



Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe (PPEA)

Hybrid- und Elektrofahrzeuge Lehrunterlagen



(Quelle: Tesla Roadster)

LEHRUNTERLAGE ZU:

Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe:**Elektrische Antriebe für Zero Emission Vehicles ZEV****1. Übersicht**

In Abschnitt 3 wird eine Übersicht über die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs gegeben und in Abschnitt 4 die E-Motorentchnik besprochen. In Abschnitt 5 wird der Wechselrichter diskutiert, in Abschnitt 6 die Akkumulatoren und in Abschnitt 7 die Speicherkondensatoren. In Abschnitt 8 wird auf das Batteriemangement eingegangen und in Abschnitt 9 ein historischer Überblick über realisierte ZEV vorgestellt. Im Abschnitt 10 ist Literatur zitiert. Die Lehrunterlage wurde von Prof. A. Binder erstellt mit Unterstützung von Unterlagen von Fr. Katja Heiling und Hr. Ullrich Georgi sowie von Hr. Stefan Dewenter.

2. Ziel der Lehrunterlage

Basierend auf veröffentlichter Fachliteratur sollen für das elektrische Antriebssystem eines Zero Emission Vehicles (ZEV) folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Antriebsmotoren sind geeignet?
 - Welche Umrichterkonzepte (ECU) kommen in Frage?
 - Gängige Regelungskonzepte der Motoren
 - Welche Speicher sind verfügbar?
 - Einflüsse der Antriebsvarianten auf das Kühlsystem und die Vibrationsanregung
- Auf den aktuellen Entwicklungsstand der Akkumulatoren wird eingegangen.

3. Übersicht – elektrischer Antriebsstrang

Ein rein elektrisch angetriebenes Automobil verfügt im einfachsten Fall über folgende Komponenten:

- (elektrischer) Energiespeicher
- Ladegerät für den Speicher
- Umformer für die elektrische Energie
- E-Motor
- Antriebsregelung
- Übergeordnete Steuerung
- Getriebe zwischen E-Motor und Rädern
- Geber/Sensoren
- Kühlsystem

a) Energiespeicher:

Der Energiespeicher kann die Energie direkt elektrisch speichern (Super-Kondensatoren im Farad-Bereich) oder in einer anderen Form, z. B. mechanische Energie in einem Schwungradspeicher, chemische Bindungs-Energie in einem Akkumulator (Bleibatterie, Nickel-Metallhydrid-Batterie, Lithium-Ionen-Batterie). Kenngrößen für den Speicher sind die gespeicherte Energie/Volumen (Energiedichte), die abgegebene Leistung/ Volumen (Leistungsdichte). Magnetische Speicher benötigen sehr hohe Magnetfelder (ca. 8 T) und daher supraleitende Spulen, um die Verluste zu begrenzen. Sie kommen für mobile Anwendungen wegen der erforderlichen Kühlung nicht in Betracht. Alternativ kann

die Energie in Form chemischer Bindungsenergie in z. B. flüssigem (kaltem) Wasserstoff oder gasförmigen Wasserstoff bei hohem Druck gespeichert werden, um anschließend mit dem Luftsauerstoff in einer Brennstoffzelle zu Wasser(dampf) verbrannt zu werden und dabei Gleichspannung dem Antriebssystem zur Verfügung zu stellen. „Zero emission“ bezieht sich dann auf C-H-, NO_x und CO/CO₂-Abgase.

b) Ladegerät:

Für Akkumulatoren und Kondensatoren sind Gleichspannungsquellen erforderlich, um die Speicher elektrisch oder chemisch aufzuladen. Abhängig von der Höhe der Gleichspannung sind es in aller Regel getaktete leistungselektronische Schaltungen, die aus dem öffentlichen Drehstromnetz die erforderliche Gleichspannung zur Verfügung stellen. Bei Schwungradspeicher ist ein Drehstromsystem erforderlich, um den Motorgenerator des Schwungrads motorisch zu betreiben, um die erforderliche Drehzahl einzustellen.

