

# Energie aus Biomasse

Stefan T. Döge

Physik-Department  
Technische Universität München

10. November 2011



# Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Biomasseverwertung
- 3 Flüssige Biotreibstoffe
- 4 Zusammenfassung, Literatur und Quellen

## Zitat

*„Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse haben das Potenzial, ein wesentliches Standbein klimaschonender Energieversorgung zu werden.“*

—BKin Angela Merkel<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>am 17. April 2008 bei Choren in Freiberg/Sachsen

## Biomasse ist...

- DE-Wiki: ...die gesamte Masse an Lebewesen.

## Biomasse ist...

- DE-Wiki: ...die gesamte Masse an Lebewesen.
- NL-Wiki: ...das Trockengewicht von pflanzlichen/tierischen Organismen oder Teilen davon.

## Biomasse ist...

- DE-Wiki: ...die gesamte Masse an Lebewesen.
- NL-Wiki: ...das Trockengewicht von pflanzlichen/tierischen Organismen oder Teilen davon.
- EN-Wiki: ...biologisches Material von lebenden oder vor Kurzem noch lebenden Organismen.

## Biomasse ist...

- DE-Wiki: ...die gesamte Masse an Lebewesen.
- NL-Wiki: ...das Trockengewicht von pflanzlichen/tierischen Organismen oder Teilen davon.
- EN-Wiki: ...biologisches Material von lebenden oder vor Kurzem noch lebenden Organismen.
- RU-Wiki: ...die kumulierte Masse pflanzlicher oder tierischer Organismen, welche im Moment der Beobachtung in der Biogeozenose existieren.

## Biomassedefinition der EU

- Definition per Richtlinie **2001/77/EG** des Europ. Parlaments und des Rates vom 27.9.2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt:  
„**Biomasse** ist der biologisch abbaubare Anteil von Erzeugnissen, Abfällen und Rückständen der Landwirtschaft (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Industriezweige sowie der biologisch abbaubare Anteil von Abfällen aus Industrie und Haushalten.“

## Bioenergie...

- ...ist die aus Biomasse gewonnenen Energie, z.B. in Form von Wärme, elektrischem Strom, Kraftstoffen.

## Bioenergie...

- ...ist die aus Biomasse gewonnenen Energie, z.B. in Form von Wärme, elektrischem Strom, Kraftstoffen.
- ...leitet sich aus der Sonnenenergie ab (↗Photosynthese).



## Bioenergie...

- ...ist die aus Biomasse gewonnenen Energie, z.B. in Form von Wärme, elektrischem Strom, Kraftstoffen.
- ...leitet sich aus der Sonnenenergie ab (↗Photosynthese).  
$$6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}, \Delta H^0 = +2870 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$
- ...ist der Vorläufer der kohlenstoffbasierten fossilen Energie.

## Bioenergie...

- ...ist die aus Biomasse gewonnenen Energie, z.B. in Form von Wärme, elektrischem Strom, Kraftstoffen.
- ...leitet sich aus der Sonnenenergie ab (↗Photosynthese).  
$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O, \Delta H^0 = +2870 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$
- ...ist der Vorläufer der kohlenstoffbasierten fossilen Energie.
- ...ist die Energie der Zukunft??

## Klimaschutzziele in Deutschland und der EU

- EU: 2-Grad-Ziel<sup>2</sup> und -20 % CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2020<sup>3</sup>; -30 % falls die Hauptemittenten (China, USA) sich auch zu Minderungen verpflichten

---

<sup>2</sup>Die globale Durchschnittstemperatur soll auf nicht mehr als 2° C über dem vorindustriellen Niveau ansteigen

<sup>3</sup>für alle Angaben: verglichen mit dem Referenzjahr 1990 

## Klimaschutzziele in Deutschland und der EU

- EU: 2-Grad-Ziel<sup>2</sup> und -20 % CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2020<sup>3</sup>; -30 % falls die Hauptemittenten (China, USA) sich auch zu Minderungen verpflichten
- D: -30 %; -40 % falls die EU um 30 % reduziert

---

<sup>2</sup>Die globale Durchschnittstemperatur soll auf nicht mehr als 2° C über dem vorindustriellen Niveau ansteigen

<sup>3</sup>für alle Angaben: verglichen mit dem Referenzjahr 1990 

## Klimaschutzziele in Deutschland und der EU

- EU: 2-Grad-Ziel<sup>2</sup> und -20 % CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2020<sup>3</sup>; -30 % falls die Hauptemittenten (China, USA) sich auch zu Minderungen verpflichten
- D: -30 %; -40 % falls die EU um 30 % reduziert

---

<sup>2</sup>Die globale Durchschnittstemperatur soll auf nicht mehr als 2° C über dem vorindustriellen Niveau ansteigen

<sup>3</sup>für alle Angaben: verglichen mit dem Referenzjahr 1990 

# Bundesgesetze

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), 2000  
→ Subventionierung von Strom aus EE

# Bundesgesetze

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), 2000  
→ Subventionierung von Strom aus EE
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, 2002  
→ KWK-Anteil auf 25 % des Stromverbrauchs in Dtl. erhöhen

## Bundesgesetze

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), 2000  
→ Subventionierung von Strom aus EE
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, 2002  
→ KWK-Anteil auf 25 % des Stromverbrauchs in Dtl. erhöhen
- Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG), 01/2007 (geändert 07/2009) → 2010–14 6,25 kal.-% EE-Anteil am Energieverbrauch des Verkehrssektors

## Bundesgesetze

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), 2000  
→ Subventionierung von Strom aus EE
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, 2002  
→ KWK-Anteil auf 25 % des Stromverbrauchs in Dtl. erhöhen
- Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG), 01/2007 (geändert 07/2009) → 2010–14 6,25 kal.-% EE-Anteil am Energieverbrauch des Verkehrssektors
- Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)  
→ 20 % des Endenergieverbrauchs in der EU erneuerbar

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)
- Zwei- und Mehrfachzucker (insbes. Saccharose)

