakuumröhrenkollektor), die auch im Einzelbetrieb untersucht werden können.

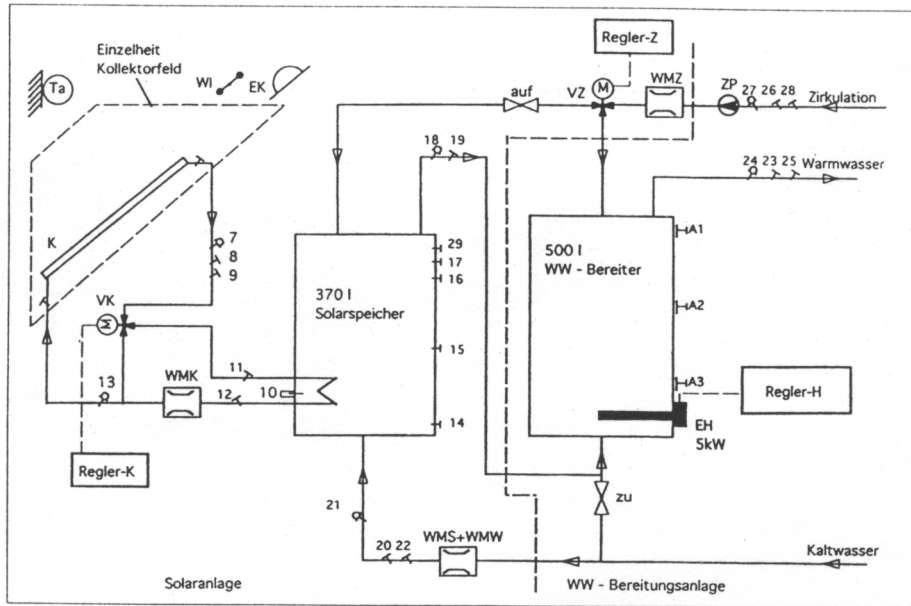
Folgende Fragestellungen wurden untersucht, deren Ergebnisse für die wissenschaftlich-technische Programmbegleitung der solarthermischen Großanlagen von Bedeutung waren:

- Einfluß klimatischer Bedingungen (Einstrahlung, Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, Abschattung, Feuchtigkeit, Verschmutzung) auf die Leistungsfähigkeit verschiedener Kollektortypen
- Einfluß der Betriebsbedingungen der Anlage (Warmwasserverbrauch, Volumenströme, Wassertemperatur im Solarspeicher) auf den Ertrag des Kollektors
- Ermittlung optimaler Betriebsbedingungen für verschiedene Kollektortypen
- Optimierung der Arbeitsweise des Kollektorkreises
- Ermittlung von Systemparametern wie Kollektorkreisnutzungsgrad, Systemnutzungsgrad, solarer Deckungsanteil, Verlustgrade (Solarspeicher, Warmwasserbereiter, Zirkulation), Arbeitszahl, Auslastung
- Erstellung qualitativer Energieflußbilder
- Betriebsverhalten von Anlagenkomponenten

Die drei Kollektoren der Forschungs- und Versuchsanlage sind jeweils mit einer Umwälzpumpe ausgestattet und können daher einzeln oder im parallelen Verbund betrieben werden. Für spezielle experimentelle Untersuchungen ist eine Handsteuerung der Anlage vorgesehen. Anstelle des Absorbers können Kollektorprototypen im Anlagenbetrieb untersucht werden.

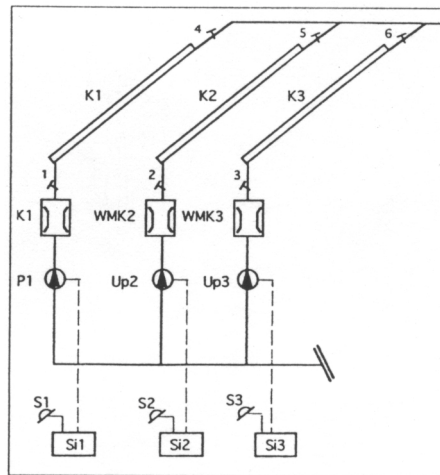
Das durch die Solarstrahlung erwärmte Wärmeträgermedium gelangt von den Kollektorkreisen über eine Sammelleitung zu einem Wärmetauscher, der sich in einem Solarspeicher (Volumen: 370 l) befindet. Das nachströmende kalte Wasser wird dadurch vorgewärmt und dem eigentlichen Warmwasserspeicher (Volumen: 500 l) zugeführt.

Im Warmwasserspeicher befindet sich eine elektrische Heizeinrichtung (5 kW), die das vorgewärmte Wasser auf die Gebrauchstemperatur von 60° C erwärmt. Das aufbereitete Warmwasser dient zur Versorgung der Wasch- und Duschräume eines Werkstattgebäudes der Universität Potsdam.



Schema der Versuchsanlage an der Universität Potsdam mit Meßstellen

Abbildung 1: Schema der solarthermischen Versuchsanlage



Die drei Kollektoren der Potsdamer Versuchsanlage können einzeln oder parallel betrieben werden.

Abbildung 2: Kollektorfeld der Versuchsanlage

Literatur

STRÄBNER, H. (1997): Eine solarthermische Versuchs- und Demonstrationsanlage. XV. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Inzynieria procesowa w ochronie srodowiska, Universität Opole 1997, Tagungsband, S. 130-140

STRÄBNER, H.; LIERMANN, A. (1998): The long-term subsidy-program "Solarthermie 2000." VVI. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Inżynieria procesowa w ochronie środowiska, Universität Opole 1998, Tagungsband

SCHMEER, E. (1998): Requirements on a test centre for solar thermal plants. Srodkowo-Europejska Konferencja "Ecopole 98. Conference Proceedings: Chemja i inżynieria ekologiczna 1998

SCHMEER, E.; STRÄBNER, H. (1999): Solarthermische Versuchs- und Demonstrationsanlage für Forschung und Lehre. In: Sonnenenergie. 24. Jahrg. (1999), H.4, S. 23-25

STRÄBNER, H.; LEDWON, K.: The application of small solar thermic systems for seasonal use. In: Chemja i inżynieria ekologiczna 1999 (im Druck)

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Ernst Schmeer
Universität Potsdam
Institut für Berufspädagogik/
Berufliche Fachrichtungen Elektro- und Metalltechnik
Postfach 60 15 53
14415 Potsdam

Forschungs- und Demonstrationsanlage zur Photovoltaik

E. Schmeer

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Forschungs- und Demonstrationsanlage zur Photovoltaik kann das Verhalten solcher Anlagen unter Praxisbedingungen untersucht werden. Der Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte, Einzelkomponenten und Solarzellentypen hinsichtlich ihrer Effektivität, Lebensdauer und Praxistauglichkeit ist möglich.

Summary

The photovoltaic-system for research and demonstration gives the possibility to analyze the function of such systems under practice conditions. We can compare different system-conceptions, parts of components and solar-cells with regard to efficiency, operating life and fitness for use.

Projektbeschreibung

Die Forschungs- und Demonstrationsanlage zur Photovoltaik konnte im Jahr 1994 mit Fördermitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und des Landes Brandenburg aufgebaut werden. Sie besteht aus einem feststehenden Anlagenteil mit einer installierten Leistung von ca. 5 kW_p bei einer Gesamtfläche von ca. 50 m² und einem dem Sonnenstand nachgeführten Anlagenteil mit einer installierten Leistung von ca. 2,5 kW_p mit einer Gesamtfläche von ebenfalls ca. 50 m². In der Gesamtfläche der nachgeführten Anlage sind Booster-Spiegel enthalten, durch die die Energieausbeute erhöht werden soll. In einem Containergebäude ist die zum Betrieb der Anlage notwendige Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik und die technische Ausstattung zur Messwerterfassung untergebracht. (Abb. 1)

Der feststehende Anlagenteil ist unter einem Neigungswinkel von 45° nach Süden ausgerichtet und mit zwei verschiedenen Solarzellentypen bestückt. Zur Erstinstallation wurden neben monokristallinen Siliziumsolarzellen (M55-Module der Fa. Siemens) auch Metall-Isolator-Silizium (MIS) - Inversions-schicht-Solarzellen (PS 184 MC 180 - Module der Fa. Nukem) ausgewählt. Die erzeugte elektrische Energie wird zu 90 % über netzgeführte Wechselrichter in das Netz der Energieversorgung Potsdam (EVP) eingespeist. Die restlichen 10 % werden zur Demonstration des Inselbetriebs im Kleinspannungsbereich mit Batteriespeicher im Messcontainer verwendet.

