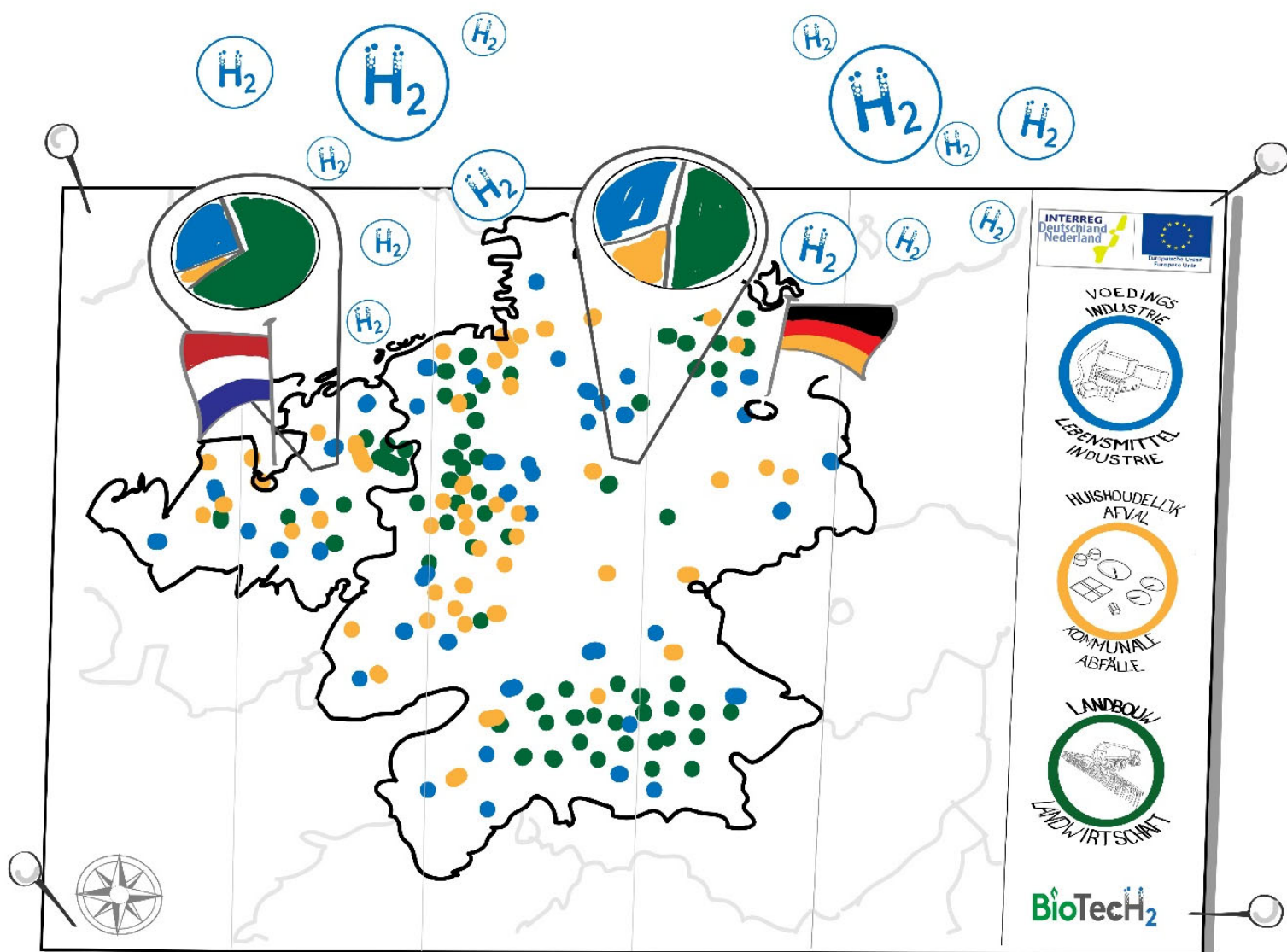


Potentialstudie/Potentiaalstudie

Bio-H₂ aus organischen Reststoffen mittels dunkler Fermentation in Deutschland und den Niederlanden

Bio-H₂ uit organische reststoffen met donkere fermentatie in Duitsland en Nederland



Impressum/Impressie

Herausgeber/Uitgever

FH Münster
Dr.-Ing. Elmar Brüggling
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt
Tel: +49 (0)2551/962-420
Mail: bruegging@fh-muenster.de



Partner:

Bio-energiecluster Oost-Nederland
Postbus 835
7500 AV Enschede
Niederlande
Tel.: +31 (0) 53 / 4861195
E-Mail: coordinator@bioenergieclusterootnederland.nl



PlanET Biogastechnik GmbH
Up de Hacke 26
48691 Vreden
Deutschland
Fon: +49 (0) 25 64 / 39 50 - 0
E-Mail: info@planet-biogas.com