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)
- Zwei- und Mehrfachzucker (insbes. Saccharose)
- Polysaccharide (Stärke)

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)
- Zwei- und Mehrfachzucker (insbes. Saccharose)
- Polysaccharide (Stärke)
- Cellulose

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)
- Zwei- und Mehrfachzucker (insbes. Saccharose)
- Polysaccharide (Stärke)
- Cellulose
- Lignin (Stützgerüst der Pflanzen)

## Energetisch verwertbare Bestandteile

- Einfachzucker (Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose)
- Zwei- und Mehrfachzucker (insbes. Saccharose)
- Polysaccharide (Stärke)
- Cellulose
- Lignin (Stützgerüst der Pflanzen)
- Mineralstoffe (Mg, Ca, K, Nitrat, Phosphat) und Spurenelemente (Fe, Cl, ...) sind nicht energetisch verwertbar

## Feste Biomasse – Direktverwertung

- Holz/Holzpellets
  - zur Feuerung/Heizung traditionell oder in Blockheizkraftwerken (BHKW)
  - als Beifeuerung in Kohlekraftwerken, sog. Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) zu deutsch: Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung
  - als Kraftstoff mittels Holzvergasung

## Feste Biomasse – Direktverwertung

- Holz/Holzpellets
  - zur Feuerung/Heizung traditionell oder in Blockheizkraftwerken (BHKW)
  - als Beifeuerung in Kohlekraftwerken, sog. Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) zu deutsch: Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung
  - als Kraftstoff mittels Holzvergasung
- Klärrückstände
  - als Beifeuerung in Kohlekraftwerken

# Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage

# Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage
- Grassilage

# Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage
- Grassilage
- Roggen-Ganzpflanzensilage

# Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage
- Grassilage
- Roggen-Ganzpflanzensilage
- Futter- und Zuckerrübe

# Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage
- Grassilage
- Roggen-Ganzpflanzensilage
- Futter- und Zuckerrübe
- Bioabfall

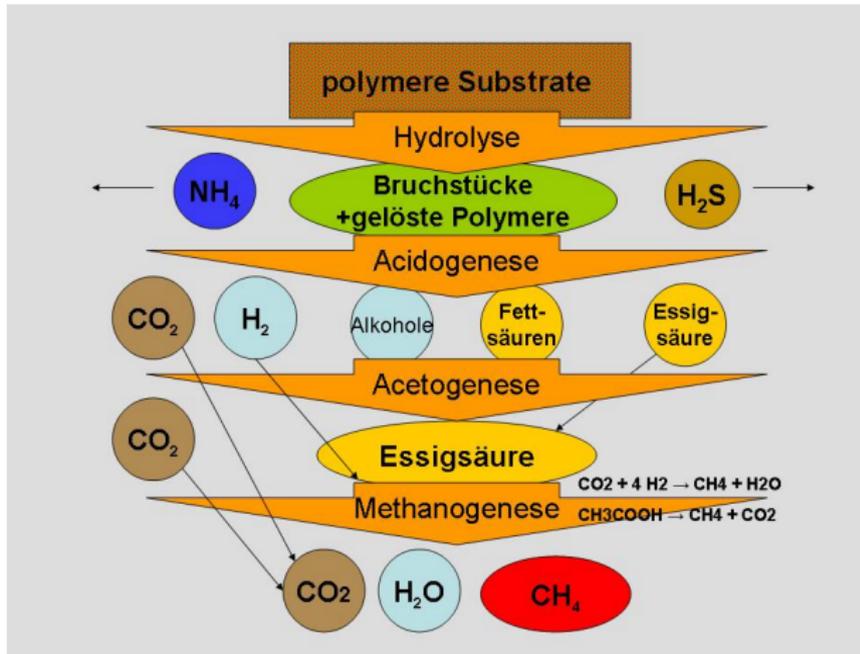
## Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

- Maissilage
- Grassilage
- Roggen-Ganzpflanzensilage
- Futter- und Zuckerrübe
- Bioabfall
- Rinder-, Schweine-, Hühnermist und -gülle

## Ausgangsstoffe für die Biogasproduktion

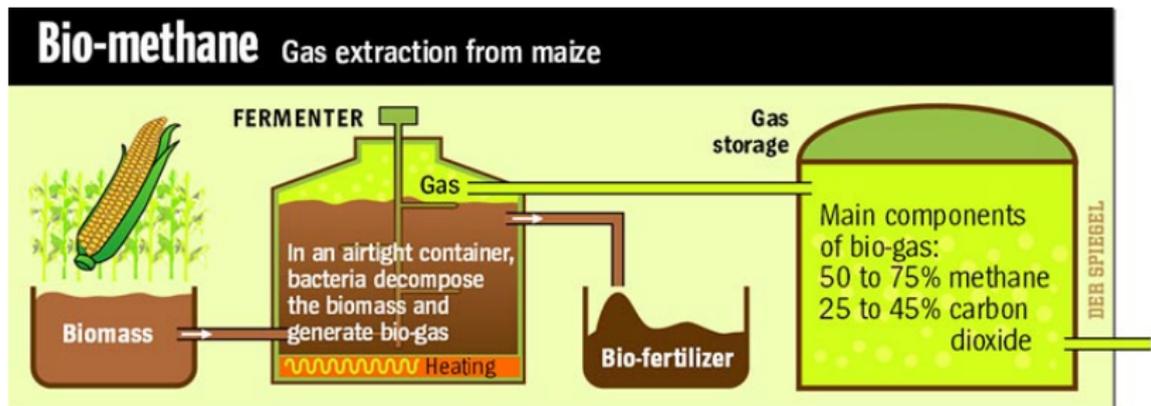
- Maissilage
- Grassilage
- Roggen-Ganzpflanzensilage
- Futter- und Zuckerrübe
- Bioabfall
- Rinder-, Schweine-, Hühnermist und -gülle
- Getreideschlempe

# Biogasherstellung – Chemie



<sup>4</sup>aus der deutschen Wikipedia

## Biogasherstellung – Anlagenschema



<sup>5</sup>aus Dem Spiegel (2007)

