

# Thermochemische Biomassevergasung zur Poly-Generation von Strom, Wärme und Kraftstoff

Dr. Michael Specht  
ZSW  
michael.specht@zsw-bw.de

Tonja Marquard-Möllenstedt  
ZSW  
tonja.moellenstedt@zsw-bw.de

Dr. Ulrich Zuberbühler  
ZSW  
ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de

Prof. Dr. Hartmut Spliethoff  
ZAE Bayern  
spliethoff@tum.de

Die thermochemische Vergasung von Biomasse eröffnet ein breites Spektrum an energetischen Nutzungsoptionen, die vor dem Hintergrund folgender Zielgrößen diskutiert werden:

- hocheffiziente energetische Nutzung der eingesetzten Ressourcen
- breites Einsatzspektrum verschiedener Biomassen
- hohes CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial

Ein weiteres Ziel – neben der Erzeugung von Strom und Wärme – ist die kombinierte Bereitstellung hochwertiger Energieträger aus dem Produktgas des Vergasungsprozesses. Im Rahmen des Beitrags werden verschiedene Verfahrensvarianten vorgestellt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf gasförmigen Sekundärenergieträgern, denen in der bisherigen Diskussion zu wenig Beachtung gewidmet wird.

## Effiziente Nutzung biogener Ressourcen

Bei der energetischen Nutzung von Biomasse stellt sich die Frage nach dem optimalen Verwertungspfad. Gibt es aufgrund der Nutzungskonkurrenz im Wärme-, Strom- und Kraftstoffmarkt den optimalen Verwertungspfad? In vielen Potenzialstudien wird die Biomasse – trotz begrenzter Verfügbarkeit – für die energetische Nutzung „mehrfach verkauft“. Welche Rahmenbedingungen liegen einem effizienten Biomasseeinsatz zugrunde? Im vorliegenden Beitrag werden hierzu einige Argumente kritisch dargelegt, die zu diesen Erkenntnissen führen:

- Feste Biomassen mit einem Feuchtegehalt < 40 Gew.% sind für die thermochemische Vergasung prädestiniert.

- Anaerob vergärbare Biomassen mit einem höheren Wassergehalt sind vorzugsweise über den Pfad der fermentativen Biogas-erzeugung nutzbar.

Folgende Randbedingungen sollten der energetischen Biomassenutzung zugrunde gelegt werden:

1. hohe energetische Effizienz des Umwandlungspfades
2. hohes CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial
3. Leistungsgröße der Konversionsverfahren, die dem dezentralen Anfall der biogenen Rohstoffe gerecht wird
4. möglichst breite biogene Rohstoffbasis der Konversionsverfahren
5. Erzeugung von Endenergie für den Strom-, Wärme- und Kraftstoffmarkt

Für einen effizienten Einsatz biogener Ressourcen müssen alle der oben aufgeführten Randbedingungen erfüllt werden – weitere kommen hinzu, die sich aus der Nutzungskonkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln bzw. der stofflichen Verwertung der Biomasse ergeben.

## Thermochemische Gasherstellung aus Biomasse

Die Motivation für die Vergasung von Biomasse ist der hohe Verstromungswirkungsgrad, die Nutzungsoption des erzeugten Produktgases zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern und die Verwendbarkeit einer Vielzahl fester biogener Brennstoffe.

Für die thermochemische Konversion von Biomasse kommt eine ganze Reihe von Vergasungsverfahren in Frage, die sich hinsichtlich der Prozessbedingungen (z. B. Temperatur, Druck, Vergasungsmittel) und in der technischen

Ausführung (Festbett-, Wirbelschicht-, Flugstromvergaser) unterscheiden.

Bei allen Vergasungsverfahren wird ein Produktgas erzeugt, das sich im Wesentlichen aus den heizwertreichen Komponenten  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_nH_m$  sowie  $CO_2$ ,  $H_2O$  und ggf.  $N_2$  zusammensetzt. Maßgeblich bestimmend für die Anteile der einzelnen Gaskomponenten sind die Prozessbedingungen und das verwendete Vergasungsmittel (z. B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf).

