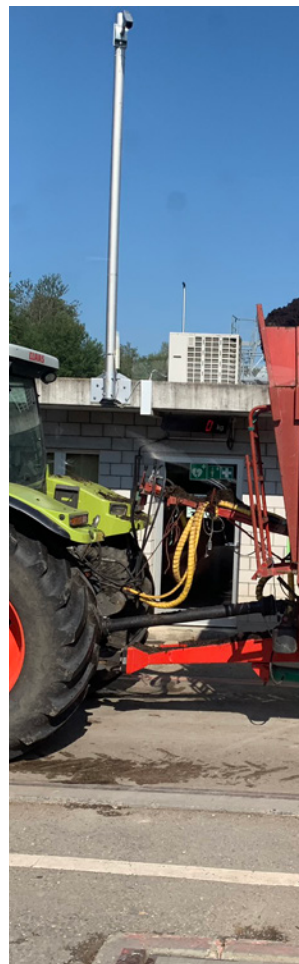
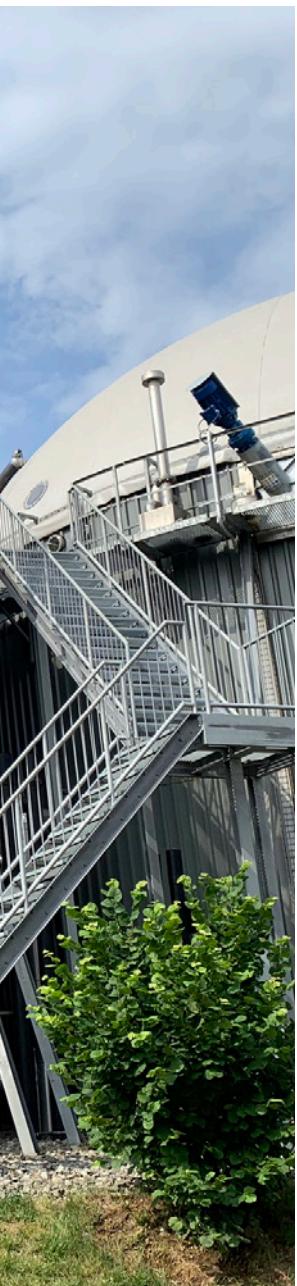


WHITE PAPER

Biogas aus Hofdünger in der Schweiz

Energiepotenzial, Technologieentwicklung und Ressourcenmobilisierung

Vanessa Burg, Gillianne Bowman, Oliver Thees, Urs Baier, Serge Biollaz,
Theodoros Damartzis, Jean-Louis Hersener, Jeremy Luterbacher, Hossein Madi,
Francois Maréchal, Emanuele Moioli, Florian Rüschi, Michael Studer,
Jan Van herle, Frédéric Vogel, Oliver Kröcher



Impressum

Vanessa Burg¹, Gillianne Bowman¹, Oliver Thees¹, Urs Baier², Serge Biollaz³, Theodoros Damartzis⁴, Jean-Louis Hersener⁵, Jeremy Luterbacher⁴, Hossein Madi³, Francois Maréchal⁴, Emanuele Moiola³, Florian Rüscher², Michael Studer⁶, Jan Van herle⁴, Frédéric Vogel^{3,7}, Oliver Kröcher^{3,4}

¹ Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf

² ZHAW, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil

³ PSI, Paul Scherrer Institut, Villigen

⁴ EPFL, Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne, Lausanne und Sion

⁵ Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen

⁶ BFH, Berner Fachhochschule, Zollikofen

⁷ FHNW, Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch



Suggested citation

Burg, V.; Bowman, G.; Thees, O.; Baier, U.; Biollaz, S.; Damartzis, T.; Hersener, J.-L.; Luterbacher, J.; Madi, H.; Maréchal, F.; Moiola, E.; Rüscher, F.; Studer, M.; Van herle, J.; Vogel, F.; Kröcher, O., 2021: White Paper: Biogas aus Hofdünger in der Schweiz: Energiepotenzial, Technologieentwicklung und Ressourcenmobilisierung. SCCER-BIOSWEET; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 20 S.

<https://www.doi.org/10.16904/envidat.256>

Ziel des Whitepapers

Ziel dieses Whitepapers ist es, Entscheidungsträgern, Verwaltungen und Stakeholdern die aktuellsten Forschungsergebnisse zur Verfügung zu stellen, um die optimale Nutzung von Bioenergie aus Hofdünger in der Schweizer Energiewende zu fördern. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse des Schweizer Kompetenzzentrums für Bioenergieforschung – SCCER BIOSWEET – zusammengefasst und in einem breiteren Kontext dargestellt. Wenn nichts anderes erwähnt wird, beziehen sich die Ergebnisse auf die Schweiz und im Falle der Ressourcen auf die heimischen Biomassepotenziale.

Titelblattfotos: Florian Rüscher (ZHAW), Vanessa Burg (WSL) und Vivienne Schnorf (WSL)

Layout: Sandra Gurzeler, WSL

Herausgeberin

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 13.12.2021

Zusammenfassung

Die Schweiz steht vor einer tiefgreifenden Transformation ihres Energiesystems. Um Lösungen für die mit der Energiewende verbundenen technischen, gesellschaftlichen und politischen Herausforderungen zu finden, haben Bundesrat und Parlament der Schweiz 2014 acht Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCER – Swiss Competence Center for Energy Research) zur Unterstützung der Energiestrategie 2050 gegründet. Dabei fokussierte das SCCER BIOSWEET (BIOMass for SWiss EnErgy fuTure) auf Biomasse und Biomassekonversion.

Obwohl die Biogastechnologie eine hoch entwickelte und einsatzbereite Technologie darstellt, ist die Nutzung von Hofdünger als Energiequelle in der Schweiz noch sehr begrenzt. Die anaerobe Vergärung (AV) ist eine vielversprechende Technologie, um erneuerbare Energie in Form von Wärme, Elektrizität und Kraftstoff aus Hofdünger zu erzeugen. Ausserdem verbessert AV die Düngerqualität und reduziert den Einsatz von Mineraldünger. Daher sollte der Hofdünger, der in der Schweiz in nennenswerten Mengen anfällt, als eine wichtige lokale Ressource angesehen werden, die zur Bodendüngung, Nährstoffrückgewinnung und Energieversorgung genutzt werden kann, was darüberhinaus zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen führt.

In diesem White Paper analysieren wir die Situation des Hofdüngers in der Schweiz, um die Gründe für seine geringe Nutzung als Energiequelle zu ermitteln und Möglichkeiten zur Verbesserung aufzuzeigen.

Die Komplexität des Hofdüngers (dezentrales Aufkommen, unterschiedliche Beschaffenheit, usw.) machen es schwierig, diesen Rohstoff für andere nachhaltige Produkte zu nutzen, so dass seine Verwendung für Energie nicht mit anderen Wegen stofflicher Nutzung konkurriert. Heute ist seine energetische Verwertung durch kleine Konverter gekennzeichnet, die unter der geringen Effizienz der Stromumwandlung aus Gas lei-

den. Die Effizienz der Energiebereitstellung aus Hofdünger könnte durch die Einführung effizienterer Technologien in der gesamten Prozesskette der AV verbessert werden. Dazu gehören die Trennung des Hofdüngers in feste und flüssige Fraktionen sowie Technologien zu seiner besseren Vorbehandlung (mikrobielle und thermochemische Vorbehandlung) sowie Methanisierung, Gasreinigung und Brennstoffzellen. Neben der AV sind die hydrothermale Vergasung und die Biokohleproduktion interessante aufkommende Technologien mit grossem Potenzial für die quantitative Umwandlung des Hofdüngers. Die Gesamtmodellierung des Energiesystems weist auf die hohe Relevanz der Nutzung von Hofdünger als Energiequelle hin.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nutzung von Hofdünger für energetische Zwecke in der Schweiz viel grösser sein könnte, als sie heute ist. Die Realisierung der Potenziale erfordert den Ausbau der Biogasinfrastuktur und der bestehenden Investitionsanreize. Neben den Vorteilen für die Umwelt (insbesondere Reduktion der CO₂-Emissionen) trägt die Energiebereitstellung aus Hofdünger in Kombination mit anderen erneuerbaren Energien zur Stabilisierung des Energiesystems bei und ermöglicht eine grössere Unabhängigkeit von den fossilen Energieträgern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Hofdüngerressourcen	4
3	Aktuelle technologische Entwicklungen	6
3.1	Fest-Flüssig-Trennung	6
3.2	Mikrobielle Vorvergärung	7
3.3	Dampf-Vorbehandlung	8
3.4	Hydrothermale Vergasung	8
3.5	Kohlenstoffrückgewinnung durch Biokohle	10
3.6	Gasreinigung	10
3.7	Katalytische Methanisierung	11
3.8	Biologische Methanisierung	12
3.9	Brennstoffzellen	12
4	Chancen und Barrieren für Bioenergie aus Hofdünger	14
5	Die Bioenergie aus Hofdünger im Energiesystem	15
6	Förderung von Biogas aus Hofdünger und Empfehlungen	16
7	Schlussfolgerung	17
	Danksagung	18
	Referenzen	18

1 Einleitung

Die Schweiz steht vor einer schrittweisen und tiefgreifenden Transformation ihres Energiesystems. Um Lösungen für die damit verbundenen technischen, gesellschaftlichen und politischen Herausforderungen zu finden, haben Bundesrat und Parlament den Aktionsplan «Koordinierte Energieforschung Schweiz» lanciert, in deren Rahmen die Schweizerische Kommission für Technologie und Innovation (KTI; heute Innosuisse), der Schweizerische Nationalfonds (SNF) und das Bundesamt für Energie (BFE) beauftragt wurden, interdisziplinäre Forschungsnetzwerke zwischen Hochschulen zu entwickeln und zu leiten. Acht Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCERs) wurden 2014 zur Unterstützung der Energiestrategie 2050 der Schweizer Regierung gegründet. Im SCCER BIOSWEET (BIOmass for SWiss EnErgy fuTure; www.sccer-biosweet.ch) liegt der Fokus auf Biomasse und insbesondere auf der Erforschung und Umsetzung von Biomasse-Konversionsprozessen mit hohem technologischen Reifegrad. Dieses Programm hat zu vielen neuen Erkenntnissen im Bereich der Bioenergie geführt; die vorliegende Synthese stellt dessen wichtigste Ergebnisse in den Kontext der Energiewende in der Schweiz vor.

Trotz der beträchtlichen Menge anfallenden Hofdüngers und obwohl die Biogastechnologie hoch entwickelt und einsatzbereit ist, ist die Nutzung von Hofdünger als Energiequelle in der Schweiz noch sehr begrenzt. Etwa 110 landwirtschaftliche Biogasanlagen stellen 1440 Terajoule (TJ) jährlich bereit, wobei ein beträchtlicher Teil auf die Vergärung von Co-Substraten zurückzuführen ist. Heute wird also nur ein Bruchteil des verfügbaren Hofdüngers energetisch verwertet. Die anaerobe Vergärung (AV) ist eine vielversprechende Technologie für die Umwandlung von Hofdünger in erneuerbare Energie in Form von Wärme, Elektrizität und Kraftstoff. Sie führt gleichzeitig zur Minderung der Treibhausgasemissionen

in der konventionellen Hofdüngerwirtschaft. In der Schweiz macht die Landwirtschaft 12,7% der gesamten Treibhausgasemissionen des Landes aus, wovon 19% auf die Hofdüngerwirtschaft zurückzuführen sind. Daher bietet die AV des Hofdüngers Möglichkeiten, Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen und die Verpflichtung der Schweiz zum Pariser Abkommen zu unterstützen. Ausserdem erhöht AV die Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen und reduziert den Einsatz von Mineraldüngern, wenn der Gärrest als Dünger verwendet wird. Daher sollte Hofdünger als wichtige lokale Ressource angesehen werden, die sowohl für die Nährstoffrückgewinnung (Co-Substrat) als auch für die Energieversorgung genutzt werden kann und dabei zu reduzierten Treibhausgasemissionen (THG) führt.

In diesem White Paper analysieren wir die Situation des Hofdüngers in der Schweiz, wir identifizieren die Gründe für ihre geringe Nutzung für die Energieanwendung und zeigen Möglichkeiten für eine Verbesserung auf. Zunächst stellen wir die Eigenschaften des Hofdüngers im Hinblick auf den Primärenergiegehalt des Rohstoffs sowie seine räumliche Verteilung und Hotspots dar (Kapitel 2). Anschliessend beschreiben wir die jüngsten technologischen Entwicklungen, die im Rahmen des SCCER BIOSWEET-Programms und anderer Projekte analysiert wurden (Kapitel 3). Darüber hinaus zeigen wir die Chancen und Barrieren von Bioenergie aus Hofdünger anhand verschiedener Aspekte auf: Treibhausgasminderung, Sichtweisen und Anreize der Landwirte, Transporte und Lieferketten sowie andere Möglichkeiten der Verwertung von Hofdünger (Kapitel 4). Des Weiteren analysieren wir die Rolle von Hofdünger innerhalb des Energiesystems durch einen Modellierungsansatz (Kapitel 5) und geben abschliessend Empfehlungen zur Förderung der energetischen Nutzung von Hofdünger (Kapitel 6).