## Biogaszusammensetzung

Stoff	Schwankungsbreite	Durchschnitt <sup>6</sup>
Methan	45–70 %	60 %
Kohlenstoffdioxid	25–55 %	35 %
Wasserdampf	0–10 %	3,1 %
Stickstoff	0,01–5 %	1 %
Sauerstoff	0,01–2 %	0,3 %
Wasserstoff	0–1 %	< 1 %
Ammoniak	0,01–2,5 mg/m <sup>3</sup>	0,7 mg/m <sup>3</sup>
Schwefelwasserstoff	10–30.000 mg/m <sup>3</sup>	500 mg/m <sup>3</sup>

<sup>6</sup>Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)
- Bioethanol (1. und 2. Generation), teilweise in Form von Ethyl-*tert*-butylether (ETBE)

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)
- Bioethanol (1. und 2. Generation), teilweise in Form von Ethyl-*tert*-butylether (ETBE)
- Synthesediesel (2. Generation)

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)
- Bioethanol (1. und 2. Generation), teilweise in Form von Ethyl-*tert*-butylether (ETBE)
- Synthesediesel (2. Generation)
- Biobutanol (3. Generation?)

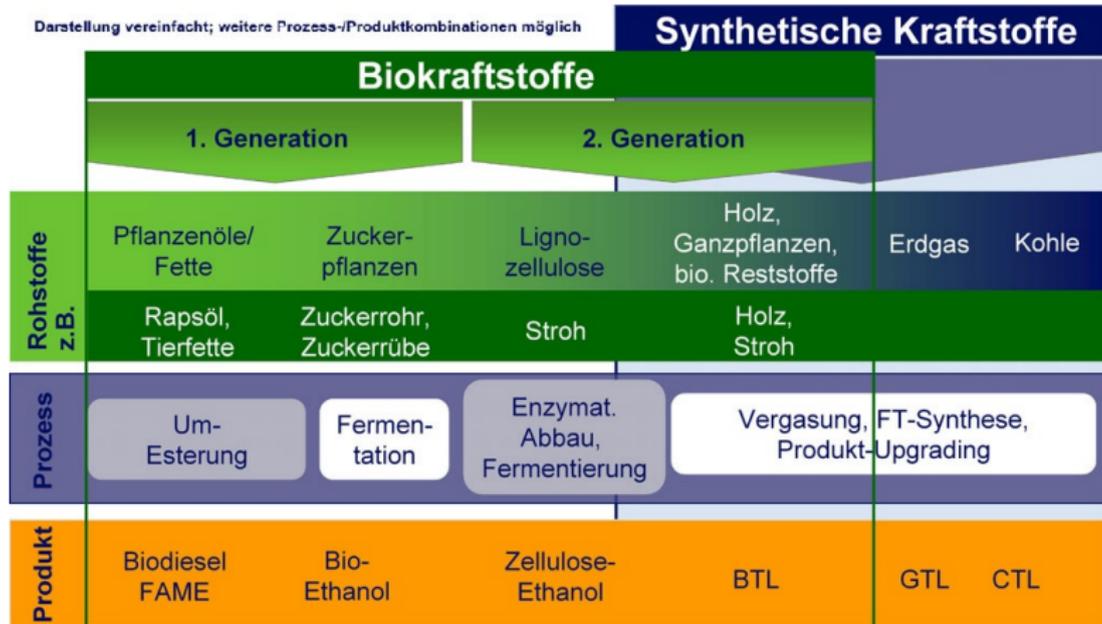
## Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)
- Bioethanol (1. und 2. Generation), teilweise in Form von Ethyl-*tert*-butylether (ETBE)
- Synthesediesel (2. Generation)
- Biobutanol (3. Generation?)
- Biodiesel/-ethanol/-gas/-H<sub>2</sub> aus Algen (3. Generation?)

# Allgemein

- Pflanzenöl/Pöl (1. Generation)
- Biodiesel/Fettsäuremethylester (1. Generation)
- Bioethanol (1. und 2. Generation), teilweise in Form von Ethyl-*tert*-butylether (ETBE)
- Synthesediesel (2. Generation)
- Biobutanol (3. Generation?)
- Biodiesel/-ethanol/-gas/-H<sub>2</sub> aus Algen (3. Generation?)
- Pyrolyseöl als Intermediat aus Karbonisierung

# Einteilung in 1. und 2. Generation)



7

<sup>7</sup>nach Choren Industries GmbH, Freiberg/Sachsen (2009)

# Pflanzenöl und Biodiesel

- Grundpflanzen: Raps, Soja, Ölpalmen, Purgiernuss (Jatropha)

# Pflanzenöl und Biodiesel

- Grundpflanzen: Raps, Soja, Ölpalmen, Purgiernuss (Jatropha)
- Extraktion des Öls durch Pressen und chemisches Lösen

