



Education in Hydrogen Technologies Area

WASSERSTOFFFAHRZEUGE MIT BRENNSTOFFZELLE



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

INHALT

Inhalt.....	2
Einleitung - Gründe für den Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff.....	4
1 Wasserstoff als Energieträger	6
1.1 Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen	7
1.1.1 Dampfreformierung von Erdgas	7
1.1.2 Partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen	7
1.1.3 Kohlevergasung	8
1.2 Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser	8
1.3 Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse	8
1.4 Herstellung von Wasserstoff aus alternativen Energiequellen	9
1.5 Referenzen	9
1.6 Fragen am Ende des Kapitels:.....	9
2 Brennstoffzellen	10
2.1 Einleitung.....	10
2.2 Historische Entwicklung	10
2.3 Prinzip.....	11
2.4 Arten von Brennstoffzellen	13
2.4.1 Alkalische Elektrolyt-Brennstoffzellen (AFC).....	13
2.4.2 Polymermembran-Brennstoffzellen (PEMFC)	13
2.4.3 Phosphorsäure-Brennstoffzellen (PAFC)	13
2.4.4 Geschmolzene Karbonat-Brennstoffzellen (MCFC).....	14
2.4.5 Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC).....	14
2.5 Fragen am Ende des Kapitels:.....	14
3 Elektromotoren in Fahrzeugen.....	14
3.1 Gleichstrommotoren (DC)	15
3.1.1 Separat erregter Gleichstrommotor.....	16
3.1.2 Serie Gleichstrommotor	16
3.1.3 Paralleler Gleichstrommotor	17
3.1.4 Zusammengesetzter Gleichstrommotor	18
3.1.5 Bürstenloser Gleichstrommotor.....	18
3.1.6 Zusammenfassung.....	19
3.2 AC-Motoren (Wechselstrom)	20

4.2.1	Asynchronmotor.....	21
3.2.1	Querflussmotor	22
3.2.2	Synchronmotor.....	22
3.2.3	Geregelter Reluktanzmotor.....	23
3.2.4	Zusammenfassung.....	25
3.3	Fragen am Ende des Kapitels:.....	26
4	Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge	26
4.1	Japanischer Toyota Mirai ist ein in Serie produziertes wasserstoffbetriebenes Auto.....	27
4.1.1	Fahrleistungen (Toyota-Daten November 2014)	27
4.2	Ein weiteres in Serie produziertes wasserstoffbetriebenes Auto ist der Hyundai Nexo	28
4.3	Wasserstoffbus Solaris Urbino 12	29
4.4	Wasserstoffbus ŠKODA H'CITY 12	30
4.5	Hyundai HFC BUS.....	30
4.6	Wasserstoffzug der Deutschen Bahn	31
4.7	Fragen am Ende des Kapitels:.....	31

Gefördert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Bildung und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.

EINLEITUNG - GRÜNDE FÜR DEN EINSATZ VON WASSERSTOFF ALS KRAFTSTOFF

Gründe für den Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff in Fahrzeugen – Reduzierung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe und der Produktion schädlicher Emissionen

Es wird erwartet, dass die Produktion fossiler Brennstoffe (hauptsächlich Erdöl und Erdgas) in Zukunft zurückgehen und ihre Preise weiter steigen werden. Ein alternativer Brennstoff, um sie zu ersetzen, könnte Wasserstoff sein, da seine Wasserreserven nahezu unerschöpflich sind.

Die Verbrennungswärme von Wasserstoff wurde von Naturwissenschaftlern und Technikern schon vor langer Zeit erkannt, aber erst Anfang des 20. Jahrhunderts begann ihre industrielle Nutzung, vor allem zum Schweißen oder als Hydrier- und Reduktionsmittel. Die ersten Experimente mit Wasserstoff als Treibstoff für Raketentriebwerke begannen Anfang der 1950er Jahre und erreichten erst Mitte der 1960er Jahre die Umsetzungsphase.

Der Hauptvorteil von Wasserstoff als Kraftstoff ist seine saubere Verbrennung. Wenn Wasserstoff in Verbrennungsmotoren oder in Brennstoffzellen eingesetzt wird, erzeugt er thermische, mechanische oder elektrische Energie und ein harmloses Nebenprodukt: Wasser. Es entstehen keine CO₂-Abfälle oder andere Verbrennungsnebenprodukte, die bei der Verbrennung von festen, flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffbrennstoffen entstehen. CO₂ ist der Hauptbestandteil von Treibhausgasen, und die Wasserstoffwirtschaft zielt vor allem darauf ab, deren Entstehung zu begrenzen."

Die Wasserstoffreserven im Wasser sind nahezu unerschöpflich. Es hat eine hohe Energiedichte pro Gewichtseinheit und kann transportiert und gelagert werden. Aus ökologischer Sicht ist die Verbrennung von Wasserstoff sauberer als die Verbrennung fossiler Brennstoffe, und das produzierte Wasser wird nicht von giftigen Verbindungen oder Treibhausgasen begleitet.

Im industriellen Maßstab wird Wasserstoff zum einen durch petrochemische Prozesse, einschließlich Kohlevergasung (90 % der Produktion), und durch Elektrolyse von Wasser hergestellt. Es ist auch ein wichtiges Nebenprodukt oder Bestandteil von Gasen, die in Raffinerien, Kokereien und der elektrochemischen Produktion auf der Basis wässriger Lösungen anorganischer Säuren oder Salze entstehen.

Wasserstoff ist ein farb-, geschmacks- und geruchloses Gas und das leichteste aller Gase.

Chemische Formel: H₂

CAS-Nummer: 1333-74-0

EG-Nummer: 215-605-7

UN-Nummer: 1049

Wasserstoff ist mit einem Anteil von etwa 75 % das einfachste und am häufigsten vorkommende Element im Universum. Obwohl molekularer Wasserstoff (H₂) auf der Erde selten ist, kann er in Wasser und Kohlenwasserstoffen gebunden gefunden werden.

Die geringe Dichte stellt jedoch eine Herausforderung bei der Speicherung und Verteilung dar. Da eine Verflüssigung erst nach dem Abkühlen unter die kritische Temperatur von 33,15 K möglich ist

Das Hauptziel der Einführung der Wasserstoffwirtschaft ist es, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.

Die Bedeutung von Wasserstoff wurde wiederholt in Strategiedokumenten für den Green Deal betont, darunter die "Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa".

Physikalische Eigenschaften

Molekulargewicht: 2,02 g

Siedepunkt: -252,9 °C

Tripelpunkt: -259,2 °C

Kritische Temperatur: -239,9 °C

Kritischer Druck: 12,8 atm

Gasdichte bei 0 °C und 1 atm (Luft = 1): 0,089 g/l

Gasdichte bei 25 °C und 1 atm (Luft = 1): 0,069 g/l

Selbstentzündungstemperatur in Luft bei 1 atm: 570 °C

Obwohl Wasserstoff bei Raumtemperatur relativ inaktiv ist, reagiert er bei erhöhten Temperaturen mit den meisten anderen Elementen. Wasserstoff kann beispielsweise Metalloxide bei erhöhten Temperaturen reduzieren. Diese Reaktivität bei erhöhten Temperaturen ist in den meisten industriellen Wasserstoffanlagen außerhalb des Energiesektors weit verbreitet.

Daher kann Wasserstoff als unverträglich mit Oxidationsmitteln wie Luft, Sauerstoff und Halogenen angesehen werden. So reagieren beispielsweise Fluor und Wasserstoff bei einer Temperatur von 250 °C in Gegenwart von Verunreinigungen. Gemische aus Chlor und Wasserstoff sind bei Lichteinwirkung explosionsgefährdet, und Lithium verbrennt in einer Wasserstoffatmosphäre.

Wasserstoff ist ein hochentzündliches Gas und verbrennt an der Luft mit einer blassblauen Flamme, die in Konzentrationen von 4 bis 75 Vol.-% unter Standardbedingungen praktisch unsichtbar ist.

Darüber hinaus wird Wasserstoff bei erhöhtem Druck verarbeitet. Wenn es ein Leck gibt, verursacht der Wasserstoff einen umgekehrten Joule-Thompson-Effekt, der dazu führt, dass das austretende Gas heiß genug wird, um sich sofort zu entzünden. Dadurch erhöht sich die geringe Mindestzündenergie des brennbaren Gemisches aus Wasserstoff und Luft und macht es im Vergleich zu anderen brennbaren Gasen empfindlicher gegenüber der Zündwahrscheinlichkeit.

Auch die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung ist im Vergleich zu anderen brennbaren Gasen höher, da das Wasserstoffmolekül aufgrund seiner geringen Größe leichter durch kleine Löcher entweichen kann. Diese Eigenschaft ist der Grund, warum Geräte, die Wasserstoff enthalten sollen, manchmal mit Helium, einem Edelgas, auf Dichtheit geprüft werden, da seine Molekülgröße mit der von Wasserstoff vergleichbar ist.

Da Wasserstoff leichter als Luft ist, steigt das Gas leicht in die Atmosphäre auf, im Gegensatz zu Propangas, das in Bodennähe verbleibt, was die Explosionsgefahr erhöht. Die Praxis zeigt, dass sich Wasserstoff im Freien nicht entzündet.

Die Hauptgefahr bei der Verwendung von Wasserstoff ist daher die Bildung von brennbaren Gemischen mit Luft, die bei Einwirkung einer Zündquelle zu einem Brand oder möglicherweise zu einer Verpuffung führen können. Der Spalt, in dem sich eine Wasserstoffflamme ausbreiten kann, ist viel schmaler als bei den meisten anderen Gasen, was es sehr schwierig macht, Elektromotoren zu konstruieren, die für den Einsatz in Atmosphären geeignet sind, in denen ein brennbares Gemisch aus Wasserstoff und Luft vorhanden sein kann.