Der drehbare Solargenerator ist ebenfalls mit monokristallinen Siliziumsolarzellen (M55-Module der Fa. Siemens) bestückt. Außerdem sind Booster-Spiegel, die zusätzlich Solarstrahlung auf die Solar-module reflektieren, installiert. Die Anlage wird zweiachsig der für den geographischen Standort berechneten Jahressonnenbahn nachgeführt. Die vom nachgeführten Solargenerator erzeugte elektrische Energie wird ebenfalls in das Energieversorgungsnetz der EVP eingespeist.



Abb. 1: Solaranlage der Universität Potsdam

Im Bereich der Forschung stehen Fragen zum Einfluß der klimatischen Bedingungen, zur Energiebilanz verschiedener Solarzellentypen, zu den Wirkungsgraden der Wechselrichter, zum Gesamtnutzungsgrad der Anlage, zur Betriebssicherheit, zum Energieverbrauch für den Eigenbedarf der Anlage, zum Inselbetrieb u.a. im Vordergrund.

Tabelle 1 gibt für die Jahre 1995 bis 1999 die Energiebilanz der einzelnen Anlagenteile und der gesamten Anlage wieder. In Tabelle 2 ist ein Vergleich der Energieausbeute der Anlagenteile zusammengestellt.

Tab. 1: Energiebilanz der Photovoltaik-Anlage der Universität Potsdam 1995 bis 1999

	Energie in kWh		
	fest Siemens	fest Nucem	nachgeführt Siemens
1995	1850	1720	2800
1996	1690	1570	2940
1997	1890	1770	3470
1998	1590	1500	2880
1999	1770	1630	3240
Mittelwert	1758	1638	3066

Tab. 2: Energieausbeute der Anlagenteile im Vergleich

	spezifische Energie in kWh/m ²			Verhältnis spez. Energien		
	fest Siemens	fest Nucem	nachgeführt Siemens	n.Si./f.Si.	n.Si./f.Nu.	f.Si./f.Nu.
1995	108	78	137	1,26	1,76	1,39
1996	99	71	144	1,45	2,02	1,39

1997	111	80	169	1,53	2,12	1,38
1998	93	68	141	1,51	2,07	1,37
1999	104	74	158	1,53	2,15	1,41
				1,46	2,02	1,39
Mittelwert	103	74	150	1,45	2,02	1,39

Der feststehende Anlagenteil mit Siemens-Modulen (M 55) lieferte pro Jahr auf 1 m² Modulfläche ca. 40 % mehr Energie als die auf der gleichen Anlage montierten Nukem-Module (PS 184 MC 180). Die Differenz ist zumindest teilweise auf die um 26 % höhere Nennleistung pro m² Modulfläche der Siemens-Module gegenüber den Nukem-Modulen zurückzuführen.

Bei der nachgeführten Anlage mit den Siemens-Modulen ergibt sich gegenüber der feststehenden Anlage mit den gleichen Modulen eine um ca. 45% höhere Energieausbeute, die von der Nachführung der Anlage zum Sonnenstand und vom Einfluß der Booster-Spiegel abhängig ist. Bei störungsfreiem Betrieb der nachgeführten Anlage ist die Ausbeute im Jahresmittel sogar um ca. 50% höher, liegt aber auch damit unter den Herstellerangaben, die gegenüber einer feststehenden Anlage einen doppelt so hohen Ertrag versprochen. Dieses Ergebnis wird nur an Tagen mit optimalen Einstrahlungsbedingungen erreicht. Abb. 2 zeigt das Verhältnis der Energieausbeuten beider Anlagenteile bezogen auf 1 m² für einzelne Tage im Jahresverlauf. Gegenüber der feststehenden Anlage mit Nukem-Modulen ergibt sich eine ca. doppelt so hohe Ausbeute.

In Abb. 3 wird die 1998 erzeugte und ins Netz der EVP eingespeiste elektrische Energie, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Monaten, dargestellt. Die nachgeführte Anlage liefert bei direkter Sonneneinstrahlung eine höhere Ausbeute als eine feststehende Anlage. Dabei kann die Effizienz nachgeführter Anlagen durch Behebung aufgetretener Probleme, die auf die hohe Störanfälligkeit der Steuereinrichtung (Ausfallzeiten), die unzulängliche Optimierung der Steuerung (nicht optimale Anpassung an die Einstrahlungsbedingungen und dadurch höherer Eigenverbrauch der Anlage) und die schlechte Abstimmung der Generatorleistung zur Wechselrichterleistung zurückzuführen sind, noch gesteigert werden.

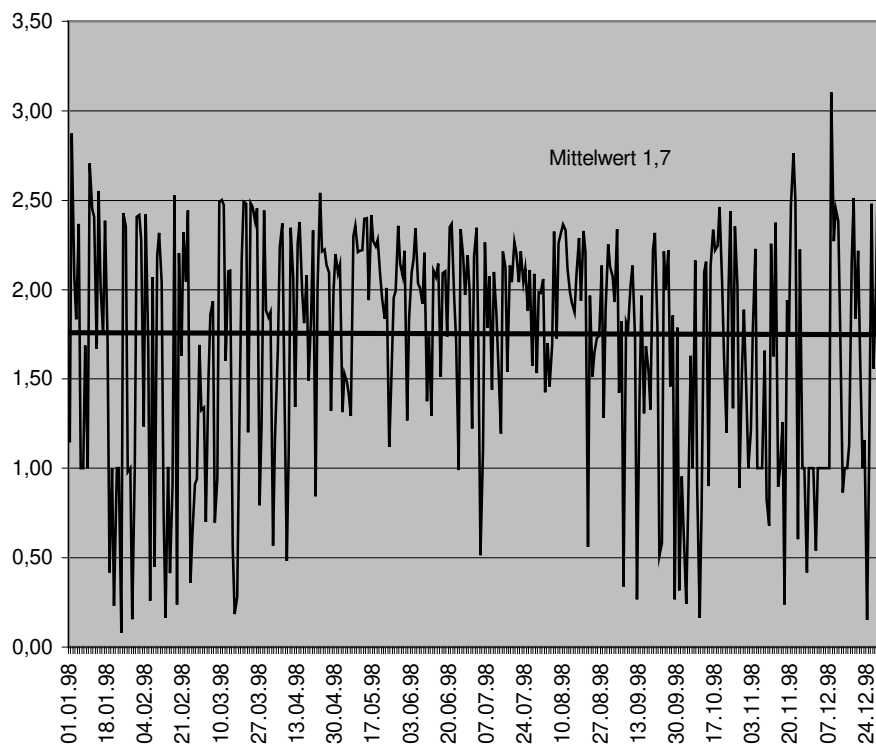


Abb.2: Verhältnis der Energieausbeuten der nachgeführten und der feststehenden bezogen auf 1 m²

