

### 3. Innovationen und Entwicklungen

Das Rückgrat der Energiewende ist und bleibt die Entwicklung und Anwendung von innovativen Technologien, Verfahren und Steuersystemen, die in enger Kooperation zwischen Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft entwickelt wurden und wesentlich dazu beigetragen haben, die älteren Techniken hinsichtlich ihrer Effizienz zu verbessern bzw. durch neue Technologien zu substituieren. Ein herausragendes Beispiel sind die zur Stromerzeugung mittels Photovoltaik und Windkraft entwickelten Technologien, durch die der Jahresenergieertrag von Windturbinen innerhalb der letzten 40 Jahre um mehr als den Faktor 600 gesteigert und die Baukosten um ca. 80% gesenkt werden konnten. Bei der Photovoltaik sind die Kosten für Solarstrom seit 2010 sogar um bis zu 90% zurückgegangen. Damit hat die Produktion von „grünem“ Strom mittels Photovoltaik und Windkraft die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit erreicht.

Technologische Entwicklungen haben auch dazu beigetragen, dass die Preise von Lithium-Ionen-Batterien zwischen 2010 und 2019 um mehr als 85% gefallen sind und dadurch ein breiter Wechsel zur Elektromobilität ermöglicht wurde. Wichtige technologische Fortschritte sind u.a. auch in der Entwicklung von alternativen Kraftstoffen, der Umwandlung von Strom in Gas (Power-to-Gas) und der Brennstoffzellentechnik erzielt worden. Durch neue Technologien konnte der Stromverbrauch im Bereich der Beleuchtung um bis zu 90% gesenkt werden. In der Industrie wurden energieeffiziente Antriebe für die Prozessindustrie entwickelt, die mit deutlichen Minderungen von Treibhausgasemissionen verbunden sind. Innovative Techniken wurden auch zur thermischen Isolierung heißer und kalter Oberflächen in der Prozessindustrie eingesetzt.

Trotz dieser wegweisenden Entwicklungen sind weitere Innovationen für eine ausreichende Bereitstellung von erneuerbaren Energien und für ihre effiziente Nutzung notwendig, wenn die Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs auf weniger als 2°K erreicht werden soll. Eine zentrale Aufgabe ist dabei die Erstellung eines Gesamtkonzepts zur Integration der erneuerbaren Energien in ein nachhaltiges und widerstandsfähiges Energiesystem, in dem die Steigerung der Produktion von erneuerbaren Energien und der Effizienz von erneuerbaren Energiesystemen sowie die langfristige Speicherung und Integration der dezentralen Versorgung mit erneuerbaren Energien in das Gesamtsystem wichtige Teilaufgaben darstellen.

### 3.1 Strom aus erneuerbaren Energien („grüner“ Strom)

Strom aus erneuerbaren Energien ist der wichtigste Energieträger der Zukunft und sollte -wo immer möglich- als primärer Energieträger eingesetzt werden, um Verluste bei der Umwandlung von Strom in andere Energieträger zu vermeiden. Wenn die beschlossenen Klimaziele bis spätestens 2050 umgesetzt werden sollen, müssen die Erzeugung von „grünem“ Strom beschleunigt ausgebaut, die Effizienz der Stromnutzung durch neue Technologien verbessert und der Ausbau der „Sektorenkopplung“ gesteigert werden. Wegen der Abschaltung der AKWs bis 2022, der steigenden Anzahl von Elektroautos und von Wärmepumpen sowie der Umstellung von industriellen Prozessen auf klimafreundliche Technologien und des Ausbaus der Digitalisierung und der steigenden Produktion von „grünem“ Wasserstoff wird sich der Druck auf die Erzeugung von „grünem“ Strom schon in den kommenden Jahren stark erhöhen.