Fragen:

1. Warum gibt es Bestrebungen, fossile Brennstoffe durch Wasserstoff zu ersetzen?
2. Wann und zu welchem Zweck wurde Wasserstoff erstmals industriell genutzt?
3. Seit wann wird Wasserstoff als Treibstoff für Raketentriebwerke verwendet?
4. Was ist der Hauptvorteil von Wasserstoff als Kraftstoff?
5. Was sind die weiteren Vorteile von Wasserstoff als Kraftstoff?

1 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER

ZIELE:

In diesem Kapitel werden wir uns kurz mit Möglichkeiten der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen oder durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Strom befassen, der beispielsweise aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Wasserstofferzeugung, fossile Brennstoffe, Dampfreformierung, partielle Oxidation, Elektrolyse, alternative Quellen

Mehr über die Wasserstoffproduktion erfahren Sie in einem anderen Modul, aber zum Zwecke eines allgemeinen Überblicks in diesem Abschnitt erwähnen wir es auch hier.

Eine der Alternativen, um Kohlenwasserstoff-Brennstoffe zu ersetzen, ist der Einsatz von Wasserstoff, einem Stoff, der in der Natur kaum alleine vorkommt und daher hergestellt werden muss.

Eine Möglichkeit, es zu gewinnen, ist die Gewinnung aus fossilen Brennstoffen wie Öl, Erdgas und Kohle, aber dies steht im Gegensatz zur Reduzierung der Produktion dieser Brennstoffe.

Die zweite Möglichkeit ist die Elektrolyse von Wasser, die eine erhebliche Menge an elektrischer Energie erfordert, die auf irgendeine Weise erzeugt werden muss, wie z. B. in konventionellen Kraftwerken, die jedoch fossile Brennstoffe verbrauchen.

Die Wasserstoffherzeugung kann unterteilt werden in:

- Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen
- Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse
- Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse
- Herstellung von Wasserstoff aus alternativen Energiequellen.

1.1 HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF AUS FOSSILEN BRENNSTOFFEN

1.1.1 DAMPFREFORMIERUNG VON ERDGAS

- die derzeit am weitesten verbreitete Methode der Wasserstoffherzeugung

Prozess:

1. Entschwefelung von Erdgas
2. Methanreformierung mit Dampf
3. CO-Umwandlung
4. CO₂-Wäsche
5. Methanisierung

Vorteil: niedrigste Produktionskosten (36-38% niedriger als bei der Wasserstoffproduktion durch partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen und Kohlevergasung).

1.1.2 PARTIELLE OXIDATION VON KOHLENWASSERSTOFFEN

- Die zweithäufigste Art der Wasserstoffherzeugung weltweit. Als Rohstoffe können sowohl gasförmige als auch flüssige Rohstoffe aus der Primär- und Sekundärölverarbeitung verwendet werden.
- Das Rohmaterial wird mit Dampf und Sauerstoff bei Temperaturen von 1300-1430 °C vergast.
- Die hohe Temperatur und das Fehlen eines Katalysators ermöglichen die Verwendung von Schwerölfractionen, Heizölen, Vakuumrückständen und Propanasphalten als Rohstoffe, die sich durch eine erhebliche Rußbildung auszeichnen.

Nachteil: Bildung von Kohlenmonoxid zusammen mit Kohlendioxid.

1.1.3 KOHLEVERGASUNG

- Die Herstellung von Wasserstoff durch Vergasung von Kohle ähnelt der Herstellung durch partielle Oxidation von Erdölrückständen.

Prozess:

1. Erzeugung von Synthesegas durch Vergasung von Kohle mit Sauerstoff oder Luft und Dampf in einem Vergasungsgenerator
2. Kühlung des heißen Synthesegases
3. Gasreinigung und Abtrennung von Wasserstoff aus dem Gas

Nachteil: höhere Produktionskosten

1.2 HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF DURCH ELEKTROLYSE VON WASSER

- Klassische, bewährte Produktionstechnik

Prozess:

- Ein elektrischer Gleichstrom, der durch zwei in Wasser getauchte Metallelektroden fließt, wird verwendet, um Wasser in gasförmigen Wasserstoff und gasförmigen Sauerstoff zu dissoziieren.
- Die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse kann auch mit elektrischer Energie erfolgen, die aus erneuerbaren Quellen wie Solar-, Windenergie-, Wasser- oder Kernenergie erzeugt wird.

1.3 HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF AUS BIOMASSE

Die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse lässt sich in zwei Prozesse unterteilen:

- Dampfreformierung von Biomasse – Pyrolyse
- Biotechnologische Verfahren – Fermentation

Eine weitere mögliche Methode ist die Verwendung von Biomassederivaten, wie Bioethanol und Biogas, aber hier ist es besser, diese Derivate direkt als Kraftstoff zu verwenden.

Die auf diese Weise verarbeiteten Substrate reichen von festen Siedlungsabfällen, Abfällen aus der Lebensmittelindustrie, Öl bis hin zu gezielt angebaute oder verschwendete landwirtschaftlicher Biomasse.

1.4 HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF AUS ALTERNATIVEN ENERGIEQUELLEN

Wie oben beschrieben, kann die Wasserelektrolyse auch mit Strom aus erneuerbaren Quellen durchgeführt werden.

Die vielversprechendste Energiequelle in diesem Bereich ist die Solarenergie. Um die Effizienz der Wasserstoffproduktion zu erhöhen, werden neue Methoden der Wasserelektrolyse entwickelt, wie z.B.:

- Hochtemperatur-Elektrolyse (Thermolyse)
 - o Ein Teil der Energie wird als elektrische Energie zugeführt, der Rest als Wärme
 - o Der Vorteil ist eine gesteigerte Prozesseffizienz durch reduzierten Stromverbrauch
- Thermochemische Kreisläufe
 - o Wasser wird durch eine Reihe chemischer Reaktionen, die durch Wärme oder eine Kombination aus Wärme und Elektrizität in Hybridzyklen ausgelöst werden (der bekannteste ist der thermochemische Kreislauf der Firma Westinghouse – Schwefelsäure-Hybridzyklus) in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten.

1.5 REFERENZEN

HROMÁDKO, Jan. Spezielle Verbrennungsmotoren und alternative Antriebe: ein umfassender Überblick über das Thema für alle Arten von technischen Kfz-Schulen. Prag: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

1.6 FRAGEN AM ENDE DES KAPITELS:

1. Warum ist es notwendig, Wasserstoff zu produzieren, um ihn als Energieträger zu nutzen?
2. Warum wird Wasserstoff für die Energieerzeugung benötigt?
3. Was ist der Vorteil der Dampfreformierung von Erdgas?
4. Was ist der Rohstoff für die partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen?
5. Was ist der Nachteil der partiellen Oxidation von Kohlenwasserstoffen?
6. Was ist der Nachteil der Herstellung von Wasserstoff durch Kohlevergasung?
7. Was ist der Prozess der Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse von Wasser?
8. Was ist Fermentation?
9. Welche Substrate werden verwendet, um Wasserstoff aus Biomasse herzustellen?

10. Die Elektrolyse von Wasser kann auch mit Strom aus erneuerbaren Quellen erfolgen. Listen Sie einige auf. Welche dieser Quellen ist die vielversprechendste?
11. Was sind die neuen Varianten der Wasserzersetzung?

2 BRENNSTOFFZELLEN

ZIELE:

Ziel dieses Kapitels ist es, das Prinzip der Stromerzeugung mit einer Brennstoffzelle zu verstehen und ihre verschiedenen Typen kennenzulernen.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Brennstoffzelle, Oxidationsmittel, Wasserstoff, Membran, feste Oxide

2.1 EINLEITUNG

Alle heute produzierten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor verbrennen fossile Brennstoffe und belasten damit die Umwelt. Im Vergleich dazu bieten elektrische Batteriefahrzeuge zahlreiche Vorteile. Sie sind leise, geben keine Schadstoffe an die Umwelt ab, benötigen für den Betrieb kein Getriebe und ihre Elektromotoren sind hocheffizient. Ein großer Nachteil von batteriebetriebenen Fahrzeugen ist jedoch ihr hohes Gewicht und ihre begrenzte Batterielebensdauer. Brennstoffzellen werden als Alternative zu diesen schweren Batterien vorgestellt. Fahrzeuge, die mit Brennstoffzellen angetrieben werden, belasten zudem die Umwelt, sind nicht auf fossile Brennstoffe angewiesen und hocheffizient. Brennstoffzellen können unter bestimmten Bedingungen unbegrenzt Energie bereitstellen und ihre Leistung kann in einem weiten Bereich leicht eingestellt werden.

2.2 HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Die Zersetzung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff mit Hilfe eines elektrischen Stroms wurde erstmals 1802 von Sir Davy Humphrey demonstriert. Die Schlussfolgerung seines Experiments war, dass eine kleine elektrische Ladung an den Elektroden auch dann noch vorhanden war, wenn die Quelle des elektrischen Stroms bereits abgeschaltet wurde. Er war jedoch nicht in der Lage, dieses Phänomen adäquat zu erklären.

Das Grundprinzip der Brennstoffzelle wurde 1838 von dem Schweizer Wissenschaftler Christian Friedrich Schönbein entdeckt, der es ein Jahr später in einer seiner Publikationen beschrieb. Der Artikel diskutierte die Entdeckung von Ozon und die Reaktion zwischen Sauerstoff und Wasserstoff, die ein elektrisches Potential an den Elektroden erzeugte. Sir William Grove, der als "Vater" der

Brennstoffzelle gilt, baute auf Basis dieser theoretischen Arbeiten den ersten funktionierenden Prototypen. Im Jahr 1843 schrieb er über dieses Thema in einem Artikel, der sich auf die Speicherung elektrischer Energie mit Hilfe von Gasen konzentrierte.