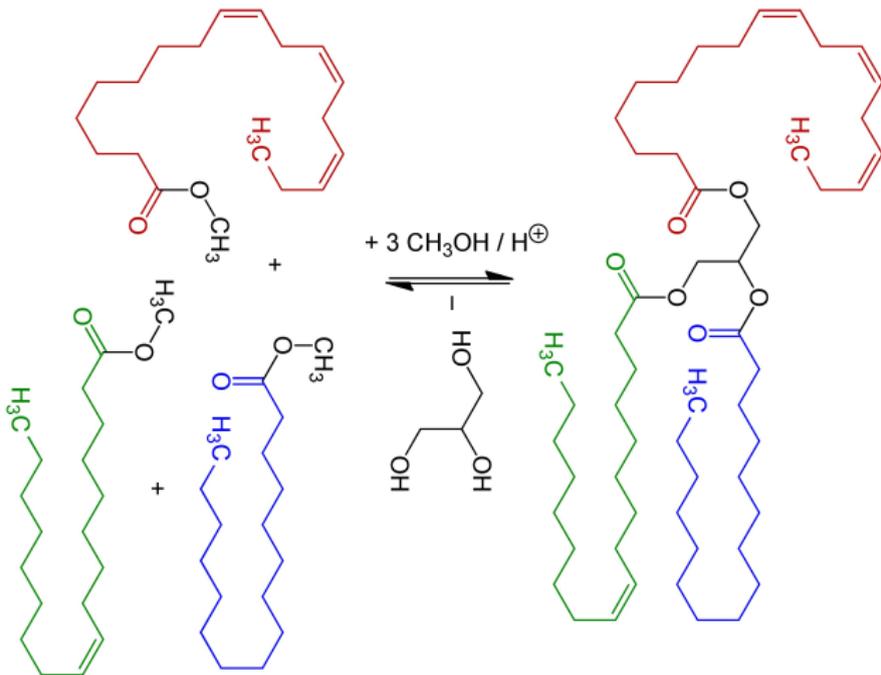
# Pflanzenöl und Biodiesel

- Grundpflanzen: Raps, Soja, Ölpalmen, Purgiernuss (Jatropha)
- Extraktion des Öls durch Pressen und chemisches Lösen
- Aufarbeitung durch Herausfiltern von Schwebstoffen und Bindung freier Säuren

# Pflanzenöl und Biodiesel

- Grundpflanzen: Raps, Soja, Ölpalmen, Purgiernuss (Jatropha)
- Extraktion des Öls durch Pressen und chemisches Lösen
- Aufarbeitung durch Herausfiltern von Schwebstoffen und Bindung freier Säuren
- Pflanzenöl → Biodiesel durch katalysierte Umesterung mit Methanol, Glycerin wird frei

# Umesterung von Pflanzenöl



# Bioethanol der ersten Generation (aus Zucker und Stärke)

- Grundpflanzen: Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Mais

# Bioethanol der ersten Generation (aus Zucker und Stärke)

- Grundpflanzen: Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Mais
- Aufspaltung der Saccharose in Glucose und Fructose

## Bioethanol der ersten Generation (aus Zucker und Stärke)

- Grundpflanzen: Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Mais
- Aufspaltung der Saccharose in Glucose und Fructose
- alkoholische Vergärung der C<sub>6</sub>-Zucker (Glucose, Fructose) zu Ethanol

## Bioethanol der ersten Generation (aus Zucker und Stärke)

- Grundpflanzen: Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Mais
- Aufspaltung der Saccharose in Glucose und Fructose
- alkoholische Vergärung der C<sub>6</sub>-Zucker (Glucose, Fructose) zu Ethanol
- Rektifizierung (auf 95,6 Vol.-%) und Absolutierung des Ethanols (auf 99,7 Vol.-%)

# Bioethanol der ersten Generation (aus Zucker und Stärke)

- Grundpflanzen: Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Mais
- Aufspaltung der Saccharose in Glucose und Fructose
- alkoholische Vergärung der C<sub>6</sub>-Zucker (Glucose, Fructose) zu Ethanol
- Rektifizierung (auf 95,6 Vol.-%) und Absolutierung des Ethanols (auf 99,7 Vol.-%)
- Beimischung zum Benzin als E5, E10, E25, Exy, E100

## Bioethanol der zweiten Generation (aus Lignocellulose)

- thermisch-chemische Vorbehandlung (↗Säuren) zum Aufspalten der Cellulose und Hemicellulose nötig, es entstehen toxische Substanzen (Furfurale)

## Bioethanol der zweiten Generation (aus Lignocellulose)

- thermisch-chemische Vorbehandlung (↗Säuren) zum Aufspalten der Cellulose und Hemicellulose nötig, es entstehen toxische Substanzen (Furfurale)
- hoher Enzymbedarf (Cellulasen, Xylanasen, Glucosidasen)

## Bioethanol der zweiten Generation (aus Lignocellulose)

- thermisch-chemische Vorbehandlung (↗Säuren) zum Aufspalten der Cellulose und Hemicellulose nötig, es entstehen toxische Substanzen (Furfurale)
- hoher Enzymbedarf (Cellulasen, Xylanasen, Glucosidasen)
- Hemicellulose bestehen größtenteils aus Xylose und Arabinose (beide C<sub>5</sub>-Zucker)

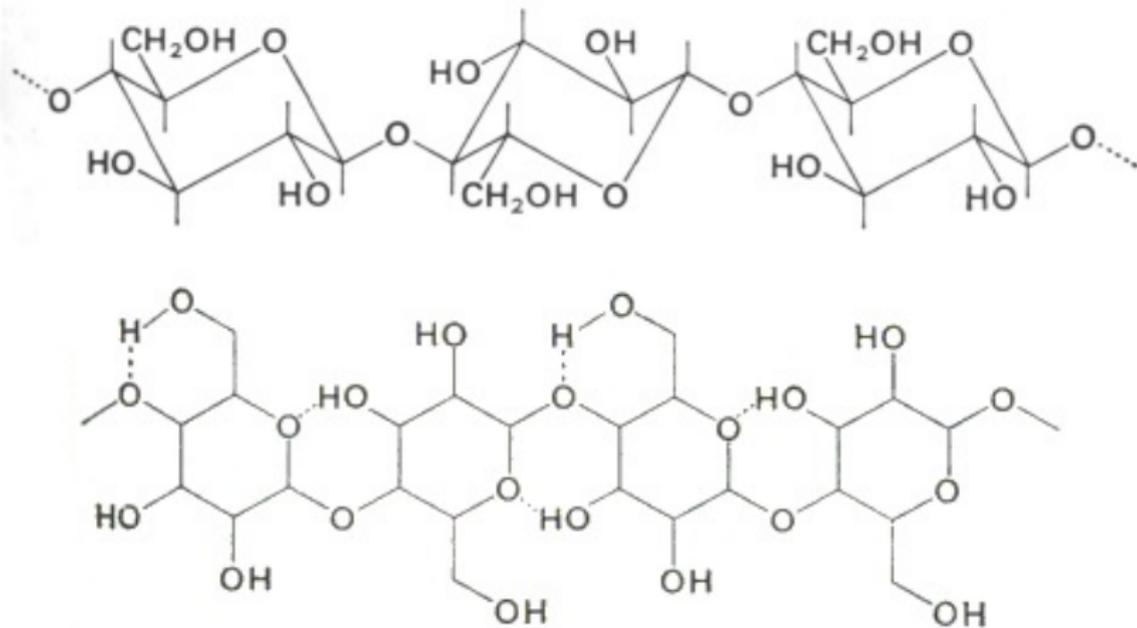
## Bioethanol der zweiten Generation (aus Lignocellulose)

