

EF Nr. 194390



Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal da l'energia

9300 971-3

**Forschungsprogramm
Biomasse**

Biometh

Methanolproduktion aus Biomasse- Abfällen in der Schweiz

Phase 1: Machbarkeitsstudie

im Auftrag des
Bundesamts für Energiewirtschaft, Bern

August 1996

Schlussbericht der Projektleitung

BIOMETH

Methanolproduktion aus Biomasse- Abfällen in der Schweiz

Phase 1: Machbarkeitsstudie

Schlussbericht

Berichtersteller: S. Stucki, Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI

1. Vorgeschichte, Veranlassung, Randbedingungen:

Treibstoffe werden heute praktisch ausschliesslich aus Erdölprodukten hergestellt. Diese sind in ausreichenden Mengen, mit (zu) niedrigen Preisen und mit einer gut funktionierenden Verteilungsinfrastruktur verfügbar. Allein aus dem Blickwinkel heutiger Verfügbarkeit von Treibstoffen und mittelfristig als gesichert angesehener Erdölreserven ergibt sich keine dringliche Notwendigkeit, über deren Substitution nachzudenken. Die Verbrennung von Erdöl ist jedoch in mehrerlei Hinsicht nicht mit den langfristigen Zielen nachhaltiger Entwicklung vereinbar: Es wird eine nicht erneuerbare Ressource verbraucht und bei deren Nutzung entstehen Abfälle (Abgase) in Mengen, welche die Abbaukapazitäten der Umwelt lokal (verbrennungsbedingte Luftschadstoffe) und global (CO₂) überschreiten.

Die Motivation für die seit ca. 20 Jahren durchgeführten F&E-Programme zum Thema alternative Treibstoffe hat sich über die Zeit gewandelt. Im Prinzip sind jedoch die drei untenstehenden Aspekte unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit alle gleichermassen wichtig:

- Die Verminderung der exklusiven Abhängigkeit des Transportsektors von Erdölimporten. Diese Motivation entstand unter dem Eindruck des Ölschocks von 1973.
- Die Verminderung der lokalen Luftverschmutzung durch Einführung alternativer, sauberer verbrennender Treibstoffe für Verbrennungsmotoren

Inhaltsverzeichnis

1. Vorgeschichte, Veranlassung, Randbedingungen.....	1
2. Die Ziele des Projekts BIOMETH	5
3. Projektabwicklung.....	7
4. Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Projektarbeiten	9
4.1. Rohstoffe	9
4.1.1. Unbelastetes Holz.....	9
4.1.2. Abfallstoffe belastetes Holz, Altpapier, Kunststoffe	9
4.2. Technische Machbarkeit.....	10
4.2.1. Vorbehandlung	11
4.2.2. Vergasung	11
4.2.2.1. Literaturstudie	11
4.2.2.2. Experimentelle Vergaseranlage (II/8)	13
4.2.3. Prozess-Simulation, Methanolsynthese, Gesamtverfahren.....	13
4.3. Marktanalysen für Methanol als Treibstoff (III/1,III/2)	17
4.4. Wirtschaftlichkeit (IV/3).....	18
4.5. Umweltverträglichkeit	21
4.6. Umsetzung, Öffentlichkeitsarbeit, Vorarbeiten für die Realisierung von BIOMETH	22
5. Beurteilung der Ergebnisse der BIOMETH-Machbarkeitsstudie	23
5.1. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	23
5.2. Beurteilung der Realisierungschancen.....	24
Liste der am Projekt BIOMETH Phase 1 beteiligten Partnerfirmen.....	25
Verzeichnis der zitierten BIOMETH-Dokumente	26
Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge	28

oder für zukünftige Antriebssysteme wie Brennstoffzellen. Pionier in dieser Richtung ist vor allem der Staat Kalifornien mit den akuten Luftreinhalteproblemen im Zusammenhang mit dem Autoverkehr.

- Die Einführung von Treibstoffen, welche mit hoher Ausbeute aus erneuerbaren Energien hergestellt werden können und damit die anthropogenen Emissionen von CO₂ reduzieren helfen.

Es ist nicht zu erwarten, dass irgend ein Alternativtreibstoff, welcher das Potential besitzt, die oben aufgeführten Ziele zu erfüllen, heute zu Preisen angeboten werden kann, welche mit Ölprodukten konkurrenzfähig sind. Der Übergang zu einer nachhaltigen Lösung im Strassenverkehr ist ein langer und kostspieliger Prozess, welcher Investitionen in Infrastruktur zur Produktion, Lagerung, Verteilung sowie Nutzung in neuen Fahrzeugtypen erfordert. Die Suche nach Alternativen muss all diese Kosten berücksichtigen. Selbst wenn die Einführung alternativer Treibstoffe durch äussere Kräfte gewaltig gefördert würde (steuerliche Bevorteilung), würde deren Marktpenetration Jahrzehnte dauern. Die Kompatibilität der Alternative mit dem existierenden System könnte für die Machbarkeit des Übergangs von entscheidender Bedeutung sein. Die Einführung eines komplett neuen Systems, wie zum Beispiel solar erzeugter Wasserstoff, welches existierende Technologien und Infrastrukturen der Treibstofflogistik und -nutzung kaum ausnutzen kann, könnte sich aus Gründen der Infrastrukturkosten und der Akzeptanz als nicht machbar erweisen¹.

Im folgenden wird kurz gezeigt, warum wir der Ansicht sind, dass Methanol ein sehr grosses Potential hat, der bevorzugte alternative Treibstoff der nahen und der fernen Zukunft zu werden.

Methanol hat diejenigen Eigenschaften, welche flüssige Erdölprodukte so erfolgreich gemacht haben: es ist bei Umgebungsdruck und -temperatur flüchtig und hat eine genügend hohe Energiedichte (50% der Energiedichte von Benzin) um eine annehmbare Reichweite zu garantieren. Methanol ist ein einfacher Alkohol mit der chemischen Formel CH₃OH. Verbrennungsmotoren können mit reinem Methanol oder mit Methanol-Benzin-Gemischen betrieben werden. Die Motoren müssen bezüglich einiger Materialien und der Zünd-einstellung angepasst werden, wenn mit Gemischen mit mehr als 15% Methanol gefahren werden soll. Die gute Kompatibilität von Methanol mit konventionellen Treibstoffen ist der Schlüssel zur Einführung dieses potentiell sehr sauberen Treibstoffs auf dem Markt, ohne dass dafür eine vollständig neue Infrastruktur bereitgestellt werden muss.

Methanol kann eine wichtige Funktion übernehmen beim Übergang von den heutigen Treibstoffen, ihrer Infrastruktur und den dafür optimierten Autos in ein nachhaltiges zukünftiges System mit erneuerbaren Energien und dafür an-

^{*1} Wer in ein Auto mit neuer Technologie investiert, will nicht auch noch dafür bestraft werden, dass mit dem Auto nur an einigen wenigen Tankstellen Treibstoff getankt werden kann und damit die Reichweite beschränkt ist.

gepassten sauberen Fahrzeugen. Bei der Produktion des Treibstoffs Methanol kann sowohl von fossilen (Erdgas oder Kohle) als auch von erneuerbaren (Biomasse, Abfälle, langfristig auch CO₂ und Solarwasserstoff) Energien ausgegangen werden. Auf der Nutzungsseite kann Methanol in herkömmlichen Verbrennungsmotoren oder, als langfristige Option, in Brennstoffzellenfahrzeugen ohne Schadstoffemissionen eingesetzt werden. Damit ergeben sich sowohl auf der Seite der Produktion, wie auch auf der Seite der Nutzung nachhaltige Perspektiven, welche auf heute existierender Technologie und Infrastruktur aufbauen können (vgl. Abb.1).

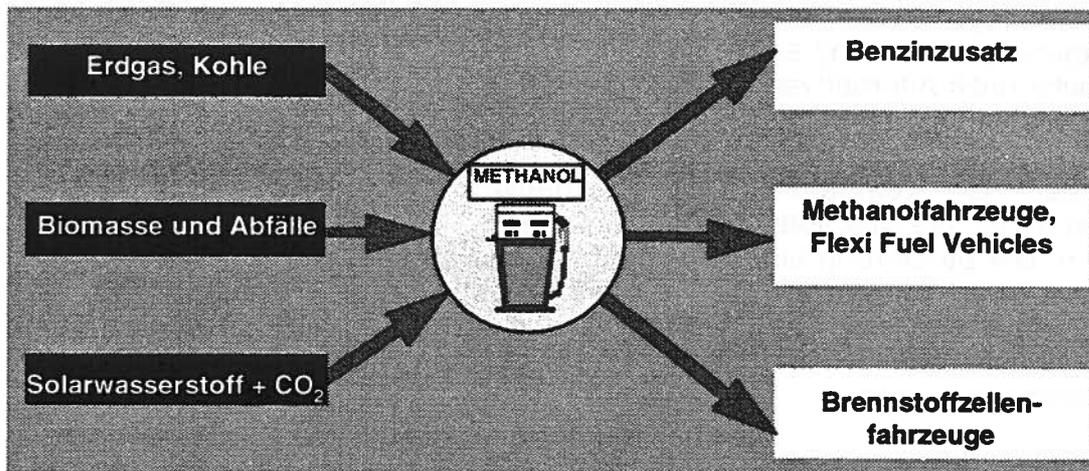


Abb. 1: **Methanol als Übergangstreibstoff.** Methanol kann sowohl aus fossilen Brennstoffen (heutige Technologie), als auch aus erneuerbaren Ressourcen produziert werden. Auf der Nutzungsseite reicht das Spektrum vom Benzinzusatz (ohne grosse Auswirkung auf das Emissionsverhalten eines unmodifizierten Motors) bis zum abgasfreien Brennstoffzellen- Fahrzeug.