2 Hofdüngerressourcen

Das theoretische Potenzial der Schweizer Biomasse beträgt 209 Petajoule (PJ) Primärenergie pro Jahr (Abb. 1) – etwa die Hälfte stammt aus Waldholz (108 PJ) und ein Viertel aus Hofdünger (49 PJ). Primärenergie bezeichnet die gesamte in der Ressource enthaltene Energie ohne Verluste infolge Umwandlung in Sekundärenergie (1 PJ = 10^{15} Joule). Dieses theoretische Potenzial entspricht der Gesamtmenge an Biomasse, die in einem Jahr anfällt. Etwa 27 PJ des Hofdüngers könnten nachhaltig für die Energiegewinnung mobilisiert werden (Burg *et al.* 2018a; Thees *et al.* 2017). Dieses nachhaltige Potenzial berücksichtigt die Verluste, die entstehen, wenn die Tiere auf der Weide sind, und die technologisch-ökonomischen Restriktionen der Nutzung, die mit der räumlichen Verteilung des Hofdüngers verbunden sind (da für die AV eine Mindestmenge an lokal produzier-

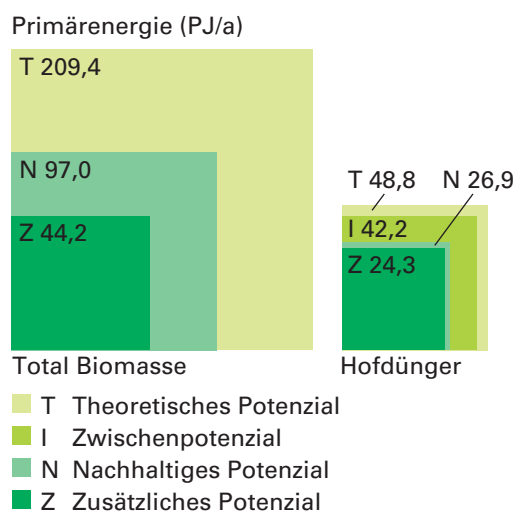


Abbildung 1: Hofdüngerpotenziale in der Schweiz.

ten Hofdünger erforderlich ist). Derzeit wird Hofdünger meist aus wirtschaftlichen Gründen kaum energetisch genutzt. Daher weist er ein grosses zusätzliches Potenzial (24 PJ) auf, was dem Energiegehalt von 0,57 Mt Öläquivalent oder etwa 2,2% des gesamten Bruttoenergieverbrauchs der Schweiz (1103 PJ im Jahr 2019 [BFE 2020]) entspricht.

Die geschätzten Hofdüngerpotenziale sind weit über das Land verteilt (Abb. 2). Diese Streuung erschwert neben der relativen Kleinteiligkeit der Schweizer Betriebe (durchschnittlich 27 Grossvieheinheiten) die Hofdüngersammlung und -verwertung für energetische Zwecke. Die grössten Hofdüngermengen sind im Mittelland verfügbar, wo die meisten Tierhaltungen stattfinden (im Kanton Bern, gefolgt von Luzern und St. Gallen).

Um einen effektiven Einsatz der Biomasse zur Energiegewinnung zu fördern, ist es wichtig, Regionen zu identifizieren und gegebenenfalls zu priorisieren, in denen sowohl die Verfügbarkeit von Bioenergie-Ressourcen als auch der sozioökonomische Kontext für Bioenergie-Investitionen geeignet sind. Daher verwendeten Mohr *et al.* (2019) räumlich explizite Potenzialdaten, um Hotspots und Coldspots von Biomassepotenzialen auf der Ebene der Gemeinden zu identifizieren, die sie dann mit sozioökonomischen Merkmalen dieser Regionen verglichen (Abb. 3). Sie fanden heraus, dass die Hofdünger-Hotspots in intensiv bewirtschafteten Gebieten des Mittellandes liegen, während die Coldspots in den Alpen und dicht besiedelten Gebieten zu finden sind. Ihre statistische Analyse zeigte, dass sich sozioökonomische Eigenschaften wie Haushaltseinkommen, poli-

tische Orientierung und Bevölkerungsdichte zwischen Hotspots und Coldspots stark unterscheiden. So ist beispielsweise die Einstellung zur Energiewende in den Coldspots im Durchschnitt besser als in den Hotspots. Der Vergleich zeigt zwar eher Korrelation als Kausalität, kann aber helfen, Synergien zwischen den Gebieten zu finden und zu nutzen und die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Projekte in ähnlichen Gebieten zu übertragen. Zum Beispiel könnten Projektentwickler mit erfolgreichen Biomasseprojekten in einer Gemeinde ähnliche Gemeinden in Bezug auf die Verfügbarkeit von Bioressourcen und die Einstellung der Bevölkerung zu erneuerbaren Energien erreichen.

Im Jahr 2050 wird erwartet, dass die für Energie verfügbare Hofdüngermenge ähnlich hoch sein wird wie die aktuellen Werte (Burg *et al.* 2019). Das zukünftige theoretische Potenzial wird auf 49 PJ geschätzt, während das nachhaltige Potenzial leicht, um weniger als 2 PJ (auf 25 PJ), sinken wird, da die Tiere mehr Zeit auf der Weide verbringen, wo der Hofdünger nicht eingesammelt werden kann. Diese Projektionen berücksichtigen verschiedene mögliche Treiber (z. B. Bevölkerungswachstum, Konsum), aber keine störenden Ereignisse, die nicht vorhersehbar sind. Zum Beispiel könnte ein plötzlicher Rückgang des Fleischkonsums die zukünftige Verfügbarkeit von Hofdünger drastisch reduzieren. Die langfristige Schätzung des Hofdünger-Potenzials bestätigt, dass in der Zukunft genügend Ausgangsmaterial zur Verfügung stehen wird, um eine viel grössere Anzahl von (insbesondere landwirtschaftlichen) Biogasanlagen als heute zu betreiben.

Primärenergie (PJ/a)

- 0,0–0,5
- 0,5–1,0
- 1,0–1,5
- 1,5–3,0
- 3,0–6,0

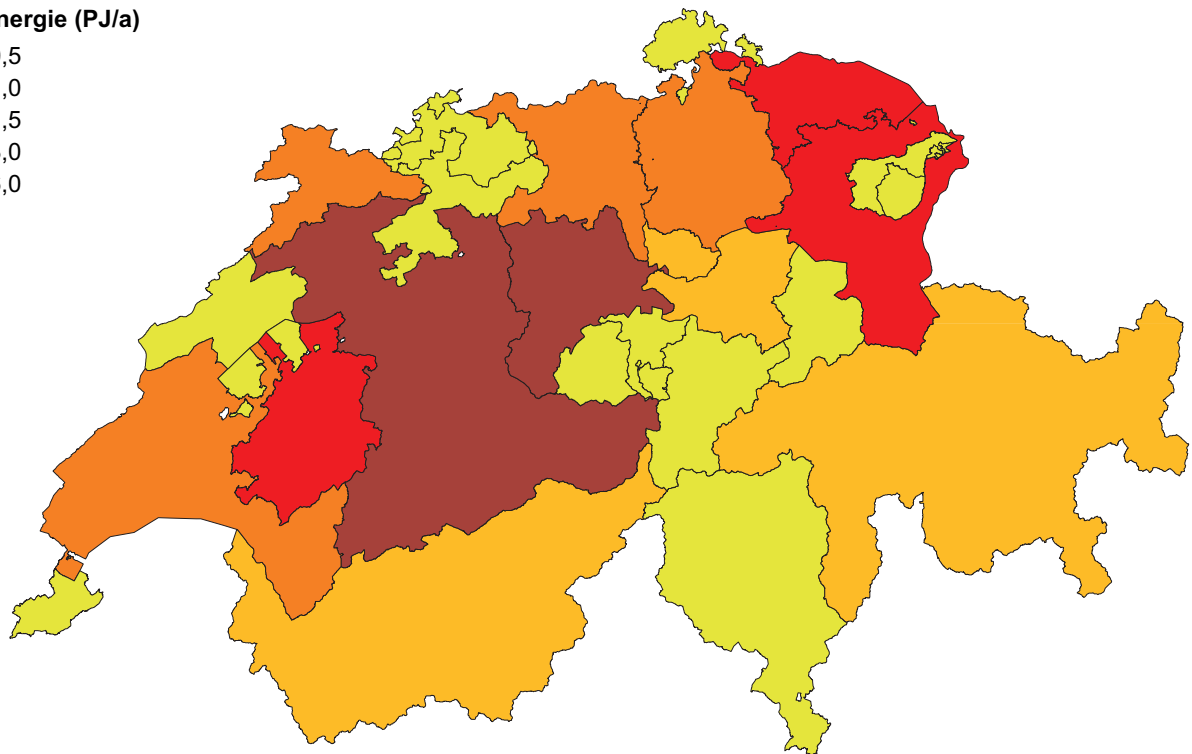


Abbildung 2: Kantonale Verteilung des nachhaltigen Hofdüngerpotenzials.

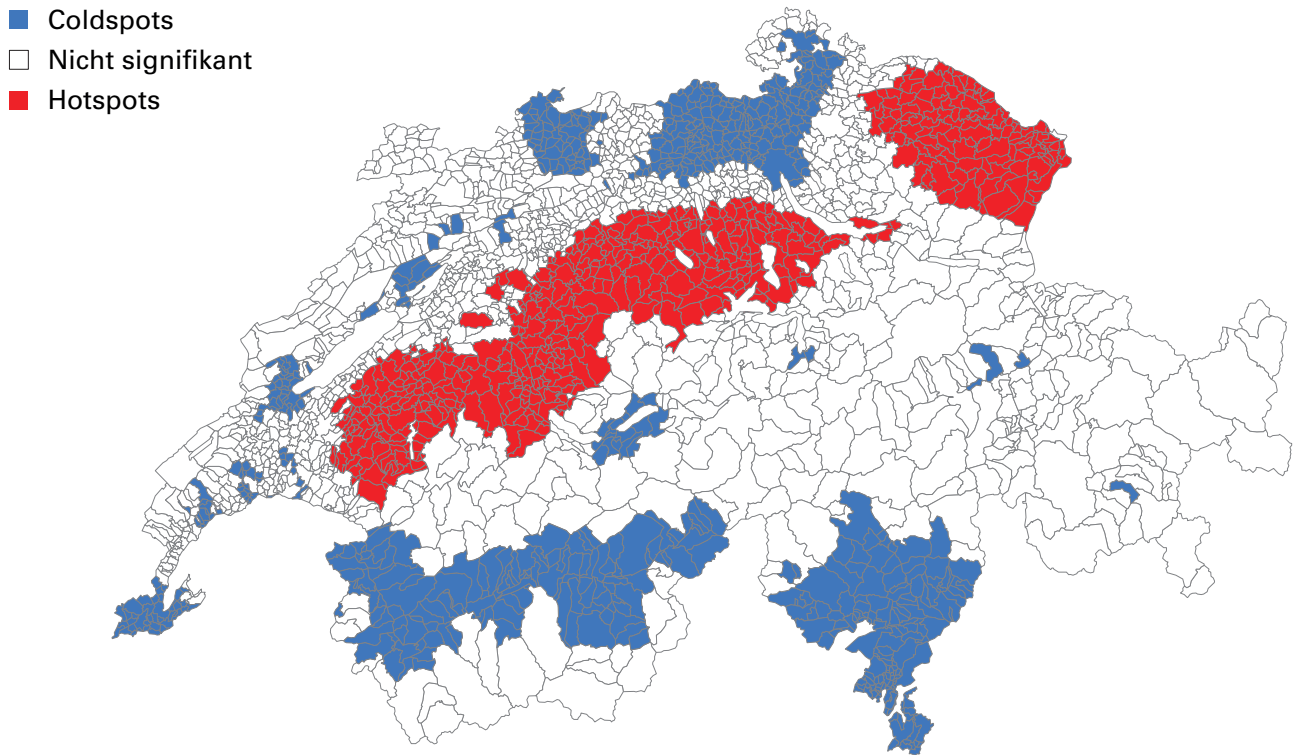


Abbildung 3: Hotspots und Coldspots des nachhaltigen Hofdüngerpotenzials pro Fläche (TJ/km²) in der Schweiz.

3 Aktuelle technologische Entwicklungen

Die grosse Menge an Hofdünger kann mit vielen Technologien energetisch verwertet werden. In der Schweiz wird hauptsächlich die AV angewandt. Bei der AV entsteht neben dem Gärrest auch Biogas. Der Gärrest enthält den nicht vergorenen Kohlenstoff (C) und die Nährstoffe (N, P, K) und wird als Dünger verwendet. Die Hauptbestandteile des Biogases sind Methan (CH₄), das als Energieträger nutzbar ist, und Kohlendioxid (CO₂). Obwohl dies eine etablierte Methode darstellt, ist eine Optimierung des gesamten Prozesses notwendig, um die Energieeffizienz und die wirtschaftliche Machbarkeit zu verbessern, und damit eine grössere Verbreitung der Hofdünger-basierten AV in der Schweiz zu begünstigen. Durch das Programm BIOSWEET wurde die Entwicklung der AV und verschiedener anderer Technologien auf einen höheren Reifegrad (TRL, Technological Readiness Level) gebracht. Die entsprechenden Technologien und Prozesse sind in Abbildung 4 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

Zunächst stellen wir dar, wie die Trennung von Hofdünger in feste und flüssige Fraktionen die energetische Nutzung von Hofdünger fördern kann (Kapitel 3.1). Es folgen die Technologien, die auf eine bessere Vorbehandlung von Hofdünger vor der AV abzielen: mikrobielle Vorvergärung (Kapitel 3.2) und Dampf-Vorbehandlung (Kapitel 3.3). Zusätzlich werden die hydrothermale Vergasung (Kapitel 3.4) und Karbonisierung (Kapitel 3.5) als alternative Technologien zur AV beschrieben. Diese können entweder direkt den Hofdünger oder den Gärrest aus dem AV-Prozess nutzen. Anschliessend be-

schreiben wir die Gasreinigung (Kapitel 3.6) bzw. deren Optimierung und stellen die katalytische (Kapitel 3.7) und die biologische Methanisierung (Kapitel 3.8), sowie den Einsatz von Brennstoffzellen (Kapitel 3.9) vor.

3.1 Fest-Flüssig-Trennung

Eine einfache Technologie zur Verbesserung des Transports und der weiteren Handhabung des Hofdüngers besteht darin, die Rohgülle in zwei Fraktionen – eine feste und eine flüssige – zu trennen und diese getrennt zu behandeln. Laut der Studie RAUS REIN enthält die abgetrennte feste Fraktion der Gülle mehr nutzbare Energie pro Gewichtseinheit als unbehandelte Rindergülle (Meier *et al.* 2018).