Abhängig von der Art der Wärmezufuhr unterscheidet man autotherme und allotherme Verfahren. Während bei allothermen Verfahren die benötigte Energie für die Vergasung mittels eines Wärmeträgers oder eines Wärmetauschers eingebracht wird, erfolgt dies bei auto-thermen Verfahren durch eine Teilverbrennung im Vergaser. Wird bei der autothermen Prozessführung Luft verwendet, enthält das Produktgas den inerten  $N_2$ -Anteil aus der Luft, was sich sowohl auf den Heizwert als auch auf die nachfolgenden Prozessschritte nachteilig auswirkt.

Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich deutlich bezüglich der Gaszusammensetzung. Aufgrund der für die Erzeugung von Sekundärenergieträgern notwendigen Gasqualität (stickstofffreies Produktgas) kommen bei der Wahl der Vergasungsverfahren ausschließlich allotherme Konzepte bzw. sauerstoffbetriebene autotherme Prozesse in Betracht. Die Bandbreiten der trockenen Produktgaszusammensetzungen für die allothermen bzw. sauerstoffbetriebenen autothermen Verfahren betragen in der Regel 30 - 50 Vol. %  $H_2$ , 20 - 40 Vol. %  $CO$ , 10 - 25 Vol. %  $CO_2$ , 0 - 15 Vol. %  $CH_4$ .

Ein weiteres Unterscheidungskriterium bei Vergasungsverfahren ist die Vergasungstemperatur, woraus sich zwei verschiedene Herstellungspfade für Produkt- bzw. Synthesegase ergeben:

Das ist zum einen der „Hochtemperaturpfad“ mit Vergasungstemperaturen im Bereich  $> 1200$  °C. Hierbei wird ein teer- und kohlenwasserstoffarmes Produktgas mit ungefähr gleichen Anteilen an  $H_2$  und  $CO$  erzeugt. In der Regel kommen hier Flugstromvergaser mit Sauerstoff (und Dampf) als Vergasungsmittel zum Einsatz. Dieser Konversionspfad ist

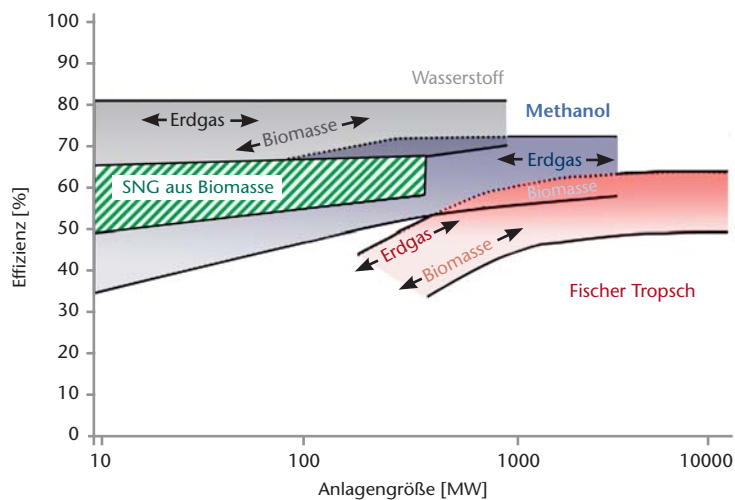
prädestiniert für Großanlagen ( $> 500$  MW). Im Gegensatz dazu eignet sich der „Niedertemperaturpfad“ mit Vergasungstemperaturen im Bereich  $< 1000$  °C eher für dezentrale Anlagen. Hier werden in der Regel Wirbelschichtvergaser eingesetzt. Bedingt durch die niedrige Vergasungstemperatur enthält das Produktgas nennenswerte Anteile an  $CH_4$  und kurzkettige Kohlenwasserstoffe (Ethan, Ethen, etc.). Der  $CH_4$ -Gehalt spielt eine entscheidende Rolle, da der Energiegehalt von  $CH_4$  ca. 3-fach höher ist als der von  $H_2$  bzw.  $CO$ . Je niedriger die Temperatur des Vergasungsverfahrens ist, desto höher ist der  $CH_4$ -Gehalt. Ist Erdgassubstitut (Substitute Natural Gas, SNG) das Zielprodukt als Sekundärenergieträger, so ist eine Niedertemperaturvergasung zielführender, da bereits im primären Produktgas ein hoher Teil des Heizwertes (bis 40% des Produktgasheizwertes) in Form von Methan vorliegt.