Aus den oben erwähnten Überlegungen resultierte die Idee zum Projekt BIOMETH. Es sollte möglich sein, mit Hilfe von an und für sich bekannter Verfahrenstechnik aus einheimischen nachwachsenden Rohstoffen und Abfällen Methanol herzustellen und damit ein System zu demonstrieren, welches das Potential hat, einen Beitrag sowohl zur Förderung erneuerbarer Energien für den Strassenverkehr, als auch zur Entlastung der Luft in den Agglomerationen zu leisten.

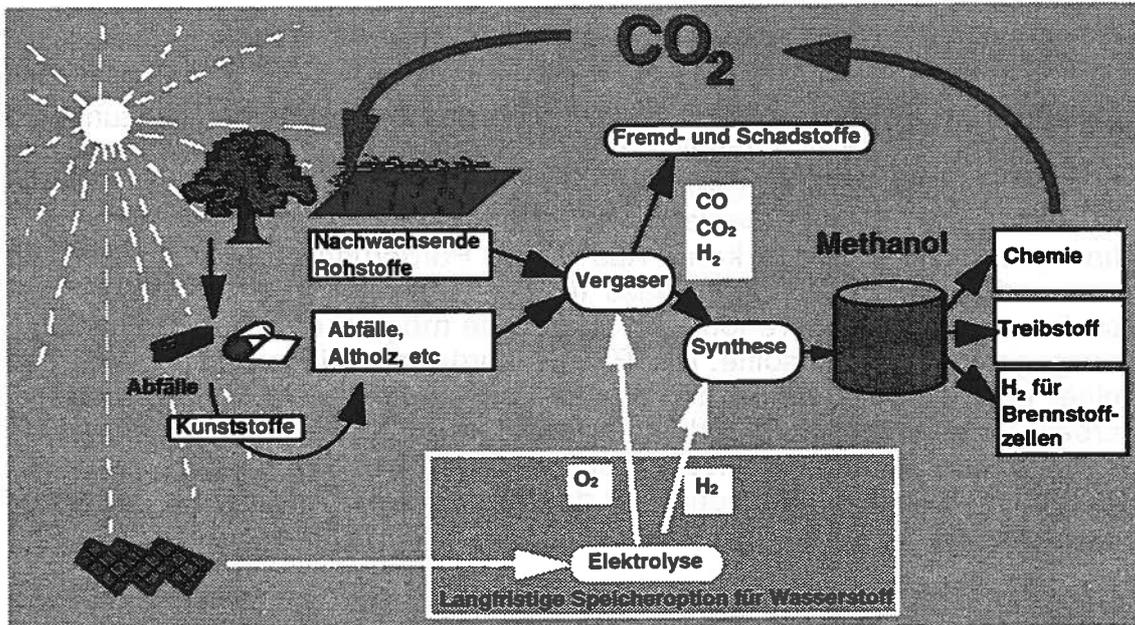


Abb.2: Kohlenstoff-Recycling durch Methanolproduktion aus Holz und Abfällen. Das BIOMETH-Verfahren kann ein breites Spektrum von festen Rohstoffen zu einem einheitlichen Produkt verarbeiten. Methanol findet Anwendung als Treibstoff, bzw. als Treibstoffadditiv, als Chemierohstoff und als Wasserstoffträger. Langfristig ergibt sich die Möglichkeit, solaren Wasserstoff in den BIOMETH-Prozess einzukoppeln. Durch Zudosierung von Wasserstoff zum Rohgas aus dem Vergaser kann die Ausbeute für Methanol um einen Faktor 3 gesteigert werden. Ein Teil des Sauerstoffs aus der Elektrolyse kann als Vergasungsmedium genutzt werden.

2. Die Ziele des Projekts BIOMETH

Das Ziel der Arbeiten ist die Demonstration der Produktion und Nutzung von Methanol aus Biomasseabfällen in der Schweiz. Die produzierte Menge an Methanol sollte dabei so gross sein, dass alle Komponenten eines solchen Systems technisch repräsentativ sind, also von einer Technologiedemonstration gesprochen werden kann. Aus dieser Forderung ergab sich auch die notwendige Randbedingung, dass für die Realisierung des Projekts ausschliesslich von existierender und so gut wie möglich erprobter Technologie ausgegangen werden sollte. Das Projekt wurde in zwei Phasen gegliedert: In einer ersten Phase sollten technische und ökonomische Konzepte ausgearbeitet und deren Machbarkeit abgeklärt werden. Bei positivem Ergebnis sollte in einer daran anschliessenden zweiten Phase das Konzept umgesetzt werden. Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis der Arbeiten an der ersten Projektphase.

Das Ziel der Projektphase 1 war der Nachweis der Machbarkeit der Biomasseverwertung via Vergasung und Methanolsynthese mit heute verfügbarer Technologie. Die Studie sollte alle Entscheidungsgrundlagen für den Bau und den Betrieb einer Demonstrationsanlage zusammentragen.

Die Kriterien für die Machbarkeit wurden wie folgt festgelegt:

- Die technischen Systeme (BIOMETH-Anlage, Nutzungsinfrastruktur, Fahrzeuge) sollen kommerziell verfügbar sein.
- Der Betrieb einer BIOMETH-Anlage soll die laufenden Kosten über die erzielten Erlöse zu decken vermögen.
- Die Investitionen für die Errichtung einer Demonstrationsanlage müssen nicht vollständig amortisiert werden (d.h. die Machbarkeit wird als gegeben angesehen, wenn ein Teil des zu investierenden Kapitals à fonds perdu abgeschrieben werden muss).
- Die Verwertungsrouten BIOMETH soll ökologisch sinnvoll sein (keine zusätzlichen Umweltbelastungen im Vergleich mit alternativen Nutzungswegen der gleichen Rohstoffe).
- Der Betrieb einer BIOMETH-Anlage soll gesichert sein bezüglich Versorgung mit Rohstoffen und Verwertung der Produkte.
- Die Arbeiten der Projektphase 1 wurden so gegliedert, dass die einzelnen Sektoren die Organisationsform einer zukünftigen Betriebsgesellschaft wiedergeben (s. Organigramm).

Im Sektor "Rohstoffe" wurden die für die angestrebte Verwertung einsetzbaren Sortimente (Waldholz, unbehandelte Abfälle aus der

Holzverarbeitung, Altholz, Altpapier, Verpackungs- und Kunststoffabfälle) bezüglich Verfügbarkeit, Transport und Preis analysiert.

Im Sektor "Anlagen, Technik, Betrieb" wurden die Verfahrensschritte (Aufbereitung, Vergasung, Gasreinigung und Synthese) für die Demonstrationsanlage mit heute verfügbarer Technik analysiert und bewertet. Experimentelle Arbeiten mit dem Ziel, für die modellmässige Beschreibung der Anlage notwendige Daten zu ermitteln, wurden im Labor des PSI durchgeführt.

Im Sektor "Produkte" wurde eine Marktstudie für das als Produkt anfallende Methanol erstellt. Speziell wurde untersucht, unter welchen Voraussetzungen Methanol im Treibstoffmarkt eingesetzt werden kann.

Im Sektor "Unterstützende Tätigkeiten" wurden die wirtschaftliche Machbarkeit und mögliche Finanzierungsmodelle analysiert. Eine Studie zur Umweltverträglichkeit einer verstärkten Holznutzung im Wald für die Bereitstellung von Rohstoff für BIOMETH wurde durchgeführt.

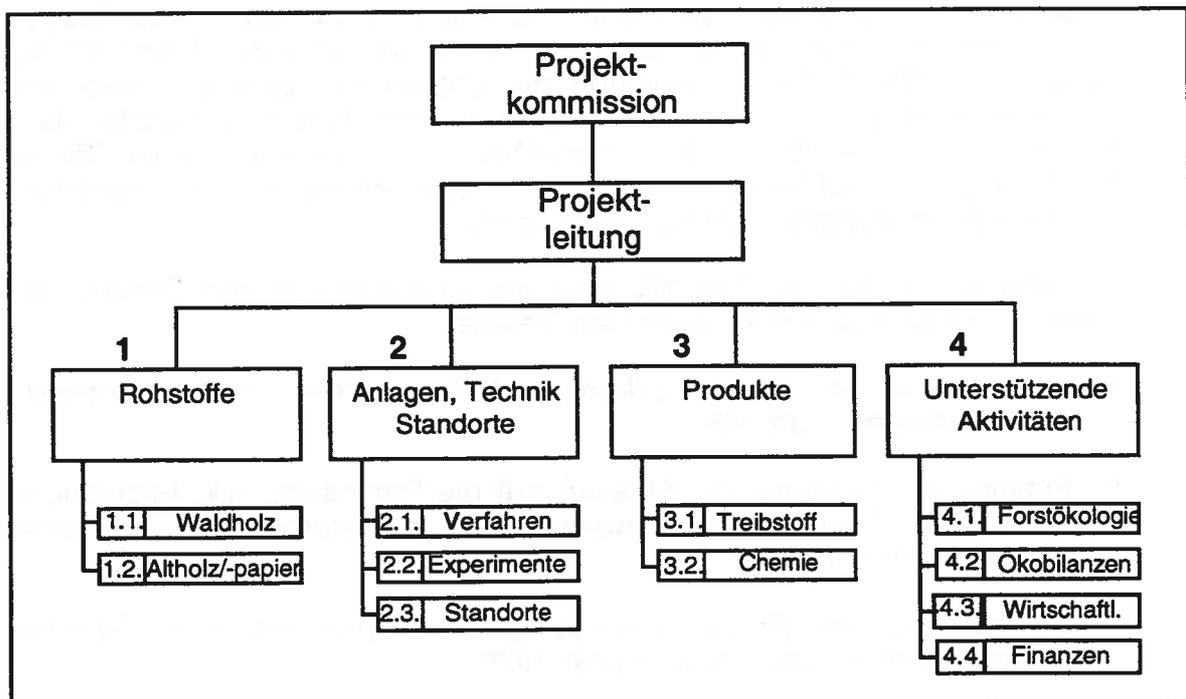


Abb. 3: Projektstruktur BIOMETH Phase 1

3. Projektentwicklung

Zu Beginn der Projektarbeiten gingen wir davon aus, dass der Betrieb einer Demonstrationsanlage vorerst mit unbelastetem Holz (Wald- und Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie) erfolgen würde und allenfalls später für die Verwertung von Altholz und anderen Abfällen nachgerüstet würde. Die Arbeiten konzentrierten sich deshalb im ersten Jahr auf die folgenden Abklärungen: Verfügbarkeit und Preis von Restholz, technische Evaluation der Verfahren (Vergasung und Methanolsynthese) für die Verarbeitung von unbelastetem Holz. Nach einem Jahr sollte eine Vorentscheidung über die Machbarkeit gefällt werden können. Um schon möglichst früh einen quantitativen Anhaltspunkt über das Verfahren, dessen Umsetzungswirkungsgrade und der Kosten zu erhalten, wurde die Firma Lurgi Frankfurt damit beauftragt, eine Variante des Verfahrens zu rechnen und eine sog. Offertstudie zu verfassen (II/3). Die Lurgi-Studie wurde ergänzt durch eigene Studien, vor allem bezüglich Rohstoff-Vorbehandlung (II/5).