Es ist deshalb zwingend erforderlich, die Technologieentwicklung in den Bereichen Windkraft und Photovoltaik durch neue Ideen und Techniken bzw. durch Optimierung bestehender Systeme zur Effizienzsteigerung und weiteren Kostenreduktionen verstärkt fortzusetzen. Bei Windkraft besteht ein hohes Innovationpotenzial bei schwimmenden Plattformen, die auf See auch bei großen Wassertiefen eingesetzt werden können und damit die Voraussetzung schaffen, die enormen Windressourcen auf See zu nutzen. Eine neue Technologie sind die „Vortex Bladeless“-Windkraftanlagen, die aber erst am Anfang der Entwicklung stehen und durch den Bau und Betrieb einer Demonstrationsanlage beweisen müssen, dass sie hinsichtlich der Effizienz und Kosten eine Alternative zu den herkömmlichen Windkraftanlagen darstellen. Auch ist zu prüfen, ob bzw. in welchem Umfang kleine Windräder einen nennenswerten Beitrag zur Stromerzeugung leisten können.

In der Photovoltaik liegen die Innovationsschwerpunkte in der Entwicklung dünnerer und effizienterer Solarzellen mit geringeren Verlusten (u.a. Heterojunction- und Perowskitsolarzellen) und in weiterer Zukunft in der Entwicklung von u.a. Konzentratorzellen und organischen Solarzellen mit höheren Wirkungsgraden. Ein weiterer innovativer Ansatz ist die erst am Anfang ihrer Entwicklung stehende Agro- und Aquaphotovoltaik, die ein hohes Potenzial für die Erzeugung von „grünem“ Strom aufweisen. Gleiches gilt für die großen noch verfügbaren Dach- und Freiflächen sowie die Überdachung von Parkflächen (u.a. von Einkaufszentren, Rasthöfen, Park-and-Ride) mit PV-Modulen, durch die in Verbindung mit Stromspeichern ein wesentlicher Anteil des privaten Stromverbrauchs abgedeckt bzw. „grüner“ Strom zum Aufladen von E-Fahrzeuge bereitgestellt werden kann.

Bei der Wasserkraft liegt der Fokus der Innovationen auf der Sanierung/Nachrüstung von älteren Anlagen sowie der Entwicklung von Kleinwasserkraftanlagen (Schachtkraftwerk, Wasserradkraftwerk), die in kleinen Fließgewässern wie Bächen eingesetzt werden können. Diese Anlagen haben zwar nur eine geringe Leistung, sind aber grundlastfähig und können bei Nutzung des vorhandenen Potenzials einen wichtigen Beitrag zur dezentralen Stromversorgung leisten. Wesentliche technische Verbesserungen sind auch bei Holzvergasungsanlagen und Biogasanlagen möglich, die grundlastfähigen Strom produzieren und dadurch einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten.

Große Forschungsaktivitäten sind erforderlich, wenn die angestrebte Nutzung der thermonuklearen Kernfusion zur Stromerzeugung bis Ende dieses Jahrhunderts erfolgreich sein soll. Gleiches gilt für die Spallation, bei der hochradioaktiver und energiereicher Atommüll aus bestehenden Kernkraftwerken durch Transmutation in Isotope mit einem wesentlich niedrigeren Gefährdungspotential und niedrigeren Halbwertszeiten umgewandelt und die dabei entstehende Wärme zur Stromerzeugung genutzt wird. Spallation eröffnet damit die Möglichkeit, das Problem der Endlagerung von hochradioaktivem Atommüll zu entschärfen und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-freien Strom zu produzieren. Die laufenden Forschungsprojekte (z.B. MYRRHA) sollen unter Einbindung deutscher Institute verstärkt weitergeführt werden.

„Grüner“ Strom ist auf Grund der fluktuierenden Erzeugung nicht grundlastdeckend. Es wird deshalb ein europaweites intelligentes Starkstromnetz (Smart Grid) gefordert, das die unterschiedlichen Netzspannungsebenen intelligent untereinander aussteuert und die Spannungsebenen nach dem Subsidiaritätssystem in die Verantwortlichkeiten nimmt. Mit diesem Netz lassen sich die regionalen Schwankungen bei der Produktion von „grünem“ Strom besser ausgleichen und die enormen Potenziale der Sonnenenergie in den Mittelmeerländern stärker nutzen. Die zwischen Deutschland und Marokko beschlossene Energiepartnerschaft über den gemeinsamen Aufbau und Betrieb von Solarkraftwerken ist auszubauen und die Effizienz der zum Einsatz kommenden Solarkraftwerke durch neue Technologien zu verbessern. Durch eine leistungsstarke Anbindung dieser Anlagen an das europaweite Stromnetz wird die Möglichkeit geschaffen, „grünen“ Strom direkt nach Europa bzw. Deutschland zu leiten.