## Nutzung des Produktgases aus der thermochemischen Vergasung zur Erzeugung chemischer Energieträger

Aus dem durch die thermochemische Vergasung erzeugten Synthesegas lässt sich eine Vielzahl möglicher chemischer Energieträger erzeugen, z. B. Wasserstoff, Methanol, Dimethylether, synthetische Benzin-/Dieselkraftstoffe oder ein methanbasiertes Erdgassubstitut.

Da sich synthetische Benzin-/Dieselkraftstoffe via Fischer-Tropsch-Synthese für den Mobilitätsbereich am einfachsten – ohne jegliche Änderung der Infrastruktur – in bestehende Strukturen integrieren lassen, findet dieser Weg seitens der Mineralöl- und Automobilindustrie die größte Zustimmung.

Bezogen auf die in Abschnitt 1 dargestellten Randbedingungen zur Nutzung biogener Ressourcen ergeben sich jedoch Nachteile bei der Erzeugung flüssiger Kohlenwasserstoffe aus Biomasse. Die Leistungsgröße der Anlagen ( $> 100$  MW) widerspricht dem dezentralen Anfall biogener Ressourcen und die energetische Effizienz ist verglichen mit anderen Verwertungswegen deutlich geringer (Abb. 1).



**Abbildung 1**  
Bandbreite der energetischen Effizienz (Verhältnis des unteren Heizwertes (LHV) des erzeugten Produktes zum Edukt Erdgas (NG) bzw. Biomasse) als Funktion der Anlagengröße. (Die Co-Generation von Strom bzw. Wärme ist nicht berücksichtigt.)

Bezüglich der energetischen Wirkungsgrade und der Anlagengröße schneidet der Flüssigkraftstoff Methanol zwar deutlich besser ab, aber Methanol wird auf absehbare Zeit für den Verkehrsbereich aufgrund der begrenzten Zumischbarkeit zu konventionellen Kraftstoffen und mangelnder Akzeptanz nur eine begrenzte Rolle spielen.

Den gasförmigen Sekundärenergieträgern Erdgassubstitut (SNG) und Wasserstoff wird dagegen noch zu wenig Bedeutung beigemessen, obwohl die Leistungsgrößen deutlich kleiner sind und der Herstellprozess einen höheren energetischen Wirkungsgrad als bei den Fischer-Tropsch-Kraftstoffen aufweist. SNG kann bereits kurz- bis mittelfristig in die bestehende Gas-Infrastruktur integriert werden, während Wasserstoff erst langfristig eine energiewirtschaftliche Relevanz erhalten wird.

