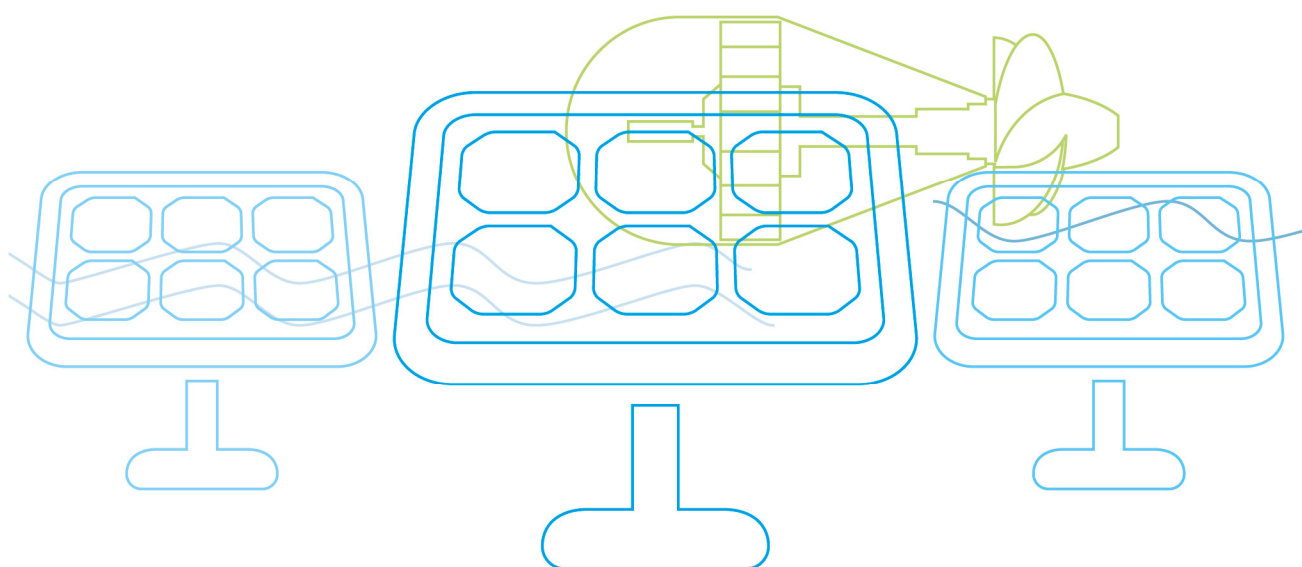




Bioethanol aus Holz & Stroh

Energieträger- und Technologiebewertung
für Bioethanol aus Holz und Stroh -
Stellenwert und Perspektiven für ein
österreichisches Demonstrationsprojekt



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds



ENDBERICHT

BIOETHANOL AUS HOLZ UND STROH – Energieträger- und Technologiebewertung für Bioethanol aus Holz und Stroh

K. KÖNIGHOFFER, G. JUNGMEIER, L. CANELLA, I. KALTENEGGER,
A. FRIEDL, PH. KRAVANJA

Projektpartner



Neue Energien 2020

Programmsteuerung



Programmentwicklung



Graz, im Juni 2012

*FFG-Projekt Nr.: 818921
JOANNEUM RESEARCH Projekt Nr.: RES.04-08.GF.021-01
JOANNEUM RESEARCH Bericht Nr.: ENG-B-09/11
Endbericht 117 Seiten (inkl. Anhang)*

BIOETHANOL AUS HOLZ UND STROH
Energieträger- und Technologiebewertung für Bioethanol
aus Holz und Stroh

K. KÖNIGHOFER, G. JUNGMEIER, L. CANELLA, I. KALTENEGGER
A. FRIEDL, PH. KRAVANJA

JUNI 2012

Projekt Nr.: RES.04-08.GF.021-01
Bericht Nr.: ENG-B-09/11
Freigegeben: Graz, am 21. Juni 2012



R. Padinger
Forschungsgruppenleiter

K. Könighofer
Projektleiter

Projekttitel

Energieträger- und Technologiebewertung für Bioethanol aus Holz und Stroh

Projektkonsortium

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit
Energieforschung
Dipl.-Ing. Kurt Könighofer
Dipl.-Ing. Dr. Gerfried Jungmeier
Dipl.-Ing. Lorenza Canella
Mag.^a Ingrid Kaltenegger
Elisabethstraße 18/II
8010 Graz
Tel. +43/316/876-1324
Fax +43/316/8769-1324
Email: kurt.koenighofer@joanneum.at
www.joanneum.at



Technische Universität Wien
Fakultät für Technische Chemie
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik u. Techn. Biowissenschaften
Prozess Simulation und Thermische Verfahrenstechnik
Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c. Anton Friedl
Dipl.-Ing. Philipp Kravanja
Getreidemarkt 9/166-2
1060 Wien
Tel. +43/1/58801-166257
Fax. +43/1/58801-16699
Email: philipp.kravanja@tuwien.ac.at
www.thvt.at



Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020 – 1. Ausschreibung“ durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	7
SUMMARY.....	10
1 EINLEITUNG	13
1.1 Aufgabenstellung	13
1.2 Schwerpunkte des Projektes.....	14
1.3 Einordnung in das Programm.....	14
1.4 Verwendete Methoden	15
1.4.1 Modellierung mit IPSEpro	16
1.4.2 Lebenszyklusanalyse	17
1.4.3 Kostenanalyse	19
1.4.4 Projektablauf, Projektbeirat und Workshops	19
2 INHALTLICHE DARSTELLUNG.....	21
2.1 Energetische und stoffliche Nutzungspotenziale von Holz und Stroh.....	21
2.2 Verfahren der Umwandlung von Holz und Stroh in Bioethanol und Nebenprodukte ..	22
2.2.1 Allgemeine Einführung	22
2.2.2 Verfahrensschritte.....	25
2.2.2.1 Zerkleinerung.....	25
2.2.2.2 Vorbehandlung	26
2.2.2.3 Hefe-Produktion.....	29
2.2.2.4 Enzymproduktion	30
2.2.2.5 Hydrolyse der vorbehandelten Biomasse und Bioethanol-Fermentation	31
2.2.2.6 Nährstoffe für die biotechnologischen Prozessschritte	33
2.2.2.7 Bioethanolabtrennung und -reinigung:	34
2.2.2.8 Aufbereitung der Schlempe und Nebenproduktgewinnung.....	35
2.2.2.9 Biogasfermentation und Aufbereitung	38
2.2.2.10 Aerobe Abwasserreinigung	42
2.2.2.11 Reststoffe mit Kraft-Wärme-Kopplung.....	43
2.3 Auswahl der interessantesten Anlagenkonzepte für Österreich.....	44
2.3.1 Auswahlkriterien	45
2.3.2 Festlegung der Anlagenkonzepte.....	45
2.4 Modellierung der Anlagenkonzepte.....	46
2.4.1 Bioethanol Prozess.....	47
2.4.1.1 Steam explosion	47
2.4.1.2 Fest-Flüssig-Trennung nach der steam explosion (Anlagenkonzept 8).....	48
2.4.1.3 Enzym- und Hefeproduktion	48
2.4.1.4 Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF)	48
2.4.1.5 Bioethanolabtrennung und Dehydrierung.....	49
2.4.2 Nebenprodukte aus der Schlempe.....	50
2.4.2.1 Strom (Anlagenkonzepte 1, 2, 11).....	51
2.4.2.2 Strom und Fernwärme (Anlagenkonzept 3)	52

