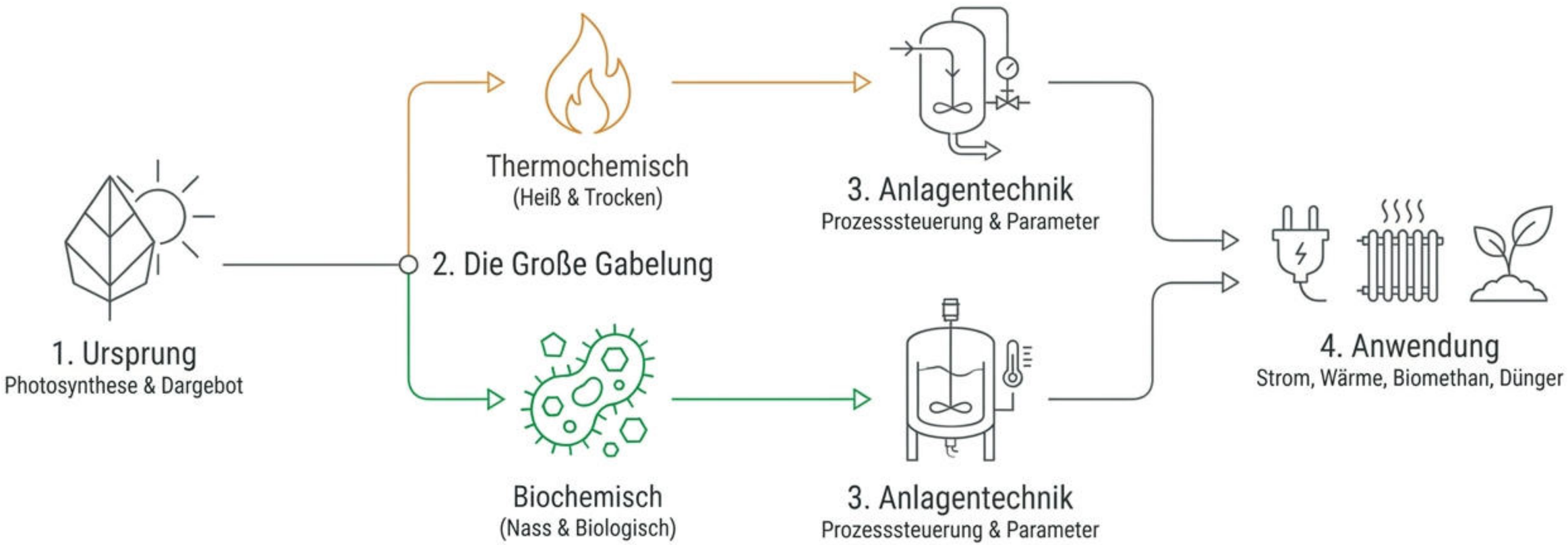
Bioenergie & Biogene Gase:

Systematische Grundlagen und Wandlungspfade

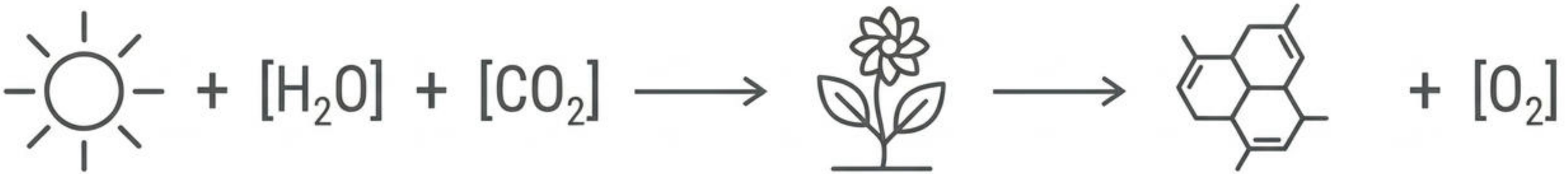
Von der Photosynthese über thermochemische und biochemische Prozesse in die Anwendung.

Gemini Notebook



Die Wertschöpfungskette der Bioenergie: Ein durchgehendes Wandlungssystem von solarer Strahlung bis zur nutzbaren Endenergie.

Gemini Notebook



Strahlung

Bestimmt Licht-/Dunkelreaktion. Besitzt einen Sättigungspunkt.

Wasser

Erhält Systemintegrität und transportiert gelöste Nährstoffe.

Temperatur

Optimum zwischen 38 °C und 60 °C (darüber Eiweißzersetzung).