Die flüssige Fraktion enthält weniger vergärbaren Kohlenstoff als die Feststofffraktion, ist aber verfahrenstechnisch einfacher zu nutzen und kann in Hochleistungsreaktoren effizient vergoren werden. Kleine Hochleistungsreaktoren für die Vergärung der Flüssigfraktion sind jedoch auf dem heutigen Markt nicht verfügbar. Die Ausbringung der Flüssigfraktion mit Schleppgülleverteiltern ist unproblematisch, da sie nicht wie Rohgülle zu Verstopfungen führt. Ausserdem infiltriert die Flüssigfraktion besser in den Boden, reduziert die Futterverschmutzung und entwickelt weniger Geruchsemissionen.

Im Vergleich zu unseparierter Gülle enthält die feste Fraktion bis zu viermal mehr Energie pro Gewichtseinheit. Dadurch verbessert sich das Verhältnis von Ener-

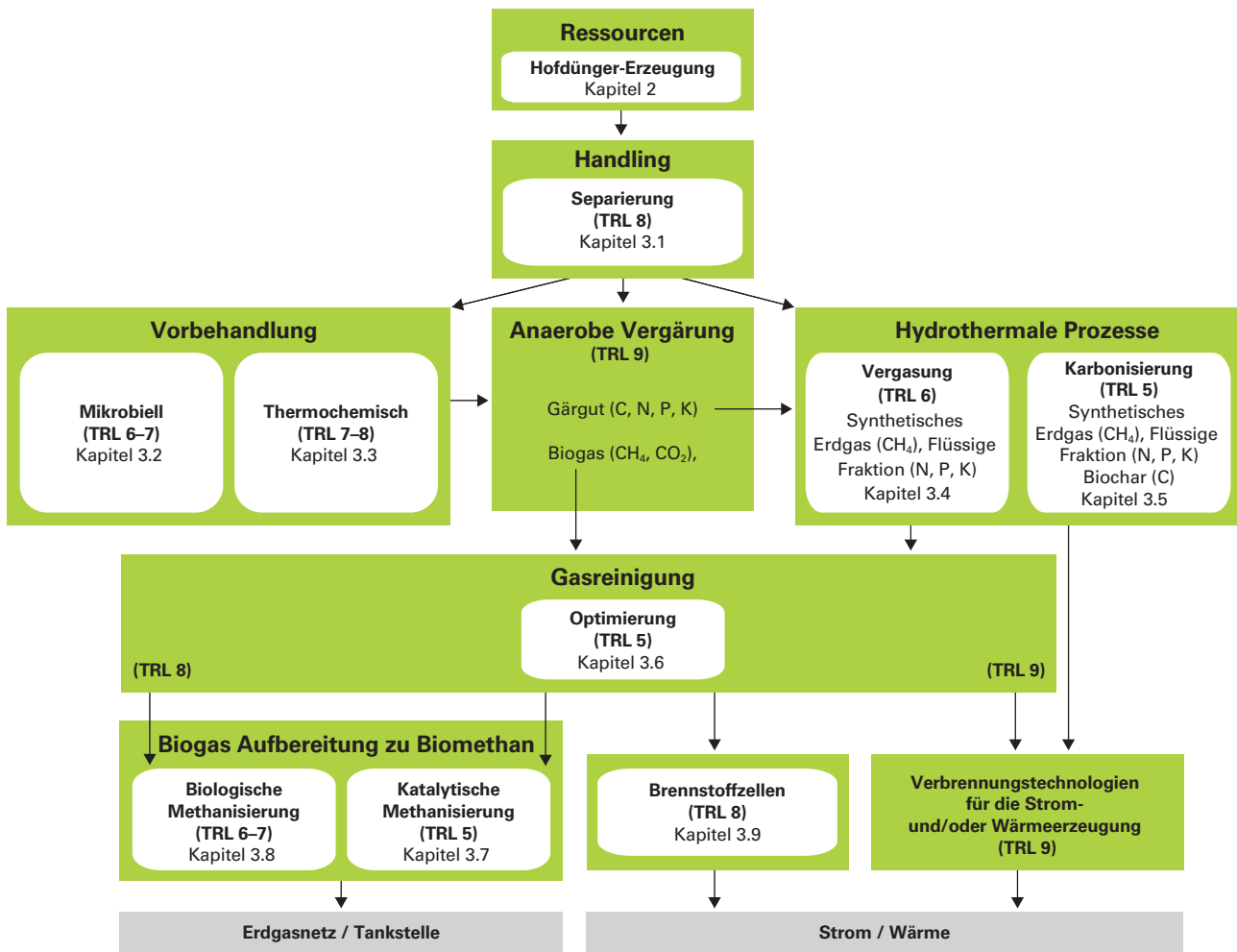


Abbildung 4: Übersicht der Technologien für die Energiegewinnung aus Hofdünger. Diejenigen, die im Rahmen des SCCER-BIOSWEET-Programms untersucht wurden, sind weiss hinterlegt mit Angabe der Technologie-Reifegrade, TRL. Die Pfeile zeigen die möglichen Nutzungspfade.

giedichte zu benötigter Transportenergie und die Feststofffraktion kann über längere Strecken transportiert werden. Die Feststofffraktion ist in Rührkesselreaktoren wenig störend und kann somit Co-Substrate ersetzen, die für die AV problematischer sind.

Die Fest-Flüssig-Trennung ist eine im Hinblick auf ihre Machbarkeit bewährte Technologie. Allerdings ist das Separationskonzept unter Berücksichtigung der Gesamtkosten zum jetzigen Zeitpunkt nicht rentabel. Obwohl der Separationsprozess einsatzfähig ist (TRL 9), sind die für die Nutzung der Flüssigfraktion erforderlichen Hochleistungsfermenter im kleinen Massstab noch nicht verfügbar (TRL 4–5). Auch fehlen Verfahren zur signifikanten Steigerung der Biogasausbeute des separierten Feststoffs (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). Die Separation reduziert jedoch die Transportkosten, weil weniger Wasser transportiert und der Energiegehalt des Transportgutes erhöht wird. Sie erleichtert somit die Bündelung der Gülle in grösseren Biogasanlagen, um positive Skaleneffekte (Grössenkostensparnisse) zu erzielen. Eine optimierte Logistik bei der Fest-Flüssig-Trennung verspricht eine höhere Kosteneffizienz. Die-

ser Ansatz wird in einem 2020 gestarteten Projekt NETZ (Nägele *et al.* 2020) weiterentwickelt, wobei die Kombination von kleinen Flüssigfermentern auf lokaler Ebene mit grossen Feststofffermentern auf regionaler Ebene das System rentabler machen könnte.

3.2 Mikrobielle Vorvergärung

Durch die getrennte Vorvergärung von Hofdünger und landwirtschaftlichen Reststoffen kann die Biomasse im Vergleich zur konventionellen AV viel schneller und vollständiger vergoren werden. Dadurch kann eine 20–30% grössere Menge an Biomasse, die nur teilweise vergoren wird, für die Biogaserzeugung genutzt werden. Dies erhöht das energetische Nutzungspotenzial und verbessert die Effizienz der Gesamtanlage um 20–30%. Durch die physikalische Trennung der AV-Stufen kann eine effizientere Hydrolyse und ein stabilerer, resilienterer Anlagenbetrieb erreicht werden. Dies liegt an den optimierten Prozessbedingungen des zweistufigen Fermentationsprozesses, verglichen mit dem konventio-

nellen, einstufigen Prozess. Biologische Verfahren, wie die mikrobielle Vorvergärung, haben zudem den Vorteil vergleichsweise geringer Investitions- und auch Energiekosten, da sie bei moderaten Druck- und Temperaturbedingungen ablaufen.

Die mikrobielle Vorvergärung wurde in mehreren Projekten der ZHAW bei verschiedenen technologischen Reifegraden (TRLs) untersucht und entwickelt. Im Rahmen des HYDROFIB-Projektes (Baier *et al.* 2019) wurde das zusätzlich nutzbare, schweizweite Energiepotenzial vorvergorener, faserreicher Biomasse, einschliesslich Stroh und Feststoffen aus der Gärrestabtrennung, ermittelt. Darüber hinaus wurden optimale substratspezifische Prozessbedingungen der mikroaeroben Hydrolyse im Labormassstab ermittelt, eine Pilotanlage für detailliertere Untersuchungen gebaut und eine Fallstudie mit einer zweistufigen AV-Anlage im technischen Massstab durchgeführt (Baier *et al.* 2019). Im Rahmen des Projekts MOSTCH4 wird ein Prototyp einer zweistufigen Biogasanlage mit mikroaerober Vorvergärung von Hofdünger die wirtschaftlichen Vorteile von kleinen, landwirtschaftlichen Anlagen demonstrieren (Warthmann *et al.* 2021). Im Projekt HYKOM wurde eine Trennung der anaeroben hydrolysierenden und methanbildenden Abbaustufen in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage im technischen Massstab umgesetzt. Der Prozess wird durch mehrere Messkampagnen wissenschaftlich begleitet und optimiert. Ziel der anaeroben, mikrobiellen Vorvergärung ist dabei vor allem die Erreichung eines stabileren Gärprozesses (Rüsch *et al.* 2021).

Mikrobielle Vorbehandlungsverfahren sind am besten für schwer und langsam abbaubare, wie lignozellulosehaltige Substrate geeignet. Sie bieten eine Steigerung der Energieeffizienz für AV-Anlagen von 20–30%, ohne zusätzliche Nebenproduktströme zu erzeugen. Hohe konzeptionelle Flexibilität und ein TRL von 6–7 ermöglichen eine sofortige Integration in bestehende landwirtschaftliche Strukturen, eine einfache Bedienung und so eine breite Anwendung.

3.3 Dampf-Vorbehandlung

Hofdünger enthält die unverdaulichen Bestandteile des Tierfutters, wie zum Beispiel lignozellulosehaltige Fasern, und ist daher bei der anaeroben Vergärung schwer abbaubar, d.h. nur etwa 20–50% des organischen Materials werden zu Biogas umgesetzt (Nasir *et al.* 2012). Zusammen mit der geringen Trockensubstanz und dem hohen Aschegehalt vieler Hofdüngerarten führt dies dazu, dass der wirtschaftliche Betrieb von anaeroben Vergärungsanlagen ohne Co-Substrate schwierig ist. Um die Biogausausbeute aus Hofdünger zu erhöhen, wurde eine Vielzahl von biologischen, mechanischen, chemischen und thermischen Vorbehandlungsmethoden vorgeschlagen (Li *et al.* 2021). Im Rahmen des SCCER BIOSWEET-Programms und mit zusätzlicher Förderung durch das Schweizer Bundesamt für Energie

(BFE; Projekt ManuMax) wurde die Dampfexplosionsvorbehandlung von Rindergülle untersucht. Dabei wird der Hofdünger durch direkte Dampf injektion auf hohe Temperaturen (160 bis 230°C) erhitzt, wodurch ein Teil der Biomasse in Lösung geht und nach der gewählten Reaktionszeit (5 bis 45 Minuten) explosionsartig entspannt, wodurch die Partikelgrösse des verbleibenden Feststoffs energieeffizient stark reduziert wird. Eine aufwendige Studie zur Vorbehandlung im Labormassstab von Li *et al.* (2021) zeigte, dass nur die Feststoffe von einer Dampfexplosionsvorbehandlung profitierten und die Methanausbeute um bis zu 50% gesteigert werden konnte. Die Ausbeute konnte mittels einer zweistufigen Vorbehandlung weiter gesteigert werden, wobei die erste Vorbehandlungsstufe bei einer niedrigeren Temperatur als die zweite stattfand. Durch die Abtrennung des Kondensats, das gelöste hitzelabile Verbindungen wie zum Beispiel hemicellulose Zucker enthält, zwischen den Stufen, konnte der unerwünschte thermische Abbau dieser Verbindungen bei höheren Temperaturen vermieden werden. Die Vorbehandlung der flüssigen Phase der Gülle führte selbst unter sehr milden Bedingungen zu reduzierten Biogaserträgen. Ökonomische Berechnungen zeigten aber, dass die Dampfvorbehandlung einen wirtschaftlicheren Betrieb einer Biogasanlage, die ausschliesslich mit Rindergülle betrieben wird, ermöglicht. Aufgrund der insgesamt vielversprechenden Ergebnisse wird derzeit an der BFH eine Pilotanlage mit Förderung des Schweizer Bundesamt für Energie (BFE, Projekt ManuMax II, TRL 6) entwickelt und am Institut agricole de Grangeneuve installiert und getestet. Die Vorbehandlung wird in einer kontinuierlichen Dampfexplosionsanlage mit Wärmeintegration durchgeführt und benötigt nicht mehr Energie als wenn die Rindergülle in einer Standardanlage vergoren würde. Die Dampfvorbehandlung hat daher ein grosses Potenzial, die Biogausausbeute von insbesondere Rindergülle und -mist – des am schwierigsten anaerob abbaubaren, aber auch am häufigsten verfügbaren Hofdüngers – stark zu erhöhen. Hierdurch wird die Chance erhöht, Biogasanlagen in Zukunft tatsächlich nur mit Hofdünger und ohne Co-Substrate ökonomisch zu betreiben.