2.4.2.3	Pellets (Anlagenkonzepte 4, 5, 12).....	53
2.4.2.4	Pellets und Fernwärme (Anlagenkonzept 6)	54
2.4.2.5	C5 Melasse und Pellets (Anlagenkonzepte 7, 8)	55
2.4.2.6	C5 Melasse und Fernwärme (Anlagenkonzept 9)	55
2.4.2.7	Biomethan und Strom (Anlagenkonzepte 10, 13)	56
2.4.2.8	Pellets (Anlagenkonzepte 4-8, 12)	57
2.4.2.9	C5 Melasse (Anlagenkonzepte 7, 8, 9)	58
3	ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	59
3.1	<i>Technologische, ökologische und ökonomische Bewertung</i>	59
3.1.1	Gesamtergebnisse.....	59
3.1.1.1	Massen- und Energiebilanzen	59
3.1.1.2	Treibhausgasbilanz und kumulierter Energieverbrauch	63
3.1.1.3	Kostenanalyse	66
3.1.2	Detaillergebnisse	69
3.1.2.1	Anlagenkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ (Anlagenkonzept 3)	69
3.1.2.2	Anlagenkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“ (Anlagenkonzept 12)	76
3.2	<i>Mögliche Integration von Anlagen in bestehende Infrastruktur.....</i>	83
3.3	<i>Energiewirtschaftliche Bedeutung</i>	84
4	AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN	85
4.1	<i>Ausblick.....</i>	85
4.2	<i>Empfehlungen.....</i>	85
5	ANHANG	87
5.1	<i>Annahmen für die Modellierung</i>	87
5.2	<i>Massenbilanzen der Anlagenkonzepte</i>	91
5.3	<i>Hilfsstoffe und Nebenprodukte</i>	105
5.3.1	Fermentationshilfsstoffe CSL und Rübenmelasse	105
5.3.2	Nebenprodukt Pellets	106
5.3.3	Nebenprodukt C5 Melasse	107
5.4	<i>Reststoffe und deren Verwertung.....</i>	108
5.4.1	Ausbringung der Asche als Dünger.....	108
5.4.2	Schlamm- und Gärwasserbildung in Biogasfermentation und Aerober Abwasserbehandlung (Anlagenkonzepte 10 und 13)	110
6	LITERATUR.....	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusätzliches Holzpotenzial für Fichte und Buche aus dem jährlich ungenutzten Holzzuwachs (Kaltschmitt, M. et. al. 2003), (Kranzl, L. et. al. 2008), (Hartmann, H. et. al. 2007), (Reichmuth, M. et. al. 2004)	21
Tabelle 2: Strohpotenzial für Weizen und Körnermais aus dem Kornertrag in Österreich 2008 (Kaltschmitt, M. et. al. 2003), (Reichmuth, M. et. al. 2004)	22
Tabelle 3: Zusammensetzung von Holz und Stroh und theoretische maximale Bioethanolausbeute (EtOH) aus C6 und C5 Zuckern (Olofsson, K. et. al. 2008) (100% der Zucker werden in Bioethanol umgewandelt bei Verwendung 100% trockener Biomasse)	23
Tabelle 4: Übersicht Merkmale einer Bioethanolanlage	24
Tabelle 5: Vorteile und Nachteile der On-site Enzymproduktion	31
Tabelle 6: Ausgewählte Anlagenkonzepte für Bioethanolanlage	46
Tabelle 7: Grunddaten für Massen- und Energiebilanzen der ausgewählten Anlagenkonzepte (100.000 t/a Bioethanol)	60
Tabelle 8: Vereinfachte Energiebilanz der Anlagenkonzepte (Input: Biomasse und Strom; Output: Produkt Bioethanol und Nebenprodukte; Prozessenergie)	60
Tabelle 9: Massenbilanzen der Anlagenkonzepte	63
Tabelle 10: Mengen der Hilfs- und Reststoffe (nicht beinhaltet: Schlamm fällt nur bei den Anlagenkonzepten mit Biomethan an)	63
Tabelle 11: Ausgangsdaten für die Kostenrechnung	67
Tabelle 12: Betriebsparameter und detaillierte Massenbilanz für Anlagenkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ (Anlagenkonzept 3)	70
Tabelle 13: Detaillierte Energiebilanz für Anlagenkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ (Anlagenkonzept 3)	71
Tabelle 14: Kostenzusammenstellung Bioethanolkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“	75
Tabelle 15: Betriebsparameter und detaillierte Massenbilanz für Anlagenkonzept EtOH-Holz-C6/Pellets (Anlagenkonzept 12)	77
Tabelle 16: Detaillierte Energiebilanz für das Anlagenkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“	78
Tabelle 17: Kostenzusammenstellung Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“	82
Tabelle 18: Möglichkeiten der Systemintegration von Bioethanolanlagen mit lignozellulosen Rohstoffen	83
Tabelle 19: Aschemassenströme für Anlagenkonzepte 12 (Holz) und 3 (Stroh)	108
Tabelle 20: Konzentration an Schwermetallen in der Asche	109
Tabelle 21: Nährstoff Massenströme für die Ausbringung als Dünger	109
Tabelle 22: Daten für die Ausbringung	110
Tabelle 23: Nährstoff-Massenströme durch Klärschlamm und Grobasche für die Anlagenkonzepte 10 und 13	112
Tabelle 24: Zusammenfassung der Schlamm- und Aschemengen für die Anlagenkonzepte mit Biogasfermentation (10 und 13)	112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur von IPSEpro [Perz and Bergmann, 2003]	16
Abbildung 2: Die 5 Teilschritte der Lebenszyklusanalyse	17
Abbildung 3: Schema zur Bewertung eines Bioenergiesystems im Vergleich zu einem fossilen Referenzsystem mittels LCA zur Bereitstellung von Energiedienstleistung	19
Abbildung 4: Schema einer Bioethanolanlage zur biotechnologischen Umwandlung lignozellulöser Rohstoffe	22
Abbildung 5: Verwendung der Vorbehandlungsmethoden in Demo- und Pilotprojekten [IEA, 2009] ..	26
Abbildung 6: Ethanolpreis (MESP in \$/gal) für verschiedene Vorbehandlungsmethoden. Entnommen aus: [Eggeman and Elander, 2005].	27
Abbildung 7: Ergebnisse der Steam explosion von Stroh. Glucan (links) gibt das Verhalten von Zellulose wieder, Xylan (rechts) das Verhalten von Hemizellulose. Quellen: 1: [Aden, 2008], 2: [Öhgren et al., 2005] 3: [Lloyd and Wyman, 2005] 4: [Linde et al., 2008].	28
Abbildung 8: Ergebnisse der 2 stufigen steam explosion von Fichte. Glucan (links) gibt das Verhalten von Zellulose wieder, Mannan (rechts) das Verhalten von Hemizellulose. Quellen: 1: [Monavari et al., 2009b], 2: [Nguyen et al., 2000], 3: [Söderström et al., 2002] 4: [Wingren et al., 2004] ..	29