H2-bv
Kloosterbrink 45
8034 PT, Zwolle
Niederlande
Fon: +31 649 328 320
E-Mail: info@h2-bv.com



Autoren/Auteurs:

Tobias Weide (FH Münster)
Frans Feil (Bio-Energiecluster)
Sören Kamphus (FH Münster)
Jens Peitzmeier (FH Münster)
Elmar Brüggling (FH Münster)

Finanzierung/Financiering:



www.deutschland-nederland.eu

<http://www.biohydrogen.eu/>

Einleitung

Es wird erwartet, dass der Bedarf an Wasserstoff (H_2) in Deutschland und den Niederlanden in den nächsten Jahren deutlich steigen wird. H_2 ist sehr vielseitig einsetzbar und kann in einigen Bereichen dazu beitragen, die Emissionen von klimaschädlichen Gasen zu minimieren, etwa als emissionsfreier Treibstoff für Wasserstoffautos oder Energiespeicher für erneuerbare Energien. Bisher etablierte Prozesse sind allerdings nicht CO_2 -neutral, da ein Großteil des H_2 durch sehr energieintensive Prozesse hergestellt wird. Dabei werden fossile Energieträger, wie zum Beispiel Erdgas bei hohem Druck von bis zu 200 bar und Temperaturen von bis zu 1.700 °C zu H_2 und CO_2 umgewandelt. Das Verfahren nutzt keine regenerativen Ressourcen und belastet daher die Umwelt.

Verschiedene Studien zum Thema der erwarteten Nachfrage an H_2 in den nächsten Jahren kommen zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2050 allein in Deutschland 250 bis 800 TWh an Wasserstoff benötigt werden. Europaweit wird eine Nachfrage von 800 bis 2.250 TWh prognostiziert. (C. Hebling *et al.*, 2019)

Um zumindest Anteile dieses Bedarfs klimafreundlich decken zu können, wurde im Rahmen des Interreg VA Projekts: „BioTech H_2 “ an einem neuen Verfahren zur CO_2 -neutralen Produktion von Wasserstoff aus biogenen Abfallstoffen und Abwässern geforscht. Dabei entwickelte das Forschungsteam um Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter und Dr.-Ing. Elmar Brüggling an der FH Münster in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern PlanET Biogastechnik GmbH, Bio-Energiecluster Oost-Nederland und H2-bv ein biologisches und anaerobes Verfahrenskonzept.

Das entwickelte Verfahren, erzeugt bei moderaten Temperaturen von 30 bis 80 °C aus Biomasse-Reststoffen und Abwässern, H_2 . Das kontinuierliche Verfahren ist in zwei voneinander getrennte Verfahrensschritte aufgeteilt. Im ersten Schritt wird in einem Reaktor die Biomasse mittels dunkler Fermentation zu Wasserstoff umgesetzt. Bei der dunklen Fermentation wandeln Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen und unter der Abwesenheit von Licht, komplexe organische Verbindungen zu H_2 und CO_2 um. Dabei können allerdings nicht alle organischen Verbindungen verwertet werden, weshalb in einem nachfolgenden Verfahrensschritt ebenfalls unter anaeroben Bedingungen verbleibende Organik zu CH_4 und CO_2 umgewandelt wird. Da das CO_2 aus regenerativen Quellen und Abfallstoffen entsteht, ist es weniger klimaschädlich und wird dem natürlichen Kreislauf, nach energetischer Nutzung, wieder zugeführt.

Dieser Bericht zeigt, wie hoch das theoretische H_2 -Potential dieses Verfahren ist, wenn sämtliche für das Verfahren nutzbaren Abfallströme in Deutschland und den Niederlanden verwendet werden würden. Dabei wird das berechnete theoretische Potential an Bio- H_2 in Relation gesetzt, zu der erwarteten Nachfrage an Wasserstoff in den nächsten Jahren.

Inleiding

De verwachting is dat de vraag naar waterstof (H_2) in Duitsland en Nederland de komende jaren aanzienlijk zal toenemen. H_2 is breed inzetbaar en kan bijvoorbeeld als emissievrije brandstof voor waterstofauto's of als energieopslag voor duurzame energie, helpen in het terugdringen van broeikasgassen. De tot nu toe bestaande processen zijn echter niet CO_2 -neutraal, aangezien een groot deel van H_2 wordt geproduceerd door zeer energie-intensieve processen. Fossiele energiebronnen, zoals aardgas, worden bij een hoge druk tot 200 bar en een temperatuur tot $1700\text{ }^\circ\text{C}$ omgezet in H_2 en CO_2 . Het proces maakt geen gebruik van hernieuwbare bronnen en is daarmee belastend voor het milieu.