3.4 Hydrothermale Vergasung

Die hydrothermale Vergasung (hydrothermal gasification, HTG) kann eine vollständiger energetische Nutzung der Biomasse bei gleichzeitiger Minimierung der Rückstände und maximaler Rückgewinnung der Nährstoffe ermöglichen. Da es sich um eine thermochemische, d.h. nicht-biologische Technologie handelt, kann sie nasse Biomasse fast vollständig in ein methanreiches Biogas umwandeln. Nasse Biomasseaufschlämungen werden unter hohem Druck auf hohe Temperaturen erhitzt, wodurch das Wasser flüssig bleibt. Dieses unter Druck stehende heisse Wasser zersetzt die Biomasse in eine ölige Flüssigphase, die mit dem Wasser und anorganischen Komponenten (Mineralien)

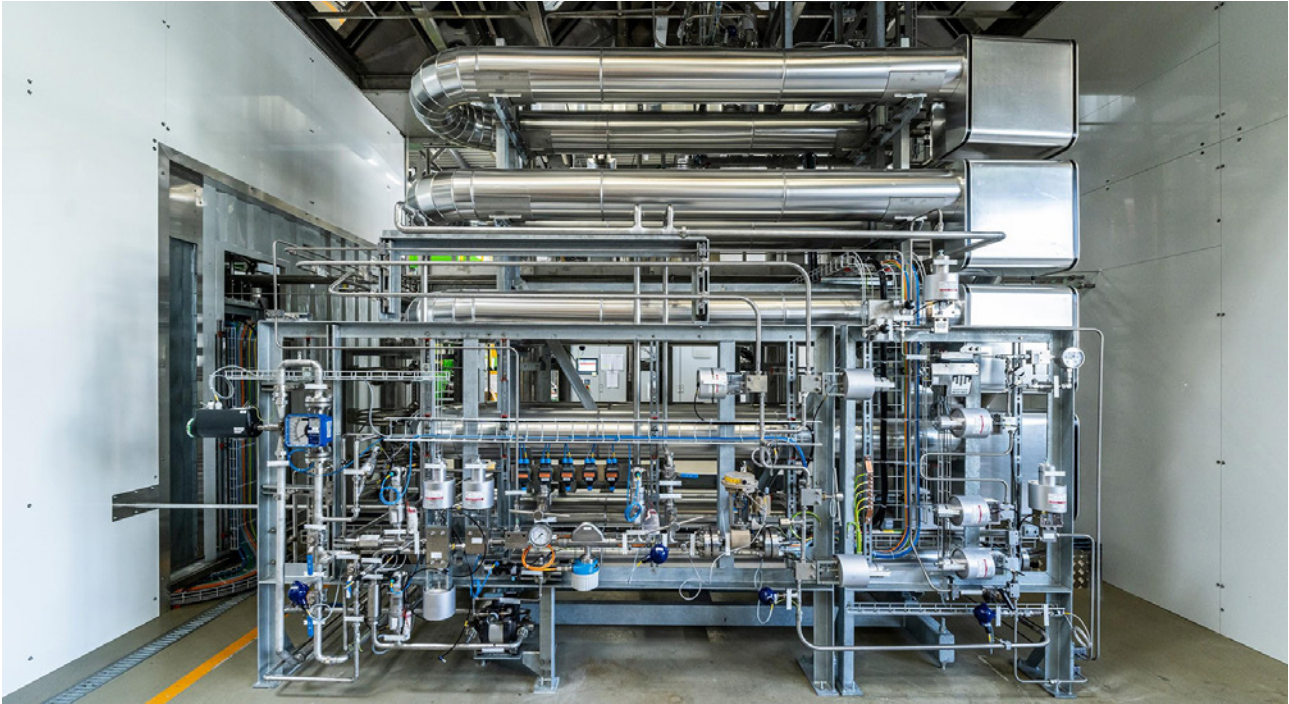


Abbildung 5: Pilotanlage am PSI für die hydrothermale Vergasung von feuchter Biomasse (Photo: M. Fischer, PSI).

aus der Biomasse vermischt ist. Die ölige, organische Phase kann mit Hilfe eines Katalysators sehr effizient in ein Gemisch aus Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt werden. Die anorganischen Komponenten werden zurückgewonnen und können zu einem Düngemittel weiterverarbeitet werden. Die Endprodukte der Biomasse sind ein methanreiches Biogas und ein Prozesswasserstrom, der arm an organischen Stoffen und Mineralien, aber reich an Ammonium, einem weiteren wichtigen Nährstoff, ist.

Der hydrothermale Vergasungsprozess wurde innerhalb des SCCER BIOSWEET weiterentwickelt und optimiert, um einen höheren technologischen Reifegrad zu erreichen. Als wichtiger Meilenstein wurde zusammen mit den Industriepartnern und mit Unterstützung des BFE (Projekt HydroPilot) eine Pilotanlage am PSI gebaut (siehe Abb. 5). Diese halbindustrielle Anlage hat eine Kapazität von 110 kg/h nasser Biomasse und kann bis zu 100 kW Biogas produzieren. Rund 60% der in der nassen Biomasse enthaltenen Energie kann in Biogas umgewandelt werden. Dieses Gas wird unter hohem Druck gewonnen und muss nur minimal gereinigt werden. Der Strom mit den Mineralien wird genutzt, um Nährstoffe wie Phosphor zu extrahieren. Der nach der Extraktion verbleibende mineralische Rückstand kann in einem Zementwerk weiter verwertet werden. Die Kombination der hydrothermalen Vergasung mit einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle oder einem Gasmotor erhöht den Wirkungsgrad des Gesamtsystems, da die Wärmeströme sowohl der Brennstoffzelle als auch des Gasmotors zur Beheizung der hydrothermalen Vergasung genutzt werden können. Für einen solchen kom-

biniierten Prozess wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von bis zu 43% berechnet (Vogel *et al.* 2016).

Die HTG-Technologie kann auf die meisten pumpfähigen Schlämme angewendet werden, die etwa 10 Gewichtsprozent organische Substanz oder mehr enthalten. Mechanisch entwässerter Hofdünger ist ein Beispiel dafür. Einschränkungen müssen bei korrosiven Einsatzstoffen, zum Beispiel mit einem hohen Halogenidgehalt, oder Einsatzstoffen mit einem extrem hohen Schwefelgehalt gemacht werden. Um die Eignung eines bestimmten Einsatzstoffes zu beurteilen, wurde innerhalb des SCCER BIOSWEET eine Einsatzstoff-Entscheidungsmatrix entwickelt. Dieses Experten-Entscheidungstool umfasst sowohl die hydrothermale Vergasung als auch die anaerobe Vergärung. Ein wichtiger Vorteil der HTG ist die Fähigkeit, auch Stoffe zu verarbeiten, die nicht anaerob vergoren werden können, wie zum Beispiel verholzte Teile. Dies bietet die Möglichkeit, viele Abfallströme auf regionaler Ebene zu behandeln, nicht nur Hofdünger, sondern z.B. auch mit Kunststoffen verunreinigte Grünabfälle. Da Nährstoffe, einschliesslich flüchtige Bestandteile wie NH_3 , innerhalb einer HTG-Anlage vollständig zurückgewonnen werden, sind die Emissionen dieser Technologie sehr gering. Die Gesamtbilanz des Lebenszyklus hat sich als sehr vorteilhaft erwiesen. Die Umwandlung von Hofdünger und dessen Ersatz als Düngemittel durch das mineralische Nebenprodukt des Prozesses führt zu reduzierten N_2O -Emissionen und einer verbesserten Umweltleistung, ausgedrückt zum Beispiel als Treibhauspotenzial: $-0,6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./MJ}_{\text{SNG}}$ (Luterbacher *et al.* 2009). Aufgrund der Vielseitigkeit des HTG-Prozesses

hat dieser das Potenzial, einen grossen Teil des gesamten nachhaltigen Hofdüngerpotenzials (und anderer Arten von Abfallbiomasse) in der Schweiz mit hoher Effizienz und geringer Umweltbelastung umzuwandeln. Die Technologie wurde im Rahmen des SCCER BIOSWEET auf TRL 6 gebracht, so dass ein Markteintritt innerhalb der nächsten Jahre absehbar ist.

3.5 Kohlenstoffrückgewinnung durch Biokohle

Bei Überlegungen zur energetischen Nutzung von Hofdünger und landwirtschaftlichen Reststoffen wird häufig eine maximale Energieeffizienz angestrebt. Dies ist gleichbedeutend mit einer möglichst vollständigen Umwandlung von organisch gebundenem Kohlenstoff in CO₂ und damit einer Entfernung von Kohlenstoff aus dem System. Bei der AV von Hofdünger wird zum Beispiel eine Kohlenstoffeffizienz von 40–50% erreicht. Dabei wird ausser Acht gelassen, dass der organische Kohlenstoffkreislauf nicht vollständig unterbrochen werden sollte, da landwirtschaftlich genutzte Böden auf den Eintrag und die Anreicherung von stabilen Kohlenstoffverbindungen in Form von Humus angewiesen sind, um ihre Fruchtbarkeit und Speicherfähigkeit von Wasser und Nährstoffen zu erhalten. Neben der Kompostherstellung aus Festmist und landwirtschaftlichen Reststoffen bietet sich hier die Biokohle aus der Karbonisierung zur stofflichen Nutzung des Kohlenstoffs in der Bodenbearbeitung an.

Die hydrothermale Karbonisierung (hydrothermal carbonisation, HTC) von Hofdünger oder Gärresten bietet eine Möglichkeit, Biokohle zu erzeugen, die als Bodenverbesserer genutzt werden kann. Aufgrund der hohen Kohlenstoff-Effizienz des HTC-Prozesses können 80–90% des Gärrest-Kohlenstoffs in stabiler Form in den Kohlenstoffkreislauf des Bodens zurückgeführt werden, verglichen mit 40–50% bei direkter Anwendung von rohem oder kompostiertem Gärrest. Bei der Karbonisierung von Gärresten kann sogar die Biokohle in den Fermenter zurückgeführt werden, was die Möglichkeit von Synergieeffekten und erhöhter Methanproduktion eröffnet (Sunyoto *et al.* 2016), ohne dass die nützliche Verwendung als Bodenverbesserung geopfert werden muss.

Im BIOSWEET-Projekt HTC Rheinmühle haben Forscher die Entwicklung eines HTC-Reaktors für flüssige Substrate in Angriff genommen (Mehli *et al.* 2020). Die Herstellung von Biokohle mit gleichbleibender Qualität für den Einsatz als Bodenhilfsstoff, sowie die Aufbereitung der anfallenden hochkonzentrierten Prozesswässer erwiesen sich als grosse Herausforderung. Im Rahmen der Innosuisse Projekte CarbonVALUE und CarboPHOS der ZHAW werden Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Phosphor und anderen Wertschöpfungsprodukten durch hydrothermale Karbonisierung untersucht (FFA 2020; Merkle *et al.* 2021). Beide Projekte kombinieren die stoffliche Verwertung durch P-Rückgewinnung mit

der energetischen. Dabei wird durch massiv verbesserte Entwässerung der Produkte eine nennenswerte Energieeinsparung erreicht.

Es zeigte sich im Verlauf der Projekte, dass die Reaktionsbedingungen rau sind und die Prozesskomplexität hoch ist. Dies zusammen mit den Herausforderungen der Biokohlequalität und der Aufbereitung des Prozesswassers stellen diese Technologie noch vor erhebliche Schwierigkeiten. Diese müssen überwunden werden, bevor eine Umsetzung in einer landwirtschaftlichen Umgebung erfolgen kann.

3.6 Gasreinigung

Die Hauptbestandteile von Biogas sind Methan und Kohlendioxid, wobei der Methananteil die nutzbare Energieressource darstellt. Darüber hinaus kann Biogas geringe Mengen (0–10%, Volumenanteil) an Stickstoff und Sauerstoff sowie Spuren (ppbv–ppmv Anteile) von Schwefelverbindungen (z. B. H₂S, Mercaptane, Sulfide), Siliziumverbindungen (Siloxane, Silane), Ammoniak, halogenierten Verbindungen und anderen flüchtigen organischen Verbindungen enthalten. Der Anteil an Spurenstoffen im Biogas hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die Zusammensetzung der Biomasse kann variieren, selbst wenn der Hauptbestandteil Hofdünger ist: Der Hofdünger kann von verschiedenen Tieren stammen, die unter unterschiedlichen Bedingungen gehalten werden, und er kann je nach Jahreszeit unterschiedlich verfügbar sein, je nachdem, ob die Tiere in Ställen gehalten werden oder nicht. Darüber hinaus können je nach Verfügbarkeit auch Co-Substrate unterschiedlicher Herkunft zugesetzt werden. Die Fermenterbedingungen (Betriebstemperatur, Fermentertyp, Verweilzeit) haben ebenfalls einen Einfluss. Zusätzlich können im Fermenter auf Mikrobelleftung oder Zugabe von Eisenverbindungen basierende Entschwefelungsverfahren eingesetzt werden, um den H₂S-Gehalt im Biogas zu reduzieren.

Die im Biogas vorhandenen Spurenstoffe können eine erhebliche Herausforderung für die energetische Nutzung darstellen. Insbesondere Schwefelverbindungen in Konzentrationen von einigen ppmv (oder sogar ppbv) können jeden katalytischen Prozess, der mit Biogas arbeitet, erheblich beeinträchtigen. Dies gilt auch für neuartige, hocheffiziente Verfahren wie Hochtemperatur-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cell, SOFC) oder katalytische Brennstoffaufbereitungsanlagen. Es wurde nachgewiesen, dass Schwefel im Bereich von 0,5–2 ppmv die Leistung von SOFCs beeinträchtigt (Lanzini *et al.* 2019) und nickelbasierte Methanisierungskatalysatoren deaktiviert. In kleinen Masstäben, d. h. Anlagen unter 150 kW_{el}, gibt es noch keine wirtschaftlich tragfähige Biogas-Reinigungstechnologie für diese neuen Technologien. Da die meisten Schweizer Betriebe beziehungsweise Anlage in dieser Grössenordnung liegen, besteht ein Bedarf an robusten und kostengünstigen Gasreinigungslösungen für SOFCs (erläutert in Kapitel

2.9). Andernfalls ergibt sich für diese Endanwendung kein wirtschaftlicher Vorteil.