Abbildung 9: links: Entwicklung der Bioethanolkosten im Zeitraum 2000-2012. Enzyme werden zugekauft. Quelle: [(NREL), 2007]. rechts: Trichoderma Reseei.	30
Abbildung 10: Integration von Hydrolyse und Fermentation. Separate Hydrolysis and Fermentation, SHF. Simultaneous Saccharification and Fermentation, SSF. Consolidated Bioprocessing, CBP.	32
Abbildung 11: Links: Spezielle Einbauten für die Destillation von Maischen mit hohem Feststoffgehalt [W.M. Ingledew and Kluhsies, 2009]. Rechts: Energiebedarf der Destillation in Abhängigkeit von der Bioethanolkonzentration, adaptiert aus [Zacchi and Axelsson, 1989].	35
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Trocknung mit überhitztem Dampf (Superheated Steam Drying) [GEA Barr Rosin, 2011]	37
Abbildung 13: Integrationsmöglichkeiten von der Biogasfermentation und Bioethanolproduktion aus Lignozellulose 1) gesamte Schlempe [Barta et al., 2010b], 2) nur Flüssigfraktion der Schlempe [Barta et al., 2010b], 3) nur Abwässer [Aden et al., 2002]	39
Abbildung 14: Links: Schema des UASB-Reaktors. Quelle: [Bischofsberger et al., 2009], Rechts: Betriebsdaten für die Mesophile Biogasfermentation von Zuckerrohr- und Zuckerrübenmelasse. Quelle [Wilkie et al., 2000].	40
Abbildung 15: Biogasreinigung und Up-Grading. Übersicht möglicher Technologien. Fett hervorgehobene Technologien werden im Text kurz erklärt.	41
Abbildung 16: Kostenvergleich von Sulfidfällung und biologischer Entschwefelung zur Entschwefelung von Rohbiogas. Quelle: [Urban et al., 2009]	42
Abbildung 17: Absenkung der Verbrennungstemperatur durch Abgasrezirkulation. Quelle: [Kaltschmitt et al., 2009]	44
Abbildung 18: Zusammenfassendes Schema der Anlagenkonzepte. Schwarz: Ident für alle Anlagenkonzepte. Farbig: Nebenprodukte der einzelnen Anlagenkonzepte. Grau-strichliert: nur Anlagenkonzept 8 (HWIS).	47
Abbildung 19: Kolonnenverschaltung der Destillation in den Anlagenkonzepten	49
Abbildung 20: Zusammenfassende Darstellung der Nutzungsmöglichkeiten der Schlempe. Bunt: Die verschiedenen Nebenprodukte.	50
Abbildung 21: Vereinfachte Darstellung von Stromproduktion aus Schlempe	51
Abbildung 22: Prozess-Kraftwärmekopplung zur Erzeugung von Prozesswärme und Strom (links) und Prozesswärme, Strom und Fernwärme (rechts)	52
Abbildung 23: Vereinfachte Darstellung von Strom- und Fernwärmeproduktion aus Schlempe	53
Abbildung 24: Dampfnutzung für Prozesswärme (links) und Prozesswärme und Fernwärme (rechts)	53
Abbildung 25: Vereinfachte Darstellung von Pelletproduktion aus Schlempe. Zahlen beschreiben Stoffströme bei jeweiligen Anlagenkonzepten laut Tabelle 6.	54
Abbildung 26: Vereinfachte Darstellung von Pellet- und Fernwärmeproduktion aus Schlempe	54
Abbildung 27: Vereinfachte Darstellung von C5 Melasse- und Pelletproduktion aus Schlempe (Zahlen beschreiben Stoffströme bei jeweiligen Anlagenkonzepten laut Tabelle 6)	55
Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung von C5 Melasse- und Fernwärmeproduktion aus Schlempe.	56
Abbildung 29: Vereinfachte Darstellung von Biomethan- und Stromproduktion aus Schlempe.	57
Abbildung 30: Vereinfachte Energiebilanz - Anteile Bioethanol (EtOH), Nebenprodukte und Prozessenergie in %	61
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Massenbilanz	62
Abbildung 32: Treibhausgas-Emissionen der 13 Anlagenkonzepte in kt/a	64
Abbildung 33: Treibhausgasreduktion in Prozent [%] gegenüber Referenzsystemen Benzin mit fossiler bzw. erneuerbarer Energie	65
Abbildung 34: Kumulierter Primärenergieverbrauch (KEV) in GWh/a	65
Abbildung 35: Reduktion des fossilen Anteils am kumulierten Primärenergieverbrauch (KEV fossil) in Prozent [%] gegenüber Referenzsystemen Benzin mit fossiler bzw. erneuerbarer Energie	66
Abbildung 36: Spezifische Kosten für Bioethanol in € pro Liter Bioethanol bzw. € pro Liter Benzinäquivalent	68
Abbildung 37: Spezifische Kosten für Bioethanol € pro Liter Benzinäquivalent bei um 30% erhöhten Investitionskosten	68
Abbildung 38: Bioethanolkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ und Referenzsystem fossil	72
Abbildung 39: Bioethanolkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ und Referenzsystem erneuerbar	72
Abbildung 40: Treibhausgas-Emissionen in kt CO ₂ -Äq./a für das Bioethanolkonzept EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme	73
Abbildung 41: Treibhausgas-Emissionen in kt/a für das Bioethanolkonzept EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme und die Referenzsysteme (fossil und erneuerbar mit Stroh)	73

Abbildung 42: Kumulierter Primärenergieverbrauch in GWh/a für das Bioethanolkonzept „EtOH-Stroh-C6/Strom+Wärme“ und die Referenzsysteme (fossil und erneuerbar mit Stroh)	74
Abbildung 43: Aufteilung der Jahreskosten.....	75
Abbildung 44: Änderung der spezifischen Kosten von 0,74 € pro Liter Benzinäquivalent durch Änderung von Kosten und Erlösen (+30% bzw. -30%)	76
Abbildung 45: Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“ und Referenzsystem fossil.....	79
Abbildung 46: Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“ und Referenzsystem erneuerbar	79
Abbildung 47: Treibhausgas-Emissionen in kt CO ₂ -Äq./a für das Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“	80
Abbildung 48: Treibhausgas-Emissionen in kt/a für das Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“ und die Referenzsysteme (fossil und erneuerbar mit Holz)	80
Abbildung 49: Kumulierter Primärenergieverbrauch in GWh/a für das Bioethanolkonzept „EtOH-Holz-C6/Pellets“ und die Referenzsysteme (fossil und erneuerbar mit Holz).....	81
Abbildung 50: Aufteilung der Jahreskosten.....	83
Abbildung 51: Änderung der spezifischen Kosten von 0,66 € pro Liter Benzinäquivalent durch Änderung von Kosten und Pelletspreis (+30% bzw. -30%).....	83
Abbildung 52: Vergleich von Investitionskosten für Anlagen der Biotreibstoffherstellung (200.000 t/a)84	
Abbildung 53: Heizwert (LHV) und Zusammensetzung der in den verschiedenen Anlagenkonzepten produzierten Pellets. Anlagenkonzepte 4-8: Stroh. Anlagenkonzept: 12 Holz. Die Berechnung des Heizwerts erfolgte nach dem PLS Modell aus [Friedl et al., 2005].....	106
Abbildung 54: Zusammensetzung von C5 Melasse bei Abtrennung nach der Destillation (Anlagenkonzepte 7 und 9) und Abtrennung nach der Vorbehandlung (Anlagenkonzept 8).	107
Abbildung 55: Schema der Biogasfermentation und Abwasserbehandlung	111

Zusammenfassung

Ausgangssituation/Motivation

Der Transportsektor trägt maßgeblich zu den Treibhausgas-Emissionen in Österreich bei: jährlich 22 Mio. t CO₂, das sind etwa 27% der österreichischen Treibhausgas-Emissionen. Dieser Sektor verzeichnet auch mit 54% die höchste Zuwachsrate bei den Treibhausgas-Emissionen von 1990 bis 2010. Seit Jänner 2009 liegt die Richtlinie der EU für erneuerbare Energie vor, die im Jahr 2020 einen Anteil von 10% erneuerbarer Energie im Transportsektor vorsieht. Im Jahre 2009 betrug der Anteil von Biotreibstoffen in Österreich etwa 7%. Die Erfüllung dieser Vorgabe kann nur erreicht werden, wenn einerseits die kommerziellen Biotreibstoffe Biodiesel und Bioethanol aus Stärke und Zucker („Biotreibstoffe der ersten Generation“) und andererseits „Biotreibstoffe der zweiten Generation“ aus lignozellulosen Rohstoffen (synthetische Biotreibstoffe durch Vergasung mit Synthese und Bioethanol durch Verzuckerung mit Fermentation) erzeugt und genutzt werden. Die Technologie der Erzeugung von Bioethanol aus lignozellulosen Rohstoffen, vor allem Holz und Stroh, ist in Entwicklung. Es sind derzeit weltweit Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen in Planung bzw. in Bau oder in Betrieb (z.B. Pilotanlage mit Holz in Schweden, mit Stroh in Kanada, Demonstrationsanlage für Stroh in Dänemark, Italien und Spanien). Internationale F&E-Aktivitäten zielen auf den kommerziellen Einsatz dieser Technologien ab, da lignozelluloses Bioethanol mittelfristig ein großes Potenzial zur Bereitstellung nachhaltiger Biotreibstoffe hat. Die Nutzung von Holz und Stroh steht nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion.