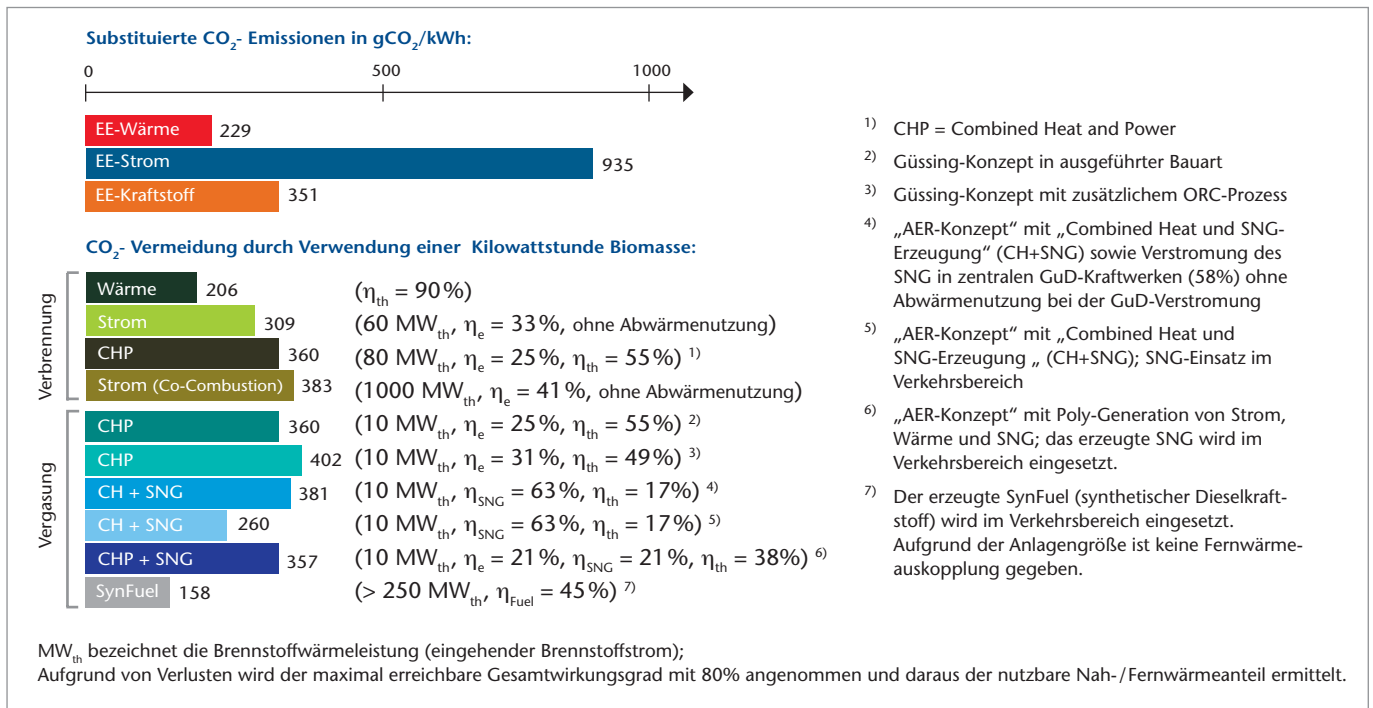
An dieser Stelle soll kurz eingegangen werden auf das für die Erzeugung von adaptiertem Synthesegas am ZSW entwickelte AER-Verfahren (Absorption Enhanced Reforming) zur Vergasung von Biomasse. Das AER-Produktgas unterscheidet sich im hohen H<sub>2</sub>-Gehalt sowie im geringen Inertgas- und CO<sub>x</sub>-Anteil deutlich von dem anderer thermochemischer Konversionsverfahren. Insbesondere der hohe Wasserstoffanteil mit ca. 70 Vol. % im trockenen Produktgas ermöglicht die Erzeugung von Sekundärenergieträgern aus dem stöchiometrisch adaptierten Synthesegas. Die Abtrennung von H<sub>2</sub> kann durch geeignete Gastrenntechnologien erfolgen. Aufgrund der Vergasungstemperatur von

< 700 °C verfügt das Produktgas über einen Methananteil > 12 Vol. %. Die niedrige Vergasungstemperatur ermöglicht neben der Verwendung von Holz als Brennstoff ein flexibles Einsatzspektrum von Biomassen in der Wirbelschicht. Durch entsprechende Wahl der AER-Verfahrensparameter kann in einer bestimmten Bandbreite der CO<sub>x</sub>-Anteil im Produktgas eingestellt werden. In einer nachgeschalteten Methanisierungsstufe lässt sich das CO<sub>x</sub> mit H<sub>2</sub> zu Methan umwandeln. Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass nach der Methanisierung ein methanreiches Gas resultiert, das ohne weiteren CO<sub>2</sub>-Abtrennprozess den Richtlinien zur Einspeisung in das Erdgasnetz entspricht.

## CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei der energetischen Nutzung biogener Ressourcen

Da Biomasse eine begrenzte Ressource ist und vielseitig verwertet wird, sind sowohl die energetische Effizienz als auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei der energetischen Nutzung von besonderer Bedeutung. Es stellt sich die Frage, wie eine kWh Biomasse unter dem Gesichtspunkt der CO<sub>2</sub>-Vermeidung energetisch am sinnvollsten eingesetzt werden kann. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidung gibt an, welche Menge an CO<sub>2</sub> eingespart wird, wenn anstelle fossiler Ressourcen Biomasse als Primärenergieträger in verschiedenen Nutzungssektoren eingesetzt wird.