Die erste Zwischenbilanz zur Machbarkeit BIOMETH wurde im Frühjahr 94 gezogen (IV/2). Es zeigte sich, dass das Verfahren in der vorliegenden Auslegung mit Rohstoffen, welche franko Anlage teurer als Fr. 100 /t_{atro} zu stehen kommen, nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Damit ist das Konzept BIOMETH für die Nutzung der unbestritten grossen Wald- und Restholzpotentiale der Schweiz heute nicht wirtschaftlich einsetzbar (vgl. Abschnitt 4.1.1.). Aufgrund dieser Einschätzung wurde entschieden, für die Beurteilung der Machbarkeit einer Demonstrationsanlage von der Verwertung von schadstoffbelasteten Abfällen auszugehen.

Die Arbeiten im zweiten Teil des Projekts konzentrierten sich gemäss des Zwischenentscheids auf die folgenden Themen:

- Beurteilung der Verfügbarkeit und Marktpreise von geeigneten Abfallsortimenten (I/2, I/3)
- Einfluss der Nutzung von Abfällen auf die Prozesstechnik, Feststellung technischer Grenzen in der Auswahl der zu verarbeitenden Rohstoffsortimente (II/9, II/6)
- Optimierung der Prozessauslegung hinsichtlich optimaler Rendite, ausgehend vom Referenzfall "Lurgi" (II/7).
- Marktanalyse für Methanol als Treibstoff in der Schweiz (III/1, III/2)

Diese Arbeiten wurden im Sommer 1995 mehr oder weniger abgeschlossen. Die wichtigsten Ergebnisse wurden in einem Kurzbericht zu Händen potentieller Interessenten für die Umsetzung des Projekts zusammengefasst (IV/5). BIOMETH ist nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen realisierbar unter der Bedingung, dass:

- Methanol zu einem mittleren Preis von Fr. 600.- pro Tonne (entsprechend einem Benzin-Äquivalenzpreis von Fr. 0.95 pro Liter) auf dem Treibstoffmarkt abgesetzt werden kann. Dies bedeutet, dass zumindest für den Betrieb einer Demonstrationsanlage auf dem produzierten Treibstoff keine Mineralölsteuer erhoben wird.
- eine à fonds perdu Finanzierung für 30 Mio Fr. (= 50% der Anlageninvestitionen) beigebracht werden kann.
- Von ihrer Zusammensetzung her spezifizierte Abfälle als Rohstoffe mit einer mittleren Entsorgungsgebühr (frei Anlage) von 45 Fr./to verfügbar sind.

Die Frage nach der Erfüllbarkeit der Randbedingungen bestimmte die vor allem in der zweiten Jahreshälfte unternommenen Umsetzungsaktivitäten. Voraussetzung für die praktische Umsetzung der erarbeiteten Daten und Analysen ist die Bildung einer Trägerschaft und die Ausarbeitung von tragfähigen Finanzierungsmodellen für die Realisierung einer Demonstrationsanlage. Es wurde deshalb versucht, Interessenten für eine Umsetzung der BIOMETH - Idee in der Wirtschaft und in verschiedenen Kantonen bzw. Gemeinden zu finden. Diese Aktivitäten sind noch im Gange und werden über den Zeitpunkt des Endes dieser Projektphase hinaus weitergeführt werden. Von zentraler Bedeutung für die Machbarkeit sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Besteuerung der Treibstoffe aus erneuerbaren Ressourcen. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Schlussberichts ist die Entscheidung in den eidg. Räten in der Frage der Besteuerung erneuerbarer Treibstoffe im neuen Mineralölsteuergesetz gefallen. Demnach sollte es möglich sein, die Produkte aus dem Betrieb einer Demonstrationsanlage steuerfrei auf dem Treibstoffmarkt absetzen zu können.

Die Projektphase 1 wurde anlässlich der Sitzung vom 13. Dezember 1995 offiziell abgeschlossen. Eine Projektphase 2 (Realisierung) konnte nicht unmittelbar angeschlossen werden. Es war mit den gegebenen Unsicherheiten (Finanzierung, gesetzliche Rahmenbedingungen) nicht möglich, zu diesem Zeitpunkt über das weitere Vorgehen zu entscheiden. Das PSI verfolgt die BIOMETH-Idee und deren Realisierung in eigener Verantwortung weiter.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Projektarbeiten

Alle Angaben beziehen sich auf eine Referenzanlage, welche 100 Tagedonnen Trockenmasse verarbeitet.

4.1. Rohstoffe

Zum Projektsektor "Rohstoffe" liegen die Dokumente I/1, I/2, I/3 vor.

4.1.1. Unbelastetes Holz

In Rahmen einer forstwirtschaftlichen Studie wurden Potentiale und Kosten für naturbelassenes Holz ermittelt. Der Marktpreis für Holz aus dem Wald (Hackschnitzel) wird langfristig durch zwei Faktoren bestimmt: 1. die minimal aufzuwendenden Erntekosten; 2. der Aequivalentpreis für Heizöl extraleicht. Es wurde versucht, die minimalen Kosten für Hackschnitzel gemäss dieser zwei Faktoren abzuschätzen und mit den heutigen Marktpreisen zu vergleichen. Die Studie kommt zu den folgenden Ergebnissen: Die minimalen Erntekosten hängen wesentlich von der Rückedistanz und von der Topographie des Waldgeländes ab. Mit optimal effizienten Erntemethoden belaufen sich die Erntekosten (gehackt, auf dem Waldweg) je nach topographischen Gegebenheiten auf zwischen 20 und 40 Fr./m³. Um mit einer Ölheizung (bei 35 Fr./100 kg) konkurrenzfähig zu sein, darf der m³ Holzschnitzel im Mittel zwischen Fr.18.- und 31.- kosten, je nach dem, ob in der Rechnung die Zusatzinvestitionen für die Heizung mit berücksichtigt werden oder nicht. Die aktuellen Marktpreise bewegen sich zwischen Fr.15.- bis 50.- pro Sm³. Für den Transport zu einer zentralen Anlage (>50 km Transportdistanz) kommen Fr. 10.- pro Sm³ dazu. Umgerechnet auf Tonnen Trockenmasse ergibt dies folgende Zusammenfassung: Grünschnitzel aus dem Wald: 150 bis über 200 Fr./to; Sägereirestholz: 100 Fr./to.

Da die ermittelten Minimalkosten für unbelastetes Holz nicht alle vorausgesetzten Machbarkeitskriterien für BIOMETH erfüllten (kostendeckender Betrieb), wurden die Arbeiten zu dem Thema mit dem Zwischenbericht (I/1) eingestellt.

4.1.2. Abfallstoffe: belastetes Holz, Altpapier, Kunststoffe

Die Preise bzw. Annahmegebühren, und damit auch die Verfügbarkeiten im Markt für Altholz, Altpapier und ähnlichen gemischten Sortimenten zeigen sehr starke Schwankungen. Die energetische Nutzung steht in Konkurrenz zur stofflichen Verwertung und die Nachfrage für Altholz und Altpapier wird vor allem durch die Auslastung verfügbarer und meist teurer Verwertungsanlagen (stofflich und energetisch) bestimmt. So ist beispielsweise im Zuge

der rasch anziehenden Zellstoffpreise und europaweit neu zugebauter Verwertungskapazitäten Altpapier im Laufe des Jahres 94 innert Monaten zur Mangelware geworden. Eine nicht unbedeutende Senke für Altholz sind Spanplattenwerke in Italien (in der Schweiz darf Altholz nicht zu Spanplatten verarbeitet werden). KVA-Überkapazitäten in verschiedenen Regionen der Schweiz haben dazu geführt, dass Altholz zu Sondertarifen angenommen und als Mittel zum "load management" der Kehrlichtverbrennung eingesetzt wird. Für das Projekt BIOMETH ergibt sich die folgende Einschätzung: Die Potentiale dieser Brennstoffsortimente sind ausreichend. Für Altholz und Altpapierüberschüsse wird mit Annahmegebühren um 0 Fr./to gerechnet. Für gemischte Sortimente aus Kunststoffen, Karton/Altholz wird annähernd mit KVA-Akzeptanzgebühren (100 - 150 Fr./to) gerechnet.

Für die Evaluation der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit wurde von einem Rohstoffmix ausgegangen, welcher als Grundvariante die folgende Zusammensetzung hat: >70% Altholz, <20% Verpackungsabfälle (= Gemisch aus Papier, Karton, Holz, Kunststoff), <10% Kunststoffabfälle, <5% unbelastetes Restholz. Die Zusammensetzung wurde iterativ aus der Sicht der Verfahrenstechnik (s. 2.3.) und der Sicht des Rohstoffmarktes festgelegt.