- thermisch-chemische Vorbehandlung (↗Säuren) zum Aufspalten der Cellulose und Hemicellulose nötig, es entstehen toxische Substanzen (Furfurale)
- hoher Enzymbedarf (Cellulasen, Xylanasen, Glucosidasen)
- Hemicellulose bestehen größtenteils aus Xylose und Arabinose (beide C<sub>5</sub>-Zucker)
- C<sub>5</sub>-Zucker können noch nicht mit hoher Ausbeute vergärt werden, spezielle Hefen/Bakterien notwendig

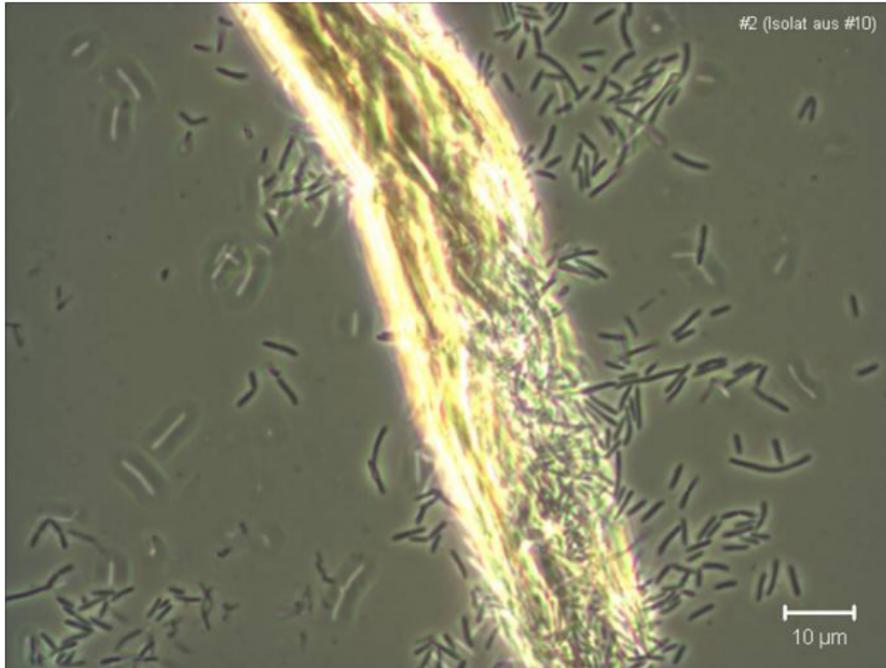
## Bioethanol der zweiten Generation (aus Lignocellulose)

- thermisch-chemische Vorbehandlung (↗Säuren) zum Aufspalten der Cellulose und Hemicellulose nötig, es entstehen toxische Substanzen (Furfurale)
- hoher Enzymbedarf (Cellulasen, Xylanasen, Glucosidasen)
- Hemicellulose bestehen größtenteils aus Xylose und Arabinose (beide C<sub>5</sub>-Zucker)
- C<sub>5</sub>-Zucker können noch nicht mit hoher Ausbeute vergärt werden, spezielle Hefen/Bakterien notwendig
- niedrigeres Raumgewicht (Energiedichte) von Pflanzenabfällen im Vergleich zu Getreide- und Maiskörnern

## Stabile Struktur der Zellulose

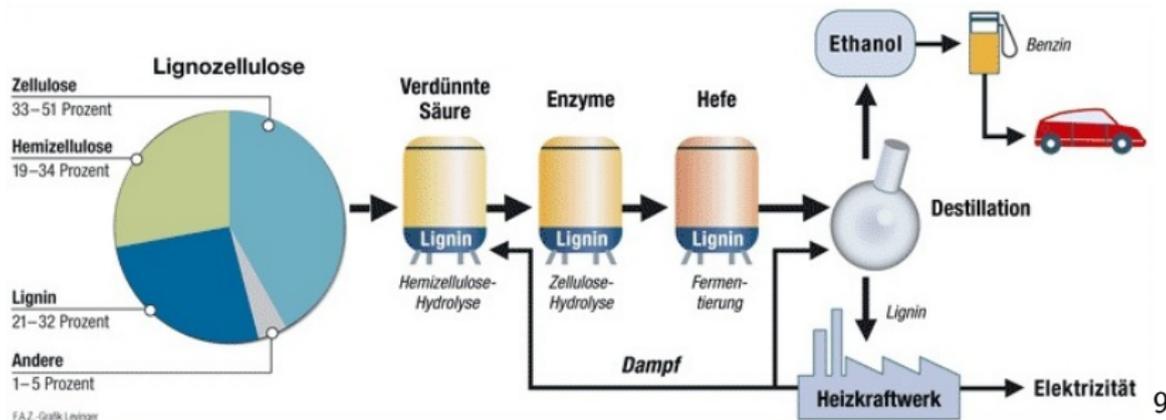


# Zelluloseabbau durch *Clostridium thermocellum* (1000x)



<sup>8</sup>Dr. W. Schwarz, Dr. J. Krauß (TUM-Lehrstuhl für Mikrobiologie)

# Bioethanolherstellung (2. Generation)



<sup>9</sup>aus der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (2007)

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh
- Vergasung zu  $H_2$  und  $CO$  (sog. Synthesegas)

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh
- Vergasung zu  $H_2$  und  $CO$  (sog. Synthesegas)
- Fischer-Tropsch-Synthese von  $H_2$  und  $CO$  zu Methanol

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh
- Vergasung zu  $H_2$  und  $CO$  (sog. Synthesegas)
- Fischer-Tropsch-Synthese von  $H_2$  und  $CO$  zu Methanol
- Verkettung zu Diesel ( $\sim C_{16}$ )