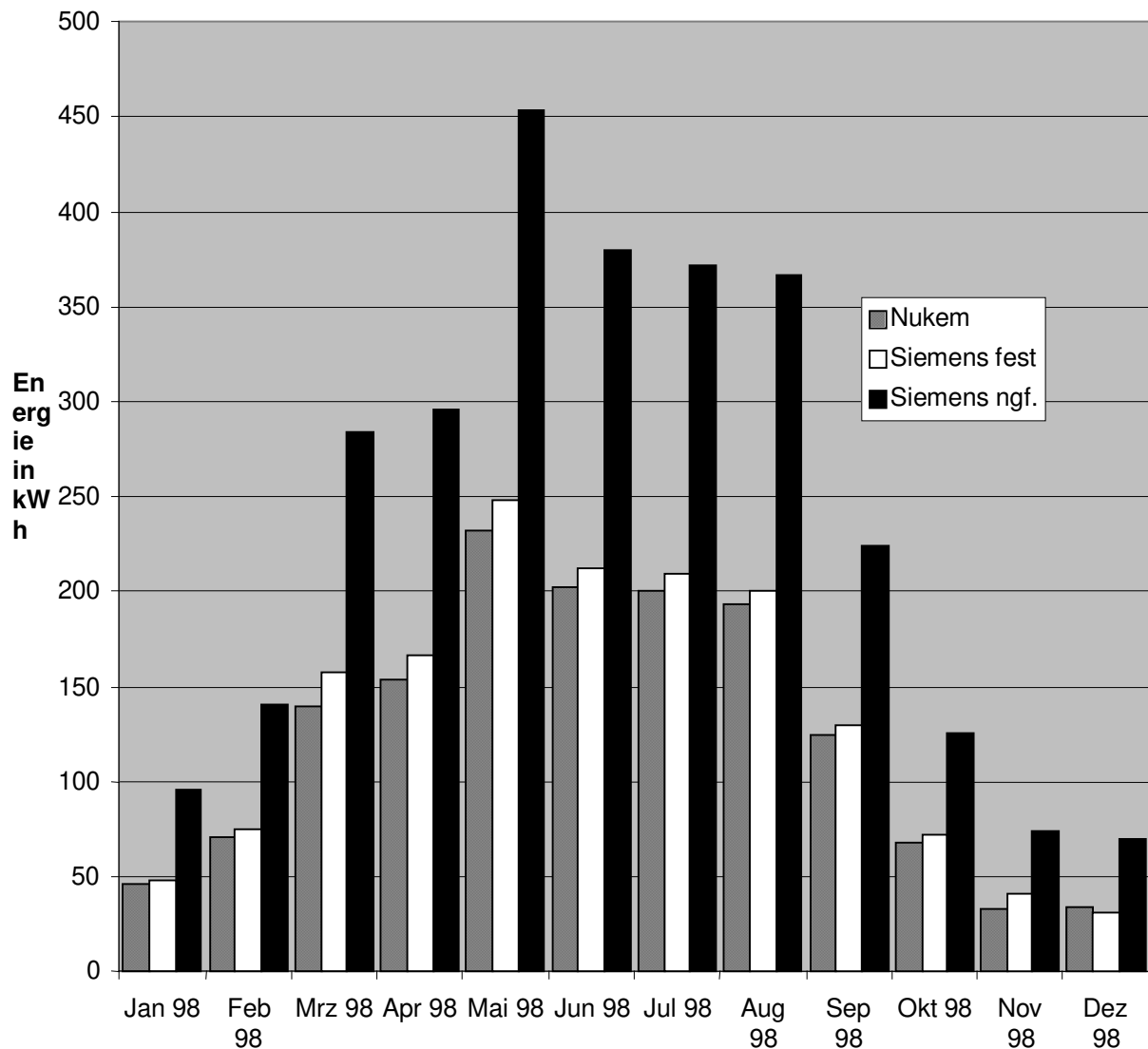


Abb.3: Ins Netz der EVP eingespeiste elektrische Energie im Jahr 1998

Literatur

STRÄBNER, H.; LIERMANN, A.: System fotowoltaiczny dla celów adawczych i dydaktycznych. chemja, dydaktyka, ekologia R1/1996/Nr.1-2, S. 61-64

STRÄBNER, H.; LIERMANN, A.: Eine Photovoltaikanlage für Forschung und Ausbildung. XIV. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Inżynieria procesowa w ochronie środowiska, Universität Opole 1996, Tagungsband S. 211-219

SCHMEER, E.; LIERMANN, A.; SEVERIN, W.; THIELE, W.: Photovoltaik in Lehre und Forschung. Die PV-Anlage der Universität Potsdam. In: Sonnenenergie. 22. Jahrg. (1997), H.2, S. 38-42

STRÄBNER, H.: Elektroenergie aus Sonnenstrahlung – Photovoltaik (1. Teil). In: Arbeit und Technik in der Schule. 8. Jahrg. (1997), H.8, S. 166–169

STRÄBNER, H.: Elektroenergie aus Sonnenstrahlung – Photovoltaik (2. Teil). In: Arbeit und Technik in der Schule. 8. Jahrg. (1997), H. 11, S. 378-383

STRÄBNER, H.; LIERMANN, A.; SCHOLZ, V.: Standörtlich und meßtechnisch bedingte Abweichungen von Meßergebnissen verschiedener Stationen. In: Sonnenenergie. 22. Jahrg. (1997), H.5, S. 46-48

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Ernst Schmeer
Universität Potsdam
Institut für Berufspädagogik/
Berufliche Fachrichtungen Elektro- und Metalltechnik
Postfach 60 15 53
14415 Potsdam

Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung“

K. Soyez, D. Thrän, M. Koller, T. Hermann

Zusammenfassung

Im BMBF-Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung“ wurde die Leistungsfähigkeit dieser neuen Verfahren umfassend untersucht, um ihre praktische Anwendung einzurichten. Aerobe, anaerobe und kombinierte Verfahren zeigten sich gleichermaßen geeignet. Der biologisch behandelte Abfall führt auf der Deponie nur noch zu geringen Gas- und Sickerwasserbelastungen. Als Beurteilungskriterien werden der Sauerstoffbedarf in vier Tagen bzw. die Gasbildung in 21 Tagen empfohlen. Ihre labortechnische Bestimmung wurde für die praktische Anwendung vereinheitlicht. Für den Anlagenbetrieb wurden an drei verschiedenen Anlagen Optimierungen der Behandlungsdauer vorgenommen und detaillierte Abluftuntersuchungen vorgenommen. Diese Daten erlauben auch eine gesamtökologische Einordnung der Verfahren in Hinblick auf eine umweltverträgliche Abfallwirtschaft.

Summary

The Federal Ministry of Education, Science, Research and Technology subsidied an integrated project to study the Mechanical-biological pre-treatment of residual waste to find out their conditions for coming into use. The results showed that aerobic, anaerobic and combined processes can be used to reach low level of contamination on air and seepage after land filling. For evaluation the parameters „breathing activity in 4 days“ and „gas formation in 21 days“ are recommended. To optimize the treatment itself three plants were investigated more deeply, e.g. influences of the processing time were evaluated and the waste-air was analysed detailed. Furthermore the collected data can be used for a cumulated assessment of the Mechanical-biological pre-treatment with regard to an eco-efficient waste management.

Einleitung

Das vom BMBF geförderte Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ (MBV) erarbeitet 1995 bis 1999 unter Koordination der FG Ökotechnologie in 18 Vorhaben die Grundlagen, um eine wissenschaftliche Basis für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit dieser Verfahren zu schaffen. Dabei umfaßt die MBV:

- die mechanische Vorbehandlung zur Stoffstromtrennung und Konditionierung des Abfalls für die biologische Behandlung
- die biologische Behandlung in aeroben, anaeroben und alternierenden Verfahren

Entscheidend für die Umweltrelevanz sind dabei einerseits Ressourcenverbrauch und Emissionen der Behandlungsverfahren, andererseits das langfristige Ablagerungsverhalten des behandelten Abfalls auf der Deponie.

Für die Beurteilung der Verfahren mußten geeignete Parameter ermittelt und standardisiert werden. U.a. wurde die Bestimmungsmethode des Parameters „biologischer Sauerstoffverbrauch in vier Tagen (AT₄)“ vereinheitlicht und soll nach Ansicht des Umweltbundesamtes auch in Zukunft genutzt werden.

Ablagerungsqualität

Die Untersuchung des Deponieverhaltens von gerottetem Abfall stellte eine der zentralen Forschungsfragen dar, zumal hier zu Beginn des Vorhabens so gut wie keine belastbaren Daten vorlagen. Um den hohen Standards der Abfallentsorgung zu genügen, ist zu gewährleisten, daß der Abfall durch die MBV weitgehend stabilisiert wird und so die Gas- und Sickerwasseremissionen gegenüber herkömmlichen Deponien mit unbehandeltem Abfall ganz erheblich reduziert sind.

Das Deponieverhalten wurde in 84 Deponiesimulationsreaktoren (DSR) untersucht, in die insgesamt 22 m³ unterschiedlich vorbehandelte Abfälle eingebaut wurden. Die Reaktoren stellen Deponie-Modellsysteme dar, an denen Aussagen über die Emissionsverläufe und -qualitäten gewonnen werden können.