Die (zumindest theoretisch) anfallenden Mengen von Altholz und deren mittlere Zusammensetzung ist inzwischen durch eine Reihe anderer Studien und einer Vielzahl von Analysen hinreichend dokumentiert für die Abschätzung der Verfügbarkeit dieses Brennstoffs und dessen Schadstoffpotential. Für die Sortimente Verpackungsabfälle und Kunststoffabfälle fehlten diese Daten noch weitgehend. Es wurde daher eine Mengenerhebung bei 84 Firmen aus verschiedenen Branchen durchgeführt. Es wurden dabei Abfälle erfasst, welche von ihrer Zusammensetzung her bekannt, oder zumindest keinen grossen unerwarteten Schwankungen unterworfen sind (im Gegensatz zu Haushaltabfällen). Die Erhebung kommt zum Schluss, dass für die Beschaffung von 10'000 Tonnen pro Jahr dieses qualitativ gut geeigneten Materials mit ca. 50 bis 100 Firmen zusammengearbeitet werden müsste. Im Rahmen dieser Erhebung wurden die zur Diskussion stehenden Abfälle beprobt und die Proben im Hinblick auf die technische Evaluation analysiert (Analysen s. Bericht II/9).

4.2. Technische Machbarkeit

Die Arbeiten konzentrierten sich auf die folgenden Aspekte:

- Grobauslegung der mechanischen (Zerkleinerung, Beschickung des thermischen Vergasers, etc.) und thermischen (Trocknung) Vorbehandlung der Rohstoffe (II/5, II/6).
- Evaluation der Vergasungstechnologien für den Zweck der Bereitstellung von Synthesegas für die Methanolsynthese (II/1) und Abschätzung des

Einflusses schadstoffhaltiger Brennstoffe auf die Leistungsfähigkeit und die Betriebskosten heute verfügbarer Wirbelschichtvergaser (II/9).

- Modellmässige Beschreibung und Grobauslegung der Verarbeitung des Rohgases aus der Vergaseranlage zu Methanol. Vergleich verschiedener Alternativen der Verfahrensführung (II/3, II/4, II/7).
- Experimentelle Arbeiten zur Erfassung von Daten, welche nicht aus der Literatur zugänglich sind (II/8, II/10, II/11).

4.2.1. Vorbehandlung

Die Studie (II/3) berücksichtigt alle Verfahrensschritte von der Lagerung der Rohstoffe, deren mechanische Zerkleinerung, Trocknung bis zur Beschickung des Vergasers. Für eine Reihe von Varianten (verschiedene zur Verarbeitung anstehende Rohstoffe und deren Kombinationen wurden zu Grunde gelegt) wurden die Kosten und der spezifische Energiebedarf (elektrisch und thermisch) gerechnet. Für die Trocknung von naturbelassenem Holz ist ein Leistungsbedarf von ca. 2 MW erforderlich. Die Kosten für die Vorbehandlung bewegen sich, je nach Variante, zwischen 4 und 8 Mio CHF. Eine Aktualisierung der Studie trägt dem definitiv zu Grunde gelegten Brennstoffmix Rechnung (II/6). Die Studie kommt unter anderem zum Schluss, dass eine Erhöhung des Kuststoffanteils im Brennstoff die aufwendige Trocknung der biogenen Anteile (Holz, Altholz) überflüssig machen könnte. Damit könnten die Kosten für die Aufbereitungsanlage um 50% von CHF 8.8 Mio auf 4.3 Mio gesenkt werden.

Im Zusammenhang mit der Festsetzung der Grenzen für die tolerierbaren Kunststoffanteile im Rohstoff wurde versucht, experimentell die zu erwartenden Verklebungsprobleme bei der Beschickung des Vergasers mit kunststoffhaltigen Materialien zu untersuchen. Es wurden in einem einfachen Versuchsaufbau die bei der Förderung von Holz-Kunststoff-Gemischen auf einer heissen Oberfläche auftretenden Kräfte in Funktion der Temperatur gemessen. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind im Bericht (II/11) festgehalten.

Ebenfalls im Zusammenhang mit der Brennstoffaufbereitung wurden im Labor Versuche durchgeführt mit dem Ziel, die bei der Holz Trocknung in offenen Trocknern zu erwartenden Emissionen abschätzen zu können. Die Emission von Formaldehyd nimmt mit der Trocknungstemperatur exponentiell zu. Wegen der Toxizität von Formaldehyd ist ein geschlossenes System der Holz Trocknung zu wählen (II/12).

4.2.2. Vergasung

4.2.2.1. Literaturstudie

Die Evaluation der verfügbaren Vergasertechnologien wurde in zwei Teilstudien durchgeführt. Im ersten Teil (II/1) wurde ein Überblick geschaffen über die Vergasungstechnologie zur Erzeugung von Synthesegas aus Holz und, als Option, Altholz. Ausgehend von Technologien für die Vergasung von Kohle und Biomasse wurde eine Vorselektion der in Frage kommenden Systeme getroffen und diese näher beschrieben. Es handelt sich ausschliesslich um Wirbelschichtverfahren (stationäre und zirkulierende Wirbelschichttechnik) mit Sauerstoff (autotherm) oder Dampf (endotherm) als Vergasungsmedium. In der Studie werden die Vergasungssysteme auf Grund verfügbarer Literaturdaten in einheitlichem Format miteinander verglichen. Beurteilungskriterien sind: Anlagengrösse, Vergasungsdruck, CO₂-Gehalt des Rohgases, Ausbeuten an H₂ und CO, Teer- und Abwassermengen, Energiebilanz.

Vergasersysteme, welche unter Druck arbeiten, wurden wegen technisch ungelöster Probleme (vor allem Beschickung, Gasaufbereitung) und wegen der für eine Demonstrationsanlage zu geringen Anlagengrösse nicht weiter berücksichtigt. Als aussichtsreichste Systeme wurden identifiziert:

- TPS (Thermal Processes Studsvik, Schweden)
- Lurgi (Deutschland)
- BCL (Battelle Columbus Laboratory, USA)

Diese Systeme wurden im zweiten Teil der Studie (II/9) näher charakterisiert hinsichtlich der Vergasung der in der zweiten Phase des Projekts in Menge und Qualität definierten und näher untersuchten Abfallbrennstoffe: >70% Altholz, <20% Verpackungsmaterial (Gemisch aus Papier/Karton, Holz und Kunststoff) <10% Kunststoffabfälle aus der Kunststoff - verarbeitenden Industrie, <5% unbelastetes Holz und Restholz). Für die Zusammensetzung der Abfallbrennstoffe wurde wenn möglich von bekannten Durchschnittswerten (Altholz, Altpapier, etc.) ausgegangen. Für die Sortimente "Verpackungsabfälle" und "Kunststoffabfälle" wurden repräsentative Proben von verschiedenen potentiellen Lieferanten gezogen und analysiert. Beim Einsatz von Holz-Kunststoffgemischen in einer Vergaseranlage muss wegen deren unterschiedlichen Zusammensetzung auf ein kontrolliertes und konstantes Mischungsverhältnis der beiden Komponenten geachtet werden.

Der Stand des Wissens über den Einfluss von schadstoffbelasteten Ausgangsmaterialien (Altholz, Verpackungsabfälle, Kunststoffe) auf den Vergasungsprozess wurde für verschiedene Vergasertypen zusammengetragen und durch eigene Rechnungen und die Auswertung veröffentlichter Versuchsergebnisse ergänzt. Die Vor- und Nachteile der nach dem Prinzip

der zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS) funktionierenden Vergasertechnologien von Lurgi, BCL und TPS für die vom Projekt gestellten Aufgaben wurden erarbeitet. Die wesentlichen Resultate der Studie sind:

Im Gegensatz zu unbelastetem Holz ergeben sich bei der Vergasung des Abfallgemisches deutliche Vorteile für den ZWS-Vergaser von Lurgi. Das TPS-Verfahren weist gegenüber der ZWS von Lurgi Nachteile (hohe Teerkonzentrationen im Rohgas) und grössere Unsicherheiten auf. Ähnliches gilt für das BCL-Verfahren. Wenn die schlechte Gasqualität durch nachgeschaltete thermische Reformierung verbessert werden muss, dann verbraucht das nachgeschaltete Verfahren gleich viel Sauerstoff wie die einstufige Vergasung in der Lurgi-ZWS.

Für den Einsatz mit Abfallstoffen müssen die Vergaser konstruktiv geändert werden. Es wird mit nur geringfügigen Zusatzkosten (~3%) für einen mit dem Abfallbrennstoffsortiment kompatiblen Vergaser gerechnet.

Für eine definitive Beurteilung der für die Vergasung von Abfällen nötigen Anlagenmodifikationen (inklusive Gasaufbereitung und Abwasserbehandlung) sind Versuche notwendig. Diese sollen in der vom PSI aufgebauten Laboranlage, und, bei einer positiven Entscheidung über die Realisierung einer BIOMETH-Demonstrationsanlage, in einer Pilotanlage des Anlagenlieferanten erfolgen.

In der Studie werden die zu erwartenden Reststoffflüsse und deren Zusammensetzung abgeschätzt. Diese werden für die Wirtschaftlichkeitsanalyse (Entsorgungskosten) eingesetzt.