Im Rahmen des SCCER BIOSWEET wurde am PSI ein Gasreinigungs- und Gasaufbereitungsprüfstand (COSYMA, TRL 5) aufgebaut, der für Feldversuche zu verschiedenen Biogasanlagen bewegt werden kann. Die Anlage kann sowohl bei Umgebungstemperatur und -druck als auch bei erhöhten Temperaturen bis 400°C und Drücken bis 7 bar betrieben werden. Diese Eigenschaften erlaubten es, eine optimale Gasreinigungslösung für jede Biogasanlage zu finden. COSYMA ist nun (2021) an die Biogasanlage in Inwil angeschlossen (Abb. 6). Das Biogas wird aus den Fermentern entnommen und durch das Gasreinigungssystem in COSYMA geleitet, wo es zur Überwachung von Verunreinigungen in den Diagnosecontainer geleitet wird. COSYMA und die Diagnosewerkzeuge wurden bereits in mehreren Projekten bei Prozessen verschiedener technologischer Reifegrade eingesetzt und dabei kontinuierlich verbessert. Zum Beispiel haben Calbry-Muzika *et al.* (2019) die Diagnosewerkzeuge bereits erfolgreich für die Analyse der Biogaszusammensetzung von fünf landwirtschaftlichen Standorten angewendet. Im Rahmen des EU-Projekts Waste2Watts (<https://waste2watts-project.net>) wurden mit COSYMA und den Diagnosebehältern verschiedene Sorptionsmaterialien zur Entfernung von H₂S, organischen Schwefelverbindungen und Terpenen evaluiert. Für einige Verunreinigungen wie H₂S, Siloxane und Terpene wurden Lösungen gefunden, für organische Schwefelverbindungen wie Dimethylsulfide (DMS) sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

3.7 Katalytische Methanisierung

Biogas kann als Quelle für Methan genutzt werden, das direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden kann. Dazu muss das Gasprodukt mehr als 96 Vol.% Methan ent-

halten. Daher muss gereinigtes Biogas (d.h. frei von Verunreinigungen wie S-haltigen Verbindungen und Siloxanen) zusätzlich behandelt werden, um CO₂ zu entfernen und einen methanreichen Strom zu erhalten. Zu diesem Zweck sind mehrere Technologien auf dem Markt verfügbar. Die am häufigsten eingesetzten sind: Wasserwäsche, chemische Absorption, Druckwechseladsorption und Membranen (Kapoor *et al.* 2019).

Bei der Wasserwäsche wird Wasser verwendet, um selektiv CO₂ und H₂S aus dem Biogas zu entfernen. Dieses Verfahren führt zu einer hohen Methanausbeute (>98%) bei akzeptabler Reinheit (über 97 Vol.% des Methans im Produkt). Der grösste Nachteil dieser Technologie ist die grosse Menge an benötigtem Wasser, womit erhebliche Kosten für die Wasserregeneration einhergehen. Daraus resultieren hohe Kapitalkosten von 2500–5000 €/Nm³_{Biogas}/h. Dennoch ist diese Technologie mit einem Marktanteil von 40% der installierten Anlagen die am weitesten verbreitete in der Biogasaufbereitung. Der Betrieb kann verbessert werden, indem Chemikalien anstelle von Wasser für den Absorptionsschritt verwendet werden (z. B. Amine). Auf diese Weise werden geringere Volumina benötigt, wodurch die Kapitalkosten der Anlage auf 1500–3000 €/Nm³_{Biogas}/h sinken und eine höhere Produktreinheit erreicht wird. Allerdings ist der Betrieb dieser Anlagen anspruchsvoller, da eine höhere Temperatur im Absorptionsschritt und bei der Regeneration des Sorptionsmittels erforderlich ist. Der Marktanteil von chemischen Wäschern in der Biogasaufbereitung liegt bei etwa 22%.

Bei der Druckwechseladsorption (pressure swing adsorption, PSA) handelt es sich um die selektive Adsorption von CO₂ in ein festes Material. Die Methanrückgewinnungsrate bei der PSA ist geringer, da ein erheblicher Anteil an CH₄ im Abgas verloren geht. Dies entspricht in den besten Fällen einer CH₄-Rückgewinnung von 96%. Aus diesem Grund und wegen der Komplexität der Konstruktion liegt der Marktanteil von

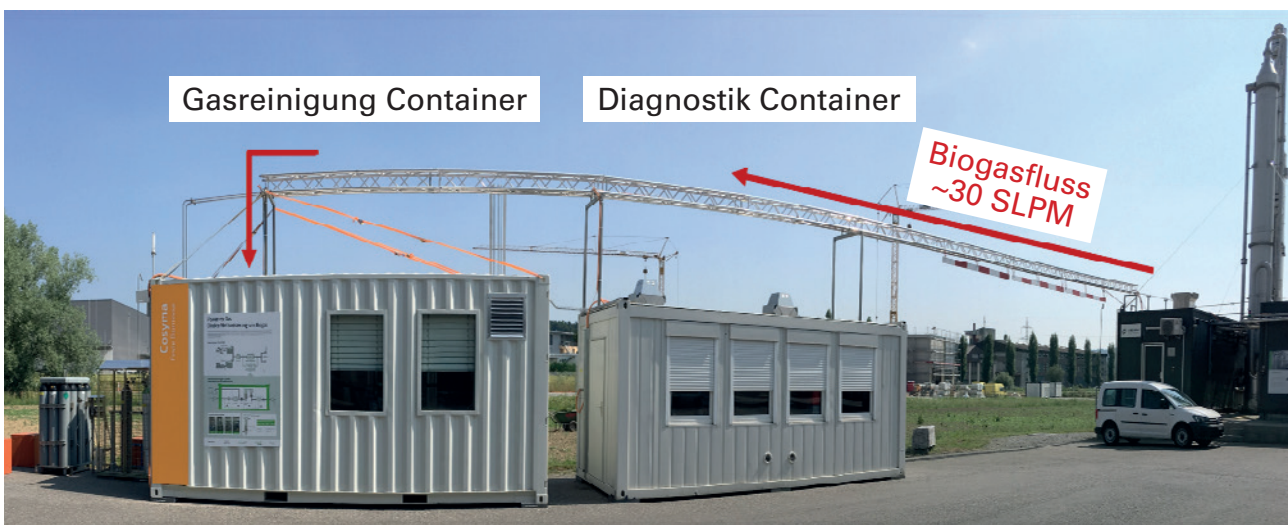


Abbildung 6: COSYMA Gasreinigungs- und Gasaufbereitungsprüfstand (SLPM = Standard-Liter pro Minute; Photo S. Biollaz, PSI).

PSA bei etwa 20% und die Kapitalkosten einer Anlage betragen 1500–3000 €/Nm³_{Biogas}/h.

Membranen sind Materialien, die den Gasstrom selektiv in einen CH₄-reichen und einen CO₂-reichen Strom trennen. Die Hauptvorteile von Membranen sind die direkte Anwendung im Gasstrom (ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Einheiten zur Regeneration) und die Modularität (einfache Anpassung an die Anlagengrösse). Entsprechend sind die kleinsten heute kommerziell verfügbaren Biogasaufbereitungsanlagen Membran-Anlagen mit einem Durchfluss ab 10 Nm³_{Biogas}/h. Allerdings sind Membranmaterialien teuer und die erhebliche Menge an Methan, die im CO₂-reichen Strom verbleibt, macht eine zusätzliche Reinigung erforderlich.

Eine neue Technologie zur Biogasaufbereitung, die derzeit entwickelt wird, ist die CO₂-Methanisierung. Dabei wird das CO₂ nicht aus dem Gasstrom entfernt, sondern durch Zugabe von H₂ selektiv in CH₄ umgewandelt. Diese Reaktion wird in katalytischen Reaktoren (meist auf Ni-basierten Katalysatoren) bei etwa 300°C und 5–10 bar durchgeführt. Dem Hauptvorteil dieser Methode stehen hohe Kapital- und Betriebskosten gegenüber, insbesondere wenn der H₂ durch Elektrolyse hergestellt wird. Es wird erwartet, dass diese Technologie in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, da sie es ermöglicht, überschüssige erneuerbare Energie ins Erdgasnetz zu speichern.

Im Rahmen des SCCER BIOSWEET wurde die Machbarkeit der Technologie in der Praxis nachgewiesen, indem der Gasreinigungs- und Gasaufbereitungsprüfstand COSYMA (TRL 5, 20 kW_{SNG}) in der Kläranlage von Werdhölzli (Kanton Zürich) installiert und betrieben wurde. Die Versuche zeigten einen stabilen Betrieb der Methanisierungsreaktion zur Aufbereitung von Biogas für mehr als 1000 h, mit einer durchschnittlichen Methanausbeute von 96% (Witte *et al.* 2018, 2019). Daher ist die CO₂-Methanisierung eine machbare Technologie für die Biogasaufbereitung, deren Kommerzialisierung die Entwicklung einer kostengünstigen Lösung für die H₂-Produktion voraussetzt. Das in Werdhölzli durchgeführte Projekt wurde vom BFE mit dem Watt d'Or 2018 ausgezeichnet.

3.8 Biologische Methanisierung

Eine weitere Möglichkeit, die Effizienz der anaeroben Vergärung von Hofdünger zu erhöhen, liegt in der Möglichkeit, zusätzliches Methan durch die Nutzung von erneuerbarem Kohlendioxid aus Biogas zu erzeugen, das in Gegenwart von Wasserstoff mittels mikrobiologischer Methanisierung umgewandelt wird. Das Hinzufügen dieses Prozessschritts führt theoretisch zu einer 40–50% höheren Energieausbeute bei unveränderter Biomassemenge und Fermentergrösse. Darüber hinaus ermöglicht er die Produktion von Biomethan in Einspeisequalität ohne weitere Aufbereitungsschritte, was 4–6% der Energie des Rohbiogases einspart.

Im binationalen erant-Projekt CarbonATE entwickeln, charakterisieren und evaluieren die Schweizer Partner einen mikrobiologischen Prozess im Labormassstab, um Rohbiogas aus anaeroben Fermentern, CO₂-reiches Schwachgas aus der Biomethanaufbereitung oder CO₂-reiche Ströme aus anderen Quellen durch Zugabe von H₂ zu CH₄ zu konvertieren (Baier *et al.* 2020). Ziel ist es, ein Gasprodukt mit einem CH₄-Gehalt von >96% zu erzeugen, das direkt in das Gasnetz eingespeist werden kann. Der Fokus des Projekts liegt auf der Ex-situ-Methanisierung, bei der der mikrobiologische Prozess unabhängig von der anaeroben Vergärung in einem separaten Reaktor unter kontrollierten Bedingungen abläuft. Dies führt zu einer optimalen Reaktorkonfiguration mit hohen H₂-Transferraten, erhöhten Gasumwandlungsraten und einem geringen Kohlenstoff-Fussabdruck. Aufgrund der Verfügbarkeit von Elektrolyseuren im kleinen bis mittleren Massstab bietet diese Technologie Möglichkeiten für die zusätzliche Nutzung von CO₂ aus der Hofdüngervergärung zur Energiegewinnung. Unter Berücksichtigung des Prozessenergiebedarfs für Elektrolyse und Methanisierung liegt der theoretische Überschuss an Bioenergiegewinnung bei 20–30%. Neben der effizienten Bereitstellung von erneuerbarem Strom für die Elektrolyse ist die Entwicklung hocheffizienter H₂-Eintrags- und Transferkomponenten eine der technischen Herausforderungen der Prozessentwicklung. Die Bewältigung dieser Herausforderung würde den Weg für innovative Lösungen zur Aufrüstung von Biogasanlagen durch den Einsatz von In-situ-Methanisierung innerhalb des bestehenden Fermenters ebnet.

Die mikrobielle Ex-situ-Methanisierung eignet sich als Nachrüstung für alle Arten und Bereiche von landwirtschaftlichen AV-Anlagen und bietet einen erheblichen Überschuss an Biomethanproduktion von bis zu 50%. Unter milden Prozessbedingungen sind die negativen Umweltauswirkungen gering. Eine relativ hohe Prozesskomplexität und eine beträchtliche Abhängigkeit von erneuerbarem Strom behindern derzeit eine breit angelegte Implementierung in landwirtschaftlichen Umgebungen.

3.9 Brennstoffzellen

Die Entwicklung von Festoxid-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cell, SOFC) zur Stromproduktion schreitet kontinuierlich voran. Mehrere Entwickler bieten Produkte auf dem Markt an, von Installationen im Mikrobereich (1 kW_e) bis hin zu Systemen mit mehreren 100 kW_e. In den letzten Jahren lag der weltweite SOFC-Absatz bei 25 000 Einheiten pro Jahr, was einer Gesamtleistung von >140 MW_e/a entspricht (E4Tech 2020). Sie wandeln meist Erdgas um, können aber aufgrund ihrer Brennstoffflexibilität auch Biogase ohne grossen Mehraufwand umwandeln. Ihre wesentlichen Vorteile im Vergleich zu Motoren sind: (i) höherer elektrischer Wirkungsgrad, (ii) deutlich geringere Schadstoffemissionen (kein SO_x, kein NO_x, kein Methanschlupf), (iii)

geringere Wartungskosten und (iv) geringere Geräuschentwicklung. Dies gilt insbesondere für Anwendungen mit geringerer Leistung (<100 kW_e), wie sie typisch für die verstreute lokale Verfügbarkeit von Hofdünger und Biogas sind. Der erwartete elektrische Wirkungsgrad liegt hier bei 50%. In Labortests erreichen SOFC-Stacks (engl. für Stapel) mit Biogasgemischen einen Gleichstromwirkungsgrad von 60% (Madi *et al.* 2018). In realen Anlagen erreichen selbst 1–2 kW_e SOFCs mit Erdgas einen Netto-Wechselstromwirkungsgrad von 63%. Im EU-Projekt DEMOSOFC erreichten SOFCs mit 58 kW_e einen Netto-Wechselstromwirkungsgrad von 52–56% mit Abwasser-Biogas. Schätzungen zeigen, dass die derzeit total gesammelte Hofdüngermenge der Schweiz (Zwischenpotenzial, Abb. 1) in über 5000 SOFC-Einheiten von 50 kW_e genutzt werden könnte.