Großer Entwicklungsbedarf besteht bei netzdienlichen, anwendungsspezifischen Speichertechnologien mit hohen Power-to-Power-Wirkungsgraden und ausreichenden kurz- und langfristigen Speicherkapazitäten, die bereit gestellt werden müssen, wenn die Versorgungs- und Systemsicherheit gewährleistet werden soll. Die bereits eingesetzten Lithium-Ionen-Zellen weisen noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Steigerung der

Energiedichte, Leistungsdichte, Sicherheit und Lebensdauer auf. Diese Batterien sind durch neue innovative Batterietechnologien (so u.a. Feststoff-Batterien) zu ergänzen, die im Vergleich zu Lithium-Ionen-Zellen umweltfreundlicher, wärmeunempfindlicher sind und höhere Energiedichten aufweisen sowie die Verwendung von wichtigen und nur in begrenztem Umfang vorhandenen Metallen wie Kobalt und Lithium vermeiden.

Entwicklungspotenzial besteht bei den stationär eingesetzten Redox-Flow-Batterien in der Verwendung von organischen Elektrolyten anstatt der üblich eingesetzten Schwermetalle und seltenen Erden sowie in der Weiterentwicklung der von Kobalt und Lithium unabhängigen „All-iron Redox-Flow Batterietechnologie (IRFB)“, die nach vorläufigen Abschätzungen Kosteneinsparungen von über 80 Prozent relativ zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien erwarten lassen und damit als Basis für die Entwicklung einer neuen Generation von dezentralen Stromspeichern dienen kann. Durch die Bereitstellung dieser Batterien wird die Nutzung von selbst erzeugtem Strom verbessert und das regionale Stromnetz entlastet.

Wichtige Kurzzeitstromspeicher sind Pumpspeicherkraftwerke, die zwar auf einer ausgereiften Technologie basieren, aber wegen der für den Betrieb erforderlichen topographischen Voraussetzungen und auch ökologischer Bedenken und damit fehlender Akzeptanz in der Bevölkerung keine signifikante Steigerung der Speicherleistung in Deutschland erwarten lassen. Im Gegensatz dazu wird mit den in Entwicklung befindlichen „Lageenergiespeichern“ eine neue Technologie verfügbar, die ökologisch unbedenklich und wegen der Lebensdauer der Anlagen von weitaus mehr als 50 Jahren nachhaltig ist. „Lageenergiespeichern“ können in unmittelbarer Nähe der volatilen Stromerzeugung bzw. von großen Verbrauchern zur Netzstabilisierung eingesetzt werden und verfügen über eine Kapazität von > 10 MWh bei einem Wirkungsgrad von > 80%.

Eine besondere Herausforderung ist die Bereitstellung von langzeitigen Stromspeichern, die eine gesicherte Stromversorgung bei Dunkelflauten und in Wintermonaten ermöglichen. Hier bieten sich die bereits vorhandenen Power-to-Gas-Technologien an, die aber wegen der schlechten Wirkungsgrade bei der Rückverstromung von nicht mehr als 30% unwirtschaftlich sind und vor ihrer Nutzung eine erhebliche technologische Weiterentwicklung erfordern. Gleiches trifft auf die sogenannten Carnot-Batterien zu, die als Strom-Wärme-Strom-Speicher eine Schlüsseltechnologie für die Speicherung großer Elektrizitätsmengen einnehmen können. Großer Entwicklungsbedarf besteht auch bei den mit flüssiger Luft als Speichermedium arbeitenden kryogenen Stromspeichern, die eine saubere, zuverlässige und kosteneffiziente Langzeitspeicherung bieten.