Inhalt und Ziele

Ziel des Projektes war es, österreichische Perspektiven für die Erzeugung von Bioethanol aus Holz und Stroh zu erarbeiten. Unter Mitwirkung und Einbeziehung betroffener Akteursgruppen wurden unterschiedliche Technologieoptionen für Bioethanol aus Holz und Stroh aus technologischer, ökonomischer, ökologischer und energiewirtschaftlicher Sicht bewertet sowie österreichische Strategien und Perspektiven erarbeitet: Neben dem erneuerbaren Treibstoff Bioethanol als Benzinersatz können auch andere Energieträger (z.B. Strom, Wärme) und Wertstoffe (z.B. Phenol, Methanol) gemeinsam erzeugt werden, um neben einer hohen Wertschöpfung eine maximale Erschließung der energetischen und stofflichen Potenziale der Rohstoffe Holz und Stroh zu ermöglichen. Zur Optimierung des Gesamtsystems wurde die Integration dieser Technologien in bestehende Infrastruktur (wie z.B. vorhandene Holzlogistik) und in den Energiesektor berücksichtigt. Mit der Einbindung von Akteursgruppen (Treibstoffsektor, Land- und Forstwirtschaft, Anlagenbau, Technologieanbieter, Betreiber konventioneller Bioethanolanlagen und (Heiz)Kraftwerken) in einem Projektbeirat und zwei Workshops wurden die Grundlagen für die Erzeugung von lignozellulosem Bioethanol erarbeitet, Anlagenkonzepte ausgewählt und die Ergebnisse diskutiert.

Ergebnisse

Die Abschätzung der zusätzlich nutzbaren Potenziale von Stroh bzw. Holz für Österreich zeigt, dass für eine jährliche Produktionskapazität von je 100.000 t Bioethanol die Rohstoffmengen sowohl für Stroh (Bedarf 650.000 t bei 10% Wassergehalt) als auch für Holz (870.000 t Holz bei 55% Wassergehalt) verfügbar sind. Ausgehend von diesen Potenzialen und den mit dem Projektbeirat festgelegten Rahmenbedingungen wurden 13 Anlagenkonzepte für jährlich 100.000 t Bioethanol entwickelt, davon 10 für Stroh und 3 für Holz. Diese Anlagenkonzepte wurden so erstellt, dass der Wärmebedarf aus Reststoffen der Bioethanolerzeugung vollständig gedeckt werden kann und je nach Anlagenkonzept auch der Strombedarf. Grundsätzlich sollte die Nutzung von ausschließlich C6 Zucker betrachtet werden (C5 Zucker kann nur mit gentechnisch veränderten Hefestämmen zu Bioethanol fermentiert werden), für zwei Anlagenkonzepte wurde zum Vergleich die Umwandlung von

C6 und C5 Zucker untersucht. Die Anlagenkonzepte unterscheiden sich durch die Art und Kombinationen der Nebenprodukte (Strom, Fernwärme, Biomethan, Pellets, C5 Melasse), die erzeugt werden.

Mit dem Simulationsprogramm „IPSEpro“ wurden die Massen- und Energiebilanzen erstellt. Davon ausgehend wurden die Treibhausgas-Emissionen und der kumulierte Primärenergieverbrauch auf Basis einer Lebenszyklusanalyse errechnet.

Für die Massenbilanzen werden als Input Rohstoff (Holz bzw. Stroh), Hilfsstoffe, Wasser und Luft dem Prozess zugeführt. Output sind die Produkte (Bioethanol, Pellets, C5 Melasse, Biomethan), (Ab)Wasser, CO₂, Asche und Schlamm. Bei Holz wird durch den hohen Wassergehalt (55%) wesentlich mehr Rohstoff für 100.000 t Bioethanol benötigt (ca. 870.000 t) benötigt als bei Stroh (ca. 650.000 t, 5% Wassergehalt). Spezifisch können 0,26 t Bioethanol/t Holz_{atro} bzw. 0,17 t Bioethanol/t Stroh_{trocken} gewonnen werden. Wird nach der Vorbehandlung die Flüssigfraktion abgetrennt, so benötigt man unter den gegebenen Annahmen ca. 695.000 t Stroh (0,16 t Bioethanol/t Stroh_{trocken}). Bei Umwandlung von C6 und C5 Zucker reduziert sich der Strohinput auf ca. 450.000 t (0,25 t Bioethanol/t Stroh_{trocken}).

Die Energiebilanzen zeigen, dass bei Stroh mit Nutzung der C6 Zucker von 23% bis 26% und bei Nutzung von C6 und C5 Zucker max. 37% der zugeführten Energie in Bioethanol umgewandelt werden. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Nebenprodukte (insbesondere Wärme) bei den Anlagenkonzepten werden von 39% bis 78% der zugeführten Energie genutzt.

Bei Holz werden von 41% bis 43% der zugeführten Energie in Bioethanol umgewandelt, bedingt durch den höheren Gehalt an C6 Zucker. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Nebenprodukte der Anlagenkonzepte werden von 53% bis 75% der zugeführten Energie genutzt.

Die ökologische Bewertung ergab Treibhausgas(THG)-Reduktionen von 41% bis 76% gegenüber den festgelegten Referenzsystemen für Benzin und fossilen bzw. mit erneuerbaren Energieträgern. In vergleichbaren Anlagenkonzepten ergaben sich höhere THG-Reduktionen bei Holz gegenüber Stroh. Die höchsten Reduktionen erreichten die Anlagenkonzepte mit folgenden Nebenprodukten: 1) Pellets, 2) Pellets und Wärme, 3) Strom und Wärme. Hohe THG-Reduktionen ergaben sich auch für die Anlagenkonzepte mit den Nebenprodukten Biomethan und Strom. Der niedrigste fossile kumulierte Primärenergieverbrauch (KEV) errechnete sich für die Anlagenkonzepte mit Holz sowie mit Stroh bei der Nutzung von C6 und C5 Zucker.

Die ökonomische Beurteilung wurde mit einer Kostenanalyse durchgeführt. Die Differenz der jährlichen Gesamtkosten der Bioethanolanlage und der jährlichen Erlöse aus den Nebenprodukten wurden als Jahresproduktionskosten für Bioethanol berechnet. Damit errechneten sich spezifische Bioethanolkosten von etwa 0,6 bis 1 € pro Liter Benzinäquivalent. Die wesentlichen Kostenanteile waren die Rohstoffkosten (für Holz bzw. Stroh bis 56%) und die Investitionskosten (Kapitalkosten bis 27%). Diese beiden Kostenanteile beeinflussten die Kosten für Bioethanol signifikanter als die Erlöse aus den Nebenprodukten. Wärme als zusätzliches Nebenprodukt kann allerdings durch die Erlöse aus dem Wärmeverkauf die Kosten noch deutlich reduzieren (von 0,64 auf 0,51 € pro Liter Bioethanol). In vergleichbaren Anlagenkonzepten (dieselben Nebenprodukte) ergaben sich bei Holz niedrigere Bioethanolkosten (0,45 €/l Bioethanol) gegenüber Stroh (0,61 €/l Bioethanol). Die niedrigsten Bioethanolkosten errechneten sich für das Anlagenkonzept Holz mit Nebenprodukt Pellets, gefolgt von den Kosten für die Anlagenkonzepte mit Stroh, die C6 und C5 Zucker umwandeln.

Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die kommerzielle Erzeugung von Bioethanol aus lignozellulosen Rohstoffen ist derzeit nicht Stand der Technik. Als nächster Schritt wäre es in Österreich anzustreben, eine

Demonstrationsanlage für lignozellulosen Bioethanol (etwa 10.000 bis 20.000 t/a) zu errichten und zu betreiben, um noch offene Fragestellungen besonders in der optimalen Prozessführung und in der Verwertung der Nebenprodukte (Qualität, Verwendung, Marktpotenzial etc.) zu erforschen. Mittelfristig könnte in Österreich Bioethanol aus Holz und Stroh in kommerziellen Anlagen erzeugt werden: 150.000 bis 250.000 t/a Bioethanol; etwa 4 bis 6,7 PJ/a. Für Bioethanol aus lignozellulosen Rohstoffen kann dieser Wert gemäß der EU-Richtlinie mit dem Faktor 2,5 bewertet werden, d.h. es könnten 2,3 bis 5,4% vom Kraftstoffbedarf (2010: etwa 306 PJ/a) zur Erfüllung der EU-Direktive herangezogen werden. Durch den Einsatz von Biotreibstoffen aus diesen Anlagen als Beimischung zu bzw. Ersatz von Benzin könnten etwa 0,3 bis 0,55 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr einspart werden.

Anzustreben wäre die Integration einer Bioethanolanlage in die bestehende Infrastruktur. Interessant wäre für Holz eine Integration in eine Papier- und Zellstoffanlage (etwa 10 Standorte in Österreich), bei Heizkraftwerken (etwa 10 Standorte in Österreich) und für Stroh eine Anlage ergänzend zu einer bestehenden Bioethanolanlage mit Getreide (ein Standort in Österreich).

Für die Erzeugung von Bioethanol aus lignozellulosen Rohstoffen sind allerdings noch weitere F&E-Aktivitäten notwendig, um die technologische Weiterentwicklung von Demonstrationsanlagen bis zum kommerziellen Einsatz zu bringen.

Summary

Motivation

The transport sector is highly responsible for greenhouse gas emissions in Austria: about 22 Mio. t CO₂ (27% of the Austrian greenhouse gas emissions). The growth rate of the transport sector is about 54% the highest of the greenhouse gas emissions within the last 20 years. The EU Renewable Energy Directive from 2009 prescribes for 2020 a share of 10% renewable energy in the transport sector. In Austria the share of biofuels was 7% in 2009. To fulfil the targets of the EU Directive biodiesel and bioethanol from starch and sugar (1st generation biofuels) and 2nd generation biofuels from ligno-cellulosic resources (synthetic biofuels by gasification and synthesis, ligno-cellulosic bioethanol by saccharification and fermentation) must be produced and used.

The technology of bioethanol production from ligno-cellulosic resources (wood and straw) is under development. Worldwide pilot and demonstration plants are operating (pilot plant in Sweden using wood, demonstration plants in Denmark, Italy and Spain using straw), and some with straw are under construction (e.g. Spain, Denmark, USA). International R&D-activities aim to make these technologies feasible because of the great potential that is offered by using ligno-cellulosic resources for bioethanol: wood and straw does not compete with the food and feed market.

Content and objectives

Goals of the projects were to develop Austrian prospects for the production of bioethanol from wood and straw. Together with stakeholder and the partners of the “Bioenergy Network of Excellence” concepts for bioethanol from wood and straw were developed. Technologic, economic and environmental assessment was done for the most promising concepts referring to the Austria’s energy supply, and Austrian perspectives were developed. Beside the production of bioethanol as a substitute for gasoline other energy carriers (e.g. electricity, pellets) and by-products (e.g. phenols, methanol) should enable a maximised use of the resources (wood and straw) with maximized economic and environmental benefits. For the optimization of the system the integration of a plant for bioethanol from wood and straw in existing infrastructure (e.g. wood logistic system, pulp production plant) will be taken into account. Stakeholder (from agriculture and forestry, biofuel industry, power plant industry, plant engineering etc.) integration by a “Project advisory board” and two workshops will support the basic research on ligno-cellulosic bioethanol and the selection of plant concepts, and discuss the final results.

Results

The assessment of additional useable potentials of straw and wood in Austria showed that straw (650,000 t/y, 90% dry matter) and wood (870,000 t/y, 45% dry matter) for the production of 100,000 t/y of ligno-cellulosic bioethanol should be available. Boundary conditions were defined together with the “Project advisory board”. 13 biotechnological production concepts for the production of 100,000 t/y of ligno-cellulosic bioethanol were established, 10 for straw and 3 for wood. A prerequisite for all the concepts is energy self sufficiency: the entire heat demand of the process must be met from by-products and also – depending on the concepts – the electricity demand. On principle only C6 sugar should be fermented (C5 sugar requires genetically modified yeast for fermentation). But for 2 concepts fermentation of C6 and C5 sugar was assumed. The concepts differ in by-products and combination of by-products (electricity, heat, bio-methane, pellets, C5 molasses).

Mass-balances and energy-balances were provided by the simulation tool “IPSEpro”. Greenhouse gas emissions and cumulative energy demand were calculated on life-cycle-base.

Inputs for the processes were biomass (wood or straw), additional materials, water and air. Outputs were the products and by-products (bioethanol, pellets, C5 molasses, bio-methane), waste water, CO₂, ashes and sludge. The concepts using wood need a higher input (870,000 t) - because of the high water content of the wood (55%) – than straw (650,000 t, 10%). Specific conversion rates are for wood 0.26 t bioethanol/t wood_{atro} and for straw 0.17 t bioethanol/t straw_{drybasis}. The biomass input of the plant concept (separation of liquids after pre-treatment) was 695,000 t of straw (0.16 t bioethanol/t straw_{drybasis}), of the concept (use of C6 and C5 sugar) was 450,000 t (0.25 t bioethanol/t straw_{drybasis}).

Energy-balances of straw concepts showed that by using only C6 sugar from 23% to 26%, by using of C6 and C5 sugar up to 37% of the energy input is converted to bioethanol. Depending on the concepts bioethanol and the by-products contain from 53% to 78% of the energy input.

In the concepts using wood from 41% to 43% of the energy input is converted to bioethanol. If the by-products were considered from 53% to 75% of the energy input is converted.

Environmental assessment on life-cycle-base showed a greenhouse gas-reduction potential from 41% to 76% referring to reference systems using gasoline and fossil or renewable energy. Greenhouse gas-reduction is higher for comparable concepts using wood than straw. Highest greenhouse gas-reduction for concepts: 1) by-product pellets, 2) by-products pellets and heat, 3) by-products electricity and heat. The concepts with by-products bio-methane and electricity also have a high potential for greenhouse gas-reduction. The lowest cumulative fossil energy demand was calculated for concepts using wood followed by concepts using straw with fermentation of C6 and C5 sugar.

Economic evaluation was done by cost analysis. The balance of annual costs of the bioethanol plant and annual proceeds from the by-products were defined as costs of bioethanol. Specific costs of bioethanol calculated on energy base are from 0.6 to 1.0 € per gasoline equivalent. Annual costs are significantly influenced by biomass costs (straw or wood, up to 56%) and investment costs (capital costs up to 27%). Costs of bioethanol are less influenced by proceeds from by-products. But by-product heat in combination with other by-products may reduce the cost of bioethanol significantly (from 0.64 to 0.51 € per litre bioethanol). Cost of bioethanol are lower for comparable concepts using wood (0.45 €/l bioethanol) than straw (0.61 €/l bioethanol). Lowest cost of bioethanol was calculated for the concept using wood with by-product pellets. Very low costs were calculated for the concept using straw with fermentation of C6 and C5 sugar.