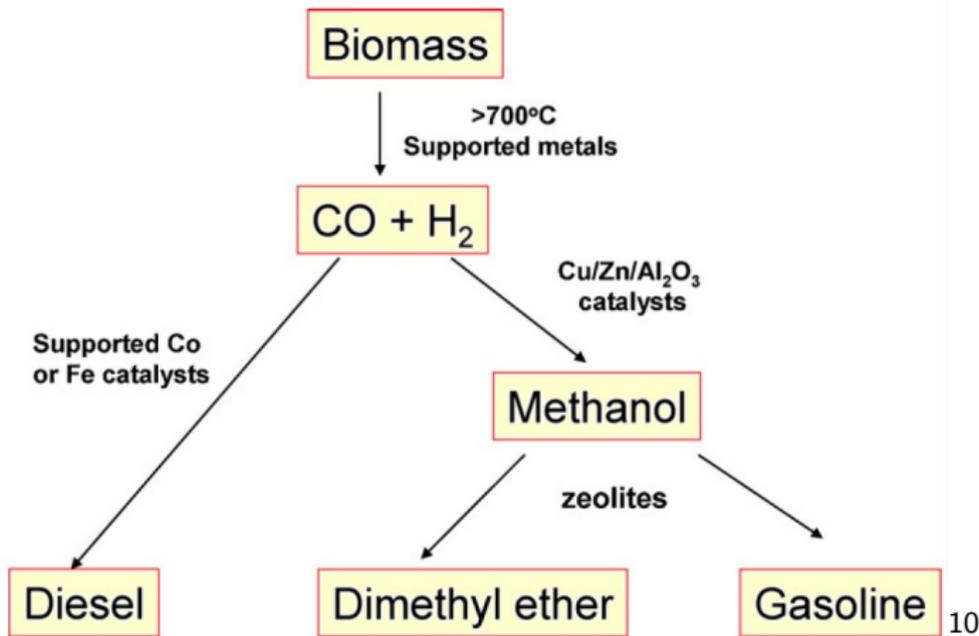
## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh
- Vergasung zu  $H_2$  und  $CO$  (sog. Synthesegas)
- Fischer-Tropsch-Synthese von  $H_2$  und  $CO$  zu Methanol
- Verkettung zu Diesel ( $\sim C_{16}$ )
- Asche verschlackt, wird so der Biosphäre entzogen

## Synthesediesel / Biomass-to-Liquids (BtL)

- Treibstoff der zweiten Generation
- Grundstoffe (einfach umzuwandeln): entrindetes Holz (z.B. Pappel aus Kurzumtrieb)
- Grundstoffe (wegen hohem Aschegehalt problematisch umzuwandeln): Restholz, Grünverschnitt, biologische Abfälle, Stroh
- Vergasung zu  $H_2$  und  $CO$  (sog. Synthesegas)
- Fischer-Tropsch-Synthese von  $H_2$  und  $CO$  zu Methanol
- Verkettung zu Diesel ( $\sim C_{16}$ )
- Asche verschlackt, wird so der Biosphäre entzogen
- Markennamen: Syndiesel<sup>®</sup>, Synfuel<sup>®</sup>, Sundiesel<sup>®</sup>, Sunfuel<sup>®</sup> (alle Volkswagen AG); Biotrol<sup>®</sup> (Daimler AG)

# Synthesedieselherstellung – Chemie 1



<sup>10</sup>D.A. Bulushev, J.R.H. Ross, *Catalysis Today*, **163** (2011) 42-46

## Synthesedieselherstellung – Chemie 2

- die vereinfachte Formel für Biomasse ist  $-(CH_2O)_n$

## Synthesedieselherstellung – Chemie 2

- die vereinfachte Formel für Biomasse ist  $\text{[CH}_2\text{O]}_n$
- Um nun die für Alkane (kettenförmige, sauerstofffreie Kohlenwasserstoffe), aus denen – vereinfacht – auch der Synthesediesel besteht, notwendige  $\text{-CH}_2\text{-}$  Verbindung zu erhalten, ist folgender Reaktionsschritt notwendig:  
$$\text{[CH}_2\text{O]}_n + n\text{H}_2 \rightarrow \text{[CH}_3\text{OH]}_n \rightarrow \text{[CH}_2\text{]}_n + n\text{H}_2\text{O}$$
oder zur Erzeugung eines n-Alkans:  
$$\text{[CH}_2\text{O]}_n + (n + 1)\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{n-2}-\text{CH}_3 + n\text{H}_2\text{O}$$

## Synthesedieselherstellung – Chemie 2

- die vereinfachte Formel für Biomasse ist  $\text{--[CH}_2\text{O]}_n$
- Um nun die für Alkane (kettenförmige, sauerstofffreie Kohlenwasserstoffe), aus denen – vereinfacht – auch der Synthesediesel besteht, notwendige  $\text{--CH}_2\text{--}$  Verbindung zu erhalten, ist folgender Reaktionsschritt notwendig:  
$$\text{--[CH}_2\text{O]}_n + n\text{H}_2 \rightarrow [\text{CH}_3\text{OH}]_n \rightarrow \text{--[CH}_2\text{]}_n + n\text{H}_2\text{O}$$
oder zur Erzeugung eines n-Alkans:  
$$\text{--[CH}_2\text{O]}_n + (n + 1)\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3\text{C--(CH}_2\text{)}_{n-2}\text{--CH}_3 + n\text{H}_2\text{O}$$
- Deshalb muss dem Synthesegas reiner Wasserstoff hinzugefügt werden!