Nachdem bei einem E-Fahrzeug bis zu 40 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen allein auf die Herstellung der Batteriezellen entfallen, müssen innovative, nachhaltige und preisgünstige Batteriezelltechnologien entwickelt werden, welche die gesamte Wertschöpfungskette für Batteriezellen umfassen. Aufgrund der steigenden Anzahl von Altbatterien, hier insbesondere der Lithium-Ionen-Zellen, wird deren Recycling zu einem zentralen Thema der Zukunft. Durch Recycling können wichtige Rohstoffe wie Lithium und Kobalt zurückgewonnen und die Ökobilanz von Batterien verbessert werden. Dazu sind die bereits bestehenden Verfahren zu verbessern bzw. neue innovative und umweltfreundliche Technologien zu entwickeln. Ein erheblicher Entwicklungsbedarf wird auch beim künftigen Recycling von modernen Windkraftanlagen, hier insbesondere der Rotorblätter, gesehen.

### 3.2 Wasserstofftechnologie

Die vollständige Dekarbonisierung des bestehenden Energiesystems erfordert nach heutigem Kenntnisstand den Einsatz von „grünem“ Wasserstoff, der über die Wasser-Elektrolyse unter Nutzung von „grünem“ Strom erzeugt wird. Damit nimmt Wasserstoff bei der Umsetzung der Energiewende eine Schlüsselfunktion ein und leistet über die „Sektorenkopplung“ einen wichtigen Beitrag für die notwendige Flexibilität im künftigen Energiesystem. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Strategie ist jedoch, dass der dafür erforderliche „grüne“ Strom bereitgestellt wird bzw. „grüner“ Wasserstoff in ausreichende Mengen und zu vertretbaren Preisen importiert werden kann. Ideale Voraussetzungen für eine effiziente Wasserstoffproduktion aus der solarbetriebenen Elektrolyse von Wasser bieten die ariden Gebiete, die aber nicht über das für die Elektrolyse benötigte Wasser in Trinkwasserqualität verfügen. Es ist deshalb dringend erforderlich, eine Elektrolyse-Technologie zu entwickeln, die eine Elektrolyse von Salzwasser ermöglicht.

Wegen der geringen Wirkungsgrade und damit hohen Energieverlusten bei einer Rückverstromung von „grünem“ Wasserstoff (z. B. über Brennstoffzellen) sollte „grüner“ Wasserstoff nur für Bereiche zum Einsatz kommen, in denen Strom keine direkte Anwendung findet. Zu diesen Bereichen gehören große Teile der Industrie (Stahl -und Aluminium-Produktion, Zementherstellung, chemische Industrie) sowie der Verkehrsbereich (Schiffe, Flugzeuge, Busse und Schwerlast- bzw. Schienenfahrzeuge). Gleiches gilt für die Langzeitspeicherung von Wasserstoff und die notwendige Rückverstromung zur Stabilisierung des Stromnetzes bei Strommangel.

In der Chemiebranche besteht schon heute ein hoher Bedarf an Wasserstoff als Synthesegas, das derzeit in Form von „grauem“ Wasserstoff bereitgestellt wird und durch „grünen“ Wasserstoff unter Anwendung neuer Technologien ersetzt werden muss. Im Verkehrsbereich (LKWs, Busse, Schiffe) kommen hocheffiziente Brennstoffzellen zum Einsatz, die durch weitere Entwicklungen in allen Betriebspunkten optimiert werden müssen, um damit die Effizienz im realen Einsatz zu steigern und die Lebensdauer zu erhöhen. Großer Forschungsbedarf besteht auch bei der Produktion von alternativen Kraftstoffen (so u.a. von synthetischem Kerosin) unter Nutzung von „grünem“ Wasserstoff und Kohlendioxid.