Es gibt drei Hauptherausforderungen für den Einsatz von SOFCs in kleinem Massstab in landwirtschaftlichen Betrieben: (i) die Gasreinigungskosten sind erheblich höher als bei anderen Biogassystemen, (ii) die SOFC-Kosten sind beträchtlich, und (iii) die AV-Kosten selbst sind ebenfalls hoch. In Bezug auf die Reinigung wurden Grenzwerte für die verschiedenen relevanten Verunreinigungen festgelegt, die derzeit nicht nur für den SOFC-Brennstoffkatalysator, sondern auch für den Biogas-Vorreformierungskatalysator, weiter verfeinert werden (vgl. 2.6)(<https://waste2watts-project.net/>). Die kritische Verunreinigung im Hofdünger-Biogas ist der Gesamtschwefel, genauer gesagt der organische Schwefel

(wenige ppm), da seine Verbindungen mit klassischen Sorptionsmitteln schwieriger zu entfernen sind als H₂S. Die SOFC-Kosten sinken mit steigendem Produktionsvolumen. Für die 50 MW_e/a SOFC-Fertigungsanlage, die SOLIDpower (Italien, Schweiz) im Jahr 2020 in Betrieb genommen hat, gehen die Systemkosten auf 2000 €/kW_e zurück. Kostenberechnungen für SOFC-Anlagen auf Bauernhöfen im Vergleich zu Blockheizkraftwerken wurden für verschiedene Fälle und Länder, einschliesslich der Schweiz, durchgeführt (Majerus *et al.* 2017, 2018). In Bezug auf die AV-Kosten sind mehrere kleine Hersteller mit wettbewerbsfähigen Lösungen auf dem europäischen Markt, wie Bioelectric, die 100 Systeme pro Jahr für Hofdünger-Biogasanlagen zwischen 11 und 73 kW_e verkaufen. Die Schweizer Partner EPFL, SOLIDpower, PSI und EREP SA bereiten eine Pilotinstallation vor, um ein SOFC-System mit 6 kW_e auf einer landwirtschaftlichen Biogasproduktionsanlage (hauptsächlich mit Rindergülle) zu betreiben. Dies ist ein Sprungbrett in Richtung 25-kW_e- und 50-kW_e-Systeme, wobei der 6 kW_e-Stack eine Untereinheit des 25-kW_e-Moduls ist, das von SOLIDpower bereits in diesem Massstab validiert wurde.

Schliesslich hat die Festoxidtechnologie den Vorteil, dass sie voll reversibel betrieben werden kann, d.h. auch als Elektrolyseur von Dampf (und CO₂) zur Erzeugung von H₂ (und CO). Auch hier sind interessante Integrationsmöglichkeiten für die Aufbereitung von Biogas möglich (Jeanmonod *et al.* 2019; Wang *et al.* 2018).

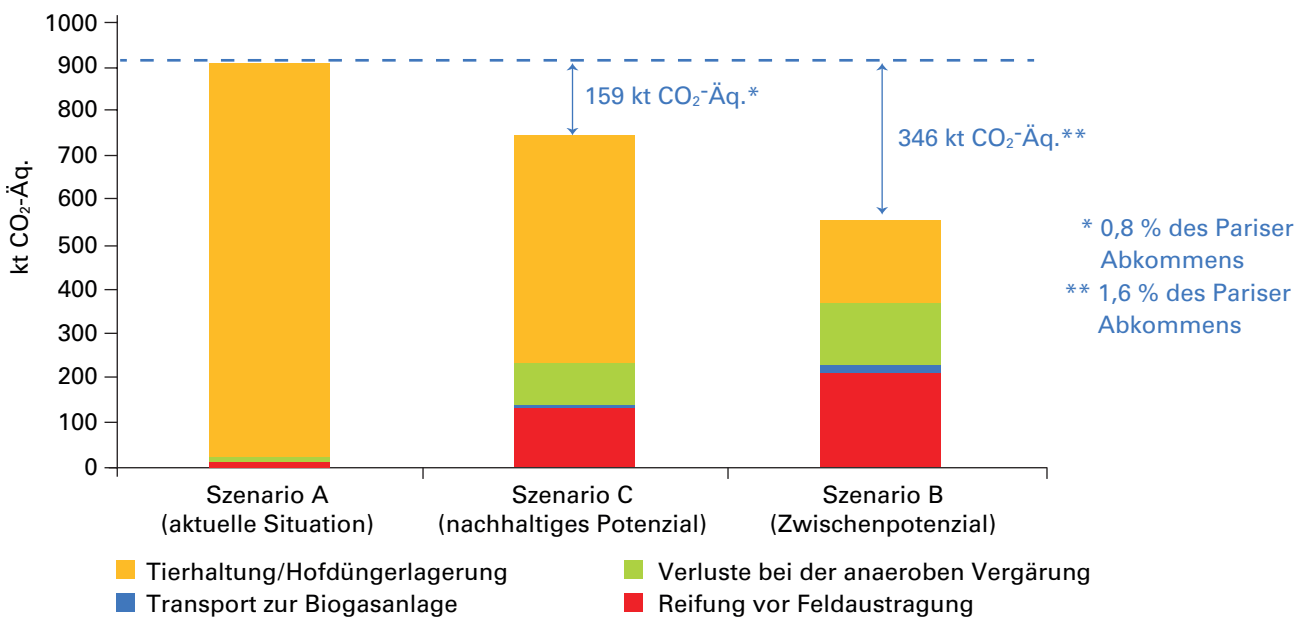


Abbildung 7: Direkte Gesamtemissionen aus dem Hofdüngermanagement (CO₂+CH₄+N₂O) in kt pro Jahr CO₂-Äq., abhängig vom Prozentsatz der in einer Biogasanlage vergorenem Hofdünger in der Schweiz (A: aktuelle Situation mit 6% Vergärung, C: realistisch machbar mit 65% Vergärung, B: maximale Ausnutzung mit 100% Vergärung).

4 Chancen und Barrieren für Bioenergie aus Hofdünger

Es sind auch nicht-technologische Aspekte zu berücksichtigen, die die Bereitstellung von Bioenergie aus Hofdünger entweder begünstigen oder behindern können. Zusätzlich zu den energetischen Aspekten kann Bioenergie aus Hofdünger viele positive externe Effekte haben.

Hinsichtlich des Potenzials zur Minderung des Klimawandels könnten 3% der landwirtschaftlichen THG-Emissionen der Schweiz vermieden werden, wenn der nachhaltig verfügbare Hofdünger vergoren würde (Abb. 7; Burg *et al.* 2018b). Aktuell trägt die Landwirtschaft bis zu 12,7% zu den gesamten anthropogenen THG-Emissionen der Schweiz bei. Mehrere hier beschriebene Technologien könnten diese THGs reduzieren. Zum Beispiel könnte die AV der geschätzten nachhaltigen Hofdüngermenge 0,8% zur Reduktion der THG-Emissionen in der Schweiz beitragen, um das Ziel des Pariser Abkommens zu erfüllen, die globale Erwärmung auf unter 2°C zu begrenzen. Diese Emissionsminderungen könnten sogar noch höher ausfallen, wenn man bedenkt, dass hofdüngerbasiertes Biogas emissionsintensive Brennstoffe (z. B. Heizöl) im Energiesektor und Mineraldünger im landwirtschaftlichen Sektor ersetzen kann, insbesondere in Kombination mit Co-Substraten.

Allerdings gibt es viele Barrieren, die derzeit die effiziente Nutzung von Hofdünger zur Energiegewinnung einschränken.

Basierend auf einer umfassenden Umfrage inklusive eines Choice-Experiments wurde die Einstellung der Schweizer Landwirte zu (individuellen und gemeinschaftlichen) AV auf verschiedenen Ebenen untersucht (Burg *et al.* 2021). Rund 190 Landwirte aus der ganzen Schweiz nahmen an der Befragung teil. Die Antworten bestätigten, dass Hofdünger für die Landwirte eine wertvolle Ressource zur natürlichen Düngung ihrer Felder darstellt und dass die AV von Hofdünger von mehr als 80% grundsätzlich positiv gesehen wird. Allerdings spiegeln viele Kommentare (z. B. bezüglich der Wirtschaftlichkeit, der Gärrestqualität, der Verwendung von Co-Substraten) auch eine gewisse Zurückhaltung wider, und ein qualitativ hochwertiges Gärrestmaterial (ohne Verunreinigungen wie Plastik, Schwermetalle, Keime) wäre ein Pluspunkt für die Akzeptanz bei den Landwirten. Ausserdem kann die AV zur Selbstversorgung der Landwirte in der Schweiz beitragen, was als sehr wichtig angesehen wird. Ausserdem bevorzugen die Landwirte in der Regel den Bau von Biogasanlagen mit möglichst wenigen Miteigentümern. Mit Hilfe der Ergebnisse der Umfrage wurde ein agentenbasiertes Modell (ABM) entworfen und verwendet, um die Entwicklung von Biogasanlagen unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu simulieren. Die Eigenschaften der Agenten (Landwirte) wurden aus der Befragung der Landwirte abgeleitet. Die Simulationen zeigten, dass der Erlös für die bereitgestellte Energie der wichtigste, aber nicht der einzige Treiber ist. Eine Erhöhung der Energieerlöse um 0,10 CHF/kWh_e (zusätzlich zur heuti-

gen Vergütung von 0,45 CHF/kWh_e inkl. Landwirtschaftsbonus für den eingespeisten Strom) würde die Errichtung von nur zehn zusätzlichen Biogasanlagen in der gesamten Schweiz ermöglichen (10% mehr als heute). Der Einfluss eines einmaligen Vergütungszuschusses schien deutlich weniger Einfluss auf die Entscheidung zum Bau einer Biogasanlage zu haben. Um das Energie- und THG-Minderungspotenzial der Umwandlung von Hofdünger in Biogas voll auszuschöpfen, müssen andere Strategien auf verschiedenen Ebenen entwickelt werden, und die politischen Entscheidungsträger sollten alle verschiedenen Aspekte berücksichtigen, die den Einsatz von Bioenergiotechnologien beeinflussen. Auf der organisatorischen Ebene kann die Initiative zum Bau grösserer Anlagen (mit vielen Ressourcen-Lieferanten) nicht nur von den Landwirten erwartet werden. Anreize zur Unterstützung der Zusammenarbeit zwischen Landwirten und gegebenenfalls auch Dritten (z. B. Molkereigenossenschaften, Gemeinden) zur Überwindung der kleinteiligen Produktionsstrukturen sollten untersucht werden. Auf der technisch-wirtschaftlichen Ebene sind Massnahmen gefragt, welche die Anlagen für die Landwirte kostengünstiger und einfacher betreibbar machen. Zum Beispiel sollte die Politik darüber nachdenken, den mit dem Bau und Betrieb von landwirtschaftlichen Biogasanlagen verbundenen Verwaltungsaufwand zu reduzieren. Auch ist zu prüfen, was Vergütungssätze bewirken, welche die bisher getesteten von maximal 0,55 CHF/kWh_e überschreiten. Auf der rechtlichen Ebene könnte man die anaerobe Vergärung als Teil des Hofdüngermanagements zur Vermeidung von THG-Emissionen verpflichtend machen und mit entsprechenden Subventionen abgelden.

Der Transport von Biomasse trägt zu den THG-Emissionen bei und seine Kosten machen einen erheblichen Anteil des Endpreises von Biomasse für Energie aus. Eine techno-ökonomische Analyse des Biomassetransports für Fest- und Flüssigmist identifizierte die fünf häufigsten Transportketten vom Lieferanten zum Endverbraucher in der Schweiz (Schnorf *et al.* 2021). Hofdünger kann entweder flüssig oder fest sein und sein Transport erfordert daher verschiedene technische Lösungen. In der Regel bringen Landwirte oder professionelle Dienstleister (mit höheren Ladekapazitäten) den Hofdünger zu den Biogasanlagen, wobei Leerfahrten vermieden werden. Die Entfernungen für den Hofdüngertransport auf der Strasse liegen zwischen durchschnittlich 5 und 9 km. Schliesslich kann, wo es die Infrastruktur zulässt, Hofdünger mittels unterirdischer Rohrleitungen von den Höfen der Lieferanten direkt zum Fermenter der Anlage gepumpt werden. Die Studie ergab, dass die Länge solcher Leitungen in der Schweiz etwa 1,5 bis 4,5 km, maximal 8,5 km beträgt. Im Vergleich zu den Umweltwirkungen des Transports (CO₂-Bilanz, Energieeffizienz) stellen nach der genannten Untersuchung in der Schweiz die Kosten den limitierenden Faktor für die Zentralisierung der lokalen Ressourcen dar.

Der Flächenbedarf für die energetische Nutzung von Hofdünger ist gering: In der Schweiz würde eine Fläche von 14,5 km² benötigt, um die gesamte nachhaltig verfügbare Hofdüngermenge zu verarbeiten, wovon 80% auf die Fläche der Biogasanlagen entfallen würden (Bowman *et al.* 2021).

Um die energetische Nutzung von Hofdünger zu fördern, müssen weitere Mehrwerte erforscht werden. Dies betrifft zum Beispiel die nicht ausreichend genutzte Wärme aus den AV-Anlagen: Lediglich 65% der Bruttowärmeproduktion von Biogasanlagen werden derzeit in der Schweiz im Durchschnitt genutzt. Wenn keine Wärmeabnehmer wie benachbarte Wohnhäuser oder Industrien in der Nähe sind, könnte die ungenutzte Wärme zur Deckung des Wärmebedarfs von kleinen Gewächshäusern genutzt werden. Auf diese Weise könnte mit dem heimischen Potenzial eine maximale Gewächshausfläche von 104 ha mit hofdüngerbasierter Biogaswärme beheizt werden. 20800 Tonnen pro Jahr Tomaten liessen sich so produzieren (11% des gesamten inländischen Tomatenbedarfs; Burg *et al.* 2020) und so die lokale, kohlenstoffarme Lebensmittelproduktion mit einer kürzeren Lieferkette stärken. Diese Gewächshäuser müssten parallel zu neuen Biogasanlagen gebaut werden, um die Nutzung der Wärme zu optimieren. Im Sommer könnte die überschüssige Wärme noch für andere Prozesse wie zum Beispiel die Holz Trocknung genutzt werden. Auch der Wert des Gärrestes selbst ist nicht zu unterschätzen und könnte dazu beitragen, eine wirtschaftliche Rentabilität der Biogasanlagen zu erreichen.