Abb.2 zeigt im oberen Abschnitt die bei der regenerativen Bereitstellung von Wärme, Strom und Kraftstoff (Kraftstoffnutzung im Verkehrsbereich) substituierten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland. Dargestellt ist, wie viel CO<sub>2</sub> bei der Nutzung einer regenerativ erzeugten Kilowattstunde Wärme, Strom oder Kraftstoff eingespart wird. Die Kilowattstunde konventionell bereitgestellte Wärme ist aufgrund hoher energetischer Wirkungsgrade und der dominierenden Energieträger Erdgas bzw. Erdöl im Wärmemarkt mit relativ geringen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen belastet. Regenerativ erzeugte Heizenergie substituiert 229 gCO<sub>2</sub>/kWh im Wärmemarkt. Deutlich höher sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich. Hier dominiert Erdöl als



- 1) CHP = Combined Heat and Power
- 2) Güssing-Konzept in ausgeführter Bauart
- 3) Güssing-Konzept mit zusätzlichem ORC-Prozess
- 4) „AER-Konzept“ mit „Combined Heat und SNG-Erzeugung“ (CH+SNG) sowie Verstromung des SNG in zentralen GuD-Kraftwerken (58%) ohne Abwärmenutzung bei der GuD-Verstromung
- 5) „AER-Konzept“ mit „Combined Heat und SNG-Erzeugung“, (CH+SNG); SNG-Einsatz im Verkehrsbereich
- 6) „AER-Konzept“ mit Poly-Generation von Strom, Wärme und SNG; das erzeugte SNG wird im Verkehrsbereich eingesetzt.
- 7) Der erzeugte SynFuel (synthetischer Dieseldieselkraftstoff) wird im Verkehrsbereich eingesetzt. Aufgrund der Anlagengröße ist keine Fernwärmeauskopplung gegeben.

Ressource und die Endenergieträger Benzin, bzw. Diesel-Kraftstoff werden unter Energieeinsatz hergestellt. Regenerativ erzeugte Kraftstoffe substituieren 351 gCO<sub>2</sub>/kWh gegenüber rohöl-basierten Kraftstoffen im Straßenverkehr. Der hohe Wert bei der Nutzung regenerativ erzeugten Stroms mit 935 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> ist auf den substituierten Grund- und Mittellaststrom zurückzuführen. Die Kilowattstunde erneuerbarer Strom substituiert hier konventionell erzeugte Elektrizität mit einem hohen Kohleanteil ohne Substitution des Kernenergieanteils.

In Abb. 2 ist zusätzlich die CO<sub>2</sub>-Vermeidung dargestellt, wenn eine Kilowattstunde Biomasse in verschiedenen Nutzungssektoren eingesetzt wird. Die der Berechnung zugrunde liegenden Annahmen wie Anlagengröße und energetischer Wirkungsgrad zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoff sind im Diagramm angegeben.

Die Verwendung im Wärmemarkt hat einen geringen CO<sub>2</sub>-Einspareffekt mit „nur“ 206 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>Biomasse</sub> zur Folge (bei einem modernen Hausheizungskessel mit einem energetischen Wirkungsgrad von 90%).

Die Verstromung von Biomasse über Verbrennungsprozesse zeichnet sich in der Leistungsklasse oberhalb von 50 MW Brennstoffwärme-

leistung durch hohe Verstromungswirkungsgrade aus. Das Problem bei Anlagen dieser Leistungsklasse ist jedoch – neben langen Biomasse-Transportwegen – die Nutzung der anfallenden Wärme. Einerseits nimmt der Verstromungswirkungsgrad des Kraftwerkes bei Wärmeauskopplung ab, andererseits müssen hohe Wärmeleistungen in Fern- bzw. Nahwärmenetze eingespeist werden, die jedoch in der Regel nicht verfügbar sind, so dass die Wärme ohne Nutzen weggekühlt wird. In Abb. 2 ist deshalb nur in einem Fall (CHP) die Wärmenutzung dargestellt, was aber ein vorhandenes Wärmenetz mit einer Aufnahmekapazität von fast 50 MW erforderlich macht.

Obwohl der Gesetzgeber die Co-Verbrennung mit EEG-Vergütung in Deutschland ausgeschlossen hat, ist dieser Pfad mit aufgeführt. Dieser Nutzungspfad mit hohen Verstromungswirkungsgraden ist an die Nutzung von Kohle in Großkraftwerken gebunden. Unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes ist langfristig die Nutzung von Kohle jedoch nur tragbar, wenn hierbei die Abtrennung und Endlagerung von CO<sub>2</sub> gelingt.