Bodengüte

Bestimmt elementare Nährstoffaufnahme (Stickstoff, Phosphor).

Regionale Varianz: Weltweit 0 bis 1200 g Kohlenstoff/(m²a).
In den Tropen durch Licht/Wasser maximiert; in Deutschland primär durch die Bodengüte limitiert.

Gemini Notebook

Die große Gabelung der Konversion: Welcher Pfad für welche Biomasse?



Thermochemisch

Prinzip: Trocken & Heiß

Substrat-Anforderung: Trockene Feststoffe (z.B. Holz, Stroh).

Vorteil: Bricht problemlos komplexe, harte Lignin-Strukturen auf.



Biochemisch

Prinzip: Nass & Biologisch (Vergärung)

Substrat-Anforderung: Feuchtes Milieu (mindestens 50 % Wasseranteil).

Limitierung: Lignin- und chitinhaltiges Material (Holz) ist mikrobiell extrem schwer aufspaltbar.

Fazit: Der Wassergehalt und der Strukturfaseranteil (Lignin) diktieren zwingend die Wahl der Anlagentechnik.

Gemini Notebook

Thermochemische Pfade: Das Lambda-Spektrum

Steigendes Sauerstoffangebot (λ-Wert)

Pyrolyse

Sauerstoff: $\lambda = 0$
(Ohne Sauerstoff)

Mechanismus: Reine Wärmezufuhr zersetzt Biomasse.

Hauptprodukt: Pyrolyseöl (Flüssigtreibstoff).

Vergasung

Sauerstoff: $0{,}2 < \lambda < 0{,}5$
(Unterstöchiometrisch)

Mechanismus: Partielle Oxidation.

Hauptprodukt: Brenngase (CO, H_2, Methan) zur zeitlich/räumlich entkoppelten Nutzung.