c) Umformer für die elektrische Energie (Wechselrichter, ECU):

Bei Akkumulatoren und Kondensatoren sind DC/AC-Wandler nötig (Wechselrichter), die leistungselektronisch aus der Gleichspannung ein Drehstrom-Bordnetz variabler Spannungsamplitude und Frequenz erzeugen, um Drehfeldmaschine drehzahlvariabel betrieben zu können. Bei Gleichstromantrieben sind getaktete DC/DC-Wandler nötig, um eine variable Gleichspannung zur Drehzahlveränderung bereitzustellen. Bei Schwungradspeichern wird in der Regel das vom Motorgenerator generatorisch bereitgestellte Drehstromsystem gleichgerichtet und daraus leistungselektronisch das erforderliche AC- oder DC-System erzeugt.

d) E-Motor:

Grundsätzlich wird zwischen DC- und AC-Maschinen unterschieden. Die DC-Maschinen sind als Unipolarmaschinen mit reinem Gleichstrom sowohl im Ständer als auch im Rotor nur für niedrige Spannungen verfügbar und deshalb selten verwendet. Die DC-Maschinen mit Wechselstrom im Rotor benötigen einen mechanischen Gleichrichter (Kommutator) und Bürsten zur Stromübertragung. Wegen dessen Wartungsbedarf und zusätzlicher Masse sind diese Motoren in künftigen ZEVs vermutlich nicht in Verwendung. Die AC-Maschinen als Drehfeldmaschinen sind als Asynchron- und Synchronmaschinen robust und kompakt verfügbar, so dass diese für künftige ZEVs die Hauptantriebsvarianten darstellen.

e) Antriebsregelung:

Zur Drehzahlveränderung muss bei DC-Antrieben die Ankerspannung oder der Hauptfluss verändert werden, wenn man von der verlustreichen Widerstandsteuerung älterer DC-Strassenbahnkonzepte absieht. Über die Ankerspannung ändert sich die Drehzahl wegen der geringen Ankerinduktivität weit schneller (im zig-Millisekunden-Bereich) über den etwa 100-mal langsam veränderbaren Hauptfluss. Bei Permanentmagneterregung ist der Hauptfluss nicht veränderbar. Bei AC-Antrieben wird die Drehzahl über die Frequenz der speisenden Spannung verändert. Soll der Magnetfluss in der Maschine dabei konstant bleiben, muss die Spannungsamplitude proportional zur Frequenz verändert werden. Um Drehzahländerungen ähnlich wie beim DC-Antrieb rasch zu erreichen, muss der Hauptfluss konstant gehalten werden. Nur der drehmomentbildende Anteil des Stroms in der Motorwicklung darf sich ändern. Dazu wird eine feldorientierte Regelung benötigt, die in dem Steuerrechner der ECU z. B. einem 32 bit-Rechner, implementiert ist.

f) Übergeordnete Steuerung:

Während bei der Cruise-Control die Drehzahl des E-Motors und damit die Fahrzeuggeschwindigkeit geregelt wird, ist bei der Momentenregelung („Gaspedal“) die Einstellung der Fahrzeuggeschwindigkeit dem/der Fahrer/-in überlassen, indem mehr oder weniger Moment dem Motor abgefordert wird. Es wird somit nur das Drehmoment des Motors geregelt. Um hohe Drehzahlen zu erreichen, ohne die Spannung zu hoch werden zu lassen (= ohne die ECU auf zu hohe elektrische Leistung zu dimensionieren), wird ab

einer „Eckdrehzahl“ der Magnetfluss in der E-Maschine gesteuert verringert. Die Maschine fährt dann feldgeschwächt und gibt weniger Drehmoment ab, als sie laut Bemessung könnte, kann aber bei hohen Drehzahlen betrieben werden, was hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten z. B. auf der Autobahn erlaubt. Begrenzend wirkt der Fahrwiderstand. Zusätzliches Drehmoment zum Beschleunigen beim Überholen bei hoher Geschwindigkeit ist dann allerdings nicht mehr vorhanden. Bei Verwendung von Akkumulatoren in Parallelschaltung mit Super-Kondensatoren kann die Batterie schonend (geringere Entladungstiefe, geringere Zyklenzahl) betrieben werden, wenn Entnahme-/Rückladespitzen aus den Superkondensatoren entnommen werden (Batteriemanagement).