4.2.2.2. Experimentelle Vergaseranlage (II/8)

Im PSI wurde im Laufe des Projektes eine Versuchsanlage aufgebaut, welche zur Abklärung spezifischer Fragen im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Brennstoffsortiments auf die Vergasung eingesetzt werden kann. Im untersten Teil eines 6.7 m langen, beheizbaren Rohrreaktors befindet sich der eigentliche Wirbelschichtreaktor, in welchem Sägemehl mit Sauerstoff und Wasserdampf, bzw. mit Luft vergast wird. Die darüber liegenden Rohrstöße dienen als Verweilzeitstrecke und können auch wahlweise für die Installation und den Test von Filtern, Katalysatoren etc. zur Nachbehandlung des Rohgases eingesetzt werden. Die chemische Zusammensetzung des erzeugten Gases kann an verschiedenen Stellen im Reaktor on-line hinsichtlich seiner Hauptkomponenten analysiert werden. Für Spurenanalysen werden Gas- und Feststoff-Proben entnommen. Das Gas wird nach Abscheidung der Asche in einem Zyklon über Dach abgefackelt. Die Anlage kann mit Brennstoffmengen von zwischen 2 und 30 kg/h betrieben werden. Nach einigen zeitraubenden Anfangsschwierigkeiten funktioniert die Anlage einwandfrei und liefert reproduzierbare Werte für die Gaszusammensetzung bei definierten Einstellungen der Betriebsparameter.

Detaillierte Untersuchungen zur Vergasung von schadstoffbelasteter Abfallbiomasse werden im Rahmen einer Dissertation durchgeführt.

4.2.3. Prozess-Simulation, Methanolsynthese, Gesamtverfahren

Die technischen Abklärungen zu den einzelnen Verfahrensschritten haben zu einer innovativen Verfahrensvariante geführt, welche der (vergleichsweise geringen) Grösse der Anlage und den spezifischen Randbedingungen des Standorts Attisholz (gekoppelte Stromerzeugung) Rechnung trägt /6/. Die Firma Lurgi wurde 1993 mit einer Offerstudie betraut, um eine den Randbedingungen von BIOMETH angepasste Verfahrensvariante zu bilanzieren und die Investitionskosten zu ermitteln (11/3).

Das Verfahrensfliessbild, welches in Absprache mit dem Projektteam von Lurgi vorgeschlagen wurde, ist in Abb. 4 dargestellt. Die Vorbehandlung der Rohstoffe wurde in der Lurgistudie nicht berücksichtigt (s. Abschnitt 4.2.1.)

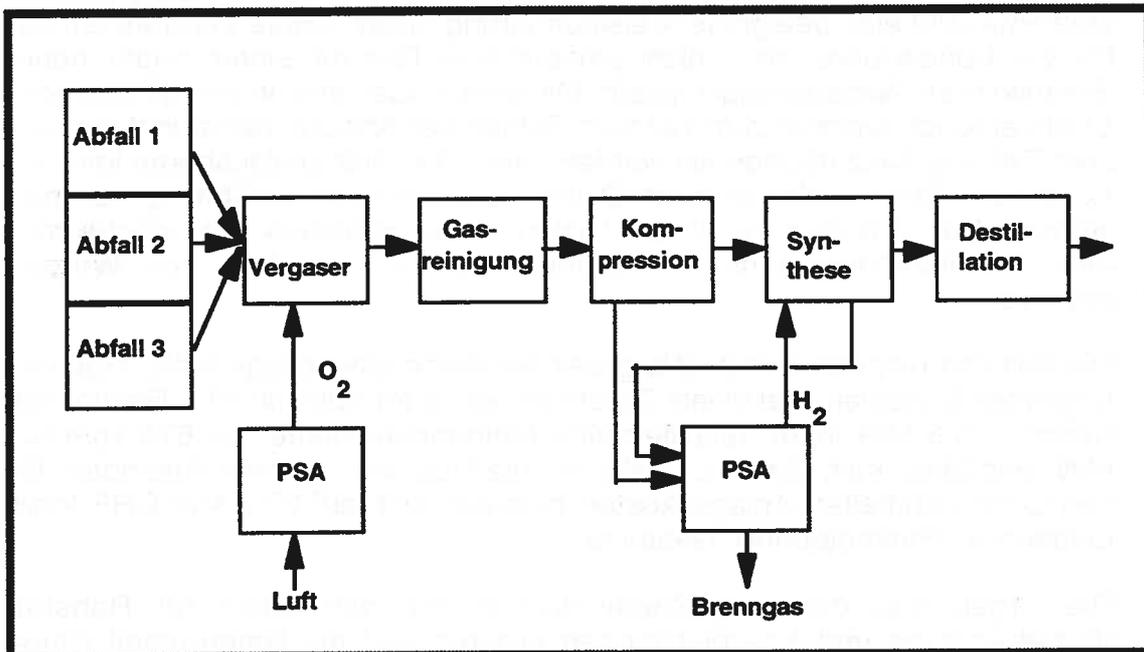


Abb. 4: Anlagenfliessbild für die BIOMETH-Demonstrationsanlage. Die Abfälle werden über getrennte Vorbehandlung in den Vergaser eingespiesen. Die Rohgase werden gereinigt, komprimiert und der Synthese zugeführt. Die Anlage beinhaltet zwei Gastrennungs-Apparate (PSA), welche einerseits Sauerstoff zur Vergasung aus der Luft abtrennen, andererseits den Wasserstoff im gereinigten Rohgas anreichern. Das die PSA 2 verlassende Brenngas kann zum Betrieb eines Gasmotors oder einer Gasturbine eingesetzt werden.

Im Vergaser, welcher nach dem Prinzip der zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS) funktioniert, wird der Rohstoff mit einem Gemisch von Sauerstoff und Dampf bei 800 bis 900°C umgesetzt. Der Sauerstoff für die Vergasung wird an Ort und Stelle über eine Druckwechseladsorptionsanlage (PSA) aus Luft gewonnen. Das heisse Rohgas wird über einen Wärmeaustauscher mit Dampferzeuger abgekühlt, bei ca. 300°C gefiltert und anschliessend in einer Serie von Wäschern von Fremdanteilen (Ammoniak, Salzsäure, Teere, Schwefel etc.) gereinigt. Der gesamte Vergasungsprozess entfernt alle nicht verwendbaren Anteile im Rohstoff und produziert dabei feste (Asche, Filterstaub) und flüssige (Waschwasser) Rückstände, welche entsorgt werden müssen.

Das zu ungefähr gleichen Teilen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und zusätzlich ca. 10 Vol.-% Methan bestehende Reingas wird in einem Verdichter auf den Synthesedruck von 25 bar komprimiert. Im katalytischen Synthesereaktor entsteht aus Wasserstoff und CO, bzw. CO₂ Methanol. Methan wird nicht umgesetzt. Damit der Syntheseprozess optimal läuft, muss der Wasserstoff in der Gasmischung vorgängig angereichert werden. Diese Anreicherung wird im BIOMETH-Verfahren über eine Wasserstoff-PSA und eine geeignete Kreislaufführung erzielt. Diese Verfahrensweise hat zur Konsequenz, dass nicht umsetzbares Gas mit einem relativ hohen Brennwert als Nebenprodukt anfällt. Mit diesem Gas wird in einem Gasmotor Strom erzeugt, welcher zum Teil zum Betrieb der Anlagen gebraucht wird und zum Teil ans Netz abgegeben werden kann. Die Methanolausbeute kann auf Kosten der Stromausbeute durch Optimierung der Kreislaufführung maximiert werden. Das aus dem Synthesekreislauf auskondensierte Methanol wird in einer Destillationskolonne von Nebenprodukten, vor allem von Wasser, gereinigt.

Die Bilanzierung der Anlage (Vergaser bis Reinmethanollagertank) ergab die folgenden Eckdaten: Bei einem Durchsatz von 4 t/h Holz mit 10% Restfeuchte (entspr. 18.5 MW input) resultiert eine Methanolausbeute von 675 kg/h (4.6 MW) und 3600 kg/h Gas (10.6 MW) für die Nutzung in einem Gasmotor. Die von Lurgi ermittelten Anlagenkosten belaufen sich auf 27.2 Mio CHF (ohne Leittechnik, Elektrotechnik, Gebäude).

Die Ergebnisse der Lurgi-Studie wurden mit den Daten für Rohstoff-Vorbehandlung und Energiebilanzen ergänzt und als Referenzfall ("base case") für die erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendet (II/4, IV/2). Es zeigte sich, dass mit der zu Grunde gelegten Auslegung der Anlage und den ermittelten Rohstoffkosten Methanol für den Verkehrsbereich nur knapp und ohne Verzinsung und Amortisation des eingesetzten Kapitals kostendeckend produziert werden kann, wenn von unbelastetem Holz als Rohstoff ausgegangen wird. Diese Situation führte im Frühjahr 94 zur Entscheidung des Projektteams, die Arbeiten neu auszurichten auf die Nutzung günstiger Rohstoffsortimente (Abfälle) und auf verbesserte und optimierte Anlagenauslegung.

Für die Optimierung der Verfahrenstechnik wurde ein Anlagenmodell erstellt, welches mit Hilfe einer Computersimulation der einzelnen Verfahrensschritte andere als in der Lurgi-Studie gewählte Betriebszustände der Anlage (z.B. Synthesedruck, Kreisgas- und Teilstromverhältnisse, Stöchiometrie im Synthesereaktor, etc.) simulieren kann. Das grundsätzliche Fließbild der BIOMETH-Anlage (Verzicht auf CO₂-Abtrennung aus dem rohen Synthesegas, Stöchiometrie-Einstellung über Wasserstoffanreicherung in einem Teilstrom, Nutzung des nicht chemisch umgesetzten energiereichen Restgases für die Stromproduktion) sollte dabei nicht in Frage gestellt werden.