Conclusion and perspectives

Production of ligno-cellulosic bioethanol in commercial plants is not state of the art. In Austria the next step could be to build and operate a demonstration plant (capacity 10,000 to 20,000 t/y). focus on research on processing methods and utilization of the by-products. Midterm in Austria 150,000 to 250,000 t/y ligno-cellulosic bioethanol (from 4 to 6.7 PJ/y) could be produced on commercial scale. As the EU directive allows to multiply the energy from ligno-cellulosic bioethanol by a factor of 2.5, about 2.3% to 5.4% of the fuel demand in Austria (2010: about 306 PJ/a) could be part of biofuel share to meet the EU target. By the use of this amount of ligno-cellulosic bioethanol as admixture or substitute for gasoline about 0.6 to 1 mio.t/y of greenhouse gases could be reduced.

First activities should aim at the integration of a bioethanol plant in existing infrastructure e.g. for wood integration in paper&pulp industry (about 10 locations in Austria) or in power plants (about 10 locations), for straw integration in existing bioethanol plant using grain (one location).

Considerable R&D-activities are still essential for the production of ligno-cellulosic bioethanol to develop demonstration plants to state of the art commercial plants.

1 Einleitung

Der Transportsektor trägt maßgeblich zu den Treibhausgas-Emissionen in Österreich bei: jährlich 22 Mio. t CO₂, das sind etwa 27% der österreichischen Treibhausgas-Emissionen. Dieser Sektor verzeichnet auch mit 54% die höchste Zuwachsrate bei den Treibhausgas-Emissionen von 1990 bis 2010 [UBA Österreich, 2012]. Der Einsatz von neuen Treibstoffen, die nachhaltig erzeugt und genutzt werden können, ist ein wesentlicher Beitrag, diesem Problem zu begegnen. Durch die Richtlinie der EU („Biotreibstoff-Richtlinie“), die den Einsatz von neuen Treibstoffen im Transportsektor fordert, werden die Bemühungen verstärkt, solche Treibstoffe zu entwickeln und einzusetzen. Die Erfüllung dieser Ziele wird über die kommerziellen Biotreibstoffe Biodiesel und Bioethanol aus Stärke und Zucker angestrebt (Biotreibstoffe der ersten Generation). Seit Jänner 2009 liegt die Richtlinie der EU für erneuerbare Energie vor, die im Jahr 2020 10% Anteil erneuerbarer Energie im Transportsektor vorsieht. Diese Ziele können nur mit lignozellulosen Rohstoffen erreicht werden, die zur Erzeugung synthetischer Biotreibstoffe (Vergasung mit Synthese) und Bioethanol (Verzuckerung mit Fermentation) eingesetzt werden können (Biotreibstoffe der zweiten Generation). Die Technologie der Erzeugung von Bioethanol aus lignozellulosen Rohstoffen, vor allem Holz und Stroh, ist in Entwicklung. Es sind derzeit weltweit Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen in Planung bzw. in Bau oder in Betrieb (z.B. Pilotanlage mit Holz in Schweden, mit Stroh in Kanada, Demonstrationsanlage für Stroh in Dänemark und Spanien). Internationale F&E-Aktivitäten zielen auf den kommerziellen Einsatz dieser Technologien, da lignozelluloses Bioethanol mittelfristig ein großes Potenzial zur Bereitstellung nachhaltiger Biotreibstoffe hat: eine Treibhausgas-Reduktion von bis zu 85% bei Ersatz von Benzin ist möglich und die Nutzung von Holz und Stroh beeinflusst nicht die Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Basierend auf einschlägigen Vorarbeiten unter anderem im EU Network of Excellence „Bioenergy NoE“ (VTT/Finland, Lund University/Sweden, ECN/Netherlands, JOANNEUM RESEARCH/Austria) wurde deutlich, dass die Einzelprozesse weitgehend bekannt sind, und der nächste Schritt in Richtung Prozessintegration und einer Demonstrationsanlage gehen sollten.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist es, österreichische Perspektiven für die Erzeugung von Bioethanol aus Holz und Stroh zu erarbeiten und Anlagenkonzepte zu entwickeln. Unter Mitwirkung und Einbeziehung betroffener Akteursgruppen (Technologieanbieter, Anlagenbauunternehmen, Land- und Forstwirtschaft, Treibstoffsektor, Betreiber konventioneller Bioethanolanlagen und (Heiz)Kraftwerken) sowie den Partnern aus dem „Bioenergy NoE“ werden unterschiedliche Technologieoptionen für Bioethanol aus Holz und Stroh erstellt. Es werden integrierte Technologieoptionen (z.B. Bioraffinerie) analysiert, in denen neben dem erneuerbaren Kraftstoff Bioethanol als Benzinersatz auch andere Energieträger (wie z.B. Strom, Wärme, Pellets) und Wertstoffe (z.B. Phenol, Methanol) gekoppelt erzeugt werden können, um neben einer hohen Wertschöpfung eine maximale Erschließung der stofflichen und energetischen Potenziale der Rohstoffe Holz und Stroh zu ermöglichen. Zur Optimierung des Gesamtsystems wird die Nutzung von Synergien dieser Technologieoptionen mit bestehender Infrastruktur (wie z.B. vorhandene Holzlogistik) und dem Energiesektor berücksichtigt.

Aus diesen Technologieoptionen werden Anlagenkonzepte, die für Österreich besonders geeignet sind, ausgewählt, mit Hilfe des Programms IPSEpro modelliert und aus ökonomischer, ökologischer sowie energiepolitischer Sicht bewertet. Zur Bewertung des zukünftigen Stellenwertes wird Bioethanol auch mit synthetischen Biotreibstoffen aus der Vergasung verglichen, insbesondere technologische Kenngrößen, Investitions- und

Produktionskosten sowie der zur großtechnischen Anwendung noch zu erwartenden Hürden und Herausforderungen.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Als Schwerpunkte des Projektes wurden bearbeitet:

- Erstellen einer Übersicht der möglichen Technologieoptionen für Bioethanol aus Holz- und Stroh z.B. Prozesse, Produkte, Anlagenkonzepte: Ausgehend von den in Österreich möglichen Nutzungspotenzialen von Holz und Stroh wurden mittels Literaturrecherche die Rohstoffeigenschaften, die mögliche Produktpalette an Nebenprodukten und alle notwendigen Prozesse von den Rohstoffen zu den unterschiedlichen Nebenprodukten zusammengestellt. Weiters wurden Aspekte für die mögliche Integration in die österreichische Industrie-Infrastruktur bzw. in den Energiesektor (z.B. Zellstoff /Papierfabrik, konventionelle Stärke und zuckerbasierte Bioethanolanlage, Pelletserzeugung, (Heiz)Kraftwerke) betrachtet und Marktpotenziale für die Brenn- und Wertstoffe aus Anlagen für Bioethanol aus Holz und Stroh abgeschätzt.
- Auswahl und Festlegung der Anlagenkonzepte für die weitere Modellierung mit dem Simulationstool IPSEpro: Bei der Auswahl und Festlegung der Anlagenkonzepte aus den Technologieoptionen wurden spezifische österreichische Bedingungen berücksichtigt und die verwendeten Prozesstechnologien sowie Energiebereitstellung für die Modellierung festgelegt. Dabei war das Ziel der Modellierung für jeden einzelnen Prozessschritt möglichst genau die Massen- und Energiebilanz bei sich ändernden Bedingungen (z.B. sich ändernde Eingangsströme oder Temperaturen) darzustellen.
- Ökonomische und ökologische Bewertung der modellierten Anlagenkonzepte: Auf Basis der Massen- und Energiebilanzen wurden die ausgewählten Anlagenkonzepte ökonomisch mittels statischer Kostenrechnung und ökologisch mittels Lebenszyklusanalyse unter Verwendung des Software-Tools GEMIS (**G**lobales **E**missions-**M**odell **I**ntegrierter **S**ysteme) bewertet.
- Die Ergebnisse zu den Anlagenkonzepten werden verwendet, um Energiewirtschaftliche Auswirkungen speziell auf den österreichischen Treibstoffsektor und den F&E-Bedarf im Bereich lignozellulöser Rohstoffe für Biotreibstoffe darzustellen.
- Durch Einrichtung eines Projektbeirats (AGRANA, Vogelbusch, OMV, Andritz AG) und Durchführung von zwei Workshops unter Mitwirkung und Einbeziehung betroffener Akteursgruppen und internationaler Experten wurde sichergestellt, dass Aspekte der österreichischen Industrie und neueste internationale Forschungsergebnisse im Projekt berücksichtigt werden konnten.