g) Getriebe zwischen E-Motor und Rädern:

Da der E-Motor in einem weiten Drehzahlbereich bei sehr gutem Wirkungsgrad betrieben werden kann, ist ein Schaltgetriebe zur Anpassung an der Drehzahl an die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht zwingend erforderlich. Da das Drehmoment die Baugröße des E-Motors bestimmt und diese aus Platzgründen klein sein soll, legt man den Motor mit deutlich höherer Drehzahl als die Raddrehzahl des Fahrzeugs aus. Um bei einem einstufigen Getriebe bleiben zu können, und um die E-Motormaximaldrehzahl zu begrenzen (Lager!, Fliehkraft!, Laufruhe!), sind Getriebeübersetzungen unter 10 sinnvoll. Es können je nach Konstruktionsprinzip einfache Stirnradgetriebe (schrägverzahnt) verwendet werden.

h) Geber/Sensoren:

Für die Drehzahlerfassung des E-Motors zur Drehzahlregelung sind entweder Drehzahlgeber erforderlich, oder es wird über „sensorlose“ Drehzahlerfassung die Drehzahl aus der Messung der elektrischen Größen zurückgerechnet. Solche geberlosen Verfahren müssen auf den jeweiligen Motortyp (Asynchron-/Synchronmaschine etc.) abgestimmt sein und einjustiert werden, indem die richtigen Motorparameter (Induktivitäten, Widerstände) im Mikrorechner der ECU abgespeichert sind. Für Synchronmaschinen ist eine Rotorlageerfassung für die Drehmomentregelung erforderlich, die ebenfalls „geberlos“ realisiert werden kann. Weiter ist für die Drehmomentregelung eine Strommessung in der ECU nötig, wobei wegen der Stromsystemsymmetrie meist nur zwei von drei Phasenströmen gemessen werden. Temperatursensoren in der Motorwicklung und in den Lagern dienen zur sicherheitstechnischen Überwachung. In der ECU wird die Sperrschichttemperatur der Leistungshalbleiter z. B. indirekt über die elektrische Parameter (Kollektor-Emitter-Spannung versus Kollektorstrom) oder direkt über Temperatursensoren am Kühlkörper mit zusätzlichen Temperaturmodellen in der ECU überwacht. In gleicher Weise überwachen Temperatursensoren und Strom-/Spannungsmessungen die Akkumulatoren und Superkondensatoren und dienen – gemeinsam mit z. B. Batteriemodellen im Überwachungsrechner – als Input für das übergeordnete Batteriemangement.

i) Kühlsystem:

Das Kühlsystem für kompakte Antriebe ist mehrheitlich auf flüssigem Kühlmedium basiert, das eine höhere Wärmekapazität als Luft hat. Durchgesetzt hat sich die indirekte Flüssigkeitskühlung (z. B. 50% Wasser, 50% Glykol wegen des Frostschutzes), die im Kühlkörper der Leistungselektronik und im Gehäusemantel des Motors die Wärme abführt. Aus ökonomischen Gründen wird ein Kreislauf verwendet, wo zuerst die empfindlichere Leistungselektronik gekühlt wird, deren Sperrschichttemperatur den Wert von ca. 125°C ... 135°C in den Si-basierten Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) nicht überschreiten darf. Daher ist die Eintrittstemperatur des Kühlmittels in den nachgeschalteten Motor deutlich höher, z. B. 50°C (und mehr), wobei je nach Motor- und Umrichtergröße 8 ... 15 l/min Kühlmittelstrom verwendet werden. Die thermische Zeitkonstante des Umrichters wird durch die Größe des Kühlkörpers bestimmt und liegt in der Größenordnung von wenigen Minuten. Bei Motoren bis ca. 50 ... 70 kW ist die Flüssigkeitsmantelkühlung auch bei Asynchronmaschinen noch problemlos möglich. Der Wärmefluss aus dem Rotor (Käfigverluste!) findet über die interne Luftzirkulation an die Lagerschilde und den Stator statt. Bei größeren Asynchronmaschinen müsste eine direkte Läuferkühlung z. B. mit Luft durchzugsbelüftet erfolgen, um die Rotorverluste abzuführen. Andernfalls ist die