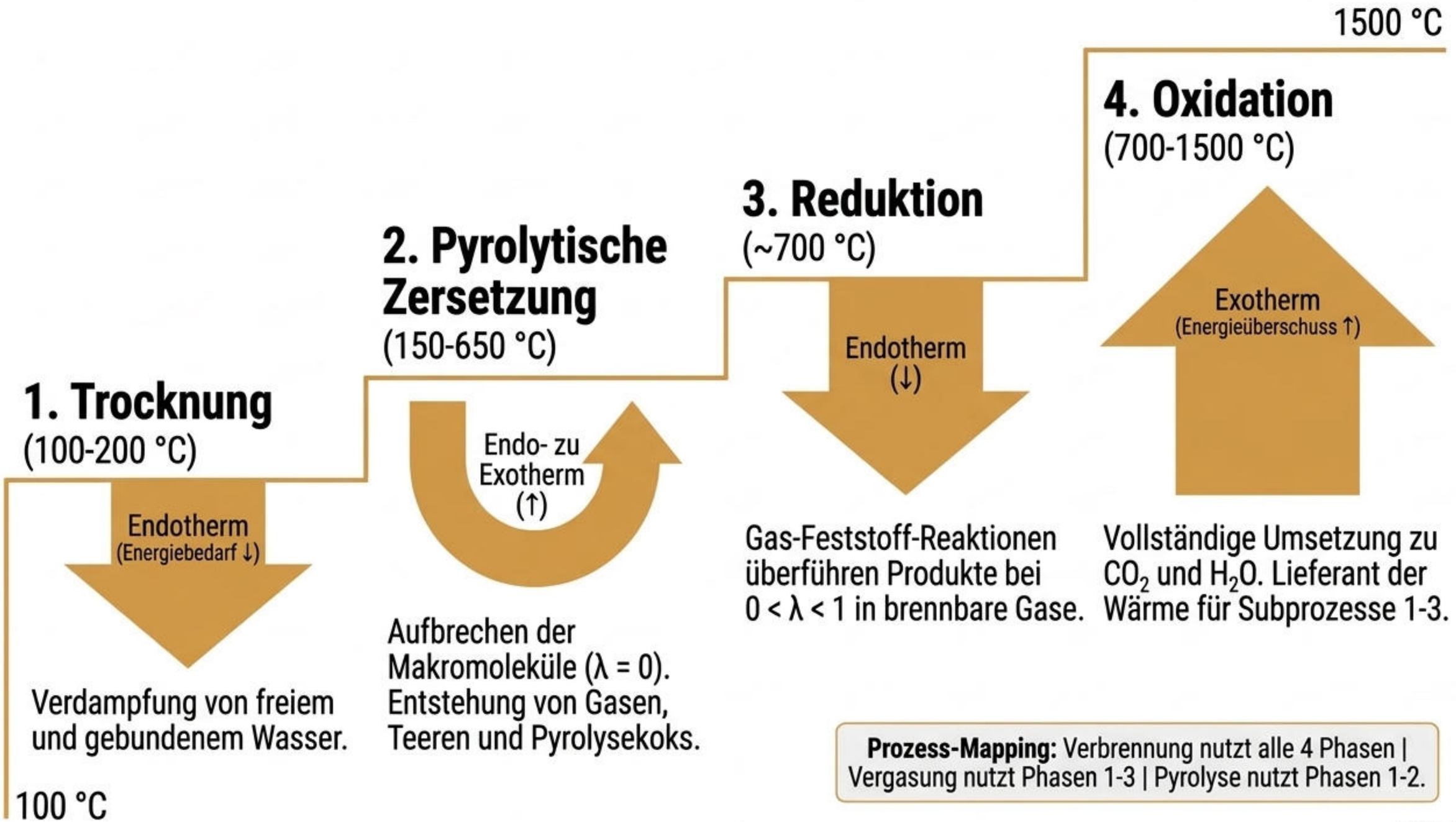
Verbrennung

Sauerstoff: $\lambda > 1$
(Luftüberschuss)

Mechanismus: Vollständige Oxidation bei 800–1300 °C.

Hauptprodukt: Wärme, CO_2, H_2O (z.B. für Dampfturbinen).

Gemini Notebook

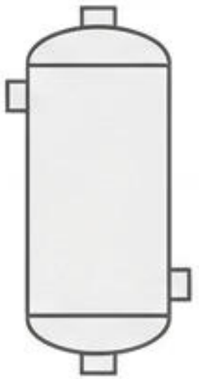


Prozess-Mapping: Verbrennung nutzt alle 4 Phasen | Vergasung nutzt Phasen 1-3 | Pyrolyse nutzt Phasen 1-2.

Gemini Notebook

Biomassevergasung: Sektorenkopplung & Anlagentechnik

Festbettvergaser (Gleich-/Gegenstrom)



- **Fokus**: Dezentraler Leistungsbereich.
- **Brennstoff**: Benötigt homogene, holzartige Brennstoffe (Pellets/Hackschnitzel).
- **Vorteil**: Bewährte Technik für gekoppelte motorische Nutzung (BHKW zur Strom- und Wärmeerzeugung).

Wirbelschichtvergaser



- **Fokus**: Industrieller Maßstab & großer Leistungsbereich.
- **Mechanismus**: Intensive Wärmeübertragung durch sandartiges Bettmaterial.
- **Eigenschaften**: Kurze Verweilzeit (Sekunden) und hoher Stoffumsatz. Hoher Partikelgehalt im Produktgas erfordert komplexe Abscheidung.

Sektorenkopplung: Produktgase ermöglichen die stoffliche Nutzung (Synthesegas für die Industrie) oder die energetische Nutzung (Strom & Wärme via KWK).

Gemini Notebook

Biochemischer Pfad: Grundlagen der Vergärung

Das Fermenter-Milieu

- **Anaerob:** Absoluter Luft- und Sauerstoffabschluss zwingend erforderlich.
- **Feucht:** Minimum 50 % Wasseranteil im Ausgangssubstrat.
- **Mikrobiell:** Ein hochempfindliches Ökosystem aus Bakterien und Archaeen.

Abgewiesen:
Lignin / Holz: Chitinhaltige Strukturen können anaerob kaum aufgespalten werden und verbleiben in der Struktur.

Die Vergärung wandelt organische Biomasse biochemisch bei niedrigen Temperaturen um – das Herzstück ist die präzise Steuerung dieses flüssigen Milieus.

Gemini Notebook

Biochemischer Pfad: Die Vier Phasen der Vergärung

I. Hydrolyse

Polymere (Kohlenhydrate, Fette, Proteine) → Monomere (Zucker, Fettsäuren, Aminosäuren).

(Limitierender Faktor bei schwer abbaubarem Material).

II. Versäuerung (Acidogenese)

Monomere → Carbonsäuren & Alkohole

III. Essigsäurebildung (Acetogenese)

Säuren → Essigsäure, H_2, CO_2

⚠ *(Achtung: Hemmung bei zu hohem Wasserstoffpartialdruck)*

Zwingende Symbiose (Syntrophie): Archaeen verbrauchen in Phase IV den Wasserstoff und sichern so das Überleben der acetogenen Bakterien in Phase III.