Der Begriff "Brennstoffzelle" wurde vermutlich erstmals 1889 von Charles Langer und Ludwig Mond verwendet, als sie versuchten, eine mit Lampengas betriebene Zelle zu entwickeln. Trotz Verbesserungen von William Jacques, der Phosphorsäure als Elektrolyt verwendete, blieben die Kosten für die Herstellung dieser Zelle zu hoch. Nach der Erfindung des Dynamos durch Werner von Siemens geriet die Brennstoffzelle in Vergessenheit und erst 1952 wurde der erste brauchbare Prototyp mit einer Leistung von 5 kW von ihrem Erfinder Francis Thomas Bacon vorgestellt. Dieser Prototyp verwendete Kalihydroxid als Elektrolyt.

In den 1960er Jahren wurde die Wasserstoff-Brennstoffzelle aufgrund der Weltraumforschung zu einem wichtigen und viel beachteten Thema, da sie im Vergleich zu anderen Energieträgern ein günstigeres Energie-Gewichts-Verhältnis aufweist. Brennstoffzellen wurden zum Beispiel in Apollo-Raumschiffen eingebaut und sie trieben auch die Space Shuttles an, wobei jeder Orbiter drei Brennstoffzellen mit einer Dauerleistung von jeweils 7 kW und einer Spitzenleistung von 12 kW beherbergte. Einer der Hauptvorteile war, dass das Abfallprodukt der Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle reines Wasser war, das im Wassersystem des Shuttles verwendet werden konnte.

Seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs war es der deutschen Marine verboten, Atom-U-Boote einzusetzen, und suchte daher nach einer alternativen elektrischen Energiequelle. Eine Lösung war der Einsatz von Brennstoffzellen, wobei Zellen 30 kW Leistung erzeugten, die in älteren Schiffsgenerationen verwendet wurden, und Zellen mit 120 kW Leistung in neueren Schiffen. Von 2005 bis 2008 wurde in Norwegen die erste Wasserstoff-Autobahn namens HyNor mit einer Länge von 560 km in Betrieb genommen.

Im Jahr 2008 wurde in den Städten Los Angeles, San Francisco und Las Vegas in den USA ein Netz von Wasserstofftankstellen und Brennstoffzellenautovermietungen in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um Honda FCX Clarity Fahrzeuge mit einer 100 kW starken PEM-Brennstoffzelle. Im Juni 2009 wurde in Tschechien der TriHyBus in Betrieb genommen, der erste Bus mit Brennstoffzelle im ehemaligen Ostblock. Im Oktober 2009 wurde in Neratovice die erste Wasserstofftankstelle in den Ländern des ehemaligen Ostblocks in Betrieb genommen.

2.3 PRINZIP

Brennstoffzellen werden im Allgemeinen als elektrochemische Geräte definiert und ihre Funktion besteht darin, Wasserstoff (Kraftstoff) und Sauerstoff (Oxidationsmittel) in elektrische Energie umzuwandeln. Diese galvanischen Zellen enthalten zwei Elektroden, die durch eine Membran oder einen Elektrolyten getrennt sind. Der Brennstoff (Wasserstoff) wird der positiven Elektrode zugeführt, während das Oxidationsmittel (Sauerstoff) der negativen Elektrode zugeführt wird. Elektronen werden an der positiven Elektrode (Anode) erzeugt und fließen durch einen externen Stromkreis zur negativen Elektrode (Kathode), wodurch ein elektrischer Strom erzeugt wird. Theoretisch kann eine Brennstoffzelle kontinuierlich betrieben werden, solange die Versorgung der Elektroden mit Brennstoff oder Oxidationsmittel nicht unterbrochen wird.

Es gibt viele Kombinationen von Kraftstoff und Oxidationsmittel. Zum Beispiel verwendet eine Knallgaszelle Wasserstoff als Brennstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel, wodurch reines Wasser als Abfallprodukt entsteht. Andere Zellen nutzen Kohlenwasserstoffe und Alkohole als Brennstoffe. Anstelle von reinem Sauerstoff können Luft, Chlor oder Chlordioxid als Oxidationsmittel verwendet werden.

Elektroden können aus Kohlenstoff (Nanoröhren) oder verschiedenen Metallen bestehen, und ihre Effizienz kann durch Beschichtung mit Katalysatoren wie Palladium oder Platin erhöht werden.

Als Elektrolyt können verschiedene Säuren, meist Phosphorsäure (H₃PO₄), oder Basen, am häufigsten Kaliumhydroxid (KOH), Keramiken oder Membranen dienen. In bestimmten Brennstoffzellen wird Gas unter hohem Druck als Elektrolyt verwendet. Der heute am weitesten verbreitete Elektrolyt ist KOH, der bereits im Apollo-Projekt in Zellen eingesetzt wurde. Der Nachteil dieses Elektrolyten besteht jedoch darin, dass das Oxidationsmittel von CO₂ gereinigt werden muss, um zu verhindern, dass Kohlendioxid mit ihm reagiert, da das entstehende Kaliumcarbonat die Funktion des Elektrolyten nicht mehr erfüllen würde.

Die resultierende elektrische Spannung liegt theoretisch bei etwa 1,23 Volt und hängt von der Art des verwendeten Brennstoffs und der Qualität der Zelle ab. Derzeit erzeugen die am häufigsten verwendeten Zellen typischerweise eine Spannung von 0,5 - 0,95 V. Um eine höhere Spannung zu erreichen, können mehrere Brennstoffzellen in Reihe geschaltet werden. Die Größe des Stroms hängt von der Oberfläche der Zelle ab, und kommerziell erhältliche Zellen können heute etwa 0,5 W/cm² liefern.

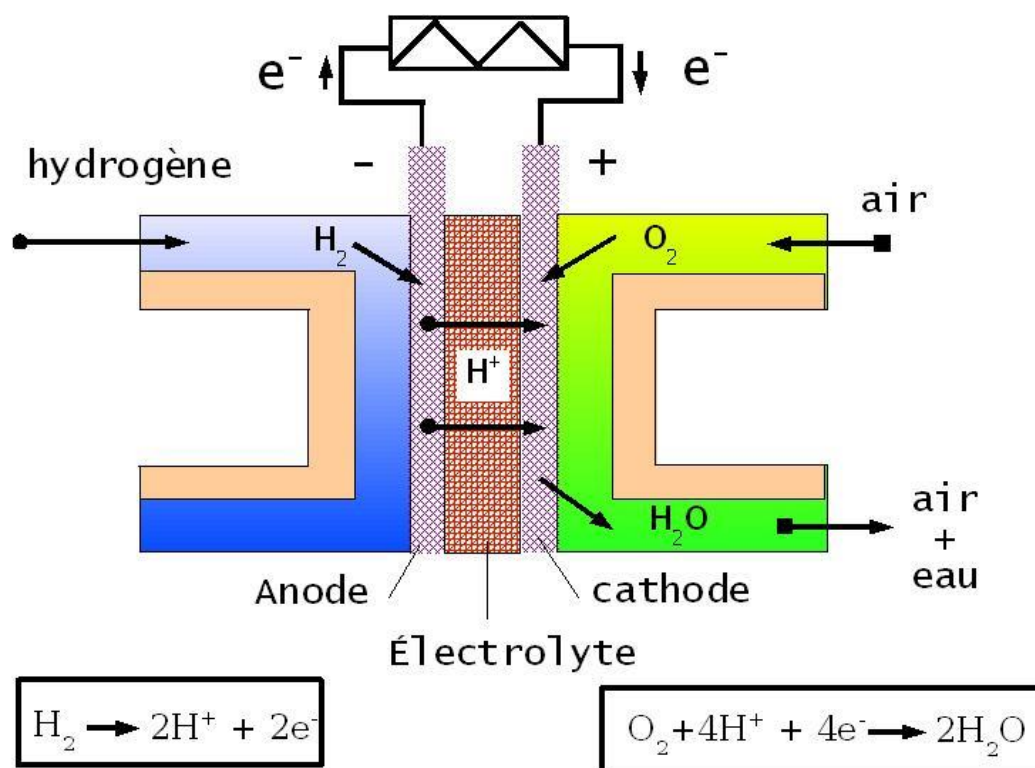


Bild 1 – Schematische Darstellung von Reaktionen in einer Brennstoffzelle (Quelle: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fuel_Zelle)

Der Brennstoff wird an der Anode katalytisch oxidiert, um Kationen zu erzeugen (z. B. Wasserstoff zu H^+). Diese Kationen gelangen durch die Membran oder in den Elektrolyten. Die freigesetzten Elektronen werden an der Anode gesammelt und wandern in Richtung des elektrischen Geräts. Da Elektronen eine negative Ladung tragen, fließt der elektrische Strom in die entgegengesetzte Richtung, von der Kathode (+), durch das elektrische Gerät zur Anode (-). An der Kathode wird das Oxidationsmittel zu Anionen (z. B. Sauerstoff zu O^{2-}) reduziert, die sich dann mit Kationen (z. B. Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser) verbinden.

2.4 ARTEN VON BRENNSTOFFZELLEN

Brennstoffzellen können nach ihrer Betriebstemperatur in Niedertemperatur- und Hochtemperaturzellen oder nach dem verwendeten Elektrolyten eingeteilt werden.