Temperaturdifferenz zwischen Lagerinnenring und –außenring zu groß (über 30 K) und führt – vor allem bei den relativ hohen Drehzahlen der Motoren von ca. max. 10000/min 12000/min trotz erhöhter Lagerluft zu Lagerproblemen durch die Wärmedehnung des Rotors. Bei den im Rotor deutlich verlustärmeren PM-Maschinen besteht diese Grenze nicht.

Die thermischen Zeitkonstanten des Motors sind wegen der größeren Masse des Kupfers und Eisens i. a. deutlich größer als jene des Umrichters, wobei die kürzere Zeitkonstante (z. B. 10 min.) die Wicklung darstellt und die längere Zeitkonstante (z.B. ca. 30 min) jene des Eisens, dessen masse deutlich größer als jene des Kupfers ist, da wegen der flussführenden Teile und der Eisensättigung ab ca. 1.8 T die Eisenquerschnitte nicht zu klein gemacht werden dürfen.

4. Elektromotoren für Elektrofahrzeuge

Es existiert eine Vielfalt an elektrischen Antrieben für Kraftfahrzeuge. Üblicherweise liegen Traktionsantriebe je nach Fahrzeuggröße im Leistungsbereich von 20 ... 80 kW. Diese Elektromotoren müssen grundsätzlich wie Verbrennungsmotoren in der Nähe der Drehachsen für die Räder eingebaut sein, wo sie die Räder über ein Getriebe antreiben. In speziellen Fällen kann der Elektromotor auch als Direktantrieb auf der Achse sitzen oder als Radnabenmotor die Räder direkt antreiben, hat aber dann wegen des größeren Drehmoments auch deutlich größere Abmessungen, da die elektromagnetische Tangentialkraft im Luftspalt – bezogen auf die Läuferoberfläche – trotz höchster Motorausnutzung mit ca. 0.5 ... 1 bar (spezifischer Drehschub τ) relativ niedrig ist, so dass das Drehmoment über einen großen Rotordurchmesser erzeugt werden muss.

Dabei soll ein elektrischer Antrieb für Fahrzeuge folgende Anforderungen erfüllen:

- hohe Leistungsdichte (Verhältnis von Leistung zu Masse \Leftrightarrow W/kg)
- hohes Drehmoment pro Motorvolumen (Momentendichte)
- hoher Wirkungsgrad sowohl bei Teillast als auch bei Nennleistung
- Rekuperation von Bremsenergie mit hohem Gesamtwirkungsgrad
- hohe Unempfindlichkeit gegenüber Beschleunigungskräften
- Flüssigkeitskühlung
- Zuverlässigkeit
- niedrige Produktionskosten
- einfache Fertigung
- ausgereifter Stand der Technik
- Automobilitauglichkeit

4.1 Motortypen

Elektrische Maschinen, die in der Automobilindustrie als Traktionsantrieb zum Einsatz kommen, sind die

- **G**leichstrommaschine (GM) mit Reihen- und Nebenschlusswicklung,
- **A**synchronmaschine (ASM),
- **P**ermanentmagneterregte **S**ynchronmaschine (PSM),
- geschaltete Reluktanzmaschine (SRM, **S**witched **R**eluctance **M**achine),
- **T**ransversalflussmaschine (TFM)

Jede dieser Maschinen (Bild 4.1-1) basiert auf dem Prinzip dass ein Drehmoment dadurch erzeugt wird, indem

- a) in einem Magnetfeld z. B. des Rotors ein stromdurchflossener Leiter im Stator eine tangentielle Kraft in Drehrichtung erfährt (*Lorentz-Kraft*) oder
- b) der Läufer auf Grund bestehender Unterschiede der magnetischen Leitfähigkeit am Läuferumfang (Reluktanzunterschied) vom magnetischen Drehfeld im Ständer mitgezogen wird.