Verschillende studies over de verwachte vraag naar H_2 in de komende jaren laten zien dat alleen al in Duitsland tegen 2050 250 tot 800 TWh waterstof nodig zal zijn. In heel Europa wordt een vraag van 800 tot 2.250 TWh voorspeld. (C. Hebling et al., 2019)

Om ten minste een deel van deze vraag op een klimaatvriendelijke manier te kunnen dekken, is binnen het Interreg VA-project "BioTech H_2 " onderzoek gedaan naar een nieuw proces voor de CO_2 -neutrale productie van waterstof uit biogene afvalstoffen en afvalwater. Het onderzoeksteam onder leiding van Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter en Dr.-Ing. Elmar Brüggling van de Hogeschool Münster heeft in samenwerking met de projectpartners PlanET Biogastechnik GmbH, Bio-Energiecluster Oost-Nederland, H2-bv. een nieuw biologisch en anaeroob procesconcept ontwikkeld.

Het ontwikkelde proces is in staat om H_2 en CO_2 te produceren uit biomassa-residuen en afvalwater bij gematigde temperaturen van 30 tot $80\text{ }^\circ\text{C}$. Het continue proces is verdeeld in twee afzonderlijke processtappen. In de eerste stap wordt de biomassa in een reactor door middel van donkere fermentatie en biologische fermentatie omgezet in waterstof. In donkere fermentatie zetten micro-organismen onder anaërobe omstandigheden en bij afwezigheid van licht complexe organische verbindingen om in H_2 . Aangezien niet alle organische verbindingen kunnen worden omgezet, wordt alle organisch materiaal dat onder anaerobe omstandigheden achterblijft, in een volgende processtap omgezet in CH_4 en CO_2 , ook onder anaerobe omstandigheden. Aangezien de CO_2 uit hernieuwbare bronnen en afvalstoffen wordt geproduceerd, is het minder schadelijk voor het klimaat en wordt het na gebruik voor de productie van energie weer in de natuurlijke kringloop gebracht.

Dit rapport laat zien hoe hoog het theoretische H_2 -potentieel van dit proces zou zijn als alle afvalstromen die voor het proces kunnen worden gebruikt, in Duitsland en Nederland zouden worden gebruikt. Het berekende theoretische potentieel van Bio- H_2 wordt vervolgens vergeleken met de verwachte vraag naar waterstof in de komende jaren.

Methodik und Annahmen

Zur Berechnung der theoretisch möglichen Menge an Wasserstoff, die durch das entwickelte Verfahren produziert werden könnte, sind zwei wesentliche Parameter entscheidend. Die Masse der organischen Abfälle, die im jeweiligen Land zur Verfügung steht und der Ausbeutekoeffizient, der angibt, wieviel H₂ aus einer definierten Menge an organischer Biomasse gewonnen werden kann.

Bisher gibt es noch keine standardisierte Datenerfassung aller biogenen Reststoffe in Deutschland und den Niederlanden. Dies führte dazu, dass ein Teil der Daten über Hochrechnungen und Befragungen von einzelnen Unternehmen erhoben wurden. (Gaida *et al.*, 2019) Desweiteren ist häufig nur die Masse oder Trockenmasse angegeben und nicht organische Zusammensetzung, die für eine genaue Berechnung des Bio-H₂-Potentials nötig ist. Um dennoch Berechnungen durchführen zu können, wurden für den Anteil der organischen Biomasse an der Gesamtmasse Annahmen getroffen, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Annahmen beruhen dabei auf bereits durchgeführten Analysen von vergleichbaren Reststoffen. Für die Berechnung des Potentials wurden Abfälle aus den Bereichen: Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie und kommunale Abfälle berücksichtigt. Die aufgeführten Werte für die Massen zeigen die maximal zur Verfügung stehenden Mengen an. Bereits etablierte Nutzungswege für die Reststoffe wurden nicht berücksichtigt und es wurde eine vollständige Umstellung auf das neue Verfahren angenommen.

Tabelle 1: Reststoffpotential-Abschätzung für Deutschland und die Niederlande Kategorisierung der Abfallströme nach Brosowski *et al.* (Brosowski *et al.*, 2016)

Level-4 Kategorie ¹	Level-2 Kategorie	DM ² (Mio. t/a)		oDM ³ (wt %)	oDM (Mio. t/a)	
		NL	DE		NL	DE
Landwirtschaft	Gülle	4,76	10,95	0,85	4,05	9,31
	Mist	0,68	8,02	0,75	0,51	6,01
Kommunale Abfälle	Klärschlamm	0,33	5,78	0,80	0,26	4,62
	Küchenabfälle	-	0,28	0,70	-	0,19
Lebensmittelindustrie		1,92	13,81	0,80	1,54	11,05
Total		7,69	38,83		6,35	31,18

Um aus der organischen Masse ein Volumen an H₂ zu berechnen, wurde ein Ausbeutekoeffizient benötigt, der angibt, wie viel Wasserstoff pro kg organischer Biomasse (oDM) produziert werden kann. Dieser wurde im Projekt bereits ermittelt und für die hier durchgeführten Berechnungen wurde ein Bereich von 90–180 L H₂/kg oDM angenommen (Weide *et al.*, 2019).