Das BIOMETH-Verfahren wurde durch eine stationäre Fließbildsimulation modelliert, damit der Einfluss verschiedener Schaltungen und frei wählbarer Prozessparameter auf das Gesamtergebnis abgeschätzt werden kann. Im Vordergrund standen die Fragen nach dem optimalen Betriebsdruck, die optimale Methanolausbeute, und die Sensitivität der Syntheseausbeute auf verschiedene Szenarien für den Brennstoffinput. Für die Gesamtausbeute entscheidende Apparate im BIOMETH-Verfahren sind neben dem Vergaser vor allem die Anlagenteile für die Methanolsynthese (Kompression, Gastrennung zur Stöchiometrie-Einstellung und Synthesekatalysator bzw. -reaktor). Für die Modellierung des Methanolsynthesereaktors wurden experimentell in einem eigens am PSI aufgebauten Teststand kinetische Daten eines heute verfügbaren CO₂-toleranten Katalysators ermittelt (II/10). Diese experimentellen Daten, zusammen mit gerechneten Daten von Lurgi, bildeten die Basis für eine Ausgleichsrechnung, mit deren Hilfe eine empirische Korrelation zwischen Input und Output des Reaktors abgeleitet wurde. Mit Hilfe des Modells wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die Outputs für praktisch alle denkbaren Gaszusammensetzungen, wie sie mit verschiedenen Inputs und Betriebsbedingungen eines Vergasers theoretisch möglich sind, berechnet. Die Analyse ergibt, dass in der Mehrzahl der so gerechneten Fälle mit einer Ausbeute von 250 kg Methanol pro eingesetzter Tonne Trockenmasse gerechnet werden kann. Diese Ausbeute ist geringfügig höher, als in der Offertstudie von Lurgi gerechnet wurde. Es zeigte sich, dass die Ausbeute relativ wenig sensitiv auf die Variationsbreite der Inputvariablen ist (II/7).

4.3. Marktanalysen für Methanol als Treibstoff (III/1,III/2)

Die ersten Abschätzungen der Wirtschaftlichkeit der Methanolproduktion aus Biomasseabfällen nach dem Verfahren BIOMETH zeigten, dass eine Demonstrationsanlage nur dann wirtschaftlich betrieben werden kann, wenn für das produzierte Methanol ein Preis in der Gegend von 600 Fr./to (+ Mwst.) erzielt werden kann (600 Fr./to entspricht einem Benzinpreis von 0.93 Fr./l). Der Weltmarktpreis für Methanol bewegte sich lange Zeit um die 150 \$/to, stieg gegen Ende 94/Anfang 95 auf über 600 \$/to und hat sich seitdem wieder auf den langjährigen Mittelwert eingependelt. Es wird auf absehbare Zeit nicht

möglich sein, Methanol aus festen Rohstoffen in Konkurrenz zu Grossanlagen auf der Basis billigen Erdgases zu Welthandelspreisen zu produzieren. Daher gehen wir für BIOMETH davon aus, dass der Minimalpreis von 600 Fr./to mittelfristig nur für die Treibstoffanwendung erzielt werden kann. Vorausgesetzt wird hier, dass Methanol aus Abfallbiomasse von der Treibstoffsteuer wird ausgenommen werden können. Dies wird nach dem neuen Mineralölsteuergesetz für Produkte aus einer Demonstrationsanlage möglich sein.

Die für BIOMETH ausgearbeitete Marktstudie ermittelte die Daten zum heutigen Treibstoffmarkt und Methanolmarkt in der Schweiz. Methanol wird heute kaum als Treibstoff eingesetzt. Es wurde versucht, Methanol gegenüber anderen Alternativtreibstoffen (RME, CNG, Kompogas, LNG, LPG, Elektrizität, Ethanol)* bezüglich Kundenfreundlichkeit, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Sicherheit zu situieren. Diese Analyse zeigt für Methanol ein durchaus positives Bild (III/1).

Im Rahmen der Marktstudie wurde auf Grund von eigens durchgeführten Befragungen ein Kundenprofil für die Nutzung von Methanol als Treibstoff aufgestellt. Demnach sind für die Einführung von Methanol in den Treibstoffmarkt verschiedene Modelle denkbar:

1. Zumischung zu Benzin. Hierzu wurden Gespräche mit Mineralölgesellschaften (v.a. Shell) in der Schweiz geführt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, innerhalb der gültigen Benzinspezifikationen bis zu 3% Methanol zum Benzin zuzumischen (M3). Es besteht bei der Mineralölindustrie kein grosses Interesse, das Methanol zu übernehmen, da Methanol nur mit fast ebensogrossen Mengen lösungsvermittelnder Additive zugemischt werden kann. Zudem müssten die Installationen an den Lagertanks der Tankstellen modifiziert werden.

2. Einsatz von M100 (reines Methanol) für den Betrieb von Fahrzeugen in privat betriebenen Flotten. Hierzu wurde eine Umfrage in verschiedenen Branchen durchgeführt mit dem Ziel, für BIOMETH attraktive Kundensegmente zu ermitteln. Aus der Erhebung ergibt sich u.a., dass ca. 1/3 der Befragten Methanol als Treibstoff einsetzen würden, wenn dies wirtschaftlich wäre.

3. Einsatz im Privatverkehr als Treibstoff für sog. "flexible fuel vehicles" (FFV, Fahrzeuge, welche sowohl mit Benzin, als auch mit M85 betankt werden können). Solche Fahrzeuge wurden vor allem von der US Autoindustrie entwickelt, wären aber prinzipiell auch von europäischen Herstellern lieferbar. Vorteil: Einführung setzt kein flächendeckendes Tankstellennetz voraus, Kunden sind ökologisch bewusste Privatpersonen. Da es für diese Art von

* RME = Raps Methylester, CNG=Compressed Natural Gas oder komprimiertes Erdgas, Kompogas=wie CNG, aber erneuerbar aus Bioabfällen gewonnen, LNG,LPG =verflüssigtes Erdgas bzw. Propangas, Ethanol: durch Vergärung stärkehaltiger landw. Produkte

Übergangslösung heute noch keinen Markt gibt, werden FFV's heute nicht serienmässig produziert.

Sowohl beim Modell FFV, wie auch bei M100-Fahrzeugen (vorwiegend Nutzfahrzeuge) müsste BIOMETH eine ausreichend grosse Nachfrage schaffen, um die Automobilindustrie aktivieren zu können. Aus heutiger Sicht ist dies ein schwieriger Punkt und beeinflusst die einzuschlagende Strategie für die Markteinführung.

Damit für den Kunden keine zusätzlichen Kosten und Unsicherheiten entstehen, wird schwerpunktmässig die Strategie verfolgt, Methanol dem normalen Benzin zugemischt zu verkaufen. Für Konzentrationen bis zu 15% Methanol sind dafür gemäss Aussagen namhafter Fahrzeughersteller zwar keine Modifikationen nötig, allerdings entspricht M15 nicht der gültigen Treibstoffnorm.

4.4. Wirtschaftlichkeit (IV/3)

Die aus den Technologiestudien der zweiten Runde resultierenden Daten wurden dazu verwendet, die betriebswirtschaftliche Machbarkeit einer Demonstrationsanlage BIOMETH zu beurteilen.

Angestrebt wird eine Mindestrentabilität für das einzusetzende Kapital von ca. 5% bei dynamischer Betrachtung vor Zinsen und vor Steuern. Die Betrachtung erstreckt sich über einen Zeitraum von 10 Jahren. Der Restwert der Anlage, die auf 20 Jahre abgeschrieben werden soll, wird nicht berücksichtigt. Die für die Berechnung getroffenen Annahmen orientieren sich an den in KVAs üblichen Werten.

Basis für alle Untersuchungen war der Referenzfall: BIOMETH-Anlage auf der "Grünen Wiese". Der Betriebsaufwand und die Investitionshöhe sind u.a. abhängig vom Standort und der dort bereits vorhandenen Infrastruktur.

Legt man diese genannten Annahmen und die nachfolgend beschriebenen konservativen Annahmen zugrunde, wird die Mindestrentabilität von 5% erreicht, wenn ein *à fonds perdu* - Betrag von ca. 25-30 Mio CHF aufgebracht werden kann.

Erreicht werden soll diese Rentabilität durch einen Cash-Flow aus betrieblicher Tätigkeit von ca. 3-3,5 Mio CHF/a. Der Gesamtertrag wird budgetiert mit ca. 8,3 Mio CHF/a. Er setzt sich zusammen aus dem Verkauf von Methanol als Treibstoff, der Annahme von Rohstoffen, sowie dem Verkauf von Strom und von Wärme (s. Tabelle 1).

Der Betriebsaufwand wird mit ca. 7,5 Mio CHF/a budgetiert. Er setzt sich zusammen aus Personalkosten, kalkulatorischen Abschreibungen, Reparatur/Unterhalt, und der Reststoffentsorgung. Der Fixkostenanteil von ca.

70 % ist sehr hoch. Ursache dafür sind einerseits die hohe Kapitalintensität und andererseits das Fehlen von Rohstoffkosten.

Die Kosten pro Energieeinheit betragen ca. 7 Rp./kWh ohne Wärmeverteilung (Annahme: Auslastungsgrad ca. 90 %). Zum Vergleich: Bei Hausfeuerungsanlagen mit Holz als Brennstoff rechnet man in günstigen Fällen mit ca. 8 bis 14 Rp./kWh ohne Wärmeverteilung. Ursachen für diese Differenz sind das Fehlen von Rohstoffkosten sowie die Anlagengrösse bei BIOMETH.

Wird die Anlage in eine bereits bestehende Infrastruktur wie KVA eingebunden, kann der Betriebsaufwand wesentlich kleiner werden. Personalkosten beispielsweise lassen sich senken.