2.4.1 ALKALISCHE ELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (AFC)

Diese Zellen gehören zu den ältesten und verwenden als Elektrolyt eine wässrige Lösung aus alkalischem Hydroxid (NaOH, KOH), die in einer Asbestmatrix fixiert ist. Ihre Betriebstemperatur kann bis zu 230 °C erreichen. Als Brennstoff wird reiner Wasserstoff und als Oxidationsmittel reiner Sauerstoff oder kohlendioxidfreie Luft verwendet.

In diesen Zellen können verschiedene Arten von Katalysatoren verwendet werden, nicht nur solche auf Platinbasis. Nickel, Silber, deren Oxide oder Edelmetalle können verwendet werden. Diese Zellen haben vor allem im Weltraum oder in militärischen Anwendungen Verwendung gefunden.

2.4.2 POLYMERMEMBRAN-BRENNSTOFFZELLEN (PEMFC)

Eine Polymermembran wird bei dieser Art von Brennstoffzelle als Elektrolyt verwendet. Die Membran muss für Wasserstoffionen (Protonen) leitfähig sein und muss angefeuchtet werden, um richtig zu funktionieren. Am häufigsten werden sulfonierte Fluorpolymere (Nafionen) verwendet. Platin wird häufig als Katalysator verwendet, der in Form einer Gasdiffusionsschicht aufgetragen wird, um eine Gasdiffusionselektrode mit einem festen Katalysator zu erzeugen. Wasserstoff oder Methanol wird als Kraftstoff und Sauerstoff oder Luft als Oxidationsmittel verwendet. Die Betriebstemperatur dieses Zelltyps beträgt bis zu 90 °C und ist damit die beste Option für den Antrieb von Fahrzeugen.

2.4.3 PHOSPHORSÄURE-BRENNSTOFFZELLEN (PAFC)

Der in dieser Brennstoffzelle verwendete Elektrolyt besteht zu 100 % aus Phosphorsäure, die in einer Matrix fixiert ist, z. B. Asbest, Polybenzylimidazol. Die Betriebstemperatur dieser Zellen beträgt 150–220 °C, und Temperaturen über 180 °C haben den Vorteil, dass sich die Gleichgewichtskonstante zugunsten von Kohlendioxid verschiebt, wodurch das Problem der Kohlenmonoxidvergiftung beseitigt wird. In diesem Fall können wir Gas direkt aus der Dampfreformierung verwenden.

Auch hier wird Platin als Katalysator verwendet, und als Brennstoff wird Wasserstoff verwendet, der durch Dampfreformierung aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird. Luft wird als Oxidationsmittel verwendet. Diese Brennstoffzellen werden in Blockheizkraftwerken eingesetzt.

2.4.4 GESCHMOLZENE KARBONAT-BRENNSTOFFZELLEN (MCFC)

Als Elektrolyt wird in diesen Brennstoffzellen eine Schmelze aus einem Gemisch alkalischer Karbonate verwendet, deren Betriebstemperatur zwischen 600 und 700 °C liegt. Die genannten Karbonate bilden eine Schmelze aus hochleitfähigen Salzen.

Teure Katalysatoren werden in diesen Brennstoffzellen nicht benötigt, da die interne Umformung ihren Wirkungsgrad erhöht, so dass der Kraftstoff nicht extrem sauber sein muss. Als Brennstoff wird Gas aus der Dampfreformierung fossiler Brennstoffe oder Biogas verwendet. Luft wird als Oxidationsmittel verwendet. Diese Brennstoffzellen werden in Kraftwerken und Blockheizkraftwerken eingesetzt.

2.4.5 FESTOXID-BRENNSTOFFZELLEN (SOFC)

Bei dieser Art von Brennstoffzelle wird eine keramische Membran als Elektrolyt verwendet, und es werden keine teuren Katalysatoren benötigt. Diese Zellen arbeiten bei hohen Temperaturen (ca. 800-1000°C) und ihr Wirkungsgrad kann durch die Verwendung der Reaktionsprodukte in einer Expansionsturbine gesteigert werden. Als Brennstoff kann Gas aus der Dampfreformierung fossiler Brennstoffe und Biogas, Erdgas oder Biogas und Luft als Oxidationsmittel verwendet werden. Diese Art von Brennstoffzelle fand Anwendung in Blockheizkraftwerken und Kraftwerken.

2.5 FRAGEN AM ENDE DES KAPITELS:

- Was sind die Vorteile von batteriebetriebenen Fahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor?
- Wer hat den ersten funktionierenden Brennstoffzellen-Prototypen gebaut?
- Was ist das Abfallprodukt einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle?
- Was ist einer der größten Nachteile von elektrisch betriebenen Fahrzeugen?
- Was ist eine Brennstoffzelle?
- Woraus besteht eine Brennstoffzelle?

3 ELEKTROMOTOREN IN FAHRZEUGEN

ZIELE:

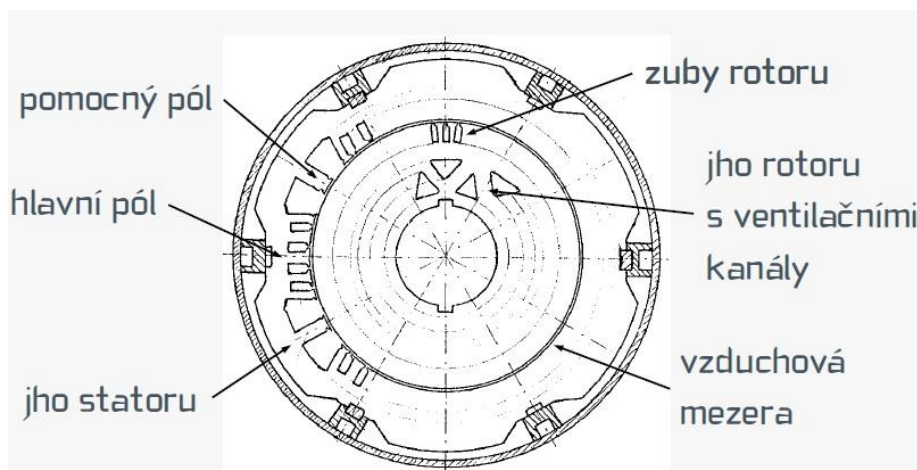
In diesem Abschnitt lernen wir die verschiedenen Arten von Elektromotoren für Wasserstofffahrzeuge, ihren Aufbau, ihre Eigenschaften, Vor- und Nachteile kennen.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Stator, Rotor, Kommutator, Erregerwicklung, Permanentmagnet, Drehmomentcharakteristik, synchron, asynchron, Reluktanzmotor

3.1 GLEICHSTROMMOTOREN (DC)

Der Gleichstrommotor ist einer der ältesten Motoren, und wie jeder Motor bestehen Gleichstrommotoren aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator kann aus Permanentmagneten oder Polen bestehen, die mit dem Rahmen verschraubt und am Ende mit Polverlängerungen verlängert werden. Um die Pole wird dann eine Feldwicklung gewickelt, und es können auch Hilfspole und Hilfswicklungen vorhanden sein. Der Rotor besteht aus Blechen mit Nuten, in denen die Arbeitswicklung platziert ist. Die Laken haben auch Belüftungslöcher. Der elektrische Strom zum Rotor wird über Bürsten zugeführt, die auf dem Kommutator aufliegen, der am Rotor montiert ist.



Hilfspol – Hauptpol – Statorjoch – Rotorzähne – Rotorjoch mit Entlüftungskanälen – Luftspalt

Bild 2 - Magnetkreis eines Gleichstrommotors

Das Magnetfeld, das durch die Feldwicklung im Stator angeregt wird, wirkt auf das Magnetfeld, das im Rotor aufgrund des Stroms erzeugt wird, der der Feldwicklung durch die Bürsten und den Kommutator zugeführt wird, was zu einer periodischen Änderung des Stroms führt, der zur Spule, auch als Anker bezeichnet, fließt. Dies wiederum induziert eine Rotationskraft oder ein Drehmoment, das ständig in Drehrichtung wirkt.

Je nach Art und Weise, wie Feldwicklung und Anker verbunden sind, können Gleichstrommotoren in Motoren mit externer Erregung oder Selbsterregung unterteilt werden. Motoren mit Selbsterregung werden weiter in Reihen-, Parallel- (Derivate) oder Reihenparallelmotoren (Verbundmotoren) eingeteilt.

3.1.1 SEPARAT ERREGTER GLEICHSTROMMOTOR

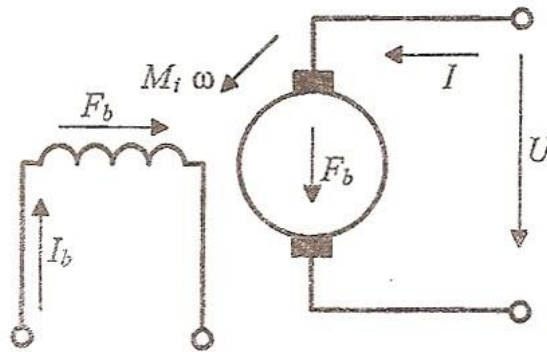


Bild 3 - Schematische Darstellung eines separat erregten Gleichstrommotors

Die Feldwicklung wird von einer separaten externen Quelle, wie z. B. einem Akkumulator, mit Strom versorgt. Die Regelung erfolgt durch Einstellen der Spannung am Rotor und des Erregerstroms. Gleichstrommotoren mit externer Erregung haben eine harte Drehmomentcharakteristik, die besonders für Traktionszwecke von Vorteil ist. Der Vorteil ist die einfache und reibungslose Geschwindigkeitsregelung über einen weiten Bereich und die Fähigkeit, reibungslos vom Fahren zum Bremsen überzugehen. Es hat jedoch ein geringeres Stillstands Drehmoment.