¹ Die Abfallströme wurden in vier verschiedenen Level kategorisiert und zusammengefasst. Die Level-2 Kategorie beschreibt die Art des Abfalls und die Level-4 Kategorie die übergeordnete Herkunft der Abfälle.

² DM: dry matter (Trockensubstanz)

³ oDM: organic dry matter in wt% (Organische Trockensubstanz in Gew.-%)

Methodologie en uitgangspunten

Om de theoretisch mogelijke hoeveelheid waterstof te berekenen die door het ontwikkelde proces zou kunnen worden geproduceerd, zijn twee essentiële parameters nodig. De hoeveelheid organisch afval dat in het betreffende land beschikbaar is (in gewichtseenheden) en de opbrengstcoëfficiënt, die aangeeft hoeveel H₂ kan worden verkregen uit een bepaalde hoeveelheid organische biomassa.

Tot nu toe is er geen gestandaardiseerde dataverzameling van alle biogene residuen in Duitsland en Nederland. Als gevolg daarvan is een deel van de gegevens verzameld door middel van extrapolaties en interviews met individuele bedrijven. (Gaida et al., 2019) Bovendien wordt vaak alleen de massa of droge massa gegeven en niet de organische samenstelling, die nodig is voor een exacte berekening van het Bio-H₂ potentieel. Om toch berekeningen te kunnen uitvoeren zijn er aannames gedaan voor het aandeel van de organische biomassa in de totale massa, die in tabel 1 zijn opgenomen. De aannames zijn gebaseerd op reeds uitgevoerde analyses van vergelijkbare residuen. Voor de berekening van het potentieel werd rekening gehouden met afvalstoffen uit de landbouw, de voedingsindustrie en het huishoudelijk afval. De vermelde waarden voor de massa's geven de maximaal beschikbare hoeveelheden aan. Er werd geen rekening gehouden met reeds bestaande manieren om de restmaterialen te gebruiken. Er werd uitgegaan van een volledige omschakeling naar het nieuwe proces.

Tabel 1: Schatting van het residupotentieel voor Duitsland en Nederland Indeling van de afvalstromen volgens Brosowski et al. (Brosowski *et al.*, 2016)

Categorie 4 ⁴	Categorie 2	DM ⁵ (Mio. t/a)		oDM ⁶ (wt %)	oDM (Mio. t/a)	
		NL	DE		NL	DE
Landbouw	Vloeibare mest	4,76	10,95	0,85	4,05	9,31
	Mes	0,68	8,02	0,75	0,51	6,01
Gemeentelijk afval	Zuiveringslib	0,33	5,78	0,80	0,26	4,62
	Keukenafval	-	0,28	0,70	-	0,19
Voedingsindustrie		1,92	13,81	0,80	1,54	11,05
Totaal		7,69	38,83		6,35	31,18

Om uit de organische massa een volume H₂ te berekenen, is een opbrengstcoëfficiënt nodig die aangeeft hoeveel waterstof er per kg organische biomassa (oDM) kan worden geproduceerd. Deze coëfficiënt is in het project bepaald en voor de hier uitgevoerde berekeningen is uitgegaan van een bereik van 90-180 l H₂/kg oDM (Weide et al., 2019).

⁴ De afvalstromen werden gecategoriseerd en samengevat in vier verschillende niveaus. De categorie van niveau 2 beschrijft het soort afval en de categorie van niveau 4 de totale herkomst van het afval.

⁵ DM: dry matter (Droge stof)

⁶ oDM: organic dry matter in wt% (Organische droge stof in % van het gewicht)

Daten und Ergebnisse

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Berechnung des theoretischen Potentials an Bio-H₂ aus Biomasse für Deutschland und der Niederlande für das Jahr 2030 dargestellt. Insgesamt könnten in Deutschland zwischen 9,9 TWh/a und 19,9 TWh/a hergestellt werden. Durch den prognostizierten Anstieg der Nachfrage an Wasserstoff, wird der Anteil biologisch erzeugten Wasserstoffs in Relation geringer ausfallen. In zehn Jahren wird mit einer Nachfrage von 20 TWh/a bis zu 140 TWh/a gerechnet, dabei kann die biologische Produktion von Wasserstoff aus Biomasse immer noch einen signifikanten Anteil an der Gesamtproduktion von Wasserstoff haben, diese aber nicht mehr vollständig abdecken. Ab dem Jahr 2050 wird die prognostizierte Nachfrage 250 TWh/a überschreiten und maximal 800 TWh/a erreichen, dann wird die Produktion von Biowasserstoff im besten Fall 8 % an der gesamten Wasserstoffproduktion in Deutschland haben. Das entspricht ungefähr dem heutigen Anteil, den Biogas zur regenerativen Energieerzeugung beiträgt. (BDEW *et al.*, 2019)

In den Niederlanden ist eine Produktionsmenge zwischen 2,1 TWh/a und 4,2 TWh/a möglich. In zehn Jahren wird eine Nachfrage von 19 TWh/a bis zu 42 TWh/a erwartet. Ähnlich wie in Deutschland könnte auch in den Niederlanden die Produktion von Biowasserstoff einen signifikanten Anteil an der gesamten Wasserstoffproduktion im Land haben. Im Jahr 2050 wird die Nachfrage erneut deutlich gestiegen sein. Eine Nachfrage zwischen 56 TWh/a und 278 TWh/a wird erwartet. Somit könnte die biogene Produktion von Wasserstoff maximal 7,1 % der Wasserstoff-Nachfrage im Jahr 2050 abdecken. (Detz *et al.*, 2019)

In Abbildung 2 wurde der Anteil der unterschiedlichen Abfälle grafisch dargestellt. Es zeigt sich das in Deutschland fast die Hälfte der für die dunkle Fermentation nutzbaren Biomasse aus der Landwirtschaft kommt. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Gülle und Mist aus der Viehhaltung. Kommunale Abfälle zu denen Klärschlamm und Küchenabfälle aus Haushalten zählen, haben einen Anteil von 35 % aus. Die restlichen 15 % belaufen sich auf Abfällen der Lebensmittelindustrie.

In den Niederlanden kommt der Großteil der nutzbaren Reststoffe aus der Landwirtschaft. Abfälle aus der Lebensmittelindustrie machen einen Anteil von 26 % an der gesamten organischen Biomasse aus. Die kommunalen Abfälle haben einen Anteil von 4 %.

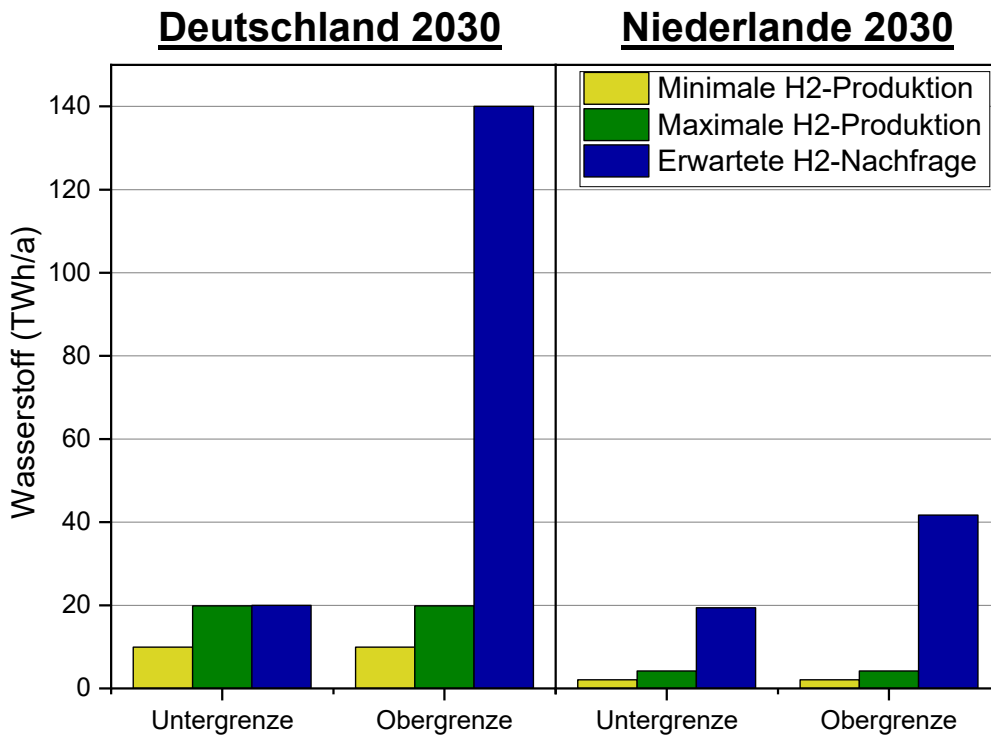


Abbildung 1: Prognostizierte Wasserstoff-Nachfrage im Jahr 2030 im Vergleich zur möglichen Produktionsmenge an Biowasserstoff aus Reststoffen in Deutschland und den Niederlanden. Plausible Bandbreite der Wasserstoff-Nachfrage für eine Direktnutzung des Wasserstoffs für z.B. Brennstoffzellen-Fahrzeuge, Niedertemperaturwärme und synthetische Brenn- und Kraftstoffe

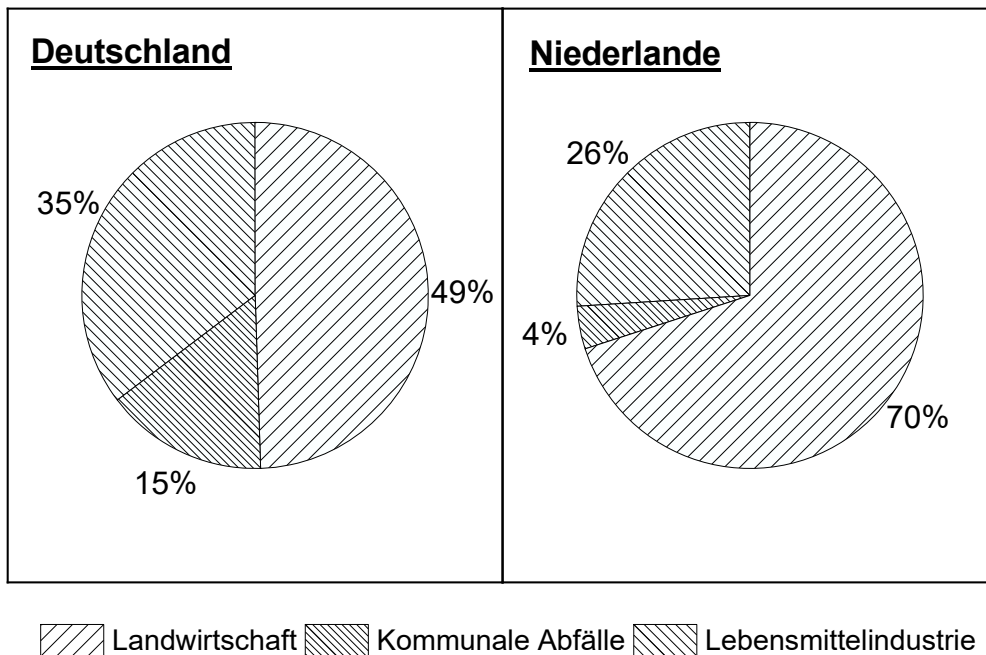


Abbildung 2: Möglicher Anteil der Bereiche Landwirtschaft, kommunale Abfälle und Lebensmittelindustrien an der gesamten Produktion von Biowasserstoff aus Biomasse mittels dunkler Fermentation (Anteil berechnet aus der organischen Biomasse)

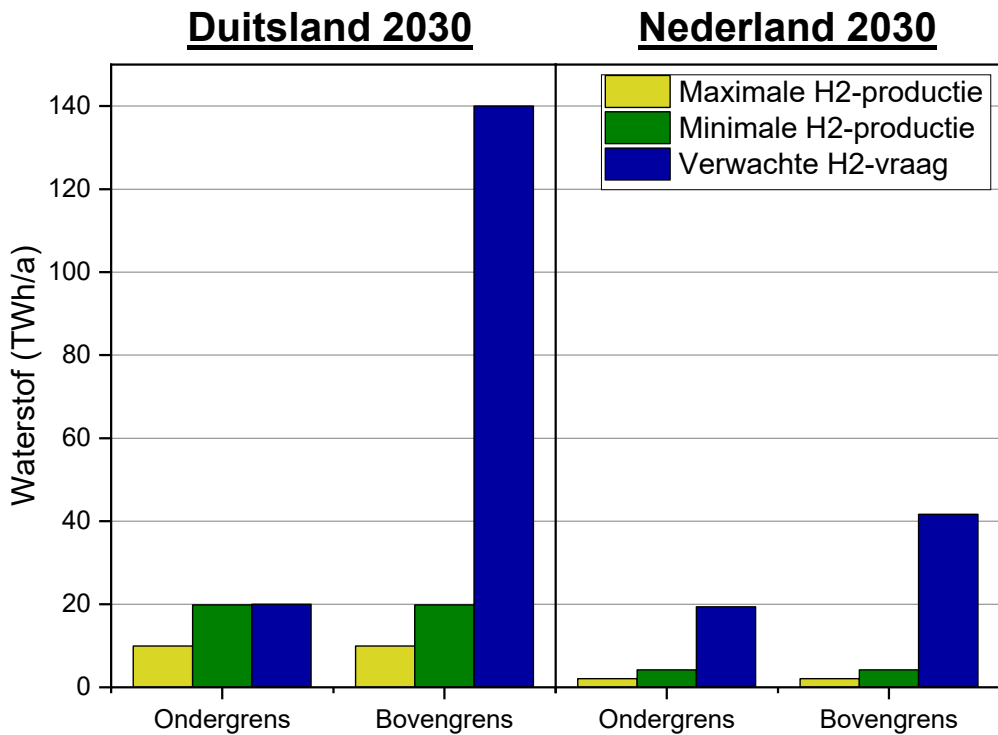
Data en resultaten

Afbeelding 1 toont de resultaten van de berekening van het theoretisch potentieel van bio-H₂ uit biomassa voor Duitsland en Nederland voor het jaar 2030. In totaal kan in Duitsland tussen 9,9 TWh/a en 19,9 TWh/a worden geproduceerd. Door de grote voorspelde toename van de vraag naar waterstof zal het aandeel van biologisch geproduceerde waterstof relatief laag zijn. Over tien jaar zal de vraag naar waterstof naar verwachting tussen 20 TWh/a en 140 TWh/a liggen. De biologische productie van waterstof uit biomassa kan nog steeds een aanzienlijk deel van de totale waterstofproductie uitmaken, maar zal dit niet meer volledig kunnen dekken. Vanaf het jaar 2050 zal de verwachte vraag meer dan 250 TWh/a bedragen en maximaal 800 TWh/a bereiken, dan zal de productie van bio-waterstof in het beste geval 8% van de totale waterstofproductie in Duitsland uitmaken. Dit komt ongeveer overeen met het huidige aandeel van biogas in de productie van hernieuwbare energie (BDEW *et al.*, 2019).

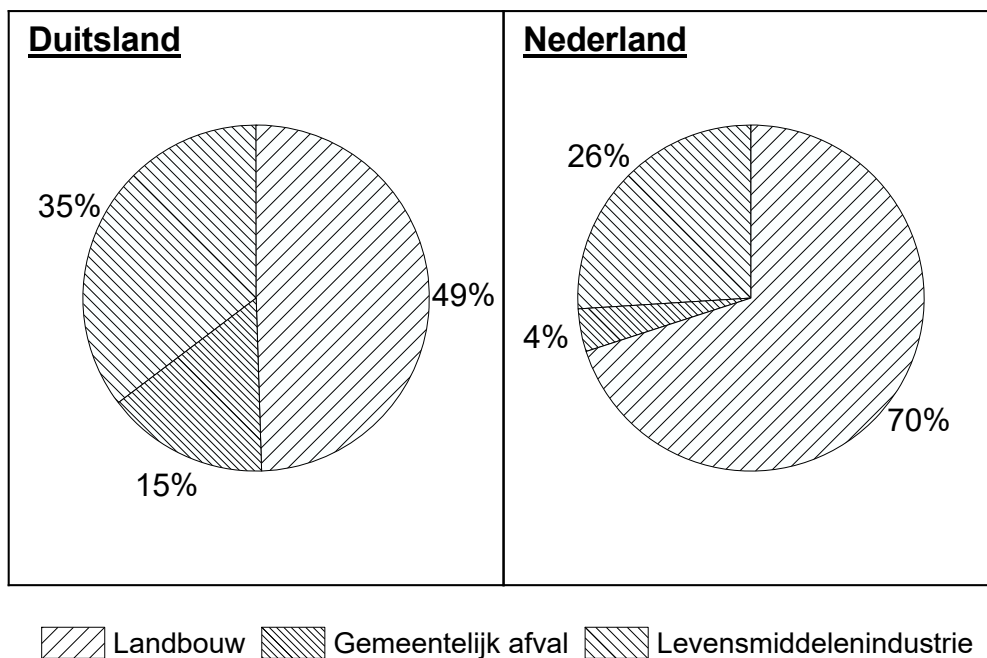
In Nederland is een productievolume tussen 2,1 TWh/a en 4,2 TWh/a mogelijk. Over tien jaar wordt verwacht dat de vraag tussen 19 TWh/a en 42 TWh/a zal liggen. Net als in Duitsland zou de productie van bio-waterstof in Nederland een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de totale waterstofproductie in het land. In 2050 zal de vraag weer aanzienlijk zijn gestegen. Er wordt een vraag verwacht tussen 56 TWh/a en 278 TWh/a. Dit betekent dat de biogene waterstofproductie maximaal 7,1% van de vraag naar waterstof in 2050 zou kunnen dekken.

In afbeelding 2 is het percentage van de verschillende soorten afval grafisch weergegeven. In Duitsland is te zien dat bijna de helft van de biomassa die voor donkere vergisting kan worden gebruikt, afkomstig is uit de landbouw. Dit zijn voornamelijk vloeibare mest en mest uit de veeteelt. Gemeentelijk afval, waaronder zuiveringsslib en keukenafval van huishoudens, neemt 35 % voor zijn rekening. De resterende 15 % is afval van de voedingsindustrie.

In Nederland is het grootste deel van de bruikbare reststoffen afkomstig uit de landbouw. Het afval van de voedingsindustrie is goed voor 26 % van de totale organische biomassa. Gemeentelijk afval maakt 4 % uit.



Figuur 1: Verwachte vraag naar waterstof in 2030 vergeleken met de mogelijke productie van bio-waterstof uit reststoffen in Duitsland en Nederland. Aannemelijk bereik van de vraag naar waterstof voor direct gebruik van waterstof voor bijvoorbeeld brandstofcelvoertuigen, lage temperatuur warmte en synthetische brandstoffen



Figuur 2: Mogelijk aandeel van de landbouw, de gemeentelijke afval- en voedselindustrie in de totale productie van biowaterstof uit biomassa met behulp van donkere fermentatie (aandeel berekend op basis van organische biomassa)

Fazit

- Das H₂-Potential aus Biomasse, könnte den aktuellen Bedarf an H₂ komplett abdecken (Statistisches Bundesamt, 2019) – sofern das gesamte Reststoffpotential genutzt würde.
- Die Nachfrage an Wasserstoff wird in den nächsten Jahren steigen – Bis 2030 könnte der Bedarf in DE und NL noch durch Bio-H₂ gedeckt werden.
- 2050 könnte der Anteil der biologischen Produktion von Wasserstoff sowohl in Deutschland als auch in den Niederlanden einen Anteil an der Gesamtproduktion von bis zu 8 % haben.
- Die hier durchgeführten Berechnungen zeigen, dass das entwickelte biologische Verfahren zur Produktion von Biowasserstoff aus Reststoffen, einen signifikanten Anteil an der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und den Niederlanden haben kann.
- Zusätzlich zum erzeugten H₂, können etwa 2/3 der Gesamtenergie in Form von Methan, durch die an die H₂-Produktion anschließende Biogas-Stufe erzeugt werden, wodurch der Energie-Gesamtanteil nochmals steigt.

Conclusies

- Het H₂-potentieel uit biomassa zou de huidige vraag naar H₂ volledig kunnen dekken. (Bundesamt für Statistik, 2019) - op voorwaarde dat het volledige reststoffenpotentieel wordt benut.
- De vraag naar waterstof zal de komende jaren toenemen - tegen 2030 kan de vraag in DE en NL nog steeds worden gedekt door Bio-H₂.
- In 2050 zou het aandeel van de biologische productie van waterstof in zowel Duitsland als Nederland tot 8 % van de totale productie kunnen bedragen.
- De hier uitgevoerde berekeningen laten zien dat het ontwikkelde biologische proces voor de productie van bio-waterstof uit reststoffen een belangrijk aandeel zou kunnen hebben in de toekomstige waterstofeconomie in Duitsland en Nederland.
- Naast de geproduceerde H₂ kan ongeveer 2/3 van de totale energie worden geproduceerd in de vorm van methaan in de biogasfase na de H₂-productie, waardoor het totale energieaandeel verder toeneemt.

Förderung/Financierung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



Ministerie van Economische Zaken

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



Literaturverzeichnis/Bibliografie

- BDEW, Statistisches Bundesamt, AGEb, BMWi, ZSW und Statistik der Kohlenwirtschaft (2019), „Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträger in den Jahren 2000 bis 2019 (in Terawattstunden)“, verfügbar unter <https://ezproxy.fh-muenster.de:2120/statistik/daten/studie/156695/umfrage/brutto-stromerzeugung-in-deutschland-nach-energietraegern-seit-2007/> (Zugriff am 21. Juli 2020).
- Brosowski, A., Thrän, D., Mantau, U., Mahro, B., Erdmann, G., Adler, P., Stinner, W., Reinhold, G., Hering, T. und Blanke, C. (2016), „A review of biomass potential and current utilisation – Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany“, *Biomass and Bioenergy*, 95. Jg., S. 257–272.
- C. Hebling, M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn und N. Müller (2019), „Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer ISE und ISI“.
- Detz, R. J., Lenzmann, F. O., Sijm, J. P. M. und Weeda, M. (2019), „Future Role of Hydrogen in the Netherlands. A meta-analysis based on a review of recent scenario studies“.
- Gaida, B., Schüttmann, I., Zorn, H. und Mahro, B. (2019), „Bestandsaufnahme zum biogenen Reststoffpotential der deutschen Lebensmittel- und Biotechnik-Industrie. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben“.
- Statistisches Bundesamt (2019), „Produktionsvolumen ausgewählter anorganischer Grundchemikalien in Deutschland im Jahr 2019 (in 1.000 Tonnen)“, verfügbar unter <https://ezproxy.fh-muenster.de:2120/statistik/daten/studie/868018/umfrage/produktion-anorganischer-grundchemikalien-in-deutschland> (Zugriff am 21. Juli 2020).
- Weide, T., Brüggling, E., Wetter, C., Ierardi, A. und Wichern, M. (2019), „Use of organic waste for biohydrogen production and volatile fatty acids via dark fermentation and further processing to methane“, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44. Jg., Nr. 44, S. 24110–24125.