Gesamterlös (Mio CHF/a)	8,296	100 %
--------------------------------	--------------	--------------

	Annahm menge (t/a)	Vergütung pro t (CHF/t)	Vergütung (Mio CHF/a)	rel. Anteil am Gesamtertrag
Altholz (20% Feuchte)	24420	10	0,244	3%
Vepackungsabfälle	5775	135	0,780	9%
Kunststoffabfälle	2888	150	0,433	5%
Total	33083		1,457	18%

	Verkaufte Menge	Erlös pro Einheit (CHF)	Erlös, total (Mio CHF/a)	rel. Anteil am Gesamtertrag
Methanol (1000 lt.)	10443	470(*)	4,950	60%
Strom (kWh)	11150700	0,10	1,115	13%
Wärme (Energieäquivalent Tonnen Schweröl)	4422	175,00	0,774	9%
Total			6,839	82%

Tabelle 1: Budgetierter Erlös für BIOMETH-Anlage. (*: entspr. 600 CHF/t)

Für den laufenden Betrieb der BIOMETH-Anlage sind, bezogen auf den Referenzfall "Grüne Wiese" und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen, keine direkten Subventionen nötig. Voraussetzung ist neben dem einmaligen *à-fonds-perdu*-Beitrag eine Mineralölsteuerbefreiung des Methanols als Treibstoff. Durch die Mineralölsteuerbefreiung entstehen dem Bund Mindereinnahmen von ca. 3,8 Mio CHF/a im Rahmen des BIOMETH-Betriebes. Diese Mindereinnahmen könnten beispielsweise durch eine Erhöhung der Fiskalbelastung herkömmlicher Treibstoffe von nur 0,05 Rp/lt. wieder ausgeglichen werden.

Aufwand (Mio CHF/a)		7,465
Materialaufwand		0,000
Personalaufwand	17 Mitarbeiter a 120.000 CHF/a	2,040
Unterhalt, Reparatur	2,5 % von Investition	1,466
Reststoffentsorgung	Reaktordeponie: 200 CHF/t, Sonderabfall: 1.250 CHF/t	0,584
Übriger Betriebsaufwand		0,513
Kalk. Abschreibungen	linear über 20 Jahre	2,762
Zinsen	5%/a	0,100

Tabelle 2: Budgetierter Betriebsaufwand für BIOMETH-Anlage

Mit der Anlage wird voraussichtlich eine Brutto-Wertschöpfung von ca. 5,7 Mio CHF/a erarbeitet. Dies bedeutet eine Schaffung von ca. 13-18 Arbeits-19plätzen am Anlagenstandort.

Die Investitionen für den Aufbau der BIOMETH-Anlage werden ca. 56 Mio CHF betragen. Sie umfassen die Investitionen für die Annahme und Aufbereitung der Rohstoffe, für die Vergasung und Synthese zu Methanol sowie für die Stromerzeugung, inkl. Planung, Montage und Inbetriebnahme. Die für die Anlage erforderliche Grundstückfläche wird angemietet. Für den Betrieb der BIOMETH-Anlage sind weitere 3-4 Mio CHF notwendig, um beispielsweise Debitorenausstände und Lager zu finanzieren. Das für den Aufbau und Betrieb notwendige Kapital beträgt somit ca. 60 Mio CHF.

Investitionen (Mio CHF)	55,4
Grundstück	0,0
Gebäude	0,6
Aufbereitung	6,2
Vergasung und Gasaufbereitung	18,7
Synthese	10,6
Nachgeschaltete Investitionen ohne Wärmeverteilung	5,4
Prozessleitsystem	3,3
Engineering, Montage, Inbetriebnahme	5,6
Unwägbarkeiten	5,0

Tabelle 3: Investitionen für Referenzfall "Grüne Wiese"

Das notwendige Kapital kann reduziert werden, wenn am Anlagenstandort bereits eine Infrastruktur vorhanden ist.

4.5. Umweltverträglichkeit

Eine Studie zum Einfluss verstärkter Holznutzung auf das Oekosystem Wald wurde zu einem frühen Zeitpunkt im Rahmen der Projektarbeiten erstellt ((IV/1)). Die Studie kommt zum Schluss, dass die verstärkte Nutzung des Waldes sowohl positive als auch negative ökologische Auswirkungen bewirken würde. Es sollte jedoch möglich sein, durch gezielte Massnahmen die negativen Einflüsse so zu dämpfen, dass aus einer auf Waldholzschnitzeln basierenden BIOMETH-Anlage insgesamt eine positive ökologische Bilanz für den Wald resultieren könnte.

Eine saubere Oekobilanz des BIOMETH-Prozesses ist bis heute nicht durchgeführt worden. Wir können deshalb nur qualitative ökologische Argumente für oder wider BIOMETH aufführen.

Die Abfallrohstoffe werden im BIOMETH-Verfahren nicht verbrannt und erzeugen damit keine Rauchgasemissionen. Bei der Vergasung mit Sauerstoff werden die Gase in einem geschlossenen System zu hochreiner Synthesequalität aufgearbeitet. Alle Schadstoffe, welche in den Abfällen enthalten sind, fallen daher zwangsläufig als feste oder flüssige Rückstände an. Die Mengen und Frachten der erwarteten festen Rückstände und Kondensate (Abwässer) sind für verschiedene Brennstoffe und Vergasertypen zusammengestellt und deren Kostenfolgen ermittelt worden (II/9). Die zu entsorgenden Reststoffe müssen gemäss ihrer Zusammensetzung auf entsprechend eingerichtete Deponien gebracht bzw. ausserhalb der BIOMETH-Anlagen zusammen mit Rückständen aus der Kehrlichtverbrennung weiter behandelt werden.

Emissionen in die Luft entstehen lediglich bei der Verbrennung des nicht umsetzbaren Gases in einem Gasmotor. Dieses Gas weist günstigerweise eine sehr hohe Reinheit auf, und die Abgase können gegebenenfalls mit einem Entstickungskatalysator behandelt werden.

Für die Bewertung der Umweltverträglichkeit spielt auch eine nicht unbedeutende Rolle, dass

Die Substitution von Diesel- oder Benzinfahrzeugen durch Methanolfahrzeuge führt zu einer Verminderung der Luftbelastung durch Verbrennungsschadstoffe. Sollte in Zukunft Methanol einmal in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt werden können, würden die Emissionen durch die Verbrennung des Methanols praktisch verschwinden.

4.6. Umsetzung, Öffentlichkeitsarbeit, Vorarbeiten für die Realisierung von BIOMETH

Der Information der Öffentlichkeit und der gezielten Werbung für die BIOMETH-Idee kam im Hinblick auf die Umsetzung von Anfang an grosse

Bedeutung zu. Öffentlichkeitsarbeit wurde über verschiedene Kanäle geleistet:

- Presseberichte (s. Liste der Publikationen)
- Prospekte, Broschüren (IV/4, IV/5)
- Vorträge, Präsentationen (s. Liste der Publikationen)
- Ausstellungen und Messen: Energietage Wettingen, Sept. 1995; Messe für Umweltechnik (M.U.T) Basel, Okt. 1995

Bereits 1994 wurde mit einem externen professionellen PR-Büro ein Prospekt für ein breites interessiertes Publikum gedruckt und seitdem an verschiedenen Anlässen verteilt (IV/4).

Die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Machbarkeitsstudie sind im Sommer 1995 in Form einer vom PSI herausgegebenen Broschüre zusammengefasst worden (IV/5). Die Broschüre richtet sich an potentielle Interessenten in einer erweiterten Trägerschaft für die Realisierung einer technischen Demonstration von BIOMETH. Sie ist in englischer und deutscher Sprache verfügbar. Zusammen mit den Präsentationsfolien (IV/6) bildet die Broschüre den sog. "Sales Kit" für das Projekt.

In der zweiten Hälfte 1995 wurden Kontaktgespräche mit einer Anzahl von Firmen (Grossverteiler, Verpackungsindustrie), Verbänden und Behörden geführt. Die Gespräche haben noch zu keinen ausweisbaren Erfolgen geführt. Das PSI wird weiterhin bemüht sein, eine Trägerschaft für die Realisierung von BIOMETH auf die Beine zu stellen.

Mineralölsteuergesetz:

Von entscheidender Bedeutung für die Machbarkeit einer BIOMETH-Demonstrationsanlage ist die Frage der Besteuerung des produzierten Methanols als Treibstoff. Es war zu Beginn des Projekts klar, dass die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Anlage soll sich selbst tragen) nur dann erfüllbar sind, wenn das Produkt steuerfrei auf dem Treibstoffmarkt abgesetzt werden kann. Nach bis 1996 geltendem Recht wurden auf Treibstoffen Zölle erhoben. Abgaben auf inländische Produkte entfielen dadurch automatisch. Bei der Beratung im Parlament (Wintersession 95, Frühling und Sommersession 96) hat die Frage der Steuerbefreiung für erneuerbare Treibstoffe zu Differenzen zwischen Ständerat und Nationalrat geführt.

Nicht zuletzt dank unserer Informationstätigkeit in den Medien und direkter Information von Parlamentariern sind in der Frage der Steuerbefreiung für die Realisierung des Projekts notwendige Kompromisse gefunden worden (Befreiung für Treibstoffe, welche in Pilot- und Demonstrationsanlage aus erneuerbaren Rohstoffen erzeugt werden).

5. Beurteilung der Ergebnisse der BIOMETH-Machbarkeitsstudie

5.1. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Studie zeigt, dass Methanol als Treibstoff in der Schweiz mit heute verfügbarer Technologie aus entsorgungspflichtigen Abfällen erzeugt und im Strassenverkehr genutzt werden kann. Die technischen Unsicherheiten und Risiken erscheinen relativ gering, auch wenn bezüglich Vergasungstechnologie und Gasaufbereitung noch einige Unsicherheiten bestehen und vor einer Realisierung der Einsatz der vorgesehenen Rohstoffe in einem Pilotvergaser des Anlagenbauers getestet werden müsste.

Die Rohstoffe, welche für den Betrieb von BIOMETH aus technischen und wirtschaftlichen Gründen in Frage kommen, wurden identifiziert und deren Verfügbarkeit bzw. deren heutiger und in Zukunft zu erwartender Markt wurde abgeschätzt.