Die Vergasungskonzepte haben insbesondere zwei Vorteile: Das erzeugte Produktgas kann neben der Verstromung und Abwärmenutzung

**Abbildung 2**  
Durch regenerative Bereitstellung von Energie substituierte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sowie CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch Verwendung einer kWh Biomasse in verschiedenen Nutzungspfaden.

auch zur Erzeugung flüssiger und gasförmiger Sekundärenergieträger verwendet werden (Poly-Generation) und es können hohe CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei kleinen, dezentralen Anlagengrößen erzielt werden.

Die kombinierte Herstellung von Strom und Wärme nach dem in Güssing (Österreich) realisierten Vergasungsverfahren mit Gasmotor ergibt eine CO<sub>2</sub>-Vermeidung von 360 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>Biomasse</sub>. Mit zusätzlicher Integration eines ORC-Prozesses steigt die CO<sub>2</sub>-Vermeidung auf 402 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>Biomasse</sub>. Die Poly-Generation von Strom, Wärme und Kraftstoff (CHP+SNG) nach dem „AER-Konzept“ bietet eine vergleichbar hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei gleichzeitiger Erweiterung des Produktspektrums, hohen Wirkungsgraden und einfacher Prozessführung bei der SNG-Erzeugung. Diese Variante hat den Vorteil eines geringeren Wärmeeinbaus an der Vergasungsanlage gegenüber der Co-Generation von Strom und Wärme.

Das Anlagenkonzept kann so modifiziert werden, dass SNG in Co-Generation mit Wärme erzeugt wird (CH+SNG). Vorteil ist hier der geringe Wärmeeinbau am Ort der Vergasungsanlage, so dass eine flexiblere Standortwahl (ohne großes Wärmenetz) möglich wird. Die CO<sub>2</sub>-Einsparung richtet sich nach der Verwendung des SNG. Dieses kann nach Transport über die existierende Infrastruktur für die Betankung von Fahrzeugen, in dezentralen BHKWs oder in GuD Kraftwerken genutzt werden. Beim Vergleich der Nutzungsoptionen für den Verkehrsbereich (Dieselsubstitut oder Erdgassubstitut) ist der SNG-Pfad gegenüber dem synthetischer Dieselkraftstoffe unter dem Aspekt der CO<sub>2</sub>-Vermeidung eindeutig von Vorteil.

## Schlussfolgerungen

Biomasse ist eine begrenzt verfügbare Ressource, deren Einsatz für energetische Anwendungen nur unter Berücksichtigung der Randbedingungen hohe energetische Effizienz, hohes CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial, dezentrale Nutzung, breite biogene Rohstoffbasis und Erzeugung von Endenergie für den Strom-, Wärme- und Kraftstoffmarkt erfolgen sollte. Folgende Schlussfolgerungen zur thermochemischen Nutzung von Biomasse lassen sich ableiten:

1. Der Einsatz biogener Ressourcen allein zur Wärmeerzeugung ist aus CO<sub>2</sub>-Vermeidungsgründen nicht zukunftsfähig.
2. Die dezentrale Verwendung der Biomasse ist der zentralen aufgrund möglicher Abwärmennutzung und damit höherer Gesamteffizienz vorzuziehen.
3. Vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Vermeidung, der energetischen Effizienz und der erforderlichen Anlagengröße wird die Erzeugung von synthetischen Benzin- oder Dieselmotorkraftstoffen aus Biomasse auf der Basis heute verfügbarer Technologien als wenig zielführend angesehen.
4. Wegen der vorhandenen Infrastruktur für methanbasierte Gase, der hohen energetischen Effizienz der SNG-Erzeugung aus Biomasse über den Vergasungspfad und des deutlich reduzierten Wärmeeinbaus (im Vergleich zur Verstromung) ist Erdgassubstitut ein vielversprechender Sekundärenergieträger für stationäre und mobile Anwendungen.
5. Die Co- bzw. Poly-Generation von Strom-, Wärme- und SNG über thermochemische Konversionsverfahren ermöglicht eine hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei der energetischen Biomassenutzung auch in dezentralen Anlagenkonzepten mit einer Brennstoffwärmeleistung ab ca. 10 MW.