Darüber hinaus wird mit einer erhöhten Spannung im gesamten Motorsystem ein höherer Wirkungsgrad durch reduzierte Spannungsabfälle an den Bürsten erreicht. Dies führt auch zu einem geringeren Stromfluss im Motor und in den Verbindungsleitungen, was zu Vorteilen wie geringerem Gewicht, geringerer Größe und geringeren Produktionskosten führt. Diese Motoren haben eine hohe Überlastfähigkeit und können eine Stunde lang 20 % mehr Leistung als die Nenndauerleistung verarbeiten. Beim Anfahren können sie sogar kurzzeitig 100 % mehr Leistung verarbeiten. Diese Motoren sind in Elektrofahrzeugen weit verbreitet, da sie direkt von der Batterie angetrieben werden können.

3.1.2 SERIE GLEICHSTROMMOTOR

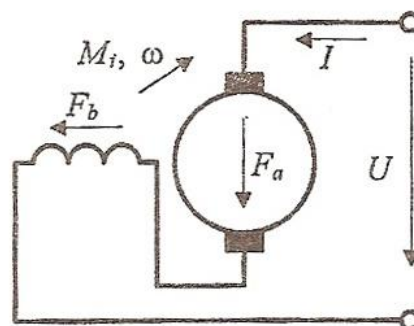


Bild 4 - Schematische Darstellung eines Reihen-Gleichstrommotors

Die Feldwicklung ist mit dem Anker in Reihe geschaltet, so dass der Strom im Anker auch der Feldstrom ist. Dies macht die Regelung des Motors einfach, da seine Spannung proportional zum erforderlichen Stromwert ist, so dass der Leistungsregler die Batteriespannung durch Umschalten oder Anpassen der Frequenz steuern kann. Der Serien-Elektromotor hat ein gutes Anlauf Drehmoment, aber die

Drehmomentcharakteristik ist sehr weich, mit einem schnellen Drehmomentabfall bei steigender Drehzahl. Wenn die Last reduziert wird, kann die Drehzahl so weit ansteigen, dass der Motor beschädigt werden kann. Daher ist es nicht empfehlenswert, ohne Belastung der Welle zu arbeiten. Diese Motoren werden in Elektroautos und elektrischen Traktionsfahrzeugen wie Zügen, U-Bahnen und Straßenbahnen eingesetzt, da sie ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen haben und die Drehzahlen je nach Last selbst anpassen können.

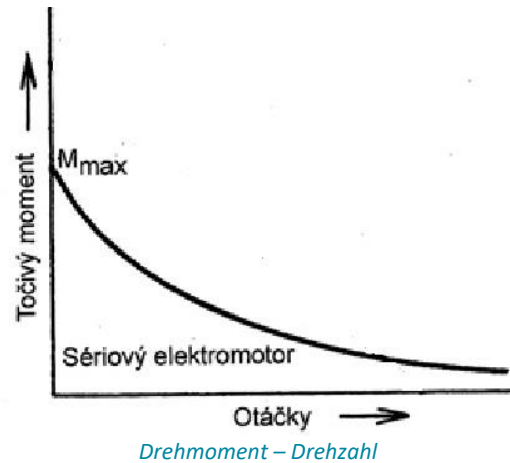


Bild 5 - Drehmomentcharakteristik eines Reihen-Gleichstrommotors

3.1.3 PARALLELER GLEICHSTROMMOTOR

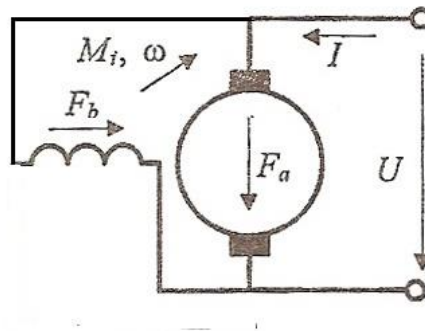


Bild 6 - Schematische Darstellung des parallelen Gleichstrommotors

Die Feldwicklung und die Ankerschaltung sind über separate Bedienelemente parallel mit der Quelle verbunden. Diese Art von Elektromotor kann einfach und stufenlos geregelt werden, jedoch in geringerem Maße als ein Gleichstrommotor mit externer Erregung. Sie haben eine härtere Drehmomentcharakteristik. Das Drehmoment nimmt mit zunehmender Drehzahl langsamer, wenn auch linear, ab. Darüber hinaus bremst der Motor auch leicht. Aus diesen Gründen wurde diese Art von Elektromotor in den meisten Elektrofahrzeugen verwendet.

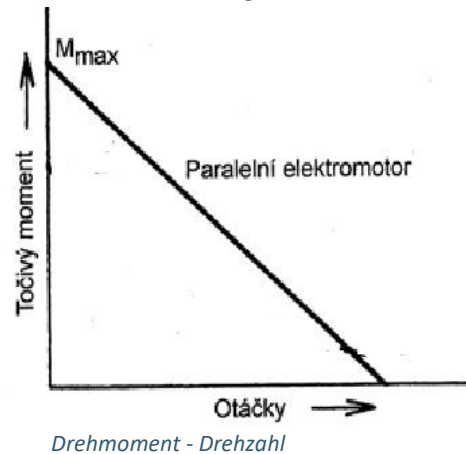


Bild 7 - Drehmomentcharakteristik eines parallelen Gleichstrommotors

3.1.4 ZUSAMMENGESETZTER GLEICHSTROMMOTOR

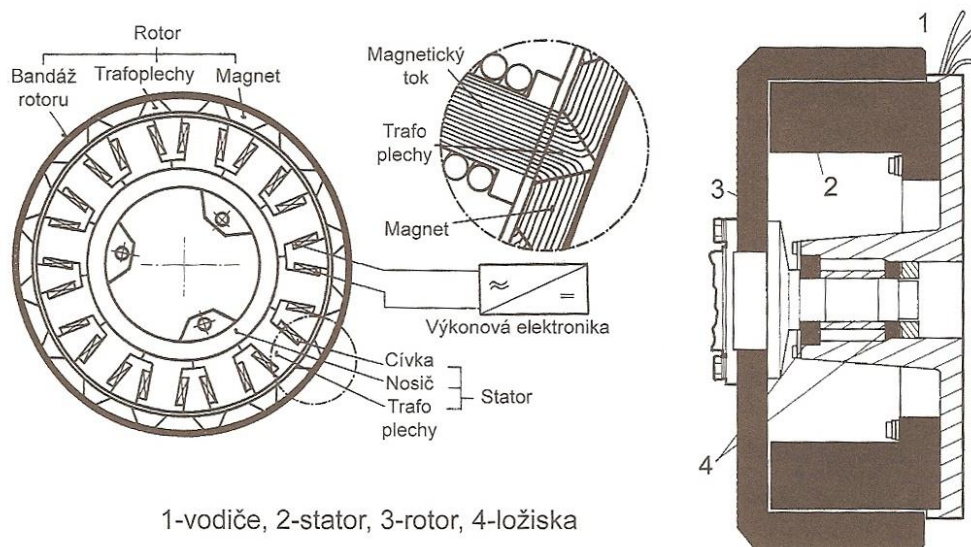
Ein zusammengesetzter Elektromotor vereint die Vorteile der beiden bisherigen Elektromotoren, er hat eine Feldwicklung in Reihe und die andere parallel zum Anker geschaltet. Die Reihenwicklung ist entsprechend der Nebenschlusswicklung magnetisch verbunden und bewirkt bei Belastung des Motors eine Drehzahlreduzierung und eine Drehmomenterhöhung. Die Nebenschlusswicklung hingegen begrenzt die Drehzahl im Leerlauf.

3.1.5 BÜRSTENLOSER GLEICHSTROMMOTOR

Bei einem bürstenlosen Gleichstrommotor sind die Rotor- und Statorpositionen im Vergleich zu einem herkömmlichen, permanenterregten Gleichstrommotor vertauscht. Die Wicklung befindet sich im äußeren Stator, wo sich normalerweise Permanentmagnete befinden, und die Permanentmagnete befinden sich im Rotor. Dieser Aufbau ähnelt dem eines permanenterregten Synchronmotors. Der Kommutator versorgt die Statorwicklung mit einem impulsmodulierten Gleichstrom, wodurch die Kosten der elektronischen Kommutierung gesenkt werden, da die Statorwicklung typischerweise nur aus drei oder vier Wicklungsbündeln besteht. Diese Bündel sind so eingestellt, dass die Flussdichte von Stator und Rotor annähernd um 90° phasenverschoben ist, wodurch die Position des Rotors sicher fixiert wird. Um dies zu erreichen, werden in der Regel Hallsonden, ein optoelektronisches System oder ein magneto-resistives System verwendet.

Bürstenlose Gleichstrommotoren verfügen nicht nur über zusätzliche Wicklungen der Leistungselektronik, sondern verwenden auch neue permanentmagnetische Materialien wie Neodym-Eisen-Bor und Samarium-Kobalt, wobei letztere noch relativ teuer sind.