## Synthesedieselherstellung – Chemie 3

- $C_xH_yO_z \rightarrow aCO + bH_2O$   
Aufspaltung von Cellulose, Hemicellulosen und Lignin in gasförmige Bestandteile

## Synthesedieselherstellung – Chemie 3

- $C_xH_yO_z \rightarrow aCO + bH_2O$   
Aufspaltung von Cellulose, Hemicellulosen und Lignin in gasförmige Bestandteile
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$   
Reduktion von Wasser mittels Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasserstoff

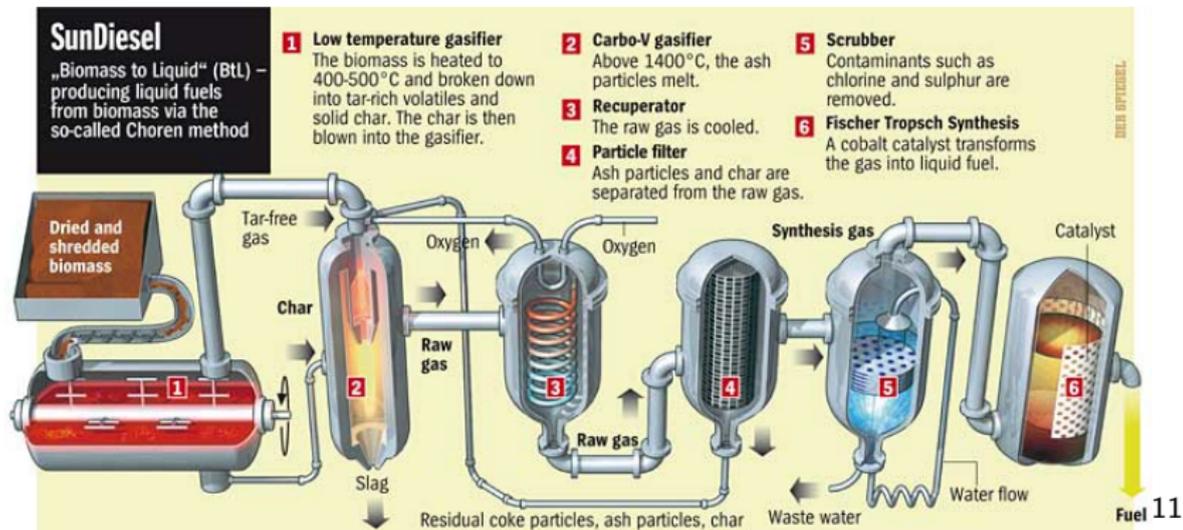
## Synthesedieselherstellung – Chemie 3

- $C_xH_yO_z \rightarrow aCO + bH_2O$   
Aufspaltung von Cellulose, Hemicellulosen und Lignin in gasförmige Bestandteile
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$   
Reduktion von Wasser mittels Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasserstoff
- $C + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2$   
Reduktion von Wasser zu Wasserstoff mittels Kohlenstoff

## Synthesedieselherstellung – Chemie 3

- $C_xH_yO_z \rightarrow aCO + bH_2O$   
Aufspaltung von Cellulose, Hemicellulosen und Lignin in gasförmige Bestandteile
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$   
Reduktion von Wasser mittels Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und Wasserstoff
- $C + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2$   
Reduktion von Wasser zu Wasserstoff mittels Kohlenstoff
- $CO_2 + C \xrightleftharpoons[-\Delta T]{+\Delta T} 2CO$   
Boudouardsches Gleichgewicht zwischen Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, in der heißen Umgebung überwiegt das CO, beim Abkühlen verlagert sich das Gleichgewicht zum CO<sub>2</sub>

# Synthesedieselherstellung – Anlagenschema



<sup>11</sup>aus Dem Spiegel (2007)

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (1. Gen.)

Jean Ziegler (UN-Sonderberichterstatter für das Recht auf Nahrung)<sup>12</sup>:

- Notwendigkeit des Kampfes gegen den Klimawandel, Biokraftstoffe können einen Teil dazu beitragen

---

<sup>12</sup>Ein Kind, das an Hunger stirbt, wird ermordet: Bonner Generalanzeiger, 22.10.2007

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (1. Gen.)

Jean Ziegler (UN-Sonderberichterstatter für das Recht auf Nahrung)<sup>12</sup>:

- Notwendigkeit des Kampfes gegen den Klimawandel, Biokraftstoffe können einen Teil dazu beitragen
- Umwidmung von Nahrungsmittel produzierendem Landwirtschaftsboden zur Herstellung von Biokraftstoffen ist „ein Verbrechen gegen die Menschlichkeit“

---

<sup>12</sup>Ein Kind, das an Hunger stirbt, wird ermordet: Bonner Generalanzeiger, 22.10.2007

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (1. Gen.)

Jean Ziegler (UN-Sonderberichterstatter für das Recht auf Nahrung)<sup>12</sup>:

- Notwendigkeit des Kampfes gegen den Klimawandel, Biokraftstoffe können einen Teil dazu beitragen
- Umwidmung von Nahrungsmittel produzierendem Landwirtschaftsboden zur Herstellung von Biokraftstoffen ist „ein Verbrechen gegen die Menschlichkeit“
- Bsp.: für die Produktion von 50 Litern Bioethanol benötigt man 232 Kilo Mais, „davon kann ein Kind in Sambia oder Mexiko ein Jahr lang leben“

---

<sup>12</sup>Ein Kind, das an Hunger stirbt, wird ermordet: Bonner Generalanzeiger, 22.10.2007

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha

---

<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha
- Anbaufläche (Mais, D, 2005) = 1.272.000 ha

---

<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha
- Anbaufläche (Mais, D, 2005) = 1.272.000 ha
- daraus Jahresertrag (Mais, D, 2005) = 9.200.000.000 kg

---

<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha
- Anbaufläche (Mais, D, 2005) = 1.272.000 ha
- daraus Jahresertrag (Mais, D, 2005) = 9.200.000.000 kg
- daraus  $V(\text{EtOH}) = 1.980.000.000 \text{ l}$   
(4,64 kg Mais pro Liter EtOH, laut Ziegler)

<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha
- Anbaufläche (Mais, D, 2005) = 1.272.000 ha
- daraus Jahresertrag (Mais, D, 2005) = 9.200.000.000 kg
- daraus  $V(\text{EtOH}) = 1.980.000.000 \text{ l}$   
(4,64 kg Mais pro Liter EtOH, laut Ziegler)
- mit 21.196 kJ/l EtOH liefert die komplette dt. Maisernte 42,0 PJ Energie