Der Strom I wird von einer speisenden Quelle (Umrichter) über eine eingepreßte Spannung U zur Verfügung gestellt. Der Stromfluss stellt sich so ein, dass die angelegte Spannung gleich der vom Magnetfeld in der Wicklung induzierten Spannung U_i und dem Spannungsfall am Wicklungswiderstand gleich ist. Das erzeugte Drehmoment M ist dem Strom I und die erforderliche Spannung U wegen $U \approx U_i$ der Drehzahl n auf Grund des Faraday-Induktionsgesetzes proportional, sowie beide zum magnetischen Fluss Φ . Der Fluss $\Phi = B \cdot A_p$ ist proportional zur Flussdichte B im Luftspalt und der Läuferoberfläche pro Magnetpol A_p . Im Bereich der konstanten Leistung $P = 2\pi n M$ bzw. $P \sim 3 \cdot U \cdot I$ (Bild 4.1.1-2) erfolgt eine Drehzahlerhöhung durch eine Schwächung des Magnetfeldes, da die Spannung U auf Grund der Umrichtermaximalspannung – begrenzt durch die Höhe der Fahrzeugbatteriespannung – begrenzt ist. Unterhalb dieser Grenze wird die Batteriegleich-Spannung über die Umrichter-Pulsweitenmodulation in Spannungsblöcke unterschiedlicher Breite zerhackt, so dass die mittlere Spannung abgesenkt wird. Damit

folgt die Spannung unterhalb der Eckdrehzahl n_N , wo die Spannung ihren Maximalwert erreicht, dem Gesetz (4-2) bei konstantem Fluss, darüber muss der Fluss geschwächt werden, was bei den unterschiedlichen Motortypen unterschiedlich gemacht werden muss.