Die neueste fortschrittliche Lösung stammt von der Magnet Motor Company, die sich durch eine einfache Konstruktion, hervorragende elektrische Parameter sowie ein kompaktes Gewicht und eine kompakte Größe auszeichnet. Dieser Motor gehört zur Gruppe der elektronischen Kommutierungsmotoren mit Dauererregung. Bei allen Elektromotoren ist das erreichte Drehmoment proportional zur magnetischen Induktion im Luftspalt, der axialen Länge des Rotors und dem Quadrat des Luftspaltradius. Die äußere Rotorkonstruktion ist vorteilhaft, da das Moment vom Luftspaltradius zum Quadrat abhängt. Es besteht aus gepressten Laminaten mit separaten, tangential magnetisierten Magneten mit wechselnder Polarität (Neodym-Eisen-Bor), wodurch keine rotierenden elektrischen Teile entstehen. Im Inneren befindet sich ein Stator, der aus gepressten Elektroblechen zusammengesetzt ist und hochpolige Spulenträger bildet. Die Spulen sind mit dem Ausgang der Leistungselektronik verbunden, die die Ströme in die Statorwicklung kommutiert, so dass sich der Motor wie ein Gleichstrommotor mit externer Erregung verhält. Es handelt sich um die sogenannte elektronische Kommutierung. Die Regelung erfolgt einfach und fehlerfrei über den gesamten Drehzahlbereich bis $n = 0$. Um die Verzehnfachung der Leistung im Vergleich zu herkömmlichen Elektromotoren zu bewältigen, wird die Statorwicklung mit Flüssigkeit gekühlt. Darüber hinaus ist der Motor bis zu viermal leichter als herkömmliche Bauweise und kleiner.



links: Rotor – Rotorverband, Laminate, Magnet

Mitte: magnetischer Fluss, Trafoplatten, Magnet – Leistungselektronik – Stator – Spule, Träger, Laminate

rechts: 1-Draht, 2-Stator, 3-Rotor, 4-Lager

Bild 8 - Schema und Querschnitt des Motors der Firma Magnet-Motor

3.1.6 ZUSAMMENFASSUNG

Gleichstrommotoren werden aufgrund der einfachen Drehzahlregelung und der geeigneten dynamischen Eigenschaften verwendet, haben jedoch eine geringere Leistung und Energieeffizienz, erfordern mehr Wartung und sind teurer.

Vorteile von Gleichstrommotoren:

- Technisch ausgereift
- Einfach gesteuert
- kosteneffizient

Nachteile von Gleichstrommotoren:

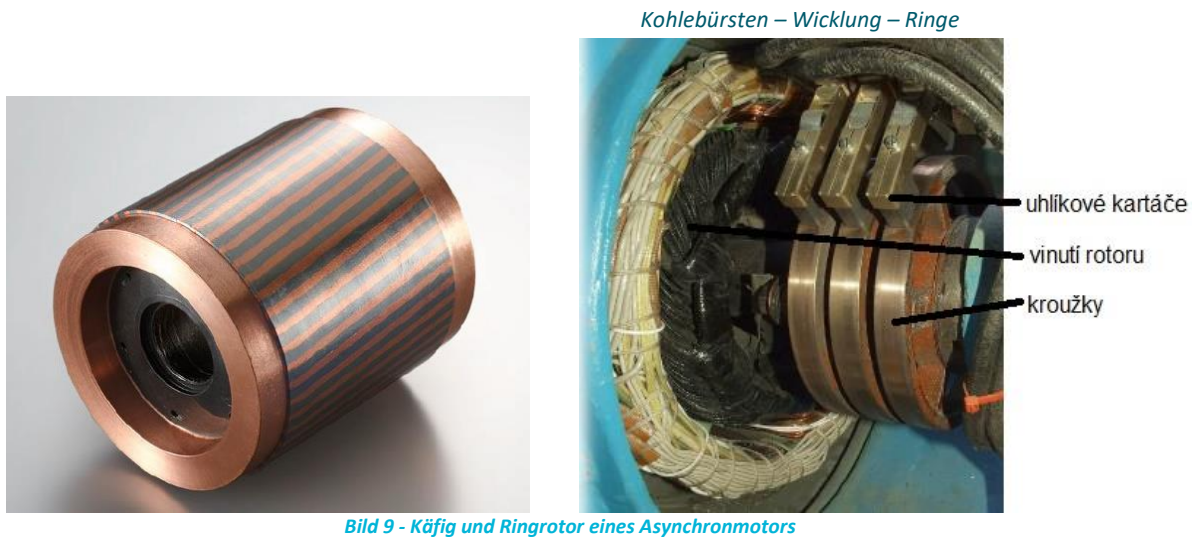
- Kommutator und Bürsten sind störanfällig und müssen gewartet werden
- Die maximale Umfangsgeschwindigkeit ist durch die Drehfrequenz auf ca. 7000 min⁻¹ begrenzt

geringerer Wirkungsgrad und geringere Leistungsdichte im Vergleich zu AC-Motoren Zur Regelung aller bisherigen Typen von Elektromotoren wird die elektronische Regelung der Stromversorgung der Motorwicklung mittels Silizium-Thyristoren mit rechteckiger Spannungskurve eingesetzt. Der gewünschte Mittelstromwert wird durch Änderung der Frequenz und Amplitude eingestellt. Eine Erhöhung der Feldanregung ist ausreichend, um im Bereich der Feldregelung zu bremsen. Dadurch steigt die Motorspannung über die Batteriespannung an, wodurch Energie über Dioden in die Batterie zurückgespeist werden kann.

3.2 AC-MOTOREN (WECHSELSTROM)

Wechselstrommotoren ersetzen zunehmend Gleichstrommotoren in Elektrofahrzeugen. Der große Vorteil von Wechselstrommotoren gegenüber Gleichstrommotoren besteht darin, dass der rotierende Rotor nicht mit Strom versorgt werden muss, da er durch das rotierende Magnetfeld angeregt wird. Die magnetischen Feldkräfte wirken auf den Anker und treiben ihn durch die Wirkung des induzierten Stroms in Rotation. Wechselstrommotoren werden in Asynchronmotoren und Synchronmotoren eingeteilt, je nachdem, ob sich der Rotor mit einer anderen Drehzahl oder synchron zum Drehfeld des Stators dreht.

4.2.1 ASYNCHRONMOTOR



Der wesentliche Vorteil des Drehstrom-Asynchronmotors ist der Wegfall des Kommutators. Der Stator besteht aus Laminaten, da sie von einem zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss durchdrungen werden. Eine dreiphasige Statorwicklung wird auf die Pole oder Nuten aufgesetzt. Der Rotor kann als Käfig oder Ring ausgeführt werden. Der Käfigrotor besteht aus dicken Aluminium-, Bronze- oder Kupferstäben, die kurz miteinander verbunden sind, wobei der Innenraum mit Laminaten gefüllt ist. Der Ringrotor ist mit einer Wicklung ausgestattet, durch die der von außen von Bürsten und Ringen gelieferte Strom fließt. Bei dieser Konstruktion befinden sich die Widerstände hinter den Rotorwicklungen, wodurch die Betriebsbedingungen geändert werden können. Bei Asynchronmotoren wird der magnetische Fluss durch die Feldwicklung dem Stator zugeführt, jedoch mit einer Drehspannung variabler Amplitude und Frequenz, die aus der Gleichspannung der Traktionsbatterie abgeleitet werden muss. Somit muss der Gleichstrom aus dem Akkumulator in Wechselstrom umgewandelt werden. durch zyklisches Einschalten von Thyristoren, wodurch sich die rechteckige Wellenform annähernd sinusförmig ändert.

Die Statorwicklung besteht aus mindestens drei um 120° zueinander gedrehten Bündeln und wird mit dreiphasigem Wechselstrom betrieben. Eine weitere Alternative können auch $3n$ -Bündel (n ist eine ganze Zahl) sein, die um einen Winkel von $120^\circ/n$ voneinander versetzt sind. Diese Wicklung erzeugt ein rotierendes Magnetfeld mit einer Kreisfrequenz von Wechselstrom ω oder für n Bündel mit einer Kreisfrequenz ω/n , d.h. sie dreht sich räumlich relativ zum Motorgehäuse.

Im Vergleich zu einem Gleichstrommotor ist ein Asynchronmotor bei gleicher Leistung deutlich kleiner und leichter, so dass mit einem Leistungsgewicht von ca. 1 kg/kW zu rechnen ist. Darüber hinaus ist der Motor einfacher aufgebaut, robust, wartungsfrei, stark überlastbar und kann bis zu 20.000 U/min erreichen.

Sowohl die Frequenz als auch die Spannung müssen variabel sein, um die Zugkraft und die Motordrehzahl zu regulieren. Die Erfüllung dieser Regulierungsanforderungen erfordert hohe Stromkreis-kosten. Die Energierückgewinnung beim Bremsen kann mit hoher Effizienz erfolgen.

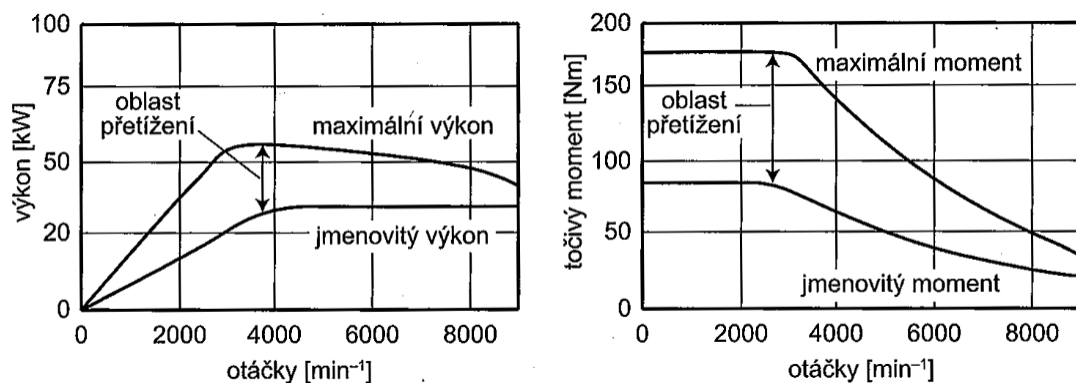


Bild 10 - Leistungs- und Drehmomentcharakteristik eines Asynchronmotors

3.2.1 QUERFLUSSMOTOR

Hierbei handelt es sich um einen speziellen Typ von Wechselstrom-Asynchronmotoren, bei denen der Strom in Umfangsrichtung an den Rotor geleitet wird und der magnetische Fluss des Stators nicht senkrecht zur Achse des Rotors, sondern parallel dazu verläuft.