Wegen der hohen Kosten bei der Herstellung ist der „grüne“ Wasserstoff derzeit nicht marktfähig. Um eine verlässliche, bezahlbare und nachhaltige Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff zu gewährleisten, sind weitere erhebliche Entwicklungen und Innovationen erforderlich, die die gesamte Wertschöpfungskette der Wasserstofftechnologie (Erzeugung, Speicherung, Infrastruktur und Verwendung) umfasst. Der Wirkungsgrad der Elektrolyseure kann durch technologische Weiterentwicklung u.a. der eingesetzten Katalysatoren und Membranen sowie durch die Nutzung der bei der Elektrolyse entstehenden Wärme (Sektorenkopplung) auf mehr als 90% gesteigert werden. Elektrolyseanlagen sollten deshalb bevorzugt dort errichtet werden, wo Wasserstoff in großen Mengen gebraucht und die Abwärme genutzt wird.

Zur optimalen Nutzung des „grünen“ Wasserstoffs ist eine ausreichende Transport- und Verteilinfrastruktur bereitzustellen. Dazu gehören die mögliche Umrüstung der bestehenden Erdgasleitungen für den Wasserstofftransport, die Entwicklung von effizienten mobilen Transportmöglichkeiten, die Bereitstellung eines ausreichenden Netzes von Tankstellen für mobile Großverbraucher sowie der Ausbau von Hafenanlagen zur Anlandung von Wasserstoff. Eine besondere Herausforderung ist die Langzeitspeicherung von „grünem“ Wasserstoff, für die geeignete Speichersysteme zu entwickeln sind. Möglichkeiten bieten heute schon die Liquid Organic Hydrogen Carriers-Trägertechnologie (LOHC) und die Metallhydridspeicher aus Leichtmetallen, die weiterzuentwickeln und marktfähig zu machen sind. Zukunftsweisend für die Speicherung und Transport von Wasserstoff ist deren Umwandlung in Ammoniak, das schon bei Raumtemperatur und geringer Kompression flüssig wird und damit erheblich einfacher zu handhaben ist als Wasserstoff.

### 3.3 Wärme/Kälte

Mehr als 50% der Primärenergie in Deutschland werden für die Wärmeerzeugung verbraucht. Davon entfallen rund 40% des Energieverbrauchs auf Gebäude und Quartiere, davon

wiederum über 80% für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser. Eine Sonderstellung nehmen dabei die Altbauten ein, die einen hohen spezifischen Wärme- und Kältebedarf aufweisen. Die Energiewende wird deshalb nur gelingen, wenn dieser Bedarf durch die energetische Sanierung des Gebäudebestands und Optimierung der technischen Anlagen erheblich reduziert wird. Eine innovative Lösung sind u.a. die Vakuum-Isolations-Paneele (VIP), die bei minimalem Platzbedarf eine extrem hohe Dämmleistung aufweisen und deshalb für Systemlösungen zur Vermeidung von Wärme- bzw. Kälteverlusten in stationären und mobilen Anwendungen bestens geeignet sind.

Der Restbedarf muss durch ein durchgehendes sektorengesetztes Gesamtsystem von intelligenten Netzen, intelligenten Quartieren und intelligenten Gebäuden gedeckt werden. Wesentliche Elemente dieses Gesamtsystems sind u.a. Wärmepumpen, thermische Sonnenkollektoren, Geothermie, Power-to-heat-Technologien, Biomasseheizung, Nutzung von Abwärme und insbesondere Wärmespeicher, die insgesamt eng miteinander vernetzt und an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden müssen. Dies gilt insbesondere für die sich stark unterscheidende Wärmeversorgung zwischen Stadt und Land sowie zwischen Gebäudebestand und Neubaugebieten, die differenzierte Lösungen notwendig machen.