IV. Methanogenese (Streng anaerob)

Acetoklastisch (Essigsäure → $CH_4 + CO_2$)

Hydrogenotroph ($H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$)

(Archaeen. Geschwindigkeitsbestimmender Schritt, Generationszeit ca. 10 Tage)

Gemini Notebook

Die Input-Variablen: Substrate im Vergleich

Nachwachsende Rohstoffe (NawaRos)

- **Einsatz**: 48,9 % (Häufigstes Substrat).
- **Ertrag**: Sehr hoch (z.B. Mais 216 m³/t).
- **Kritik**: Hohe Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (Teller-Tank-Diskussion).

Kommunaler Bioabfall (Biotonne)

- **Einsatz**: 4,2 %.
- **Ertrag**: Sehr gut (123 m³/t).
- **Status**: Zukunftsweisend. Verlangt vorgeschriebene Vorbehandlung (Hygienisierung z.B. 70°C für 1h).

Exkremente (Gülle / Mist)

- **Einsatz**: 44,5 %.
- **Ertrag**: Gering (z.B. Schweinegülle 20 m³/t), aber hoher Methananteil (60 %).
- **Vorteil**: Kostengünstig, keine Flächenkonkurrenz, sorgt für optimale Pumpfähigkeit.

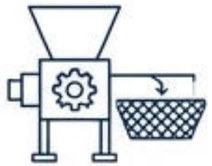
Reststoffe Industrie/Gewerbe

- **Einsatz**: 2,4 %.
- **Ertrag**: Mittel (z.B. Gras 98 m³/t).
- **Nachteil**: Hoher Aufwand bei Substrataufbereitung (Entfernung von Störstoffen/Verpackungen).

Gemini Notebook

Biogasanlage: Der architektonische Prozess der Energieerzeugung

Vorbehandlung



Substrataufbereitung

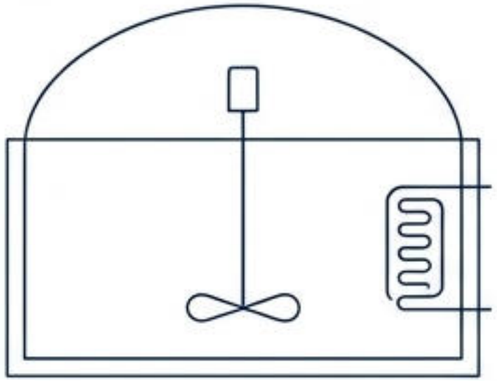
Störstoffauslese und mechanische Zerkleinerung.



Hygienisierung / Pasteurisierung

70 °C über 1 Stunde vernichtet Erreger (zwingend bei Bioabfall).

Biogasproduktion (Fermenter)



Fermenter

Das Herzstück der Anlage: Luft-, gas- und wasserdicht (Stahl oder Beton).

Ausgestattet mit Rührwerken gegen Schwimmschichten und Doppelwand-Heizung zur Milieusteuerung.

Gasaufbereitung & Gasumwandlung



Gasspeicher

Biogas fließt in Gasspeicher.



Reinigung

Biogas fließt in Reinigung.

Blockheizkraftwerk (BHKW)



Liefert zeitgleich Strom und Nutzwärme.

→ Strom

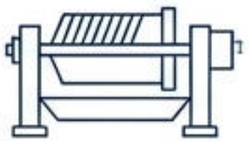
→ Nutzwärme

Lagerung / Verwertung



Lagergrube

Gärrest fließt in die Lagergrube.



Mechanische Trennung

In wertvollen Flüssigdünger und stichfesten Festmist (Kompost).

→ Flüssigdünger

→ Festmist (Kompost)

Gemini Notebook

Fermenter-Konfigurationen (Verfahrensvarianten)

Parameter	Ingenieurstechnische Varianten		
TS-Gehalt (Trockensubstanz)	Nassfermentation (< 15 % TS, Rührwerk erforderlich)	Trockenfermentation (> 20 % TS, stapelbar, Plug-Flow System)	
Art der Beschickung	Diskontinuierlich (Batch, eher Forschungsfokus)	Kontinuierlich (Standard für stetige Gasproduktion)	
Prozessstufen	Einstufig (Kompromiss-Milieu)	Zweistufig (Räumliche Trennung: Hydrolyse pH 4-6 / Methanogenese pH 6.8-7.8 für optimale Ausbeute)	
Prozesstemperatur	Psychrophil (< 25 °C)	Mesophil (25-45 °C, >90 % der Anlagen, extrem stabil)	Thermophil (45-55 °C, schnellste Umsetzung & hygienisierend, aber hohes Instabilitätsrisiko durch Ammoniak)

Gemini Notebook

Die Output-Produkte der Vergärung

DAS BIOGAS (Energieträger)

Zusammensetzung:

- 50–75 % Methan (CH_4), 25–50 % CO_2.