3.2.2 SYNCHRONMOTOR

Bei Synchronmotoren stimmt die Kreisfrequenz mit dem zirkulierenden Magnetfeld überein. Es gibt zwei Arten von Synchronmotoren, die auf dem Verfahren der Rotorerregung basieren, einen mit einer Erregerwicklung und einen mit Permanentmagneten. Bei der ersten ist der Rotor mit einer Wicklung ausgestattet, die mit Gleichstrom versorgt wird. Der Rotor kann glatt oder mit hervorstehenden Polen sein.

Der Vorteil dieser Bauweise besteht darin, dass durch die Variation des Gleichstroms ein großer Bereich konstanter Maximalleistung erreicht wird.

Bei permanenterregten Synchronmotoren wird das Magnetfeld im Rotor durch Permanentmagnete angeregt, wodurch zusätzliche elektrische Energie entfällt. Der Vorteil dieser Bauweise ist ihre geringe Größe und ihr hoher Wirkungsgrad.

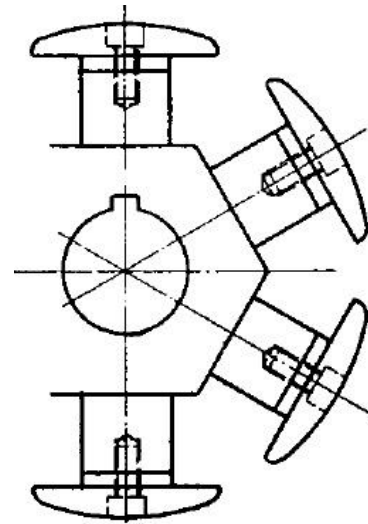
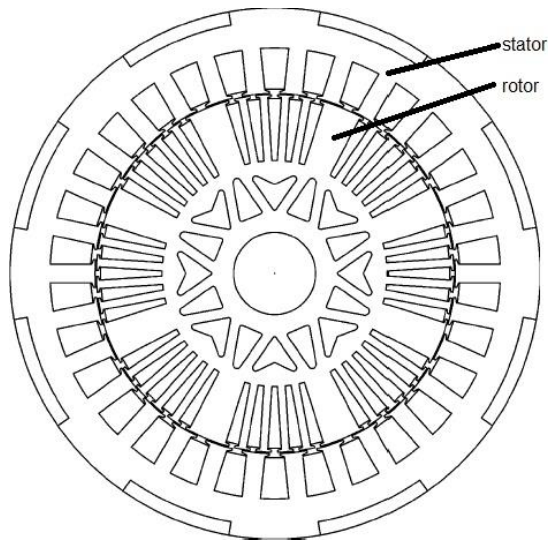


Bild 10 - Glatter Rotor Bild 11 - Hervorragende Pole (Scharen)

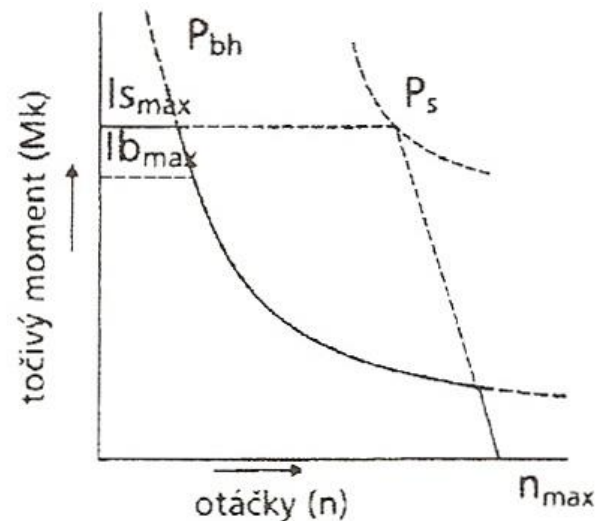
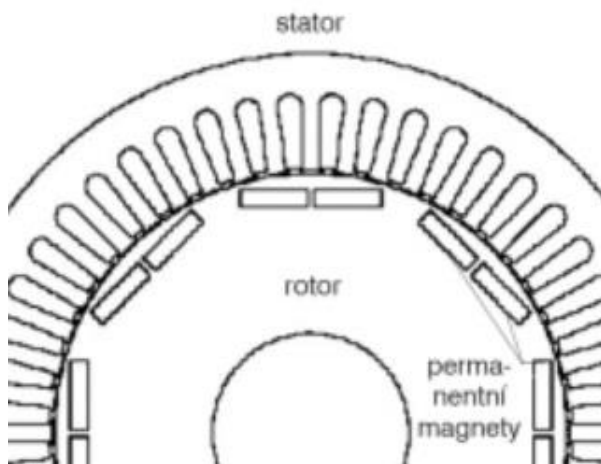


Bild 12 - Synchronmaschine mit Permanentmagneten Bild 13 - Drehmomentkennlinie eines Synchronmotors

3.2.3 Geregelter Reluktanzmotor

Reluktanzmotoren basieren auf der seit langem bekannten Technik der Reluktanzschrittmotoren, bei denen Änderungen der magnetischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Position des Rotors ausgenutzt werden. Reluktanzschrittmotoren lassen sich zwar einfach und kostengünstig herstellen, sind aber aufgrund ihrer Ungleichmäßigkeit, d.h. das Drehmoment hängt von der Rotorposition ab, seit vielen Jahrzehnten nur begrenzt einsetzbar. Dieser Nachteil kann durch eine entsprechende Steuerung überwunden werden.

Es gibt zwei Haupttypen von Reluktanzmotoren: einen, der auf dem Prinzip einer Synchronmaschine mit Schenkelpolen basiert, und den anderen, der als geschalteter Reluktanzmotor bezeichnet wird, der auf einem elektromechanischen Umrichter basiert. Der erste Typ ist eine Synchronmaschine ohne

Feldwicklung und einen Rotor, der modifiziert wurde, um die magnetische Leitfähigkeit so weit wie möglich zu variieren. Geschaltete Reluktanzmotoren sind insofern einzigartig, als sie im Gegensatz zu anderen elektrischen Maschinen nicht ohne die Hilfe elektronischer Schaltkreise funktionieren können. Je nach verwendeter Steuerungsmethode können sie im Schrittmotor- oder im kontinuierlichen Rotationsmodus arbeiten."

Ein Reluktanzmotor ist eine spezielle Art von Wechselstrommotor. Auf dem Stator befinden sich einfache Spulen, die mit einer Spannung einer Polarität gespeist werden. Es gibt keine Feldwicklungen oder Schleifkontakte in seinem Rotor. Der Rotor aus Weicheisen hat zahnradförmige Stangenverlängerungen.

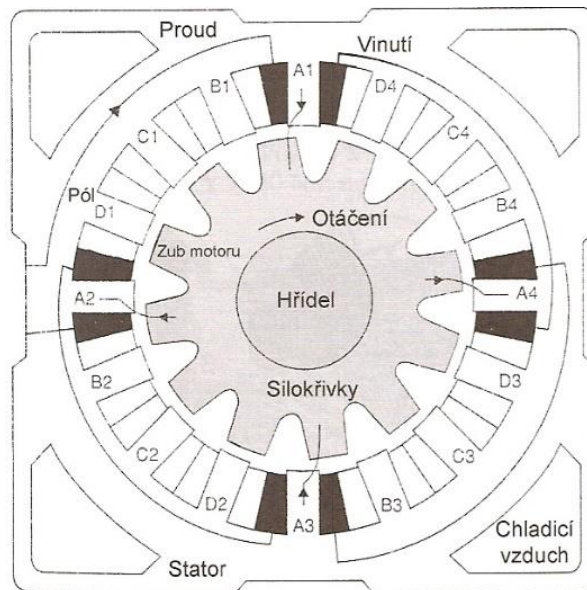


Bild 14 - Geregelter Reluktanzmotor

Das Prinzip besteht darin, dass der Rotor nach dem Einleiten von Strom in die entsprechenden Spulen so eingestellt wird, dass der Magnetkreis einen minimalen magnetischen Widerstand aufweist. Die Drehzahl und das Drehmoment des Reluktanzmotors lassen sich sehr gut durch die Leistungselektronik beeinflussen. Ein Reluktanzmotor startet asynchron und läuft dann synchron.

Das Konzept der Reluktanz bezieht sich auf den magnetischen Widerstand, den der Rotor im Magnetfeld darstellt. Durch die masselosen Zahnspalten im Rotor hat der Reluktanzmotorrotor ein sehr kleines Trägheitsmoment und damit sehr hohe Beschleunigungsmöglichkeiten.

Vorteile von Reluktanzmotoren:

- Hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen
- Hoher Wirkungsgrad
- Robuste Bauweise
- Geringe Wartungskosten
- stabiler Betrieb des Motors bei Ausfall einer oder mehrerer Phasen
- hohe Überlastfähigkeit und geringe Wärmeentwicklung
- Hoher Wirkungsgrad und günstiger Preis

Nachteile von Reluktanzmotoren:

- Das Drehmoment ist nicht gleichmäßig (pulsierendes Drehmoment)
- höhere Geräuschemissionen
- Es stellt hohe Anforderungen an die Steuerungs- und Leistungsteile bei hohen Geschwindigkeiten

3.2.4 ZUSAMMENFASSUNG

Vorteile von Wechselstrommotoren:

- Technisch einwandfrei
- Kompakte und robuste Bauweise und daher wartungsfrei
- hohe Geschwindigkeiten ermöglichen
- haben einen ebenso hohen Wirkungsgrad wie Gleichstrommotoren

Nachteile von Wechselstrommotoren:

- Anforderungen an die Steuerung
- Höherer Preis

Die folgende Tabelle vergleicht die gängigsten Fahrelektromotoren und wie man sieht, sind alle aufgeführten Typen für den Antrieb von Fahrzeugen, insbesondere von Synchronmotoren, geeignet. Die beste Erfüllung des gegebenen Merkmals wird mit der Zahl 10 bewertet.

motor	cena	účinnost	hmotnost	rozsah Pkonst	přetížitelnost	spolehlivost	stav vývoje
stejnoseměrný	10	7	6	10	10	7	10
asynchronní	8	8	6	9	10	9	9
synchronní	8	10	7	10	10	9	8
transversální	7	10	8	8	10	10	7
řízený reluktanční	9	6	7	4	10	9	5
stejnoseměrný bez kartáčů	8	10	10	8	9	10	8

DC – asynchron – synchron – quer – kontrollierte Reluktanz – bürstenloser DC

Preis – Effizienz – Gewicht – Konstantleistungsbereich – Überlastfähigkeit – Zuverlässigkeit – technische Reife

Tab.: Vergleich verschiedener Traktions-Elektromotoren-Konzepte

3.3 FRAGEN AM ENDE DES KAPITELS:

1. Aus welchen Teilen besteht ein Gleichstrommotor?
2. Wie klassifizieren wir Gleichstrommotoren nach Erregerwicklungsanschluss?
3. Was sind die Vorteile von Gleichstrommotoren?
 4. Was sind die Nachteile von Gleichstrommotoren?
 5. Was bedeutet der Begriff asynchron?
 6. Was bedeutet der Begriff synchron?
 7. Wie kann der Rotor von Asynchronmotoren hergestellt werden?
 8. Was sind die vorteilhaften Eigenschaften eines Asynchronmotors gegenüber Gleichstrommotoren?
 9. Wie kann der Rotor von Synchronmotoren hergestellt werden?
 10. Was ist ein Reluktanzmotor?
 11. Was sind die Vorteile von Reluktanzmotoren?
 12. Was sind die Vorteile von bürstenlosen Motoren?

4 WASSERSTOFFBETRIEBENE FAHRZEUGE

ZIELE:

Dieses Kapitel dient nur zu Informationszwecken, um die technischen Parameter verschiedener Arten von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen zu vergleichen.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Betankung, Reichweite, Leistung

Warum wasserstoffbetriebene Fahrzeuge einsetzen und nicht nur elektrische?

Der große Vorteil des Wasserstoffantriebs gegenüber dem reinen Elektroantrieb liegt in der deutlich kürzeren Betankungszeit.



Bild 15 - H-Ytrogen-Betankung (Quelle: <https://media.daimlertruck.com/>)

4.1 JAPANISCHER TOYOTA MIRAI IST EIN IN SERIE PRODUZIERTES WASSERSTOFFBETRIEBENES AUTO

Wasserstoff für den Antrieb von Automobilen kann aus mehreren verschiedenen Primärquellen hergestellt werden, was ihn zu einer vielversprechenden Alternative zu aktuellen Energiequellen macht. Toyota kombinierte mit seinem Fuel Cell System (TFCS) die patentierte Brennstoffzellentechnologie mit Toyota FC Stack und Hochdruck-Wasserstofftanks mit Hybridtechnologie. Dieses System hat im Vergleich zu Verbrennungsmotoren eine viel höhere Energieeffizienz.

Die Betankungszeit ist im Vergleich zu Elektrofahrzeugen viel kürzer und beträgt etwa 3 Minuten. Ein weiterer Unterschied zwischen Wasserstoffantrieb und Verbrennungsmotoren ist der Null-CO₂-Ausstoß. Die Fahrqualität ist vergleichbar mit anderen Automobilen.

4.1.1 FAHRLEISTUNGEN (TOYOTA-DATEN NOVEMBER 2014)

Fahrzeug	Reichweite	Geschätzte ca. 550 km nach NEFZ-Zyklus
	Höchstgeschwindigkeit	178 km/h
Brennstoffzellen-Stack	Volumen-Leistungsdichte	3,1 kW/L (Welthöchstwert)
	Maximale Leistung	114 kW (155 DIN-PS)

Hochdruck-Wasserstofftank	Anzahl der Tanks	2
	Nominaler Betriebsdruck	70 MPa (700 bar)
	Dichte der Tanklagerung	5,7 Gew.-% (Weltspitze)
Motor	Maximale Leistung	113 kW (154 DIN-PS)
	Maximales Drehmoment	e 335 Nm

Abmessungen / Sitzplatzkapazität

Länge	4890 mm	
Breite	1815 mm	
Höhe	1535 mm	
Leergewicht	1850 mm	
Radstand	2780 mm	
Schiene (vorne / hinten)	1535 mm / 1545 mm	
Minimale Bodenfreiheit	130 mm	
Innenmaße	Länge	2040 mm
	Breite	1465 mm
	Höhe	1185 mm
Sitzplatzkapazität	4	

4.2 EIN WEITERES IN SERIE PRODUZIERTES WASSERSTOFFBETRIEBENES AUTO IST DER HYUNDAI NEXO

Hyundai gehört zu den ersten Massenherstellern von wasserstoffbetriebenen Autos. Er heißt NEXO und ist der erste SUV mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb. Hyundai hat es geschafft, ein Auto mit einer hervorragenden maximalen Reichweite von 666 km zu entwickeln, das Betanken von Lagertanks

dauert nur 5 Minuten und hat eine Leistung von 120 kW. Das System aus drei miteinander verbundenen Wasserstofftanks ermöglicht dank seiner kompakten Abmessungen eine bessere Nutzung des Innenraums. Hyundai Nexo wurde entwickelt, um kalten Temperaturen von bis zu -30 °C standzuhalten, und wurde unter rauen Bedingungen getestet, um seine Leistungsfähigkeit auch bei Winterwetter zu gewährleisten.

Gewicht des Fahrzeugs	1,8 Tonnen
Brennstoffzelle	135 kW
Geschwindigkeit	180 km/h
Maximale Reichweite	600 km
Bremsen	Hydrauliksystem
Tank (Wasserstoffkapazität)	700 bar (6,33 kg)

4.3 WASSERSTOFFBUS SOLARIS URBINO 12

Dieser Bus wurde vom 9. bis 12. Juni 2019 in Stockholm während des UITP Global Public Transport Summit vorgestellt.

Der Solaris Urbino 12 Hydrogen ist ein emissionsfreier Bus, der mit einer Wasserstoff-Brennstoffzelle betrieben wird. Er hat eine Reichweite von 350 km und behält dennoch alle Vorteile des Elektroantriebs. Der Bus zeichnet sich durch eine sehr geringe Geräuschentwicklung und das Fehlen von Vibrationen während der Fahrt aus. Das einzige Produkt, das durch die chemische Reaktion in der Wasserstoff-Brennstoffzelle entsteht, ist Wasser. Die Betankungszeit beträgt nur wenige Minuten, was die Flexibilität des Fahrzeugbetriebs gewährleistet.

Motor	elektrische Portalachse ZF AVE130 2x125 kW
Wasserstoff-Brennstoffzelle	70 kW
Traktionsbatterien	Löwe
Wasserstoff-Tanks	Verbundbehälter 5x312 l
Ladesystem	Plug-in

4.4 WASSERSTOFFBUS ŠKODA H'CITY 12

Der Wasserstoffbus der Škoda Group hat eine maximale Reichweite von 350 km. Er zeichnet sich durch extrem geringe Geräusentwicklung und geringe Vibrationen, Komfort-Innenraum und kurze Betankungszeit aus. All dies trägt zu einem unvergleichlichen Komfort für die Passagiere und den Fahrer bei.

Länge	12 020 mm
Breite	2 550 mm
Höhe	3 430 mm
Sitzplatzkapazität	26—30
Anzahl der Passagiere	bis zu 85
Bereich	bis zu 350 km
Speicherkapazität für Wasserstoff	39 g

4.5 HYUNDAI HFC BUS

Wurde 2018 für den Transport von Besuchern und Mitarbeitern bei den Olympischen und Paralympischen Spielen Tokio 2020 entwickelt.

Gewicht des Fahrzeugs	15 Tonnen
Art der Brennstoffzelle	200 kW
Geschwindigkeit	103 km/h
Tanken und fahren	400 km
Bremsen	Hydrauliksystem
Tank (Wasserstoffmenge)	350 bar (40kg)

4.6 WASSERSTOFFZUG DER DEUTSCHEN BAHN

Siemens Mobility entwickelt auf Wunsch der Deutschen Bahn einen Wasserstoffzug der neuen Generation Mireo Plus H, der im Werk Krefeld eingebaut wird. Es ist einer der umweltbewusstesten Schritte auf dem Weg zum emissionsfreien Zugverkehr. Der Mireo Plus H erreicht Reichweiten von bis zu 800 km. Die Leistung dieser Lokomotive liegt auf dem gleichen Niveau wie die der elektrisch angetriebenen. Seine Hauptstärken sind die hohe Traktionsleistung von 1,7 MW, die maximale Beschleunigung von $1,1 \text{ m/s}^2$ und die Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Die dreiteilige Zugkonfiguration hat eine maximale Reichweite von bis zu 1000 km.

4.7 FRAGEN AM ENDE DES KAPITELS:

1. Wie lange sind die Betankungszeiten für Autos?
2. Welche Reichweite können Autos haben?
3. Welcher Druck wird bei der Befüllung von wasserstoffbetriebenen Pkw und Lkw verwendet?