Die Nutzung von Abwärme u.a. aus Industrie, Gewerbe, Biogas- und Kraft-Wärmekopplungs-Anlagen ist eine bedeutende Wärmequelle, die vielerorts ungenutzt in Flüsse und Atmosphäre abgegeben wird und einen Anteil von bis zu 30% des gesamten Heizwärmebedarfes stellen kann. Zur aktiven Nutzung der Abwärme sind neue Konzepte und Technologien zur Wärmerückgewinnung und zur Anbindung an ein Fern- und Nahwärmenetz zu entwickeln sowie die Fern- und Nahwärmenetze auszubauen. Die Wärmeverluste müssen durch neue Isoliertechniken minimiert und damit der Wärmetransport leistungsfähiger gemacht werden. Bei größerem Abstand zur Wärmequelle sind die bereits in Einzelfällen eingesetzten mobilen Latentwärmespeicher hinsichtlich der Kapazität, des Gewichts und der Kosten, u.a. durch Einsatz neuer Speichermedien, weiterzuentwickeln bzw. durch neue Technologien auszubauen.

Eine wichtige Rolle bei der zukünftigen Bereitstellung von Wärme spielen die mit „grünem“ Strom betriebenen Wärmepumpen, die mit thermischen Sonnenkollektoren gekoppelt und intelligent mit dem Stromsektor (u.a. über Power-to-heat) vernetzt sind. In Kombination mit Wärmespeichern kann damit ein Großteil der jährlichen im privaten Bereich benötigten Wärme zur Verfügung gestellt werden. Eine wesentliche Verbesserung erfährt dieses Systems zudem noch durch die Verbindung mit dem Ausbau der oberflächennahen geothermischen Wärme- und Kältebereitstellung, durch die Energie im Sommer gespeichert und im Winter abgerufen

werden kann. Dieses Gesamtsystem verfügt über weitere Verbesserungspotenziale, die durch technologische Weiterentwicklungen genutzt werden können.

Eine grundlastfähige Wärmeversorgung bietet die Tiefengeothermie, die in Verbindung mit Fernwärmenetzen einen großen Beitrag zur Wärmewende im Gebäudesektor leisten kann. Tiefengeothermie wird bereits verbreitet genutzt, weist aber noch einen erheblichen Entwicklungsbedarf auf, der gedeckt werden muss, um das vorhandene Potenzial der Geothermie möglichst umfassend zu nutzen. Eine weitere Wärmequelle ist die Verwendung von Biomasse, die aber nur begrenzt zur Verfügung steht und nicht wesentlich ausgebaut werden kann.

Die Bereitstellung von energieeffizienten und leistungsfähigen Wärmespeichern ist eine zentrale Voraussetzung, um auch die Energiewende im Wärmebereich zu schaffen. Eine besondere Herausforderung sind die Entwicklung und der Einsatz von Langzeitspeichern, deren Kapazität in Verbindung mit einem Wärmenetz zur Versorgung von Wohngebieten über mehrere Monate reichen. Die derzeit zur Anwendung kommenden Latentwärmespeicher (mit den Speichermedien u.a. Paraffin, Eis, Salzlösungen und Zeolith) müssen hinsichtlich Effizienz und Kapazität weiterentwickelt und marktfähig gemacht werden.

Verbesserte Verfahren zur effizienten Wärmenutzung sind auch in der Prozessindustrie erforderlich, in der große Mengen thermischer Energie (Wärme) benötigt werden. Dazu gehören verbesserte Techniken kaskadierter Nutzung der thermischen Energie und das Upgrading von Wärme (Exergie- bzw. Temperatursteigerung) u.a. durch hocheffiziente Wärmepumpen. Für solche komplexen, innerbetrieblichen Wärmenutzungen fehlen jedoch die erforderlichen Konzepte und Technologien.

Eine besondere Herausforderung für die nahe Zukunft ist die Bereitstellung von Klimaanlageanlagen, die sehr energieintensiv sind und in Anbetracht des Klimawandels mit zunehmenden Hitzeperioden immer stärker gefragt werden. Der Energieverbrauch der heute eingesetzten Klimatechniken bzw. Klimatisierungssysteme hat zwar in den letzten Jahren stetig abgenommen, muss aber durch neue Technologien weiter gesenkt werden.

### **3.4 Mobilität**

Mobilität ist in Deutschland der einzige Bereich, in dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen in jüngster Vergangenheit gestiegen sind und in dem der Anteil der erneuerbaren Energien mit 5,6% am Gesamtenergieverbrauch extrem niedrig liegt. Die Verkehrswende ist deshalb eine gewaltige Herausforderung, die einen tiefgreifenden Wandel des bestehenden Verkehrssystems und

innovative Lösungen mit einem ganzheitlichen, integrierten Ansatz und einer auf die jeweiligen Verkehrsträger zugeschnittene Kombination von Technologien erfordert. Ein wichtiger Baustein dieses Ansatzes ist die batteriebasierte Elektromobilität mit „grünem“ Strom, die heute schon einen hohen technologischen Stand erreicht hat und ihre Stellung im derzeitigen Verkehrssystem durch den Einsatz neuer Technologie weiter ausbauen wird. Einen Beitrag zur Elektromobilität können die Superkondensatoren liefern, die zwar schnell aufgeladen werden können, aber eine nur kurze Reichweite und einen hohen Bedarf an Ladestationen aufweisen und deshalb nur für spezifische Anwendungen, z.B. für Stadtbusse, geeignet sind. Diese Technologie muss leistungsfähiger gemacht werden, um für einen kostengünstigen Hybridantrieb genutzt werden zu können.

Dringender Entwicklungsbedarf wird bei der Weiterentwicklung der Batterien u.a. hinsichtlich der Ladekapazitäten und Schnellladefähigkeit sowie intelligenter Batteriemanagementsysteme und Ausbau der Ladeinfrastruktur mit leistungsfähigen Ultraschnellladestationen und intelligenter Netztechnologie gesehen, der sich nicht nur auf die Autobahnen beschränken darf, sondern auch öffentliche Großparkplätze (u.a. bei Einkaufszentren) und Kundenparkplätze umfassen muss. Weil ein Großteil der Ladevorgänge zuhause stattfindet, ist der Ausbau privater, netzverträglicher Ladeinfrastruktur erforderlich. Insbesondere im Umfeld größerer Wohnanlagen sind intelligent skalierende Lademöglichkeiten bereitzustellen. Wichtig wäre auch die Weiterentwicklung von mobilen Ladestationen, die u.a. bei Bedarf bei Baustellen und Großveranstaltungen eingesetzt werden können.

Die wasserstoff-basierte Mobilität unter Einsatz von „grünem“ Wasserstoff sollte nur zur Anwendung kommen, wenn der direkte Einsatz von Strom technisch nicht machbar ist. Für diesen Fall kommen Brennstoffzellen zum Einsatz, die jedoch noch einen erheblichen Entwicklungsbedarf aufweisen und effizienter, kostengünstiger und langlebiger werden müssen. Zentrale Anwendungen findet diese Technologie bei schweren Nutzfahrzeugen sowie bei Bahnen und Schiffen.

Die Weiterentwicklung von Verfahren und Anlagen zur kostengünstigen Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus „grünem“ Strom, so z.B. von Kerosin und Methanol, ist eine weitere technologische Herausforderung, die gelöst werden muss, wenn der Luftverkehr CO<sub>2</sub>-neutral gestaltet werden soll. Auch muss in Zukunft stärker auf neuartige Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen (z.B. aus Stroh) oder aus Algen gesetzt und die dafür erforderlichen Technologien entwickelt werden. Angesichts des begrenzten Biomasse-Potenzials muss der Einsatz von

Biokraftstoffen auf Bereiche beschränkt sein, der nicht durch „grünen“ Strom oder „grünen“ Wasserstoff abgedeckt werden können.

Zukunftsweisend ist die Technologie des „bidirektionalen Ladens“, mit der das an das Stromnetz angeschlossene Fahrzeug sowohl laden als auch entladen kann (Vehicle-to-Grid-Technologie). Dadurch werden zusätzliche virtuelle Speicherkapazitäten bereitgestellt und Lastspitzen im Stromnetz kompensiert bzw. geglättet. Die dazu erforderlichen Ladestationen und Software müssen weiterentwickelt und noch ein regulatorischer Rahmen geschaffen werden, um diese zukunftsweisende Technologie umfassend nutzen zu können. Voraussetzung ist die Entwicklung von Batterien ohne merkliche Degradation.

Einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrswende kann auch der Einsatz Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) leisten, durch die der zukünftige Straßenverkehr effizienter und umweltfreundlicher gestaltet werden kann. Die dabei eingesetzten Informations- und Kommunikationstechnologien sind weiterzuentwickeln und möglichst schnell einzuführen.

### 3.5 Industrie und Wirtschaft

Um die Klimaschutzziele in der Industrie zu erreichen, ist die Energieeffizienz entlang des gesamten Lebenszyklus der Produkte, beginnend mit der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung bis hin zum Recycling zu steigern, Prozesstechnologien für die Produktion von „grünen“ Produkten und biobasierten Werkstoffen zu entwickeln und den Einsatz von fossilen Energieträgern zur Industrieheizung durch regenerative Energiequellen zu ersetzen. Prozessübergreifende Konzepte zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sind derzeit in Ansätzen verfügbar und erfordern weitere ambitionierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um belastbare Daten über die Einsparpotenziale sowie über die ökonomische und ökologische Leistungsfähigkeit derartiger Lösungen bereitstellen zu können. Eine besondere Rolle spielt dabei die Digitalisierung, die weiter vorangetrieben werden muss.

Zentraler Rohstoff in der chemischen Industrie ist der Kohlenstoff, der bisher überwiegend aus Erdöl und Erdgas gewonnen wird, in Zukunft aber durch andere klimaneutrale Verfahren bereitgestellt werden muss. Ein möglicher Ansatz ist die Nutzung von CO<sub>2</sub>, das aus der Atmosphäre (Air Carbon Capture) oder aus Rauchgasen von Biomassekraftwerken (BioEnergy with Carbon Capture) abgeschieden wird und unter Nutzung von „grünem“ Wasserstoff in Methanol überführt werden kann. Methanol kann vielfach eingesetzt werden und ist eine Schlüsselsubstanz für die Synthese vieler chemischer Ausgangsprodukte.

Industrielle Anwendung können diese innovativen Verfahren auch bei der Anreicherung und langfristigen Speicherung von atmosphärischem Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage - CCS) finden, um die unvermeidbaren Treibhausgasemissionen durch anthropogener Aktivitäten - so u.a. in der Landwirtschaft und bei der Zementproduktion – auszugleichen („negative CO<sub>2</sub>-Emissionen“) und damit die Voraussetzung zum Erreichen der national und international beschlossenen Klimaziele zu schaffen. Allerdings ist noch die Frage offen, wo und wie das gesammelte CO<sub>2</sub> dauerhaft gespeichert werden kann. Innovative Ansätze sind die Verpressung des angereicherten CO<sub>2</sub> in ausgebeutete Gas- oder Erdöllagerstätten sowie in saline Aquiferen und Basaltgestein, wobei sichergestellt sein muss, dass das eingelagerte CO<sub>2</sub> dauerhaft und vollständig in den Speichern verbleibt. Eine weitere Möglichkeit ist die Einleitung des CO<sub>2</sub> in die Tiefsee. Diese Speicher-Technologien beinhalten aber noch erhebliche Risiken, die im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten untersucht werden müssen, bevor sie breite Anwendung finden.

Eine weitere innovative Maßnahme zur längerfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung ist der Einsatz von Holz in der Bauwirtschaft, durch die atmosphärisches Kohlendioxid über lange Zeit gebunden werden kann. Um dieses Potenzial verstärkt zu nutzen, muss die Forschung für innovatives Bauen mit Holz, hier insb. für einen verbesserten Brandschutz, weiter ausgebaut werden. Eine innovative Maßnahme zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung wäre auch, die zunehmend dezentralen Stromerzeugungsanlagen mit dem Aufbau von Produktionsstätten zu verbinden, die neue und stromintensive Technologien einsetzen. Ein Beispiel dafür wären Rechenzentren, die aufgrund fortschreitender Digitalisierung zunehmende Rechenleistung aufweisen, die durch dezentrale Computer Cloud-Lösungen abgedeckt werden können.