Für den Einsatz von Methanol im Verkehr ergeben sich eine Reihe von gangbaren Wegen. Um die gesamte Produktion einer Demonstrationsanlage im Verkehrsbereich absetzen zu können, ist als Absatzkanal praktisch nur eine Zumischung in geeigneter Form zu Benzin denkbar.

Die Produktion von Methanol aus Abfällen und dessen Nutzung im Verkehr hat aus der Sicht der Umwelt einen positiven Effekt.

Die zu Beginn des Projekts aufgestellten Mindestanforderungen an die Wirtschaftlichkeit einer ersten Demonstrationsanlage können erfüllt werden unter den folgenden Voraussetzungen:

1. ein Teil des für die Realisierung benötigten Kapitals, oder Fr. 30 Mio., müssen aus (öffentlichen) Mitteln *à-fonds-perdu* bereitgestellt werden;
2. für das produzierte Methanol kann ein Preis erzielt werden, welcher mit dem heutigen Benzinpreis nach Steuern konkurrenzfähig ist.

Mit diesen Randbedingungen könnte in der Schweiz heute eine Demonstration von BIOMETH realisiert werden.

5.2. Beurteilung der Realisierungschancen

Die Studie BIOMETH wurde als erste Phase eines Demonstrationsprojekts in Angriff genommen. Die zweite Phase, d.h. die Realisierung einer Demonstrationsanlage in der Schweiz, konnte trotz der nachgewiesenen Machbarkeit bis dato nicht angeschlossen werden. BIOMETH ist nicht ein

Projekt, mit dem sich ein Investor heute eine goldene Nase verdienen kann. Das haben die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit gezeigt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass das Projekt von den von uns angegangenen potentiellen Interessenten nur so lange enthusiastisch unterstützt wurde, solange nicht von Finanzen gesprochen wurde. BIOMETH kann, wenn aus kurzfristiger Optik beurteilt, nicht mit anderen technisch weniger aufwendigen Verfahren der energetischen Nutzung derselben Abfallsortimente konkurrieren: Die Verbrennung in Zementwerken oder in speziellen Altholzfeuerungen zur Bereitstellung von Prozesswärme und allenfalls Strom ist heute wirtschaftlich naheliegender.

Der Vorschlag, die Realisierbarkeit einer Anlage zur Produktion von Methanol aus Abfallbiomasse zu prüfen, wurde wegen der langfristigen Aspekte von BIOMETH gemacht: Biomasse basiert, wie die fossilen Energieträger, auf Kohlenstoffverbindungen. Die Umwandlung dieser Ressource in flüssige Treibstoffe ist langfristig sinnvoller als deren Umwandlung in Wärme oder Elektrizität, weil die Biomasse als einzige erneuerbare Energie auf relativ einfachem Weg die fossilen Energieträger im Treibstoffbereich substituieren kann. Der BIOMETH - Prozess ist längerfristig zudem in der Lage, Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen (z.B. Solarstrom) mit dem durch die Pflanzen eingesammelten Kohlendioxid in einen flüssigen Treibstoff einzubinden und auf diese Weise leicht speicher- und verfügbar zu machen. Die Optimierung der Kohlenstoffausnutzung, bzw. die Integration technischer Systeme in den Stoffkreislauf der Natur, sind langfristige Ziele einer nachhaltigen Entwicklung.

Die Realisierung von BIOMETH würde eine Technologie demonstrieren, welche für die langfristige Entwicklung wegweisend sein könnte. Der Preis dafür wäre vergleichsweise bescheiden. Da die Wirtschaft im allgemeinen kurz- bis mittelfristig optimiert, kann die Realisierung von BIOMETH nur glücken, wenn die öffentliche Hand ein Zeichen setzt.

Liste der Partnerfirmen, welche am Projekt BIOMETH mitgearbeitet haben

- Cellulose Attisholz AG, Luterbach
- Tecova AG, Wohlen
- Ing.-gemeinschaft Bühler, Maschwanden; Verenum, Zürich; IEU Liestal
- Ing.-büro Dendroplan, Bülach
- Ing.-büro Xylon SA, Genf:
- Ing.-büro für Abfall & Recycling, Liestal
- Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG (EWI), Zürich
- Temum, Brugg
- Paul Scherrer Institut, Villigen

Verzeichnis der zitierten BIOMETH-Dokumente *)

(Berichte, Zwischenberichte, "Verkaufsunterlagen")

Sektor I, Rohstoffe

- I/1 P. Steinmann, Xylon SA
94/3 Projet BIOMETH; Approvisionnement en matière première,
Secteur forêt et résidus de la transformation du bois
- I/2 W. Vock
95/2 Marktanalysen für Industrieabfälle
- I/3 W. Vock
94/7 Altholz, Altpapier und Kunststoffe: Potential, Verfügbarkeit und
Entsorgungsgebühren in der Schweiz. 1. Kurzbericht.

Sektor II, Anlagen, Technik, Standorte

- II/1 P. Hasler, T. Nussbaumer, R. Bühler
93/9 Vergasung von Biomasse für die Methanolsynthese
- II/2 B. Covelli
93/7 Grobsimulation und Variantenvergleich im BIOMETH - Projekt
- II/3 Lurgi
93/12 BIOMETH-Studie
- II/4 B. Covelli, S. Stucki
94/2 Zwischenbericht BIOMETH Technik Phase 1
- II/5 U. Marti, A. Jenni, W. Vock
94/3 Aufbereitung von Biomasse für die Herstellung von Methanol
- II/6 H. P. Lotz
95/3 Kostenstudie Aufbereitung der Brennstoffe für die Herstellung
von Methanol
- II/7 B. Covelli, R. Mülli, S. Stucki
95/4 Simulation von BIOMETH

*) Diese Dokumente können leihweise bei Dr. S. Stucki, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI bestellt werden. Tel.: 056 310 41 54, Fax: 056 310 21 99, e-mail: samuel.stucki@psi.ch

-
- II/8 L.C. De Souza, P. Hütter, J.C. Mayor, M. Quintilii
95/4 Fluidized Bed Reactor for the Gasification of Biomass (Annex V,
p. 73-76, PSI Jahresbericht 1994)
- II/9 P. Hasler, T. Nussbaumer, R. Bühler
95/5 Vergasung von belasteten Brennstoffen
- II/10 M. Wiedorn, R. Struis, S. Stucki
95/6 Aufbau eines Katalysatorteststandes und Charakterisierung
eines Methanolsynthesekatalysators bei Drücken bis 60 bar und
Temperaturen bis 260°C PSI TM 51-95-07
- II/11 M. Quintilii
96/8
- II/12 M. Quintilii, A. Schuler
94/7 Holz Trocknung. Untersuchung möglicher gasförmiger Emissionen
an einer Laborversuchsanlage PSI TM 51-94-14

Sektor III, Produkte

- III/1 M. Müller
94/12 Marktanalyse: Treibstoffmarkt Methanol in der Schweiz
- III/2 J. Leidner
94/12 Methanolmarkt

Sektor IV, Unterstützende Aktivitäten

- IV/1 M. Nanz, Dendroplan
94/6 "Einfluss verstärkter Nutzung auf das Oekosystem Wald"
- IV/2 S. Stucki
94/3 Beurteilung der Machbarkeit der Demonstrationsanlage
BIOMETH; Stand Ende März 1994.
- IV/3 M. Müller
95/11 Wirtschaftliche Machbarkeit des Projektes BIOMETH
- IV/4 "Der umweltgerechte Treibstoff. Made in Switzerland."
93/8 Prospekt für das Projekt BIOMETH.
- IV/5 S. Stucki
95/8 BIOMETH - Umweltfreundlicher Treibstoff aus Abfällen
96/2 BIOMETH - Environmentally Friendly Fuel from Waste

IV/6 S. Stucki
95/11 Je ein Satz Präsentationsfolien d/e/f für Projektpräsentationen

Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge

Tages- und Fachpresse:

S. Stucki
"Methanol aus Abfallbiomasse"
NZZ Beilage Technologie und Gesellschaft, 29. Juni 1994.

John Braun
"Drive for the future. Tanking up with synthetic."
Swiss Business Jan/Feb 95, p. 21

S. Stucki, M. Müller
"Umweltfeindliche Besteuerung von Treibstoffen", NZZ, 5. Oktober 1995

S. Stucki
"Biometh - eine Alternative zur stofflichen Verwertung?"
Pack aktuell (Fachmagazin für Verpackungstechnik und -design) Nr. 19/95; p
34-36

S. Stucki
"BIOMETH - ein Weg zur rohstofflichen Verwertung von Holz- und
Kunststoffabfällen"
Kunststoffinfo ((Kunststoffverband Schweiz) Nr. 1/96, p. 6

Konferenzbeiträge:

S. Stucki, Th. H. Schucan
"Speicherung und Transport von Wasserstoff in der Form organischer
Verbindungen";
Tagung Global Link des VDI, (VDI Berichte 1129), Okt. 94

S. Stucki
"Production of Methanol from Waste Biomass"
R'95 Recovery, Recycling, Re-integration Congress, Geneva, Feb. 1-3, 1995

R. Bühler, P. Hasler, L.C. De Souza, S. Stucki
"Biometh - Methanol Production from Waste Biomass in Switzerland"
Poster, Seminar on Power Production from Biomass II, 27/28 March 1995,
Espoo, Finland

S. Stucki
"The BIOMETH project"
Termoutilizzo di biomassa e di rifiuti, Workshop, Siena, 8-9. Juni 1995

S. Stucki, R. Bühler, P. Hasler, B. Covelli, M. Müller, W. Vock
"Biometh - feasibility of methanol production from waste biomass and it's use
as a fuel in Switzerland"
Proc. 11th Int. Symposium on Alcohol Fuels, ISAF, Sun City, South Africa,
April 1996; pp 466-476

S. Stucki
"Methanol as Transportation Fuel"
Vortrag am italo-schweizerischen Kongress "La citta del futuro", Milano 12-13
Juni 1996