1.3 Einordnung in das Programm

Der zentralen Zielsetzung des Energieforschungsprogramms entsprechend wurde Bioethanol aus Holz und Stroh als Biotreibstoff der zweiten Generation als Forschungsthema mit strategischer Relevanz abgeleitet. Dieses Projekt wurde zum Thema „Langfristige Technologieoptionen aus ökonomischer, ökologischer und sicherheitspolitischer Sicht“ im Schwerpunkt „Energieträger- und Technologiebewertung“ eingereicht. Bei diesem Thema sind vor allem die Datenbasis, Zukunftsbilder, Energieträger und Technologiebewertung und Umsetzungspfade von besonderer Bedeutung. Bei der Bearbeitung des Themas wurde die Mitwirkung und Einbeziehung betroffener Akteursgruppen (z.B. Industriepartner) sowie eine trans- und interdisziplinären Betrachtung vorgesehen. Für die Sicherung des Wirtschaftsstandortes ist es von Vorteil, dass Österreich bereits heute in der Holz-Verarbeitung zu Holz- und Papierprodukten eine international angesehene Position hat, die

in Zukunft durch eine Umwandlung von Holz zu Bioethanol und hochwertigen neuen Brenn- und Wertstoffen nachhaltig erweitert und ausgebaut werden kann.

Bei der Technologiebewertung von Bioethanol aus Holz und Stroh wurden mittel- und langfristige Technologieoptionen konzipiert. Zur Optimierung des Gesamtsystems wird die Nutzung von Synergien dieser Technologieoptionen mit bestehender Infrastruktur (wie z.B. vorhandene Holzlogistik) und dem Energiesektor berücksichtigt. Mit der Übersicht der möglichen Technologieoptionen für Bioethanol aus Holz und Stroh kann eine Vielzahl von Produkten (z.B. Bioethanol, Phenol, Methanol) und Prozessen (z.B. Vorbehandlung, Hydrolyse, Fermentation) aus erneuerbaren Energien mit Signalwirkung für zukünftige Prozesse beschrieben und bewertet werden. Ausgewählte Anlagenkonzepte aus ökonomischer und ökologischer Sicht untersucht. Hierbei wurde der Blick nicht nur auf Österreich gerichtet, sondern es wurde auch internationale Entwicklungen in der EU berücksichtigt, was durch die langjährige Kooperation mit den Partnern des „Bioenergy Network of Excellence“ (www.bioenergynoe.org) in diesem Themenbereich - VTT (FIN), Lund University (S), INRA (F) und ECN (NL) - sichergestellt wurde.

Die Nutzung von Holz- und Stroh zur Erzeugung von Biotreibstoff, Strom, Wärme, sowie von Nebenprodukten in Anlagen für Bioethanol aus Holz und Stroh ist Teil eines nachhaltigen Energiesystems, da bei Nutzung erneuerbarer Rohstoffe erneuerbare Energieträger mit der Wertstoff-Erzeugung bei hoher energetischer und stofflicher Effizienz gekoppelt werden, um die Potenziale der hochwertigen Rohstoffe maximal zu nutzen (Konzept der Bioraffinerie). Es werden unterschiedliche Energieträger erzeugt, die flexibel für unterschiedliche Energiedienstleistungen wie Transport, Strom und Wärme genutzt werden können. Neben Bioethanol, das durch die Verzuckerung der Zellulose- und Hemizellulose der Rohstoffe und der anschließenden Fermentation erzeugt wird, können etwa 1/3 der Energie in den flüssigen Biotreibstoff Ethanol umgewandelt werden. Das Lignin aus dem Rohstoff kann zur Erzeugung von festem Brennstoff z.B. Pellets, wie auch zur Erzeugung von Prozesswärme und Strom eingesetzt werden, womit ein Großteil der Energie im Rohstoff ausgenutzt wird.

Da der Kohlenstoffkreislauf bei der nachhaltigen Nutzung von Holz- und Stroh geschlossen ist, kann beim Ersatz von konventionellen fossilen Energieträgern wie z.B. Bioethanol statt Benzin eine deutliche Reduktion von Treibhausgasen (bis zu 85%) erreicht werden, insbesondere wenn alle Reststoffe stofflich und energetisch genutzt werden, kann weiterer Zusatznutzen zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen erreicht werden.

Mit der Einbindung von betroffenen Akteursgruppen aus der Land- und Forstwirtschaft, Technologieanbietern, dem Anlagenbau, den Betreibern konventioneller Bioethanolanlagen und (Heiz)Kraftwerken, sowie dem Treibstoffsektor in einem Projektbeirat (Agrana, Vogelbusch, OMV, Andritz AG) und zwei Workshops wurde die Kooperation mit österreichischen Unternehmen sichergestellt.

1.4 Verwendete Methoden

Für die Erstellung der Technologieoptionen (z.B. Prozesse, Produkte, Verfahren der Umwandlung) wurde eine Fachliteraturrecherche durchgeführt. Diese Zusammenstellung umfassender Informationen wurde ausgewertet (z.B. Beurteilung von Verfahren zum „Pretreatment“) und als eine Grundlage für die Auswahl der Prozesse und Anlagenkonzepte verwendet. Eine weitere Basis für die Auswahl waren Randbedingungen in Österreich (z.B. Potenziale der Rohstoffe Holz und Stroh).

1.4.1 Modellierung mit IPSEpro

Für die wirtschaftliche und ökologische Bewertung ausgewählter Anlagenkonzepte ist die Berechnung detaillierter Massen und Energiebilanzen unerlässlich. Zu diesem Zweck wurde die Simulationssoftware IPSEpro verwendet. Die Struktur der Software ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Software wurde ursprünglich für die Modellierung von Kraftwerksprozessen entwickelt und verfügt über die entsprechenden Stoffdatenbanken und Modelle [Perz and Bergmann, 2003]. Im IPSE-MDK (Model development kit) (siehe Abbildung 1) können relativ einfach neue Stoffkomponenten und Verfahrensschritte (unit operations) zu den bestehenden model libraries hinzugefügt werden, um auf diese Weise neue model libraries zu erstellen. So wurden in früheren Projekten model libraries mit Biomassekomponenten sowie unit operations für die Vorbehandlung, Bioethanolfermentation, Biogasfermentation sowie Biogasupgrading entwickelt [Pfeffer, 2006, Miltner, 2010, Schausberger *et al.*, 2010]. Diese model libraries wurden kombiniert, verbessert und erweitert, sodaß sämtliche Anlagenkonzepte (siehe Abschnitt 2.4) in IPSEpro dargestellt werden können.