Um die energetische Nutzung von Hofdünger zu fördern, müssen weitere Mehrwerte erforscht werden. Dies betrifft zum Beispiel die nicht ausreichend genutzte Wärme aus den AV-Anlagen: Lediglich 65% der Bruttowärmeproduktion von Biogasanlagen werden derzeit in der Schweiz im Durchschnitt genutzt. Wenn keine Wärmeabnehmer wie benachbarte Wohnhäuser oder Industrien in der Nähe sind, könnte die ungenutzte Wärme zur Deckung des Wärmebedarfs von kleinen Gewächshäusern genutzt werden. Auf diese Weise könnte mit dem heimischen Potenzial eine maximale Gewächshausfläche von 104 ha mit hofdüngerbasierter Biogaswärme beheizt werden. 20800 Tonnen pro Jahr Tomaten liessen sich so produzieren (11% des gesamten inländischen Tomatenbedarfs; Burg *et al.* 2020) und so die lokale, kohlenstoffarme Lebensmittelproduktion mit einer kürzeren Lieferkette stärken. Diese Gewächshäuser müssten parallel zu neuen Biogasanlagen gebaut werden, um die Nutzung der Wärme zu optimieren. Im Sommer könnte die überschüssige Wärme noch für andere Prozesse wie zum Beispiel die Holz Trocknung genutzt werden. Auch der Wert des Gärrestes selbst ist nicht zu unterschätzen und könnte dazu beitragen, eine wirtschaftliche Rentabilität der Biogasanlagen zu erreichen.

5 Die Bioenergie aus Hofdünger im Energiesystem

Hofdünger ist sowohl ein Energie- als auch ein Kohlenstoffträger. In Anbetracht seines weitgehend ungenutzten Potenzials ist es wichtig, seine Rolle als Energieträger innerhalb des Schweizer Energiesystems zu analysieren. Diese kann modelliert werden, um die Bedeutung der energetischen Hofdüngerverwertung zu bestimmen. Das vollständig betrachtete Umwandlungsschema zeigt die Grössenordnung der Energie- und CO₂-Flüsse (Abb. 8). Es ist zu beachten, dass infolge der Parametrisierung der einzelnen Prozesse des Energiesystems unterschiedliche Teilsysteme in den verschiedenen Modellierungslösungen auftreten können. Wie gezeigt, wird Hofdünger hauptsächlich durch AV in Biogas umgewandelt und anschliessend zu Biome-

than oder direkt durch hydrothermale Vergasung (hydrothermal gazification, HTG) zu Biomethan aufbereitet. Unvergorene Rückstände aus der AV können auch hydrothermal behandelt werden, um zusätzliches Methan zu erzeugen. Das freigesetzte CO₂ aus diesen Prozessen kann dann zusammen mit erneuerbarem H₂ zur Bildung von synthetischem Erdgas nach dem Power-to-Gas-Konzept genutzt werden, wodurch das gesamte Kohlenstoffpotenzial von Hofdünger ausgeschöpft wird.

Es wurden mehrere Szenarien mit Energyscope, einem Open Source Modell zur Analyse regionaler Energiesysteme (www.energyscope.ch), erstellt und analysiert, die die vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems für 2050 berücksichtigen (Li *et al.*

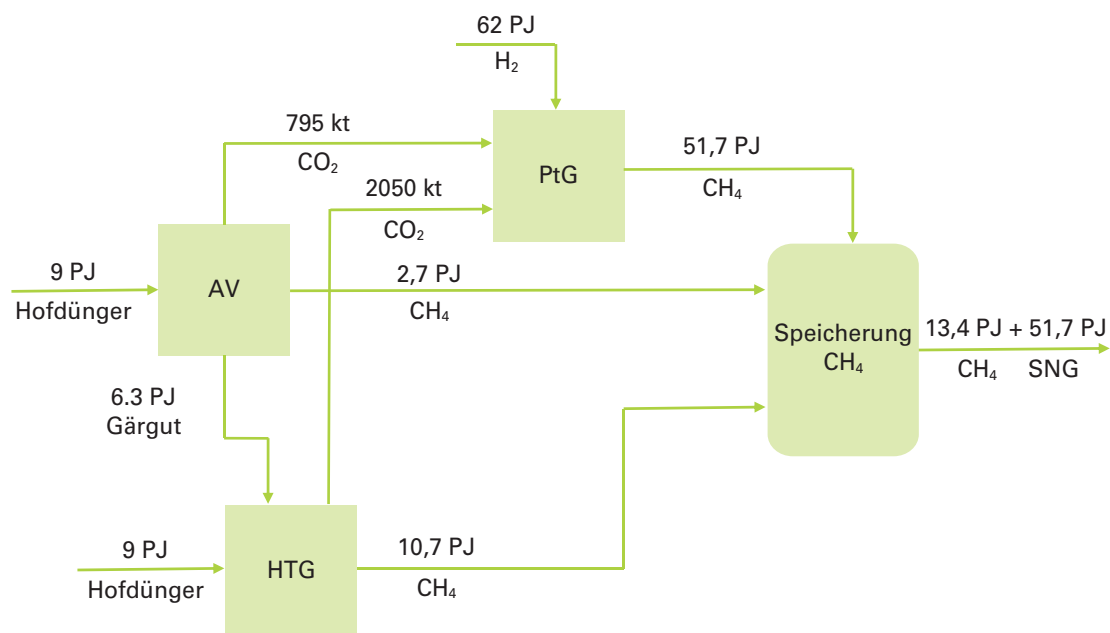


Abbildung 8: In den Modellstudien verwendete Pfade der Hofdüngerumwandlung (AV: anaerobe Vergärung; HTG: hydrothermale Vergasung; PtG: Power to Gas; SNG: synthetisches Erdgas) und die quantifizierten Energie- und CO₂-Flüsse auf der Basis von 18 PJ/a Hofdünger-Input.

2020). Die Modellergebnisse zeigen, dass bei einem den Unsicherheiten Rechnung tragenden, variablen Input von Hofdünger zwischen 18 und 30 PJ/a dessen Umwandlung durch AV und HTG bis zu 17% der gesamten Biomethanproduktion abdecken kann. Dies entspricht etwa 10–11,5% der gesamten Biokraftstoffproduktion im Schweizer Energiesystem für 2050 und stellt 2–3% der gesamten vom Energiesystem gelieferten Energie dar. Die Simulationen ergeben einen sehr begrenzten Beitrag der Power-to-Gas-Optionen und die direkte Umwandlung in Biomethan wird bevorzugt.

Während des Umwandlungsprozesses des verfügbaren Hofdüngerpotenzials in Biomethan werden 2,5–4 Mt/a CO₂ freigesetzt, was letztendlich den Einsatz geeigneter Abscheidungstechnologien zur CO₂-Nutzung und/oder Sequestrierung erfordert, um das Ziel der Dekarbonisierung zu erreichen. Schliesslich scheinen die Investitionskosten für die Hofdüngerumwandlung im Vergleich zu den grossen Beitragenden innerhalb des Energiesystems wie Wasserkraft und PV vernachlässigbar zu sein; sie betragen lediglich 1% der gesamten Kapitalkosten aller Energieumwandlungsprozesse.

6 Förderung von Biogas aus Hofdünger und Empfehlungen

In den Schweizer Energieperspektiven 2050+ (BFE, 2020b) wurde festgestellt, dass das Erreichen von Netto-Null-THG-Emissionen bis 2050 bei gleichzeitiger Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung die Nutzung des gesamten inländischen nachhaltigen Biomassepotenzials erfordern würde. Dies gilt für alle analysierten Szenarien; je nach Szenario wird sogar ein zusätzlicher Bioenergie-Import von maximal 60 PJ erforderlich. Bioenergie wird also eine Rolle bei der Erreichung der Schweizer Ziele für erneuerbare Energien für 2050 und darüber hinaus spielen. Während Energie aus Biomasse derzeit weniger als 5% des Bruttoenergieverbrauchs ausmacht, wird dieser Anteil in den Netto-Null-Szenarien bis 2050 voraussichtlich fast 20% erreichen (BFE *et al.* 2020). Die Nutzung dieser nachhaltigen Ressource wird dem Land helfen, die THG-Emissionen in dem vorgesehenen Mass zu reduzieren und seine Energieversorgung zu sichern. Um dies zu erreichen, muss die Nutzung von Biomasse kontinuierlich erhöht werden, wobei die Biogaserzeugung eine sehr vielversprechende Technologie darstellt.

Die Gaswirtschaft strebt bis 2030 einen Anteil von 30% erneuerbarem Biomethan für die Wärmeversorgung von Haushalten an (Gazenergie.ch 2020). Unter der Annahme, dass der Bedarf bis dahin weiter leicht ansteigt, entspricht dies einer Gesamtmenge von rund 5000 GWh (18 PJ). Basierend auf Daten der WSL wurde abgeschätzt, dass in der Schweiz prinzipiell genügend feuchte Biomasse vorhanden wäre, um diese Menge an Biogas bis 2030 zu produzieren (Gazenergie.ch 2020). Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Nutzung dieses Potenzials jedoch begrenzt. Der inländische Beitrag zur Deckung des Bedarfs wird sich daher wahrscheinlich bei 30–50% einpendeln und das zusätzliche Biogas muss importiert werden, um das Ziel der Branche zu erreichen. Bezüglich der zusätzlichen Importe bleibt offen, woher diese kommen werden, ob diese Menge nachhaltig erzeugt und die Versorgung langfristig gewährleistet werden kann.

In der Schweiz wird landwirtschaftliches Biogas derzeit überwiegend zur Stromerzeugung genutzt. Aufgrund des hohen Anteils an Atom- und Wasserkraft ist der Schweizer Strom bereits CO₂-arm. Daher kann die

Minderung der anthropogenen THG-Emissionen durch die gezielte Substitution von fossilen Brennstoffen wie Erdgas weiter verbessert werden. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Verwendung von Biomethan als Ersatz für Diesel neben den Auswirkungen auf das Klima auch die Luftqualität verbessert, da die Emissionsfaktoren von Methan bis zu zehnmal niedriger sind als die von flüssigen Brennstoffen, wenn man die Partikelemissionen bei deren Verbrennung berücksichtigt. Da die Atomstromproduktion auslaufen und der Stromverbrauch bis 2050 um 11% voraussichtlich steigen wird (BFE *et al.* 2020), kann Biogas eine interessante ergänzende Quelle darstellen, um die Schwankungen der Solar- und Windstromproduktion teilweise auszugleichen. Die Stromerzeugung ist vor allem im Winter wichtig, da die Schweiz in dieser Zeit von Importen abhängig ist, was sich mit der Stilllegung von Kernkraftwerken noch verschärfen wird und durch Energie aus Photovoltaik kaum vollständig kompensiert werden kann. Die Stromerzeugung aus Hofdünger-Biogas könnte im Winter einen wertvollen Beitrag leisten und wäre eine zuverlässige Quelle, da die Tiere in Ställen gehalten werden und grössere Hofdüngermengen zur Verfügung stehen. Um die Stromproduktion zu maximieren, sind Brennstoffzellen eine vielversprechende Option.

Wie in Kapitel 3 mit Blick auf die Ergebnisse des SCCER BIOSWEET gezeigt, gibt es eine grosse Vielfalt an vielversprechenden Ansätzen, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Energiebereitstellung aus Hofdünger und landwirtschaftlichen Reststoffen zu verbessern und so die Produktionsmengen zu erhöhen. Die Weiterentwicklung bestehender Biogasanlagen und -technologien wird von Vorbehandlungsverfahren wie der Fest-Flüssig-Trennung, der mikrobiellen sowie der thermochemischen Vorbehandlung profitieren. Diese führen zu einer effizienteren Biogasaufbereitung und können einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Produktion leisten. Diese Technologien werden kurz- und mittelfristig für die Umsetzung verfügbar sein (TRL 6–8). Neue, innovative Technologien zur Umwandlung von Biomasse in erneuerbare Energie (z. B. hydrothermale Vergasung, TRL 6 oder der Einsatz von Brennstoff-

zellen, TRL 8), aber auch differenzierte Potenzialanalysen und ganzheitliche Konzepte zur Verwertung von Hofdünger und landwirtschaftlichen Reststoffen könnten eine bessere Nutzung des beträchtlichen nachhaltigen Energiepotenzials der gesamten landwirtschaftlichen Biomasse mittel- und langfristig fördern.

Um das Energie- und THG-Minderungspotenzial der Umwandlung von Hofdünger in Biogas sowie eine mögliche Steigerung der Energieversorgung der Schweiz voll auszuschöpfen, müssen Strategien auf verschiedenen Ebenen entwickelt werden. Auf der organisatorischen Ebene kann nicht erwartet werden, dass die Initiative zum Bau grösserer Biogasanlagen (mit vielen Zulieferern) nur von Landwirten ausgeht, sondern es wird als Vorteil gesehen, wenn auch Gemeinden oder Energieunternehmen in diesem Bereich aktiv werden. Die begrenzte Verfügbarkeit von wertvollen Co-Substraten (z. B. aus der Industrie oder Gastronomie) weist auf die Relevanz hin, diese effizient und koordiniert energetisch zu nutzen, anstatt sie wie bisher auch in Kompostierwerken zu verwerten. Um die Rentabilität von Biogasanlagen zu erhöhen, werden daher häufig Bioabfälle zu landwirtschaftlichen Biogasanlagen hinzugefügt, was

als Co-fermentation bezeichnet wird. Die höheren Biogaserträge und die Einnahmen aus den möglichen Entsorgungsgebühren machen die landwirtschaftlichen Biogasanlagen wirtschaftlicher. Darüber hinaus sollten weitere Massnahmen entwickelt und eingeführt werden. Ansätze könnten Koordinationsangebote sein, die die Zusammenarbeit der Landwirte zur Überwindung der kleinteiligen Produktionsstrukturen unterstützen, oder finanzielle Anreize wie zum Beispiel deutlich höhere Vergütungssätze für die Bereitstellung erneuerbarer Energie.