Zwingende Aufbereitung:

- 1. Trocknung (Kondensator entfernt H_2O und NH_3).
- 2. Entschwefelung (Schützt Motorenöl vor Zerstörung).





Netzeinspeisung als Biomethan:

- Erfordert CO_2-Abtrennung via Aminwäsche oder Druckwasserwäsche (5–10 bar) für das Erdgasnetz.



DER GÄRREST (Ressource)



Definition:

- Ausgefaulte Restmasse (anorganische Substanzen + Wasser).



Agronomischer Wert:

- Hochwertiger Dünger, extrem reich an pflanzenverfügbarem Stickstoff (Ammoniak), Phosphat und Kalium.



Verarbeitung:

- Mechanische Separierung (Dekanter/Pressen) trennt die Masse in eine nutzbare Flüssigphase und stichfesten Festmist.

Gemini Notebook

Praxis-Case: Die Biotonne (Vergärung vs. Kompostierung & NawaRo)

Ökonomischer Win

Mais (NawaRo) verursacht Kosten: ca. 25 €/t.

Biotonne generiert Entsorgungserlöse: 35 bis 70 €/t.

Fazit: Der Anlagenbetreiber wird bezahlt, um das hocheffiziente Substrat anzunehmen.

Ökologischer Win

Fläche: Keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Die Vergärung benötigt 50 % weniger Anlagen-Fläche als reine Kompostierung.

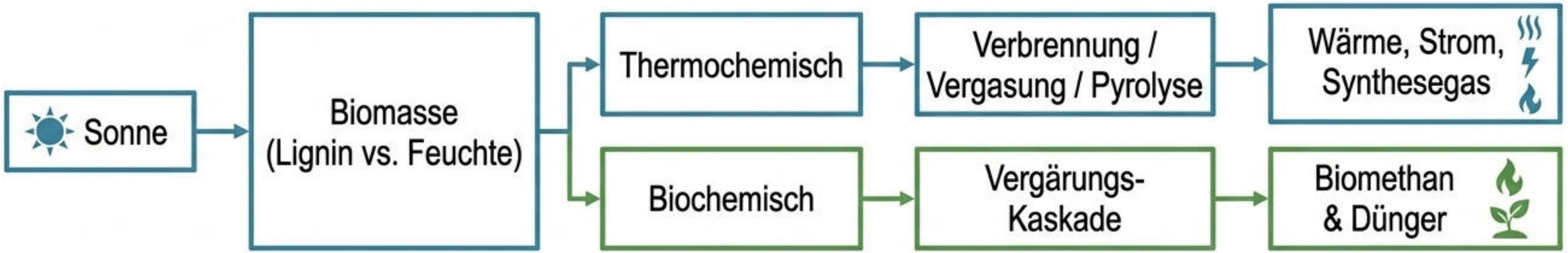
Klima: Einsparung von 150 kg CO_2 pro Tonne Bioabfall.

Energie: Reine Kompostierung verbraucht Fremdenergie. **vs** Vergärung generiert einen massiven Energieüberschuss (Biogas).

Zusammenfassung: Alte reine Kompostieranlagen sollten dringend mit vorgeschalteten Vergärungsstufen nachgerüstet werden, um den ökologischen und ökonomischen Win-Win zu heben.

Gemini Notebook

Zusammenfassung: Der Bioenergie-Pfad



Bioenergie ist die **vielseitigste Form** der **Sektorenkopplung**.

Die physikalischen Eigenschaften der Biomasse (Feuchte, Lignin) determinieren zwingend den technologi**schen Pfad**. Ob durch die trockene Hitze thermochemischer Prozesse oder die nasse Präzision **biologischer Fermentation** – das Resultat ist die steuerbare **Transformatio solarer Strahlung** in Strom, Wärme, Kraftstoff und hochwertigen Dünger.

Gemini Notebook