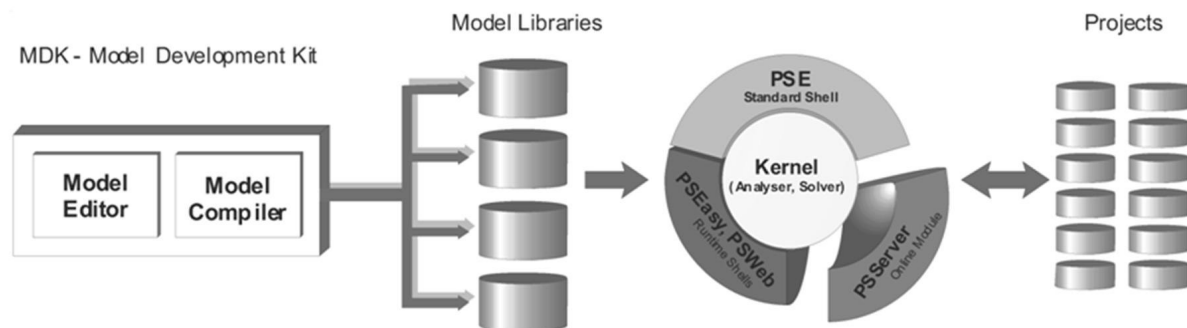


Abbildung 1: Struktur von IPSEpro [Perz and Bergmann, 2003]

Konkret wurden zu den bestehenden Komponenten die Feststoffe C5 Zucker, extrazelluläres Enzym sowie die flüssigen Komponenten Essigsäure, Glycerol und Furfural hinzugefügt.

Bei der Modellierung neuer Verfahrensschritte wurden unter anderem die folgenden „units“ neu programmiert bzw. einfache bestehende Modelle erweitert und verbessert (in Klammer das Kapitel, in dem die Technologie beschrieben wird):

- Zerkleinerung (2.2.2.1)
- Steam Explosion (steam pretreatment) (2.2.2.2)
- Hefeproduktion (2.2.2.3)
- Enzymproduktion (2.2.2.4)
- Enzymatische Hydrolyse (2.2.2.5)
- C5-Fermentation (2.2.2.5)
- Fest-Flüssig-Trennung (2.2.2.8.1)
- Verdampfung (2.2.2.8.2)
- Dampftrocknung (2.2.2.8.3)
- Biogasfermentation (2.2.2.9.1)
- Aerobe Abwasserreinigung (2.2.2.10)

Mit dieser neuen model library konnten nun alle Varianten in IPSEpro bilanziert werden. Dabei wurden zunächst die Flowsheets ohne Wärmerückgewinnung (Wärmeintegration, Heat integration, HI) berechnet. Lediglich Destillation (3-Kolonnen Lösung) und Eindampfung (5-stufig) wurden jeweils intern optimiert.

Anschließend wurde die notwendigen Daten aus IPSEpro extrahiert, extern eine Pinch-Analyse durchgeführt und ein optimiertes Wärmetauschernetzwerk berechnet. Dazu wurde

eine selbst entwickelte Software (TVTHens) verwendet. Um Massen- und Energiebilanzen für das wärmeoptimierte Flowsheet zu berechnen wurde das Wärmetauschernetzwerk in IPSEpro realisiert. Die für die Bilanzen wichtigen Biomasseheizwerte wurden nach dem PLS-Modell von [Friedl *et al.*, 2005] berechnet. Bei bekannten Daten (Stroh, Holz) war die Übereinstimmung mit der Literatur [Reisinger *et al.*, 2009] ausreichend. Schließlich wurden Massen- und Energiebilanzen nach MS Excel exportiert und für die Berechnung der Lebenszyklusanalyse aufbereitet.

1.4.2 Lebenszyklusanalyse

Die energetische und ökologische Beurteilung der Anlagenkonzepte erfolgt auf Basis der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis - LCA). Die energetische Analyse mittels LCA beinhaltet die Berechnung des „Kumulierten Primärenergieverbrauchs KEV“. Die ökologische Beurteilung durch die LCA errechnet die Treibhausgas-Emissionen und nimmt Bezug auf ISO 14040 „Life Cycle Assessment“, der „Standard Methodology“ von IEA Bioenergy Task 38 „Greenhouse Gas Balances of Biomass and Bioenergy Systems“ und den Empfehlungen der COST Action E9 „Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products“. Der Lebenszyklus umfasst dabei 5 Teilschritte („from cradle to grave“ bzw. „well to wheel WTW“ für Treibstoffe, siehe Abbildung 2).

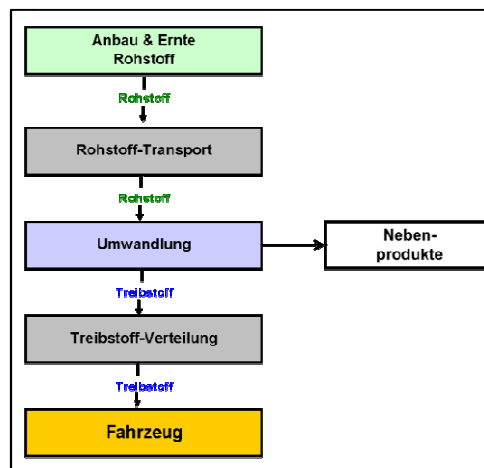


Abbildung 2: Die 5 Teilschritte der Lebenszyklusanalyse

In der Lebenszyklusanalyse (LCA, Prozesskettenanalyse) werden alle emissions- und energierelevanten Prozesse im In- und Ausland berücksichtigt, die für die Herstellung, Transport und Nutzung von Bioethanol notwendig sind. Für die Berechnung wird das Programm GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.5) verwendet. Es werden die Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) berücksichtigt.

- Kohlendioxid (CO_2), eine geruch- und geschmacklose Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindung, entsteht als Hauptprodukt bei der Verbrennung von Kohlenstoff. Die pro Energieeinheit emittierte CO_2 -Menge ist unter anderem vom Kohlenstoff-Gehalt des Brennstoffes abhängig. Weiters entsteht CO_2 beim aeroben Abbau von Biomasse. Im Prozess der Photosynthese wird das CO_2 aus der Atmosphäre in der Pflanze gebunden.
- Methan (CH_4), eine brennbare Kohlenwasserstoff-Verbindung, ist Hauptbestandteil von Erdgas und ein Produkt der unvollständigen Verbrennung. Weiters entsteht CH_4 beim anaeroben Abbau von Biomasse. CH_4 -Emissionen treten auch beim Abbau von Kohle und bei der Förderung von Erdöl und Erdgas auf.
- Lachgas (N_2O) ist eine farblose und toxische Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung, die unter bestimmten Bedingungen bei Verbrennungsprozessen entsteht. Die dabei emittierte

IMPRESSUM

Verfasser

JOANNEUM RESEARCH

Forschungsgesellschaft mbH

RESOURCES – Institut für Wasser, Energie
und Nachhaltigkeit Energieforschung

Kurt Könighofer
Gerfried Jungmeier
Lorenza Canella
Ingrid Kaltenegger
Elisabethstraße 18/II, 8010 Graz
Tel. +43/316/876-1324
Fax +43/316/8769-1324
Web: www.joanneum.at

Technische Universität Wien

Fakultät für Technische Chemie
Institut für Verfahrenstechnik,
Umwelttechnik u. Techn. Biowissenschaften
Prozess Simulation und Thermische
Verfahrenstechnik

Anton Friedl
Philipp Kravanja
Getreidemarkt 9/166-2, 1060 Wien
Tel. +43/1/58801-166257
Fax. +43/1/58801-16699
Web: www.thvt.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch
die Forschungsförderungsgesellschaft
(FFG) sind für die Weiternutzung der hier
enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH