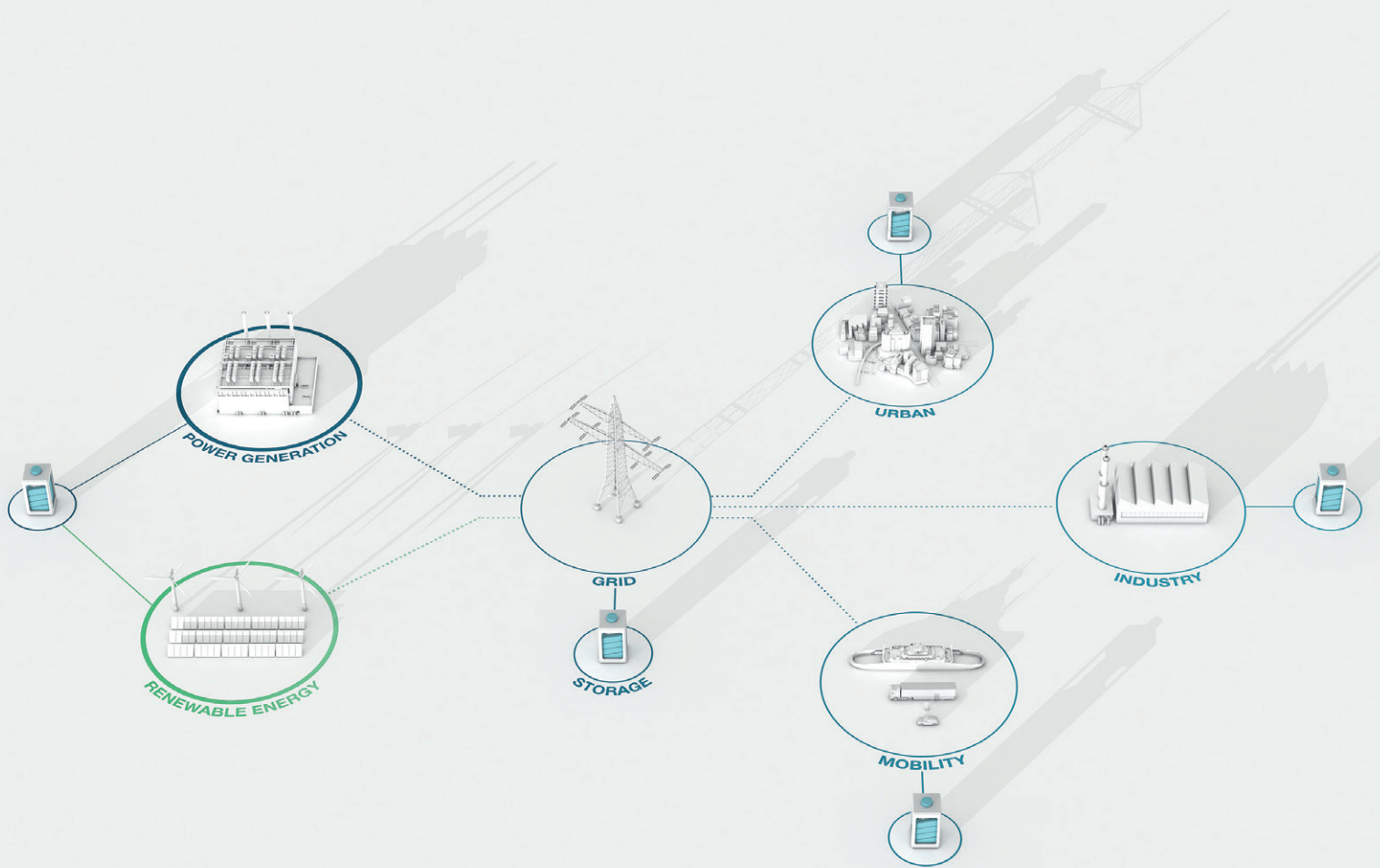


Power-to-X-Technologien für die Sektorenkopplung



VDI-Agenda
November 2021

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Power-to-X	4
	2.1 Warum eine Agenda zu Power-to-X?	4
	2.2 Power-to-X für den Standort Deutschland	4
	2.3 Power-to-X in der VDI-Regelsetzung	5
3	Richtlinienreihe VDI 4635 „Power-to-X“	7

1 Einleitung

Sektorenkopplung

Im Rahmen der Energiewende werden zunehmend erneuerbare Energiequellen zur Bereitstellung von Strom und Wärme eingesetzt. Aufgrund der Volatilität im Dargebot der Erneuerbaren Energien steigen die Flexibilitätsanforderungen insbesondere im Bereich der Stromerzeugung und -nutzung enorm. Im Vordergrund steht dabei immer die Anpassung von Erzeugereinheiten an die unterschiedlichen Bedarfe. Es wird immer schwieriger, die Bereitstellung mit den Bedarfen zu synchronisieren. Aus Umweltschutzgründen sind die Vorteile von fossilen Brenn- und Kraftstoffen hinsichtlich Speicherung und Verfügbarkeit nur für absehbare Zeit nutzbar. Eine Lösung wäre es, möglichst alle „Sektoren“ gemeinsam zu betrachten und kombinieren.

Unter „Sektoren“ versteht man in diesem Zusammenhang oft die klassischen Endenergieverbraucher

- Haushalte,
- Gewerbe, Handel und Dienstleistungen,
- Industrie und
- Verkehr.

Der Kopplungseffekt kann sich auf die gemeinsame Bereitstellung von Energieformen (z. B. Strom, Wärme, mechanische Energie) und/oder Produkten (z. B. Kraftstoffe, Brennstoffe, Chemikalien) oder auf die Handhabung dieser Energieformen/Produkte (Speichern, Management, Marktregulierung etc.) beziehen.

Technologien der Sektorenkopplung

Zur Umsetzung und Realisierung der Sektorenkopplung werden verschiedene Technologien eingesetzt wie:

- Kraft-Wärme-Kopplung
- Power-to-X-Technologien (X kann dabei stehen für: Power, Gas, Liquid, Solid, Fuel, Heat, Chemicals)
- Power-to-Mobility (insbesondere batteriebetriebene Fahrzeuge)

Sektorenkopplung mit Power-to-X

Power-to-X (PtX) bedeutet die Wandlung elektrischer Energie in einen Energieträger (gasförmig oder flüssig), in Wärme oder in ein Produkt (Rohstoff, Grundstoff).

Deutschland ist Vorreiter im Bereich „Power-to-X“, insbesondere in Bezug auf „Wasserstoff“. Dies trägt dazu bei, dass Technologieentwicklungen und Wertschöpfung in Deutschland gehalten werden können.

In Deutschland sind derzeit mit stark steigender Tendenz über 30 MW Power-to-Gas-Anlagen zu Demonstrations- und Entwicklungszwecken stationär im Einsatz (Stand 2019, bezogen auf die elektrische Anschlussleistung des Elektrolyseurs, Details siehe <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>); etwa die Hälfte davon erzeugt Wasserstoff, die andere Hälfte Methan. Die Technologiebausteine weisen bereits heute einen hohen Technologie-Readiness-Level (TRL, Technologie-Reifegrad) auf und werden für den Einsatz in PtX-Anlagen optimiert.

Entwicklungsbedarf besteht noch in den Bereichen der Systemtechnik und bei der Verbesserung – Standzeit und Effizienzsteigerung – einzelner Komponenten. Mittelfristig ist die Nutzung dieser Technologien, insbesondere von den Kostendegressionen der Anlagen, vom CO₂-Preis und der Nutzung alternativer Flexibilitätsoptionen (Netzausbau, Batteriespeicher, Lastmanagement) abhängig. Langfristig ist Power-to-X als fester Bestandteil des Energiesystems einzuordnen.

Um jedoch die globale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu sichern, müssen weitere Entwicklungen zur Bewertung, Integration und Umsetzung von PtX-Anlagen zielorientiert geführt und gebündelt werden.

Für die erfolgreiche Positionierung der deutschen Wirtschaft ist es in diesem Kontext wichtig, die positiven Effekte der Normung in den Prozess einzubeziehen und voll auszuschöpfen.

Das Aufstellen von Regeln, die Standardisierung von Prozessen und Abläufen erleichtern Arbeit und Verständigung in Unternehmen, Wissenschaft und Genehmigungsbehörden. Normen sind die Sprache der Technik und dienen der Vereinheitlichung von Anforderungen an materielle und immaterielle Güter. Damit schaffen sie Vergleichbarkeit. Und sie erleichtern die Marktdurchdringung, da ein Waren- und Dienstleistungsverkehr im globalen Handelsnetzwerk nur mit Festlegungen funktioniert.

Der VDI als Regelsetzer

Der VDI als Europas größter technisch-wissenschaftlicher Verein ist einer der großen Regelsetzer in Deutschland. Mit mehr als 2.100 gültigen VDI-Richtlinien erstellt er allgemein anerkannte technische Regeln mit Beurteilungs- und Bewertungskriterien und methodischen Grundlagen für nahezu alle Branchen und gibt auch über Ländergrenzen hinweg konkrete Handlungsempfehlungen. Das Themenspektrum reicht von Architektur, Abfallwirtschaft über Bau-technik, Bionik und Werkstoffsubstitution bis hin zu Zuverlässigkeit.

In VDI-Richtlinien wird der Stand der Technik laufender und zukünftiger Entwicklungen und der Stand der Wissenschaft in der Regel zweisprachig (deutsch und englisch) beschrieben. Das große VDI-Experten-Netzwerk aus Wissenschaft, Industrie und öffentlicher Verwaltung erarbeitet ehrenamtlich und interdisziplinär VDI-Richtlinien. Dabei folgen die einzelnen Ausschüsse dem international gängigen Normungsprozess. Damit ist auch die Grundlage für die Eingabe eines deutschen Standpunkts für die internationale Normung gegeben.

2 Power-to-X

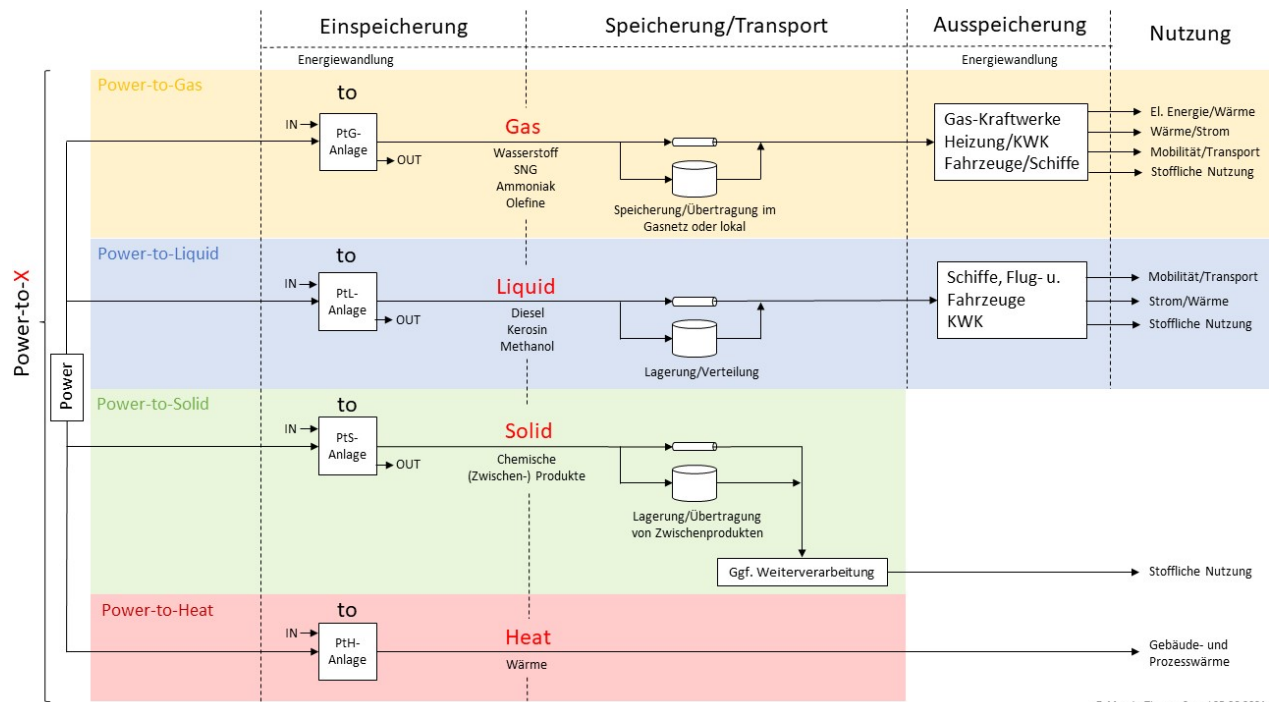


Bild 1. Systemgrenzen (Quelle: Martin Thema)

2.1 Warum eine Agenda zu Power-to-X?

Mit der vorliegenden VDI-Agenda will der VDI eine breitere Öffentlichkeit aber auch technische Regelsetzer und Entscheidungsträger über die umfangreichen Aktivitäten im Rahmen der Richtlinienreihe VDI 4635 informieren.

Eines der Ziele, die der VDI wie alle technische Regelsetzer damit verfolgt, ist die Vermeidung von Doppelparbeit und vor allem Vermeidung von Widersprüchen in technischen Regelwerken.

2.2 Power-to-X für den Standort Deutschland

Power-to-X bezeichnet die Wandlung elektrischer Energie in einen anderen Energieträger oder ein Produkt und ist ein Sammelbegriff für viele unterschiedliche Prozesse wie Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Fuel, Power-to-Chemicals, Power-to-Product und Power-to-Heat. Das X in Power-to-X kann auch für Kälte stehen und damit auch Power-to-Cold umfassen.

In der Richtlinienreihe VDI 4635 werden die oben genannten Prozesse nach dem Aggregatzustand des erzeugten Produkts eingeteilt. Somit spricht man in der

Richtlinienreihe VDI 4635 von Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Power-to-Solids. Ergänzend wurde PtH (Power-to-Heat) dazu genommen. Die Systemgrenzen der Power-to-X-Prozesse sind in Bild 1 dargestellt.

Oft ist Wasserstoff die Basis für die PtX-Prozesskette. Der sogenannte grüne Wasserstoff kann hauptsächlich aus der Wasserelektrolyse gewonnen werden, welche mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben wird. Aus einer anschließenden Reaktion von Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid oder Stickstoff entstehen im Anschluss beispielsweise Methan oder Ammoniak, die durch Nutzung verschiedener Pfade vielfältig eingesetzt werden können.

Die Erzeugung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus regenerativem Strom und CO₂ über sogenannte Power-to-Liquid-Verfahren (PtL-Verfahren) ermöglicht eine Umstellung auf defossilisierte Kraft-, Brenn- und Chemiegrundstoffe auch in solchen Anwendungsgebieten, die nicht über eine direkte Elektrifizierung oder die Nutzung von Gasen adressiert werden können.

Diese Kopplung zwischen dem zunehmend auf regenerativer Primärenergie basierenden Stromsektor und dem Wärme-, Kraftstoff- und Chemiesektor ermöglicht so die Vermeidung oder zumindest Reduktion der CO₂-Emissionen in Anwendungen, die weiterhin

auf die Nutzung von Energieträgern mit hoher Energiedichte bei gleichzeitig guter Speicher- und Verteilinfrastruktur angewiesen sind. Beispiele hierfür sind der Langstrecken-Flug- und Schiffsverkehr, schwere Nutzfahrzeuge mit hoher Reichweite und Kühltechnik oder die Herstellung chemischer Grundstoffe wie Methanol, Dimethylether (DME) oder Olefine.

PtX-Anlagen stellen auch eine lastseitige Flexibilitäts-option dar, die umso wichtiger wird, je höher der Anteil der volatilen regenerativen Energien in der Energieversorgung ist.

Die Produkte aus PtX-Anlagen können als Kurzzeitspeicher (siehe Power-to-Heat) oder als Langzeitspeicher (Power-to-Gas, Power-to-Ammonia, Power-to-Liquids, Power-to-Heat etc.) eingesetzt werden.

2.3 Power-to-X in der VDI-Regelsetzung

Durch die Interdisziplinarität des Fachgebiets und die teils noch jungen Technologien existiert noch kein einheitliches System zur Vergleichbarkeit bezüglich Mess- und Nachweismethoden oder der Angabe und Bezeichnung von Systemparametern.

Ausgehend von diesen Überlegungen entschied der Richtlinienausschuss VDI 4635, alle Einzelprozesse und alle Prozessketten von PtX zu betrachten.

In der Richtlinienreihe VDI 4635 werden daher insbesondere die technischen Parameter der verschiedenen Prozesse der PtX-Kette definiert und standardisiert, damit Anlagen und einzelne Prozesse miteinander verglichen werden können.

Außerdem werden Aspekte der Planung, Auslegung, Inbetriebnahme und Betrieb, Genehmigungs- und Sicherheitsfragen sowie systemische Aspekte adressiert.

Die Richtlinienreihe ist als **Baukastensystem** mit mehreren Teilen vorgesehen. Die Struktur der Richtlinienreihe ist in Bild 2 abgebildet. Folgende PtX-Prozesse werden in separaten Arbeitsgruppen und dazugehörigen Blättern betrachtet:

- Power-to-X
- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid
- Power-to-Solids
- Power-to-Heat

Behandelt werden nicht nur die eigentlichen Umwandlungspfade (PtX), sondern auch die jeweils

relevanten Technologien sowie die erforderlichen Komponenten.

Derzeit werden folgende Einzelprozesse im Detail betrachtet:

- Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse
- Bereitstellung von Kohlenstoffoxiden
- Methanisierung
- Erzeugung flüssiger Kohlenwasserstoffe
- Ammoniaksynthese

Um die Auswahl der unterschiedlichen PtX-Pfade auf Basis vergleichbarer Kriterien zu ermöglichen, befasst sich eine weitere Arbeitsgruppe mit den „Systemischen Aspekten von PtX-Anlagen“.

Allen oben genannten Prozessen ist gemein, dass folgende Aspekte näher betrachtet und festgelegt werden:

- Terminologie
- Systemgrenzen
- Systemparameter (inklusive dynamischer Betrieb)
- Beschreibung des Stands der Technik bzw. der Entwicklung
- Auswahl der Technologien auf Basis einer multi-kriteriellen Bewertung
- Kostenbetrachtungen

Die Arbeitsgruppen arbeiten parallel. Die Herausforderung besteht darin, die vielfältigen und wertvollen Arbeiten zu integrieren und gegebenenfalls um weitere Aktivitäten bedarfsgerecht und zielführend zu erweitern.

Daher koordiniert ein übergeordneter Ausschuss, bestehend aus den Vorsitzenden der einzelnen Arbeitsgruppen und deren Stellvertretenden die Richtlinienarbeit, sodass nicht nur Begriffe, Systemgrenzen und Systemparameter kompatibel zueinander sind, sondern auch gewährleistet wird, dass die Darstellung der Prozesse soweit übereinstimmt, dass die Richtlinienreihe den angestrebten Vergleich erleichtert.

Die mehr als 130 Mitglieder des Gremiums, die die Richtlinienreihe zurzeit erstellen, kommen aus den Bereichen Industrie, Wirtschaft, Wissenschaft und Verbände. In der VDI-Richtlinienarbeit sind außerdem der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches

e.V. (DVGW) sowie die Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) und die Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) eingebunden. Dadurch werden Begriffe harmonisiert und Doppelarbeit vermieden. Auch Vertreter der TÜV

SÜD Industrie Service GmbH und der TÜV Rheinland Industrie Service GmbH unterstützen die Richtlinienarbeit mit ihrer Expertise im Bereich Genehmigungen, Sicherheit und Inbetriebnahme.

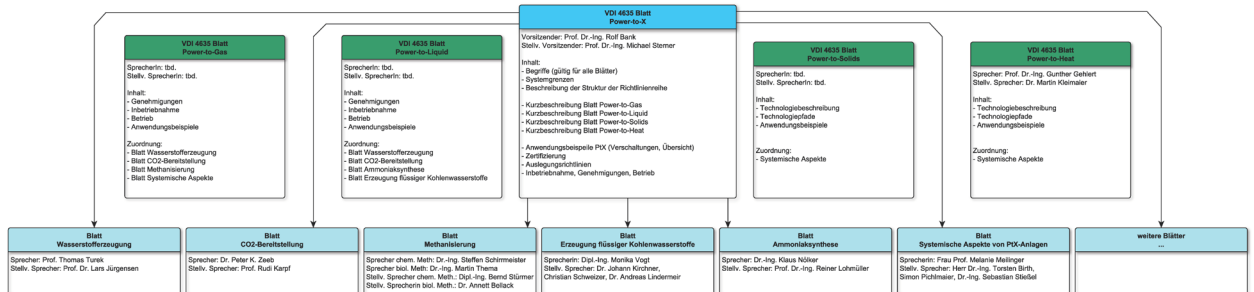


Bild 2. Struktur der Richtlinienreihe VDI 4635 „Power-to-X“ (Quelle: Martin Thoma)

3 Richtlinienreihe VDI 4635 „Power-to-X“

Die systematische Nummerierung der Richtlinien ist derzeit noch in Abstimmung.

Richtlinie „Power-to-X“

Hauptfokus der übergeordneten Richtlinie ist die Definition allgemeiner Begriffe, die für alle Blätter der Richtlinienreihe gelten. Ferner werden die Systemgrenzen von PtX-Anlagen festgelegt und die Struktur der Richtlinienreihe erläutert.

Richtlinie „Power-to-Gas“

Die Richtlinie „Power-to-Gas“ (PtG) befasst sich mit der Wandlung von elektrischer Energie in gasförmige Speichermedien. Dabei werden übergeordnete Aspekte von Bau, Inbetriebnahme und Betrieb der Anlagen behandelt. Wesentliche systemische Aspekte, wie Standortwahl, Durchführung einer Lebenszyklusanalyse (LCA) oder andere werden aus der Richtlinie „Systemische Aspekte“ bezogen auf Wasserstoff, biologische und chemische Methanisierung behandelt. Für Wasserstoff wird die Richtlinie „Wasserstoffbereitstellung“ zugrunde gelegt, für die Methanisierung die Richtlinien „Wasserstoffbereitstellung“, „CO₂-Bereitstellung“ und „Methanisierung“.

Richtlinie „Power-to-Liquids“

Die Richtlinie „Power to Liquids“ (PtL) befasst sich mit der Wandlung von elektrischer Energie (bei Umgebungsbedingungen) in flüssige Speichermedien unter Verwendung von Kohlenstoffoxiden oder Stickstoff. Dabei werden übergeordnete Aspekte bei Bau und Betrieb von PtL-Anlagen wie die Methanol-, Fischer-Tropsch- und Ammoniaksynthese betrachtet. Technische Details werden den Richtlinien „Flüssige Kohlenwasserstoffe“ und „Ammoniaksynthese“ behandelt.

Richtlinie „Power-to-Solids“

Die Richtlinie „Power-to-Solids“ (PtS) befasst sich mit der Wandlung von elektrischer Energie (bei Umgebungsbedingungen) in feste Speichermedien. Da es derzeit noch keine technisch ausgereiften Verfahren gibt, wurde die Bearbeitung dieser Richtlinie zurückgestellt.

Richtlinie „Power-to-Heat“

Die Richtlinie „Power-to-Heat“ (PtH) beschreibt die Wandlung von elektrischem Strom in Wärme (oder Kälte). Es führt Systemparameter und -grenzen, physikalische Grundlagen und Zusammenhänge ein, gibt einen Überblick über den Stand der Technik inklusive dazugehöriger Infrastruktur und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der energetischen sowie exergetischen Bewertung verschiedener PtH-Methoden, das heißt dem Vergleich der PtH-Methoden hinsichtlich der erzielbaren Wärmemengen sowie der erzielbaren Temperaturniveaus der Wärmebereitstellung. Die Richtlinie beschreibt neben den klassischen Methoden zur Auswahl und Auslegung der PtH-Technologien auch eine Methodik zur exergetischen Effizienzanalyse. Abgerundet wird die Richtlinie durch repräsentative Beispiele für eine multikriterielle Auswahl und Auslegung in der Praxis.

Richtlinie „Bereitstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse“

Die Richtlinie „Bereitstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse“ befasst sich mit der Nutzung elektrischer Energie zur elektrolytischen Wasserspaltung. Es werden Systemgrenzen sowie System- und Kostenparameter definiert, die für die Beschreibung von Wasserelektrolyseanlagen relevant sind. Die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis der drei verfügbaren Technologien alkalische Elektrolyse, Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Elektrolyse und Hochtemperaturelektrolyse werden erläutert. Darüber hinaus wird auch die Wasserstoffherzeugung durch Chlor-Alkali-Elektrolyse kurz behandelt. Wichtige Teilaspekte der Wasserelektrolyse wie die Bereitstellung des Gleichstroms, die Möglichkeit des dynamischen Betriebs, die erforderlichen Messgrößen für die Bilanzierung sowie die Kompression des Wasserstoffs werden adressiert.

Richtlinie „CO₂-Bereitstellung“

Die Richtlinie „CO₂-Bereitstellung“ wird die Versorgung derjenigen PtX-Technologien mit Kohlenstoffdioxid, eventuell vermischt mit Kohlenstoffmonoxid, die Kohlenstoff benötigen, beschrieben. Die Richtlinie beschreibt die verfügbaren fossilen und nicht fossilen Quellen für Kohlenstoffoxide. Es werden die Verfahren zur Abtrennung des Kohlenstoffoxids und

die anschließende Reinigung und Aufarbeitung beschrieben. Da sowohl die zur Verfügung stehenden Quellen als auch die Abnehmer nicht unbedingt miteinander synchron arbeiten, wird auf mögliche Pufferung der Kohlenstoffoxide eingegangen. Die Transportmöglichkeiten vom Erzeuger zum Verbraucher werden beschrieben, ebenso die Reinheitsanforderungen der verschiedenen PtX-Verfahren.

Richtlinie „Methanisierung“

Die Richtlinie „Methanisierung“ definiert Systemgrenzen sowie Prozess-, System- und Kostenparameter, die zur Beschreibung von Methanisierungsanlagen in den beiden energietechnisch relevanten Nutzungspfaden essenziell sind. Diese sind die biologische Methanisierung mittels methanogenen Archaeen und die chemische Methanisierung (Sabatier-Prozess). Die wichtigsten Grundlagen und Charakteristika zum Verständnis der jeweiligen Prozesse werden erläutert, Anwendungsbeispiele werden gegeben.

Richtlinie „Flüssige Kohlenwasserstoffe“

In der Richtlinie „Flüssige Kohlenwasserstoffe“ werden Verfahren betrachtet, bei denen elektrische Energie über mehrere Prozessschritte (bei Umgebungsbedingungen) in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt werden. Dabei stehen die Methanol- und Fischer-Tropsch-Synthese im Fokus. Adressiert werden aber auch Verfahren zur Bereitstellung von Synthesegas. Die wichtigsten Grundlagen und Charakteristika zum Verständnis der jeweiligen Prozesse, insbesondere hinsichtlich der Anforderungen, die sich aus dem PtX-Konzept ergeben, werden erläutert.

Richtlinie „Ammoniaksynthese“

Die Richtlinie „Ammoniaksynthese“ definiert Systemgrenzen sowie System- und Kostenparameter, die zur Beschreibung der Ammoniakherstellung relevant sind. Die beiden betrachteten Prozesspfade sind die klassische Haber-Bosch-Synthese unter Verwendung von Wasserstoff aus dem Prozess nach Richtlinie „Wasserstofferzeugung“ und alternativ dazu die in der Entwicklung befindlichen Verfahren zur direkten elektrochemischen Herstellung von Ammoniak aus Wasser und Stickstoff. Die Grundlagen und Besonderheiten der jeweiligen Prozesse werden erläutert.

Richtlinie „Systemische Aspekte“

In der Richtlinie „Systemische Aspekte“ werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Prozessen von PtX-Anlagen (Methanisierung, Wasserstofferzeugung, CO₂-Bereitstellung etc.) verdeutlicht und vereinheitlicht, sodass die Prozesse zueinander passen. Wichtig sind dabei die jeweiligen Systemgrenzen und -parameter aus den einzelnen Modulen sowie die Übergabeparameter an den Schnittstellen. Ferner werden Methoden zur multikriteriellen Bewertung empfohlen und eingeordnet, sodass PtX-Anlagen und PtX-Prozesse bewertet und miteinander verglichen werden können. Die Kriterien umfassen sowohl technische als auch ökonomische, ökologische und soziale Aspekte (z. B. Bewertung bei standortspezifischen Konzepten, Akzeptanz, Infrastruktur, CO₂-Benefit, Wirtschaftlichkeit).

Die oben genannten Angaben beschreiben den momentanen Bearbeitungsstand. Der Richtlinienausschuss VDI 4635 behält sich das Recht vor, nicht nur den Titel, sondern auch das Inhaltsverzeichnis, das heißt die Schwerpunkte der jeweiligen Richtlinie, zu modifizieren, falls es sich im Lauf der Arbeit als sinnvoll oder notwendig herausstellt.

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit mehr als 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 140.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Wir sprechen für Ingenieurinnen und Ingenieure sowie für die Technik und gestalten so die Zukunft aktiv mit. Über 12.000 ehrenamtliche Expertinnen und Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt
Hanna Seefeldt
Tel. +49 211 6214-926
seefeldt@vdi.de
www.vdi.de