Schliesslich können Verbesserungen auf der technisch-wirtschaftlichen Ebene dazu führen, dass die Anlagen für die Landwirte effizienter und rentabler betrieben werden. Häufig werden von den Akteuren finanzielle Zwänge für ihr geringes Interesse an Investitionen genannt: hohe Investitionskosten, fehlende Wärmeabnehmer, fehlende Einspeisevergütungen und das Auslaufen von Subventionen. Darüber hinaus könnte die finanzielle Kompensation für den THG-Minderungseffekt (CO₂-Kompensation) weiterentwickelt werden, um die wirtschaftliche Machbarkeit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu erhöhen.

7 Schlussfolgerung

Hofdünger könnte in der Schweiz in viel grösserem Umfang als heute für energetische und klimapolitische Zwecke genutzt werden. Durch die Vergärung von Hofdünger könnten erhebliche Mengen an erneuerbarer Energie bereitgestellt und gleichzeitig Treibhausgasemissionen vermieden werden. Dies würde jedoch einen Ausbau der Biogasinfrastuktur und Veränderungen innerhalb der derzeitigen Rahmenbedingungen für die Energiegewinnung erfordern.

Die Effizienz der Energiegewinnung aus Hofdünger könnte durch die Einführung von Technologien zur Fest-Flüssig-Separation von Hofdünger verbessert werden. Die anaeroben Vergärungsprozesse könnten durch Vorbehandlungen des Ausgangsmaterials, welche die Gesamteffizienz erhöhen, und durch Nachbehandlungen, welche die Biogasqualität erhöhen, verbessert werden. Auch die geringen Wirkungsgrade der kleinen Konverter zur Umwandlung von Gas in Strom liessen sich noch steigern. Schliesslich könnten vermehrte Anstrengungen unternommen werden, die Abwärme zu nutzen.

Die hydrothermale Vergasung ist eine neue Technologie, die in der Lage ist, das verfügbare Hofdünger-

potenzial noch effizienter in Biogas umzuwandeln und dabei Nährstoffe wie Phosphor sogar in reiner Form zurückzugewinnen. Die Aufbereitung von Biogas zu synthetischem Erdgas ist kurzfristig eine interessante Option für die Treibhausgasbilanz der Schweiz, insbesondere als umweltfreundlicher Treibstoff. Eine parallele Nutzungsschiene ist die gezielte Erzeugung von Grundlaststrom im Winter über effiziente Brennstoffzellen. Die Modellierung des Gesamtsystems zeigt die hohe Relevanz der Hofdüngerverwertung im Hinblick auf Energieversorgung und CO₂-Bilanz. Die Charakteristiken des Hofdüngers erschweren seine potenzielle Nutzung für andere nachhaltige Produkte, wie zum Beispiel Chemikalien oder Werkstoffe. Daher erscheint die energetische Nutzung von Hofdünger besonders vorteilhaft. Die Energiebereitstellung aus Hofdünger kann also in einem relevanten Ausmass dazu beitragen, das Energiesystem des Landes in Kombination mit anderen erneuerbaren Energien zu stabilisieren und eine grössere Energieunabhängigkeit von Importen, insbesondere von fossilen Brennstoffen, zu erreichen. Darüberhinaus reduziert sie schädliche Wirkungen auf das Klima und den Ressourcenverbrauch.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde von der Schweizer Innovationsagentur Innosuisse finanziell unterstützt und ist Teil des Programms BIOSWEET des Schweizer Kompetenzzentrums für Energieforschung SCCER. Wir bedanken uns bei weiteren Organisationen für ihre finanzielle Unterstützung: BFE, BFE P&D Programm, Ernst Göhner Stiftung und WSL, sowie den Industriepartnern Afry AG, ExerGo sàrl, KASAG Swiss AG und

Tretech sàrl, und schliesslich dem Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking (Projekt Waste2Watts, grant 826243). Weiterhin danken wir Prof. Dr. Karl Keilen (keilenANALYTICS) für die hilfreichen Kommentare zum Dokument, Martin Moritzi (WSL) für das Korrekturlesen der deutschen Version und Sandra Gurzeler (WSL) für das Layout.

Referenzen

- Baier, U.; Antalfy, I.; Burg, V.; Hölzel, B.; Krautwald, J.; Moser, Y.; Rüschi, F.; Schmid Lüdi, K.; Treichler, A.; Warthmann, R., 2019: Projekt Mikroaerobe Hydrolyse faserreicher Biomasse zur Steigerung der Biogasproduktion (HYDROFIB), Swisspower AG, FBI First Biogas Int'l, Allmig, WSL, SVGW FOGA, BFE. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/1422>.
- Baier, U.; Corbin, A.; Merkle, W., 2020: Projekt CarbonATE – Entwicklung einer enzymatischen CO₂-Abtrennungsstrategie für eine optimierte mikrobiologische Methanisierung. Intermediate Report ZHAW, Wädenswil (unpublished data).
- BFE, 2020: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019. Retrieved from <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>.
- BFE; Prognos AG; INFRAS AG; TEP Energy GmbH; Ecoplan AG, 2020: Energieperspektiven 2050+. Retrieved 14 January 2021 from <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wd-WJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmXvYWQvMTAzMjM=.html>. Kurzbericht, Bern. 112 p.
- Bowman, G.; Burg, V.; Erni, M.; Lemm, R.; Thee, O.; Björnsen Gurung, A., 2021: How much land does bioenergy require? An assessment for land-scarce Switzerland. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy*, 00: 1–15. <http://doi.org/10.1111/gcbb.12869>.
- Burg, V.; Bowman, G.; Erni, M.; Lemm, R.; Thees, O., 2018a: Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biom. Bioenergy*. 111, 60–69.
- Burg, V.; Bowman, G.; Haubensak, M.; Baier, U.; Thees, O., 2018b: Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Res. Cons. Recycl.* 136: 53–62.
- Burg, V.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Thees, O., 2019: Long term wet bioenergy resources in Switzerland: Drivers and projections until 2050. *Energies* 12, 18: 3585. <http://doi.org/10.3390/en12183585>.
- Burg, V.; Golzar, F.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Roshandel, R., 2020: Symbiosis opportunities between food and energy system: The potential of manure-based biogas as heating source for greenhouse production. *J. Ind. Ecol.* <http://doi.org/10.1111/jiec.13078>.
- Burg, V.; Troitzsch, K.G.; Akyol, D.; Baier, U.; Hellweg, S.; Thees, O., 2021: Farmer's willingness to adopt private and collective biogas facilities: an agent-based modeling approach. *Res. Cons. Recycl.* 167: 105400. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105400>.
- Calbry-Muzyka, A.; Madi, H.; Biollaz, S., 2019: Cleaning agricultural biogas for high temperature fuel cells at pilot scale, SFOE. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40684>.
- E4Tech, 2020: The Fuel Cell Industry Review 2020 edition. www.FuelCellIndustryReview.com.
- FFA Forschungsfonds Aargau 20200331_10 CarbonVALUE, 2020: Nutzbarmachung des energetischen und des stofflichen Potenzials von Prozesswässern aus der hydrothermalen Karbonisierung.
- Jeanmonod, G.; Wang, L.; Diethelm, S.; Maréchal, F.; Van herle, J., 2019: Trade-off designs of power-to-methane systems via solid-oxide electrolyzer and the application to biogas upgrading. *Appl. Energy* 247: 57–581.
- Kapoor, R.; Ghosh, P.; Kumar, M.; Vijay, V.K., 2019: Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *Env. Sci. Pollut. Res.* 26: 11631–11661.
- Lanzini, A.; Madi, H.; Chiodo, V.; Papurello, D.; Maisano, S.; Santarelli, M.; Van herle, J., 2017: Dealing with fuel contaminants in biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) and molten carbonate fuel cell (MCFC) plants: Degradation of catalytic and electrocatalytic active surfaces and related gas purification methods. *Prog. Energy Combust. Sci.* 61. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.04.002>.
- Li, X.; Damartzis, T.; Stadler, Z.; Moret, S.; Meier, B.; Friedl, M.; Maréchal, F., 2020: Decarbonization in complex energy systems: A study on the feasibility of carbon neutrality for Switzerland in 2050. *Front. Energy Res.* 8, 274. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2020.549615>.

- Li, Y.; Zhao, J.; Krooneman, J.; Euverink, G.; Jan, W., 2021: Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: Laboratory achievements and their full-scale application potential. *Sc.Total Env.* 755 (Pt 1), S. 142940.
- Luterbacher, J.S.; Fröling, M.; Vogel, F.; Maréchal, F.; Tester, J.W., 2009: Hydrothermal gasification of waste biomass: process design and life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.* 43, 5: 1578–1583. <https://doi.org/10.1021/es801532f>.
- Madi, H.; Diethelm, S.; Constantin, D.; Van herle, J., 2018: Biogas-fed SOFC: Performance investigation with variable CH₄/CO₂ composition, 13th European Solid Oxide Fuel Cell & Electrolyser Forum, Lucerne (CH), Paper A1110, 67–74.
- Majerus, S.; Lauinger, D.; Van herle, J., 2017: Cost requirements for a small-scale SOFC fed from agricultural-derived biogas. *J. Electrochem. Energy Conv. Stor.* 14, 1: 011002.
- Majerus, S.; Lauinger, D.; Van herle, J., 2018: Taking advantage of the vastly underused European biogas potential: break-even conditions for a fuel Cell and an engine as biogas converters *J. Electrochem. Energy Conv. Stor.* 15, 3: 031006.
- Mehli, A.D.; Winkler, D.; Griffin, G.; Gerner, B.; Kulli, U.; Baier, M.; Kühni, A.; Treichler, S.; Garcia, A., 2020: Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung. Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse. Final Report SFOE Project SI/501670-01. Bern.
- Meier, U.; Hersener, J.-L.; Bolli, S.; Anspach, V., 2018: "RAUS – REIN": Feststoffe "RAUS" aus der Gülle und "REIN" in die Vergärung, Neuartiges Konzept zur Verbreitung der Vergärung von Hofdünger in der Schweiz, Schlussbericht, im Auftrag von Bundesamt für Energie und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- Merkle, W.; Keller, R.; Treichler, A.; Ebert, J.; Edelmann, M.; Hüsch, S.; Kühni, M.; Stucki, M., 2021: Projekt CarboPHOS – Phosphorous recovery through hydrothermal carbonisation of sewage sludge Antaco AG, Ostschweizer Fachhochschule OST, Abwasserverband Aarau und Umgebung. AVA <https://www.zhaw.ch/en/research/research-database/project-detailview/projektid/4682>.
- Mohr, L.; Burg, V.; Thees, O.; Trutnevyte, E., 2019: Spatial hot spots and clusters of bioenergy combined with socio-economic analysis in Switzerland. *Renew. Energy* 140: 840–851.
- Nasir, I.M.; Mohd Ghazi, T.I.; Omar, R., 2012: Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Eng. Life Sci.* 12, 3: 258–269. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100150>.
- Nägele, H.-J.; Rüschi, F.; Baier, U., 2020: Projekt Vorprojekt Netz: Nährstoff- und Energietechnik-Zentrum Ingenieurbüro HERSENER GmbH, LAVEBA Genossenschaft, GRegio Energie AG, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/3778>.
- Rüschi, F.; Huber, S.; Baier, U.; Nägele, H.-J.; Merkle, W.; Senn, M.N.; Wittwer, K., 2021: Projekt HYKOM – Energieoptimierte Kombination von Hygienisierung und Hydrolyse zur Vorbehandlung von Flüssigsubstraten vor der Vergärung, ZHAW, Gebr. Klaus und Urs Wittwer/wigako. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/3838>.
- Schnorf, V.; Trutnevyte, E.; Bowman, G.; Burg, V., 2021: Biomass transport for energy: cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. *J. Cleaner Prod.* 293: 125971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125971>.
- Sunyoto, N.M.S.; Zhu, M.; Zhang, Z.; Zhang, D., 2016: Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresour. Technol.* 219: 29–36.
- Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R., 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER Biosweet. *WSL Ber.* 57, 299 p.
- Vogel, F., 2016: Hydrothermal production of SNG from wet biomass, In: Synthetic Natural Gas from Coal, Dry Biomass, and Power-to-Gas Applications. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A. (eds). John Wiley & Sons, Inc.
- Wang, L.; Jeanmonod, G.; Pérez-Fortes, M.; Diethelm, S.; Van herle, J.; Maréchal, F., 2018: Technical evaluation of sustainable biogas upgrading via solid-oxide electrolysis. 13th European Solid Oxide Fuel Cell & Electrolyser Forum, Lucerne (CH). Paper A0910: 70–80.
- Warthmann, R.; Arioli, G.; Principi, P.; Baier, U.; König, R.; Treichler, A., 2021: Projekt MOSTCH4: Mini On-site System To valorize manure in methane, ZHAW, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana SUPSI, Laborex SA. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/3541/>.
- Witte, J.; Kunz, A.; Biollaz, S.M.A.; Schildhauer, T.J., 2018: Direct catalytic methanation of biogas – Part II: Techno-economic process assessment and feasibility reflections. *Energy Convers. Manag.* 178: 26–43.
- Witte, J.; Calbry-Muzyka, A.; Wieseler, T.; Hottinger, P.; Biollaz, S.M.A.; Schildhauer, T.J., 2019: Demonstrating direct methanation of real biogas in a fluidised bed reactor. *Appl. Energy* 240: 359–71.