In den DSR wurden - nach Abtrennung der heizwertreichen Fraktion und einer drei- bis viermonatigen biologische Behandlung - Einbaudichten von über 1 Mg/m³ (trocken) erreicht und nur geringe Setzungen erzielt (Abbildung 1). Die hydraulische Leitfähigkeit des eingebauten Materials liegt bei 10⁻⁶ bis 10⁻⁸ m/s. Nun ist zu prüfen, ob diese Werte auch im Deponiebetrieb erreicht bzw. dort sogar noch verbessert werden können. Wenn die Korngröße des abzulagernden Materials begrenzt ist, können die Gesetzmäßigkeiten und Techniken des Erdbaus angewendet werden können.

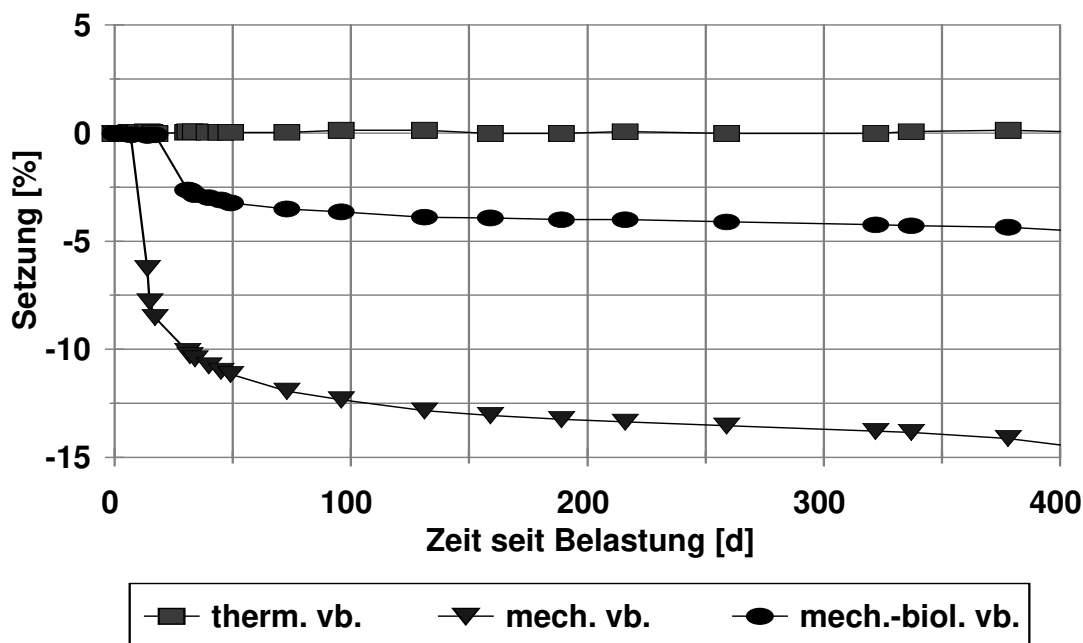


Abb. 1 Relative Oberflächensetzung (Bezugshöhe ca. 3 m) bei unterschiedlich vorbehandelten Restabfällen infolge einer Kiesauflast von ca. 30 kN/m² (Bidlingmaier et al 1999)

In den Simulationsreaktoren war das Emissionspotential der Sickerwasserbelastung von MBV-Material gegenüber dem von unbehandelten Abfällen um ca. 90% reduziert. Weiterhin konnte der bei den Abfällen bestimmte Parameter „biologischer Sauerstoffverbrauch in vier Tagen (AT₄)“ mit den nach der Ablagerung ermittelten Sickerwasserbelastungen korreliert werden (Tabelle 1).

Das Gasbildungspotential von MBV-Material wird auf 20-40 NI/kg, bezogen auf Trockensubstanz (TS) geschätzt und beträgt damit 10 % des Gasbildungspotentials von unbehandeltem Abfall. Für eine 20 m hohe Deponie ergeben sich dann noch Restgasemissionen von weniger als 2 l/m²/h. Das darin enthaltene Methan kann ohne aktive Entgasungsmaßnahmen bereits durch die Methanoxidation in einer gasdurchlässigen Deponiedeckschicht zu 90 -95 % eliminiert werden.

Tab. 1 Wertebereiche relevanter Alternativparameter in Abhängigkeit von der Zielgröße Sickerwasserbelastung (Höring et al 1999)

mittlere Sickerwasserbelastung TOC [mg/l]	TOC [mg/l]	Eluat AT ₄ [mg O ₂ /gTS]
< 600	< 200	< 5
600 – 1000	200 – 300	5 – 20
1000 – 2000	300 – 500	10 – 50
> 2000	> 500	> 20
mittlere Sickerwasserbelastung ges. N [mg/l]	ges. N [mg/l]	Eluat AT ₄ [mg O ₂ /gTS]
200 – 400	30 – 50	< 5
400 - 1000	50 – 100	5 – 20
> 1000	100 – 250	> 20

Beurteilungsparameter

Zur Beschreibung der zu erwartenden Ablagerungsqualität wurden über 20 verschiedene chemische, biochemische und biologische Parameter getestet. Diese sollten vor allem mit den Gas- und Sickerwasseremissionen im Deponiesimulationsreaktor korrelieren, damit sie zur Beurteilung des Behandlungserfolges in den Anlagen verwendet werden können.

Eine Korrelation konnte bei folgenden Parametern nachgewiesen werden:

- Gasbildung in 21 Tagen (GB₂₁)
- Biologischer Sauerstoffverbrauch in vier Tagen (AT₄)
- Organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) im Eluat
- Cellulose-Lignin-Quotient (C/L-Verhältnis)

Der AT₄ (Abbildung 2) erreicht zwar eine geringfügig niedrigere Korrelation mit der Gasbildung im Deponiesimulationsreaktor als der GB₂₁, ist allerdings schneller und unempfindlicher in der Bestimmung.

Das C/L-Verhältnis beschreibt - da sich der Ligninanteil während der biologischen Behandlung praktisch nicht ändert - den Grad des Cellulose-Abbaus. Von Anfangswerten um 4,0 in unbehandeltem Restabfall sinkt er mit zunehmender Stabilisierung auf Werte um 0,5.

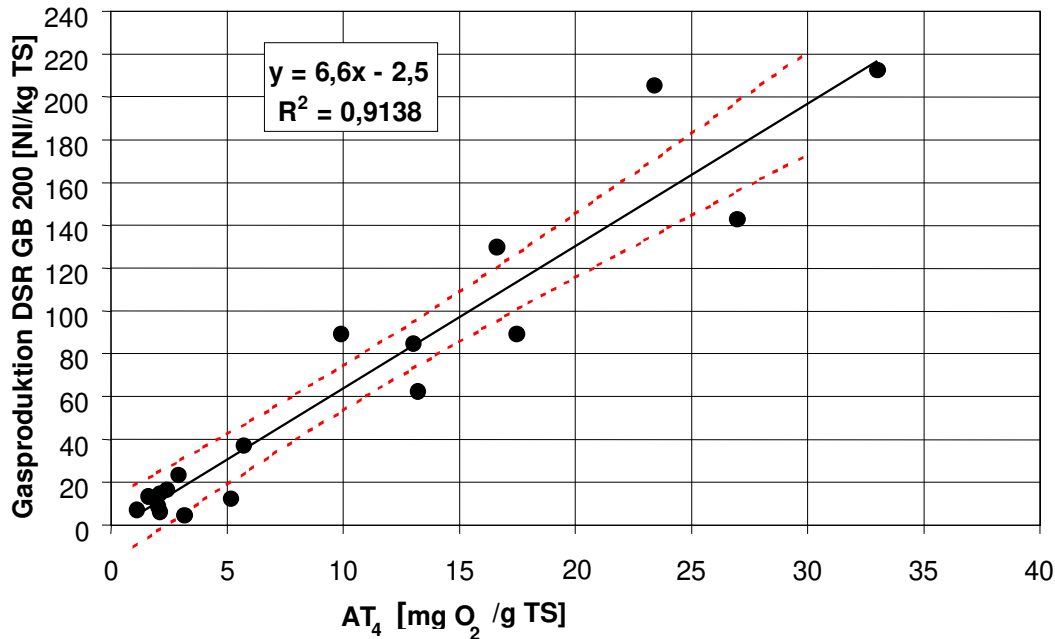


Abb. 2 Korrelation zwischen AT₄ und Gasbildung im Deponiesimulationsreaktor (Höring et al 1999)

Behandlungsverfahren

Zur Beschreibung des Leistungsstandes der MBV wurden sieben verschiedene Verfahrenskonzepte untersucht. Sie umfaßten Anlagen vom 8,5-Liter-Labormaßstab bis zur Großanlage mit einer Kapazität von 150.000 Jahrestonnen (Tabelle 2).