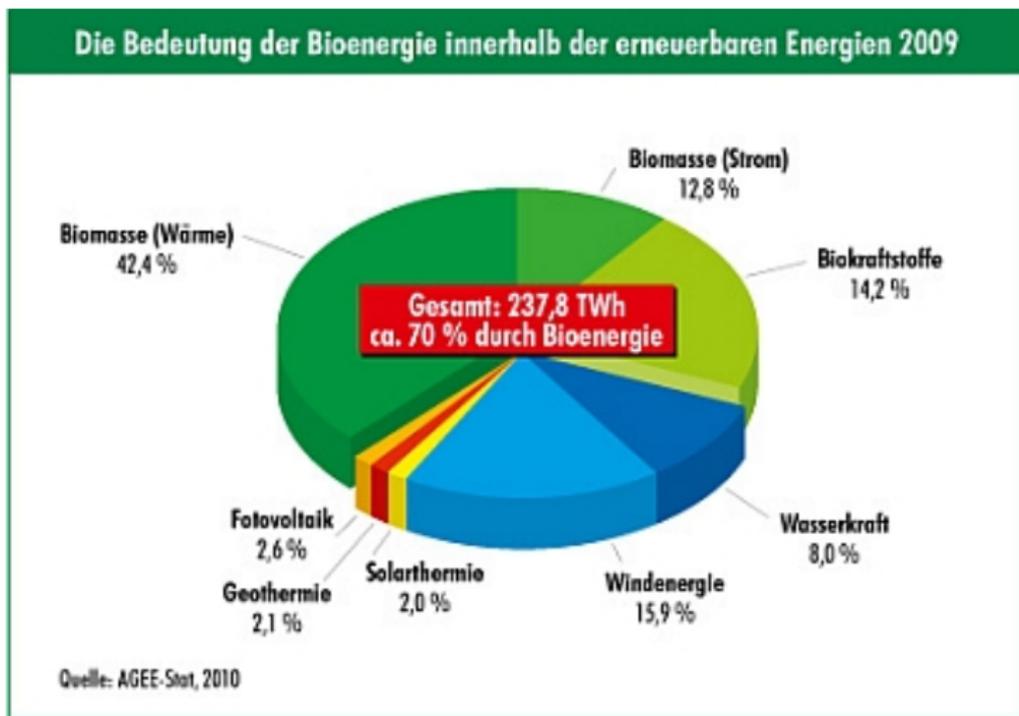
<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

## Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion – Rechnung

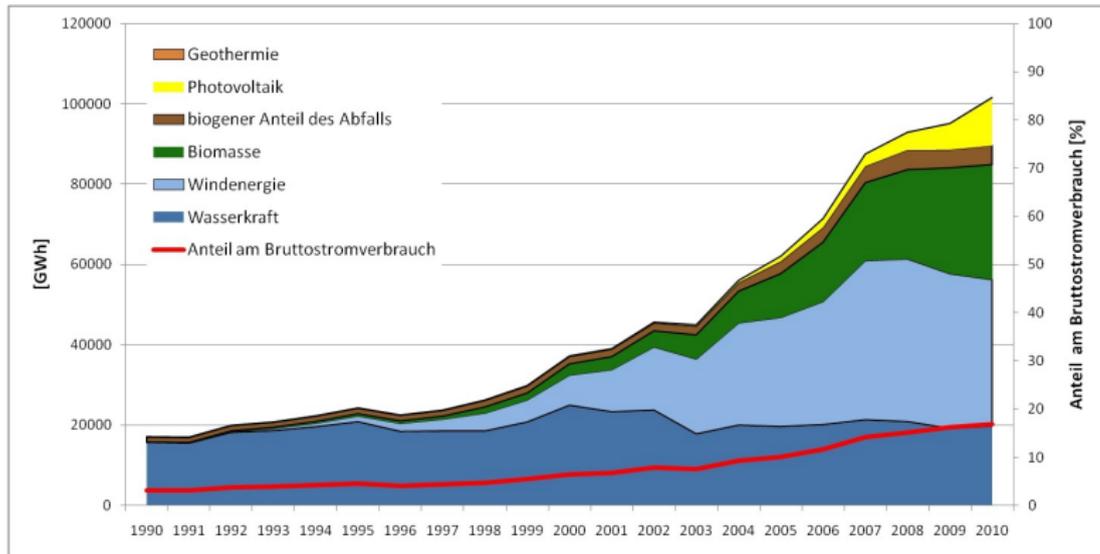
- Hektarertrag<sup>13</sup> (Mais, D, 2003) = 7.220 kg/ha
- Anbaufläche (Mais, D, 2005) = 1.272.000 ha
- daraus Jahresertrag (Mais, D, 2005) = 9.200.000.000 kg
- daraus V(EtOH) = 1.980.000.000 l  
(4,64 kg Mais pro Liter EtOH, laut Ziegler)
- mit 21.196 kJ/l EtOH liefert die komplette dt. Maisernte 42,0 PJ Energie
- Benzinverbrauch in D pro Jahr: 997,041 PJ  
→ 4,20 % des dt. Jahresbenzinverbrauchs

<sup>13</sup>Stat. Bundesamt, Datenreport 2006, S.267-8

# Bioenergie als Teil der erneuerbaren Energien



# Bioenergie als Teil der erneuerbaren Energien (Stromversorgung)



14

<sup>14</sup>BMU, 2008

## Literaturempfehlungen, Quellen, Statistiken

**Int. Energiebehörde (IEA)** World Energy Outlook, jährlich, Paris

**Statistisches Bundesamt** Statistische Jahrbücher für die BRD und das Ausland, Wiesbaden, im Netz: <http://www.destatis.de>

**Risö National Laboratory** Risö Energy Report 1–6, Hrsg. Hans Larsen und Leif Sönderberg Petersen, Risö (Dänemark)