Die große Bandbreite der untersuchten Verfahren, sowohl bei der Stofftrennung als auch bei der biologischen Behandlung, erlaubt nun eine übergreifende Beurteilung der Leistungsfähigkeit der mechanisch-biologischen Vorbehandlung.

- Unabhängig von der Verfahrenskonzeption wird die Abtrennung und energetische Verwertung der heizwertreichen Fraktion als vorteilhaft gesehen.
- Die eingesetzten Zerkleinerungsaggregate unterschieden sich in ihrer Wirkung sehr stark: Während Walzenmühlen kaum eine Zerkleinerung bewirkten, zeigten Rotttrommeln und Hammermühlen bessere Ergebnisse.
- Die zur Stofftrennung eingesetzte große Bandbreite von Siebschnitten (Abbildung 3) ergab keine Hinweise auf besonders geeignete Siebgrößen. Eine signifikante Anreicherung der abbaubaren Organik im Unterkorn läßt sich durch die Kombination aus Zerkleinerung und Siebung nicht erzielen. Die systematische Stofftrennung bedarf daher ergänzender Verfahren (z.B. Windsichtung, Schwimm-Sink-Verfahren).

Tab. 2 Maßstab und gerätetechnische Ausstattung der am Verbund beteiligten MBA

TV	Anlage / Standort	Typ *	Betriebsform	Geräteausstattung	
				Mechanik	Biologie
2/1	Quarzbichl (Kreis Bad Tölz)	G	Umstellungsbetrieb	Walzen- und Schneckenmühle, Homogen. in Rottetrommel, Trommelsieb (150mm), Spannwellensieb (40–60mm), Magnetscheider	Ursprünglich belüftete Tafelmieten; umgestellt auf Rottecontainer und Kleinrotteboxen mit temperaturgest. Belüftung; Nachrotte in unbelüfteter Miete
		V	Batchbetrieb	Hammer-, Kaskaden- und Schneidmühle	einstufige Trockenvergärung (BRV) in Kombination mit verschiedenen Nachrottesystemen (Miete, Rottebox)
2/3	Scharfenberg (Kreis OPR)	V	Batchbetrieb	Hammermühle, Trommelsiebe 20 u. 60mm	Prozeßgesteuerte Rottecontainer
2/4	Horm (Kreis Düren)	G	Einfahren der Anlage (150.000 Mg/a)	Trommelsiebe 350 u. 180 mm Walzenmühle, Hammerbrecher Magnetscheider, Homogenisierungstrommel	gekapselter Rottetunnel; Nachrotte in unbelüfteter Miete auf der Deponie
2/5	Lichtweiß-Institut / TU Braunschweig	L/V	Batchbetrieb (140 l – 14 m ³)	Siebung (80 mm), Zerkleinerung	alternierende Behandlung in speziell konstruierten, statischen oder rotierenden Bioreaktoren
2/6	Dr.-Ing. Steffen (Essen)	V	Batchbetrieb (je 5 m ³)	Shredder (80 u. 150mm)	alternierende Behandlung nach dem 3-A-Verfahren
2/7	BTN (Nordhausen)	L	Batchbetrieb (je 8,5 l)	Naßtrennung	ein- bis dreistufige Vergärung nach dem BTN-Verfahren
2/8	Fraunhofer-Institut (Stuttgart)	L	Batchbetrieb (je 30 l)	Siebung, Windsichter Naßtrennung	zweistufige Vergärung nach dem Schwarting-Uhde-Verfahren

* L = Laboranlage; V = Versuchsanlage; G = Großanlage

- Gemessen an oben beschriebenen Beurteilungsparametern sind alle untersuchten Verfahren in der Lage, in der biologischen Behandlungsstufe bei entsprechender Rottedauer, weitgehend stabilisierte Produkte zu erzeugen. Beim Einsatz gesteuerter Intensivrottesysteme wird dafür ein Zeitraum von 12-16 Wochen benötigt.
- Vergärungsverfahren benötigen eine aufwendigere Stoffstromtrennung. Für die abgetrennten Fraktionen sind geeignete Verwertungswege vorzusehen. Aus der biologischen Behandlungsstufe kommen nur sehr geringe Mengen zur Ablagerung. Diese sind sehr weitgehend stabilisiert. Bei mehrstufigen Verfahren kann auf die aerobe Nachbehandlung verzichtet werden.
- Aerobe Verfahren können - im Gegensatz zu Vergärungsverfahren - abwasserarm betrieben werden.

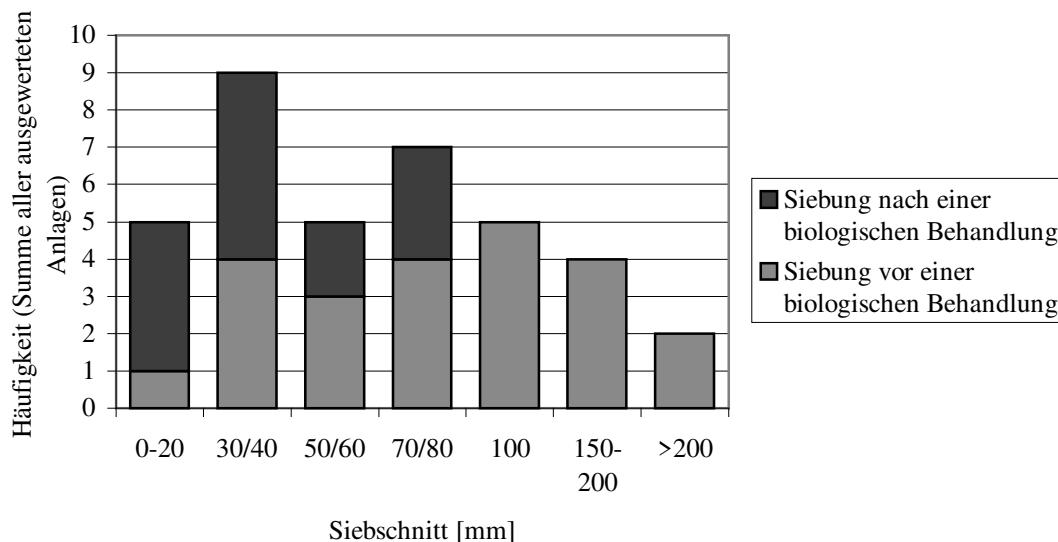


Abb. 3 Häufigkeit von Siebschnitten in Abhängigkeit vom Behandlungskonzept in 22 Forschungs- und Großanlagen zur MBV

Emissionen bei der Behandlung

Zur Bestimmung der Abluftemissionen der MBV wurden von der Universität Hannover fünf großtechnische Anlagen untersucht. Bei aeroben Behandlungsverfahren treten relevante gasförmige Emissionen überwiegend während des Temperaturanstieges zu Beginn des Rotteprozesses auf. Während der ersten zwei Wochen der Behandlung werden daher gekapselte Anlagenkonzepte und geschlossene Abluffassungen empfohlen.

Hinsichtlich der Abluftzusammensetzung wurden Vielstoffgemische aus organischen Komponenten ermittelt, die teilweise bei der Rotte als Zwischenprodukte des Stoffabbaus gebildet werden (Tabelle 3). Durch Biofiltration der Abluft können die Anforderungen der TA Luft eingehalten werden. Zur Einschränkung der organischen Belastung nach dem Stand der Technik wird vorgeschlagen, die NMVOC (Leichtflüchtige organische Kohlenstoffverbindungen außer Methan) zu begrenzen auf:

➤ $\leq 80 \text{ mg Gesamt-C}_{\text{FID}}/\text{m}^3$ im Tagesmittel und $300 \text{ g C/Mg Inputmaterial}$ (Cuhls et al 1999).

Staubemissionen lassen sich durch effektive Trenntechniken auf kleiner 10 mg/m^3 senken. Die Metallkonzentrationen im Abgas liegen weit unter den Vorgaben für Müllverbrennungsanlagen (17. BImSchV).

Für Ammoniak (NH_3), das in der Rotteabluft gefunden und in der TA Luft nicht geregelt ist, werden zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsminderung - z.B. in Form eines vorgeschalteten Biowäschers - empfohlen, da Ammoniak zu Sekundäremissionen von Stickoxiden im Biofilter führt.

Keimuntersuchungen über den Sortierbändern der großtechnischen Anlage in Horm haben zudem gezeigt, daß die Gesamtkeimbelastung der von Wertstoffsortieranlagen ähnelt. Auch die Zusammensetzung von über 90% Pilzen ist vergleichbar. Mit einer mittleren Belastung von 75.000 KBE Schimmelpilzen pro m^3 sind sowohl weitergehende hygienische Maßnahmen als auch organisatorische und technische Schutzmaßnahmen notwendig.

Ermittelt wurde außerdem eine Korrelation der Konzentrationen von Pilzen und Feinstaub der Partikelgröße $2\text{-}5\mu\text{m}$. Wenn diese durch weitere Untersuchungen bestätigt werden kann, lassen sich meßtechnische Vereinfachungen bei Routinemessungen, z.B. im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge erreichen. Dort könnte dann auf die bewährte Meßgröße „Staubgehalt“ zurückgegriffen werden.

Tab. 3 Zusammenstellung von Min./Max.-Konzentrationen und Filterwirkungsgraden für massenrelevante Stoffe der Nr. 3.1.7 TA Luft (Cuhls et al 1999)

3.1.7 TA Luft Klas- se	Komponente	Roh- gas Bas- sum max. µg/m ³	Roh- gas Bas- sum min. µg/m ³	<i>η</i> <i>Bio- filter Mittel</i> %	Rein- gas Bas- sum max. µg/m ³	Rein- gas Bas- sum min. µg/m ³	Roh- gas Horm max. µg/m ³	Roh- gas Horm min. µg/m ³	<i>η</i> <i>Bio- filter Mittel</i> %	Rein- gas Horm max. µg/m ³	Rein- gas Horm min. µg/m ³
1	Isopropylbenzol	45	< BG	5	35	< BG	155	40	38	95	< BG
1	Naphthalin	585	20	55	55	< BG	150	35	71	36	< BG
1	Tetrachlorethen	75	< BG	35	45	< BG	475	47	20	340	42
1	n-Butylacetat	295	< BG	65	180	< BG	980	160	94	130	< BG
1	Dimethyldisulfid	1.155	170	48	805	< BG	560	55	62	100	30
1	Acetaldehyd	3.700	< BG	68*	1.400	< BG	12.00 0	4.100	99	200	21
1	Crotonaldehyd	180	< BG	52	190	< BG	1.500	640	100	< BG	< BG
1	Dichlormethan	945	< BG	-12*	1.235	< BG	210	21	- 83	200	< BG
1	Chloroform	100	< BG	18	122	< BG	110	< BG	51	40	< BG
2	Toluol	695	24	-1*	3.055	27	1.490	460	34	740	300
2	3/4-Ethyltoluol	560	40	49	405	< BG	2.000	230	60	965	80
2	2-Ethyltoluol	195	20	34	185	< BG	2045	80	44	495	50
2	Ethylbenzol	575	35	25*	1.720	25	970	250	42	485	205
2	m/p-Xylol	1.765	95	21	2.370	95	2.990	720	41	1.510	450
2	o-Xylol	685	25	15	560	25	980	200	45	760	156
2	Limonen	9.140	480	90	3.435	< BG	11.27 5	1.300	56	5.850	530
2	Acetonitril	350	< BG	91	33	< BG	2.000	470	69	680	< BG
3	Cyclohexan	70	< BG	- 4	100	< BG	120	40	22	30	< BG
3	n-Decan	435	65	86	125	< BG	2.665	440	64	710	65
3	Aceton	7.600	< BG	83*	6.600	< BG	8.200	3.700	96	330	< BG
3	2-Butanon	5.165	80	81*	2.750	< BG	43.00 0	370	100	630	< BG
3	Ethanol	2.400	< BG	95	1.200	< BG	39.00 0	9.500	100	50	< BG

Bassum 14 Meßpaare, Horm 6 Meßpaare (*: ein Ausreißer nicht berücksichtigt)

Ökologische Gesamtbewertung

Den Vergleich zwischen Behandlungsaufwand und Restemission leistet die ökologische Gesamtbewertung. Verschiedene ökosystemare Gesamtbetrachtungen untersuchten das Belastungsprofil der MBV und anschließender Ablagerung sowohl im nationalen Kontext als auch im Vergleich zur Müllverbrennung. Dabei zeigt sich, daß die Abfallbehandlung und -ablagerung, unabhängig vom Entsorgungsweg, nur zu weniger als 1% an der nationalen Gesamtbelastung (gemessen in den Wirkungskategorien globale Erwärmung, Ozonabbau, Sommersmog, Versauerung, Eutrophierung, kurz- und langfristige Kanzerogene, Humantoxizität und kritischen Volumina) beteiligt ist.

Diese Belastungen lassen sich reduzieren, wobei als wesentliche Einflußfaktoren auf die ökologische Gesamtbeurteilung ermittelt wurden:

- der Herstellungsaufwand der Behandlungsanlagen
- die Rahmenbedingungen beim Einsatz von Energieträgern und bei der Verwertung von ausgeschleusten Stoffströmen

- Verbleib von Einzelsubstanzen mit hohem Wirkungspotential, z.B. FCKW und N₂O

Mit Hilfe der ökobilanziellen Gesamtbetrachtung lassen sich auch ökologische Kompromissituationen innerhalb der MBV-Technik lösen: Beispielweise kann das von der Abfallentsorgung verursachte Treibhauspotential minimiert werden, indem das Optimum aus technischem Aufwand und deponieseitigen Restemissionen ermittelt wird (Abbildung 4).

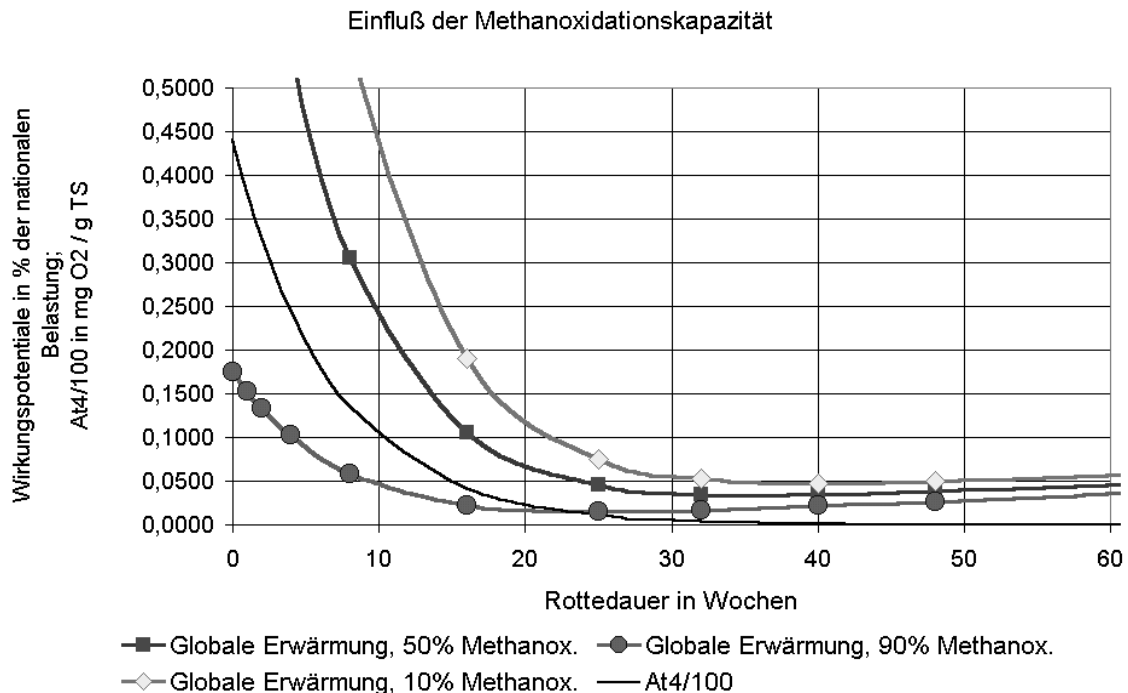


Abb. 4 Einfluß der Methanoxidationskapazität von Deponie-Deckschichten auf den Zusammenhang von Rottedauer und Treibhauspotential

Gegenüber der Müllverbrennung konnte - wie bereits in früheren Untersuchungen - kein eindeutiger Vor- oder Nachteil festgestellt werden. Vielmehr zeigen beide Konzepte charakteristische Belastungsprofile, die sich auf die Umweltkompartimente unterschiedlich auswirken. Damit ist eine abschließende Verfahrensentscheidung nur für die spezifische Einzelsituation möglich, in die sowohl die lokalen Randbedingungen als auch die umweltpolitischen Prioritäten einfließen.

Zuordnungswerte

Bei der Festlegung von Anlagenstandards ist nicht die anlageninterne Verfahrenstechnik, sondern die Umweltverträglichkeit nach der Ablagerung ausschlaggebend.

Der AT₄ liefert, neben den bereits in Tabelle 1 und Abbildung 4 dargestellten Korrelationen zur Sickerwasserbelastung und zum Treibhauspotential, auch Aussagen zur ökosystemaren Einordnung von Restabfällen: Unbehandelter Restabfall mit einem AT₄ von 20-60 mg O₂/gTS ist mit AT₄-Werten von kaum abgebautem Streumaterial aus L-Horizonten von Waldböden vergleichbar. Dagegen entspricht der Abbauzustand der Restorganik im behandelten Abfall demjenigen von humifizierter organischer Substanz in Oberböden (O- und A-Horizonte), die Atmungsaktivitäten von weniger als 6 mg CO₂-C/gTOC aufweist.

Damit sind bei einem AT_4 von maximal $5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$ zusammenfassend folgende Materialeigenschaften zu erwarten:

- geringe, in der Deponie abbaubare Methanemission
- tolerierbare Sickerwasserbelastung
- Abbaugrad vergleichbar mit der organischen Substanz in Oberböden
- Minimierung des aus Behandlungsaufwand und deponieseitigen Methanemissionen entstehenden Treibhauspotentials in der ökologischen Gesamtbetrachtung

Dieser Wert korrespondiert mit einem GB_{21} von maximal 20 NI/ kgTS , einem TOC im Eluat von maximal $200\text{-}300 \text{ mg/ l}$ und einem C/L-Verhältnis von maximal 0,5.

Fazit

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wurde eine fundierte Basis geschaffen, die nun erlaubt, für MBV-Anlagen strenge, auf die charakteristischen Emissionen zugeschnittene Grenzwerte festzulegen, die ökologisch begründet und ökonomisch realisierbar sind.

Mit dem neuen abfallpolitischen Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 alle Siedlungsabfälle zu verwerten, ist darüber hinaus zu entscheiden, wie die MBV – zusammen mit den anderen Entsorgungswegen - in den nächsten zwanzig Jahren so eingesetzt werden kann, daß einerseits eine umweltverträgliche Abfallentsorgung gewährleistet ist, andererseits die Schaffung von hochwertigen Verwertungssystemen und Stoffkreisläufen nicht behindert wird.

Literatur

Alle Literaturquellen sowie die vollständigen Ergebnisse des Verbundvorhabens sind im Tagungsband „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ zusammengestellt, dem auch die hier präsentierten Abbildungen und Tabellen entnommen sind. Er kann bezogen werden bei der FG Ökotechnologie der Universität Potsdam, Park Babelsberg 14, 14482 Potsdam. Fax: 0331 – 9774433. Email: gfried@rz.uni-potsdam.de

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Konrad Soyez
Daniela Thrän
Dipl.-Ing. Matthias Koller
Dipl.-Ing. Tim Hermann
Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
Forschungsgruppe Ökotechnologie
Park Babelsberg 14
14482 Potsdam

Carbohydrates as raw material from a Green BioRefinery Carbohydrates analysis of green plant juices after wet-fractionation of grass

I. Starke, A. Holzberger, B. Kamm, E. Kleinpeter

Zusammenfassung

Grüner Presssaft von BioRaffinerie-Originalrohstoffen (Wiesenmischgras und Luzerne nach einer Nassfraktionierung und der Protein-Abtrennung) wurde mittels Gaschromatographie/Massenspektrometrie untersucht. Die im Presssaft enthaltenen Kohlenhydrate wurden derivatisiert und identifiziert mittels ihrer Retentionszeiten im Gaschromatogramm bzw. ihrer EI Massenspektren im Vergleich mit Daten der reinen Vergleichssubstanzen. Zusätzlich wurden CI Massenspektren zur besseren Charakterisierung der anwesenden Kohlenhydrate herangezogen. Die Kohlenhydrate, die auf diesem Wege identifiziert werden konnten, wurden mittels ‚response signals‘ bezüglich des inneren Standards β -Phenyl-D-glucopyranosid quantifiziert.

Summary

Green juices from Green Biorefinery original raw-material (*wild mixed grass* and *alfalfa* after wet fractionation and protein separation) have been investigated by gas chromatography/mass spectrometry. The Carbohydrates, involved in the green juices, were derivatized and identified by both their retention times in the gas chromatogram and EI mass spectra compared to those of pure reference compounds. Additionally, chemical ionisation mass spectra were recorded for better characterizing of the carbohydrates present. The carbohydrates which could be identified in this way, were quantified by response signals with respect to that of the internal standard β -phenyl-D-glucopyranoside.

Introduction

The Green BioRefinery (figure 1) is a system for whole substantial and energetic utilisation of green plant and waste biomass. The renewable resources, especially grass from an extensive land cultivation, or natural resources and alfalfa from an intensive land cultivation, are an excellent BioRefinery-raw material. Carbohydrates inherent in plant materials are fundamental secondary raw materials beside proteins, amino acids, fibres, hormones, enzymes and dyes etc.

The first step of the technology is the so-called wet-fractionation. This process separates the plant material into its water-insoluble contents (Press Cake) and a carbohydrates- and protein-rich water-soluble fraction (Green Juice or Brown Juice) by using pressure. A carbohydrate-rich juice (carbohydrate fraction) is available after precipitation of the plant protein by acidifying or heating. These juices are an excellent fermentation medium e.g. for the production of lactic acid. Additionally, the carbohy-

drates are suitable for application in pharmaceuticals, surfactants, medicine and building blocks for synthesis (chirality pool) [1].

Problems

In the first step we were looking for an appropriate analytical method that would be able to detect the different single carbohydrates in the juice.

Juice from BioRefinery original raw-material (*wild-mix grass*) after fractionation and protein separation has been investigated by this method. GC-MS (gas chromatography-mass spectrometry) is the method of choice for the identification of small oligosaccharides, especially capillary GC-MS is made a routine technique.

The main problem for us was to optimise the method for the identification and reproducible quantification of derivatized carbohydrates from green juice in a short time.

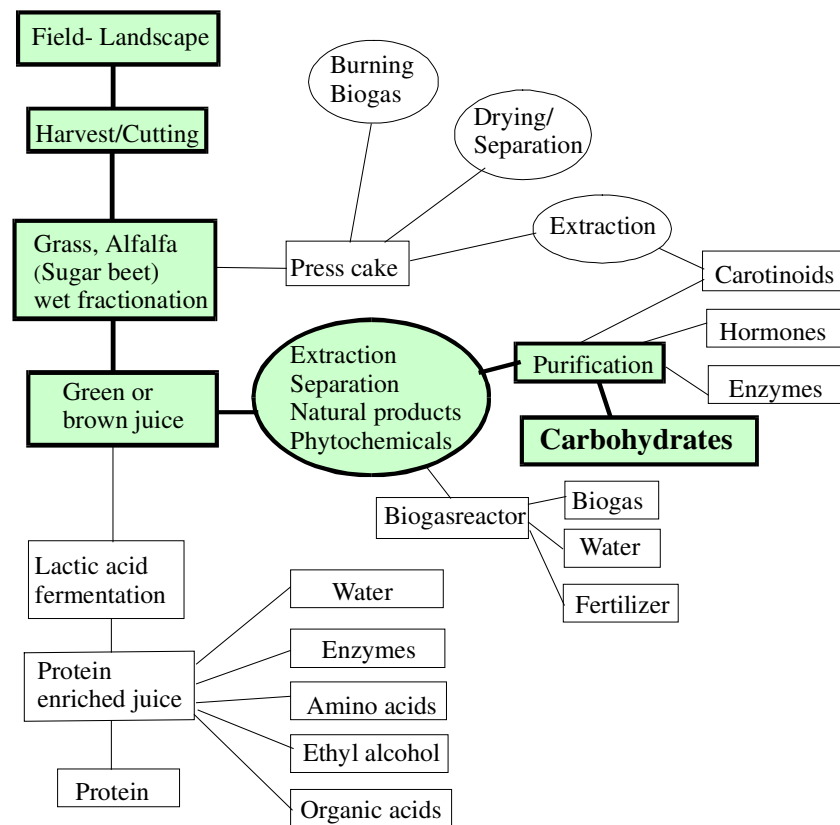


Figure 1: Carbohydrates from a system of a Green BioRefinery (see also Kiel, P. & Kamm in [1])

Raw materials and methods

Raw materials from a Green BioRefinery:

A) *wild mixed grass*

The green juices were obtained from the wild mixed grass of the area Vietnitz/Havelland. The grass was pressed and then the juice heated 10 hr at 80°C and later stored at 5° degree in the refrigerator.

B) *alfalfa*

The alfalfa (*Medicago sativa*) cutted from a field in the region of Selbelang/Havelland was used; the whole plant not only the leafs was used for the analysis. The proteins was separated according to the method *Carrez I* and *Carrez II*. The samples thus obtained were sterilly filtrated and then fast frozen at -18°C .

The sample preparation involves the hydrolysis of the saccharides in TFA; the sugars are dissolved in anhydrous pyridine and treated with HMDS or BSTFA to form the TMS- ether [2]. The saccharides-trimethylsilylethers were identified by their retention time on the GC compared to external standards (as well as their mass spectra). Additionally chemical ionisation spectra were taken for the characterisation. All identified saccharides were quantified by the response relating to an internal standard such as beta-Phenylglucopyranoside [3].

Results and Discussion

In the GC-MS study of the plant samples all components of more than 5% intensity of the peak area of the inner standard were identified.

The chromatogram of the detectable components in a grass mixture is shown in Fig. 2.

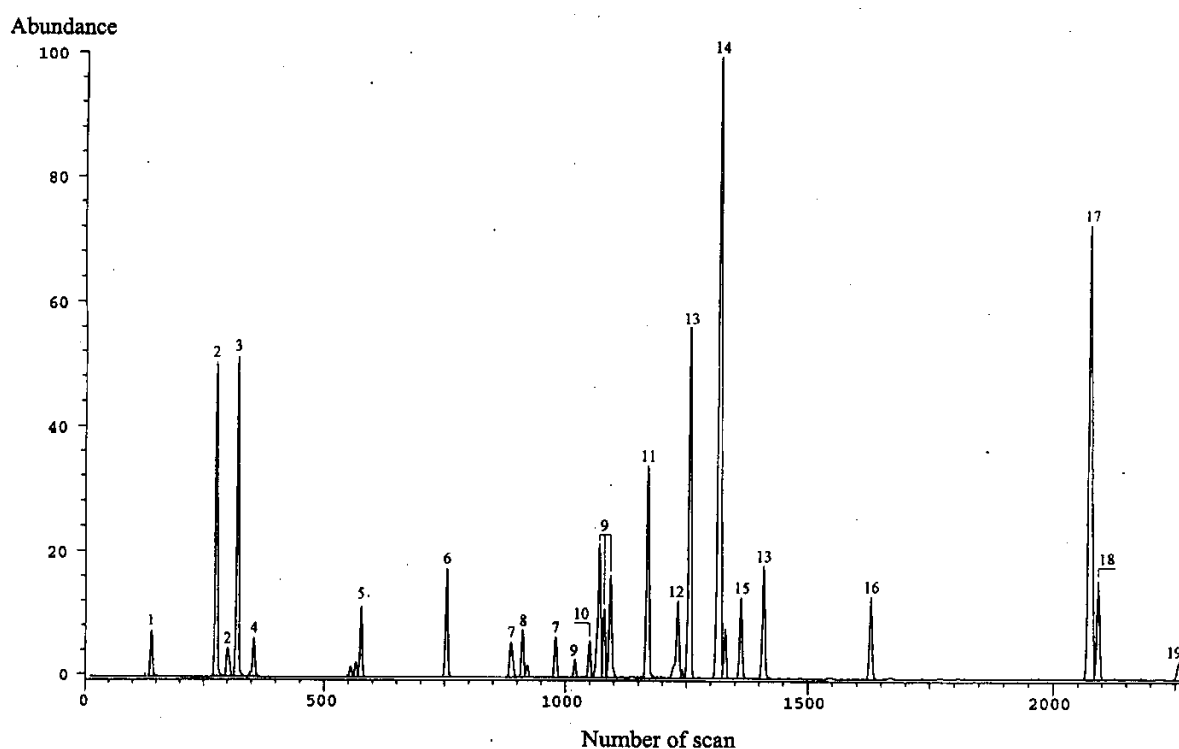


Figure 2: Gas Chromatogram of the TMS derivates of sample A) *wild mixed grass juice* (see also table 1.)

Linear relationships between the integrated peak areas A_{carb}/A_{st} on the total ion current (TIC) and the analyte/standard concentration C_{carb}/C_{st} were found for all carbohydrates (see Table 1). The reproducibility proved to be of very good quality since the repeated estimation of the areas [%] of the different sugars change only $< 10\%$.

Table 1: The results of the quantification of the carbohydrates of nonhydrolyzed and hydrolyzed samples of *wild mixed grass* juice (see also figure 2)

Peak number	carbohydrates	Concentration of carbohydrates in grass juices [mg/l]	
		nonhydrolyzed juice	hydrolyzed juice
2	Glycerol	80	77
5	Erythrose	12	8
6	Rhamnose	17	11
7	Xylose	8	7
9	Fructose	71	102
11	Galctose	52	64
12	Mannose	15	21
13	Glucose	85	91
14	Mannit	173	182
15, 16	Myo-Inositol	44	25
19	Maltose	56	8

All obtained results from *wild mixed grass* juice and *alfalfa* juice are described in [4].

Conclusions

The application of the method GC/MS described above proved to be effective for monosaccharides and carboxylic acids of green juices of wild mix grass and freshly pressed alfalfa juices. These investigations are the first steps for possible industrial application of natural sugars. If sufficient amounts of carbohydrates could be extractet, there is the possibility tot their further use in pharmacy, medicine and cosmetic.

References

KAMM, B.; KAMM, M.: The Green Biorefinery – Principles, Technologies and Products. Proc. 2nd Intern. Symp. Green Biorefinery, October, 13 - 14, 1999, Feldbach, Austria, [SUSTAIN (ed), TU-Graz, Feldbach, Austria, 1999] S. 46-69

DUTTON G.S.: Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry, 28 (1997) 11 - 49

HAVLICEK, S.C.; BRENNAN, M.R.; SCHEUER, P.J.: J. Org. Mass. Spectrom., 5 (1971) 1273 - 76

STARKE, I.; HOLZBERGER, A.; KAMM, B.; KLEINPETER, E.: Qualitative and quantitative analysis of carbohydrates in green juices (wild mixed grass and alfalfa) from a green biorefinery by gas chromatography/ mass spectrometry. Fresenius Journal Analytical Chemistry 367 (2000) 1, 65 - 72

Adressen der Autoren

Prof. Dr. Erich Kleinpeter
Dr. Ines Starke, DC Anja Holzberger
Universität Potsdam
Institut für Org. Chemie und Strukturanalytik
Am Neuen Palais 10
14469 Potsdam

Dr. Birgit Kamm
Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
AG Grüne Bioraffinerie
Kantstraße 55
14513 Teltow-Seehof