$$M = k_1 \cdot \Phi \cdot I \quad (4-1)$$

$$U = k_2 \cdot \Phi \cdot n \quad (4-2)$$

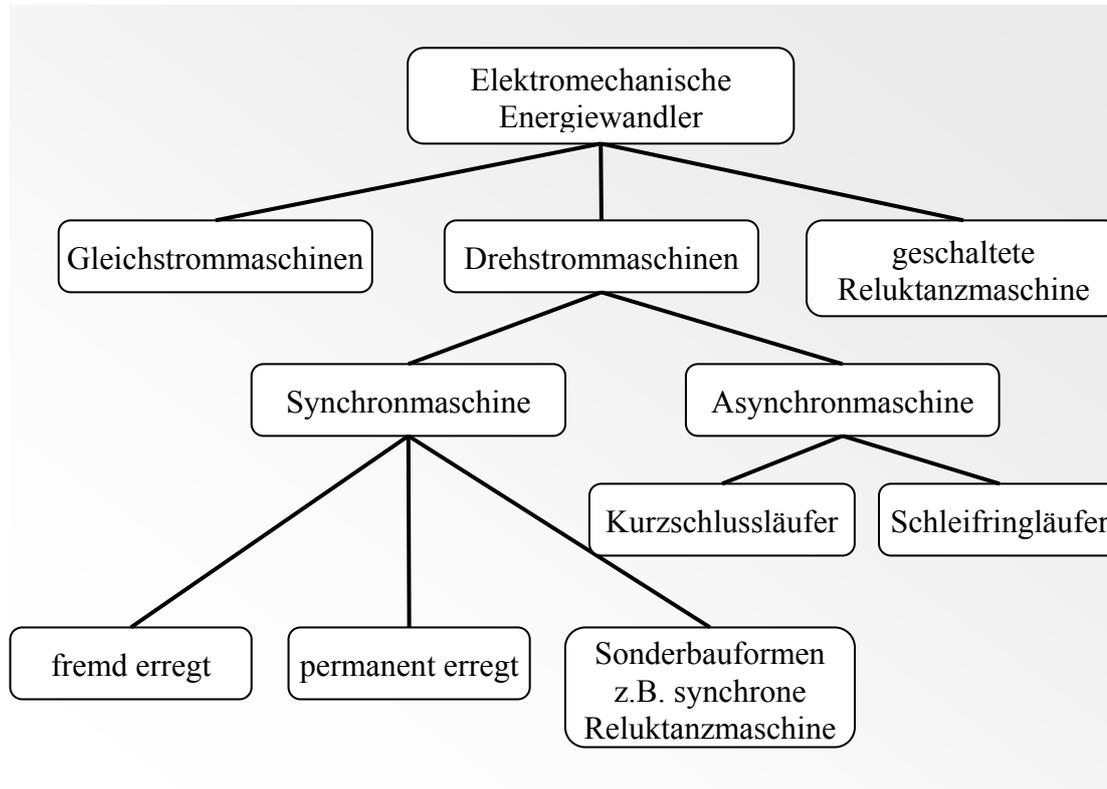


Bild 4.1-1: Übersicht über E-Antriebe

Da im Feldschwäcbereich der Fluss sinkt, sinkt auch das Drehmoment, selbst wenn der Motor den maximal möglichen Strom, begrenzt durch die Umrichterstromgrenze, führt. Mit $M \sim \Phi \cdot I \sim A_p B \cdot I$ folgt für einen Motor mit $2p$ Polen, dass das Drehmoment proportional zum Maschinenvolumen V und $M = F \cdot r = 2p \cdot \tau \cdot A_p \cdot r \sim \tau \cdot V$ und zum spezifischen Drehschub τ ist. Mit dem Läuferadius r und der Anzahl z der Leiter am Umfang, die den Strom I führen und zum Drehmoment beitragen, ergibt sich mit dem „Strombelag“ am Umfang $A = z \cdot I / (2\pi \cdot r)$ der spezifische Drehschub durch Vergleich der beiden obigen Ausdrücke.

$$\tau = k \cdot A \cdot B \quad (4-3)$$

In (4-3) ist k ein maschinenspezifischer Faktor; B kann wegen der Eisensättigung nicht wirklich hoch gewählt werden, so dass nur über intensive Kühlung der Strombelag A erhöht werden kann, um den Drehschub zu erhöhen. Dabei werden E-Motoren für Fahrzeuge im Dauerbetrieb für S2-1h (1 Stunde Dauerbetrieb, dann Abschalten) ausgelegt, die Überlast wird etwa bei 200% für kurzzeitiges Beschleunigen ausgelegt. Bei Stromdichten in den Kupferleitern bis ca. 12 A/mm^2 ist bei der indirekten Flüssigkeitsmantelkühlung der Strombelag und damit der Drehschub auf die o.g. Werte begrenzt.

In **Hybridfahrzeugen** kommen in erster Linie die permanentmagneterregte Synchronmaschine, die Asynchronmaschine und die geschaltete Reluktanzmaschine als Traktionsantriebe zum Einsatz. Auf den Einsatz der Gleichstrommaschine wird in neueren Modellen wegen des Kommutators, der Bürstenabnutzung und der eingeschränkten Drehzahlen verzichtet. Die *Fa. Voith* setzt auf den Einsatz der Transversalflussmaschine (PM-Synchronmaschine mit Querflussführung), da sie bei niedrigen Drehzahlen den höchsten spezifischen Drehschub hat (etwa Faktor 2 höher), allerdings bei hoher Polzahl. Sie empfiehlt sich für Direktantriebe ohne Getriebe. Die PM-Synchronmaschine mit Längsflussführung ist ihr nahezu ebenbürtig, kann aber auch bei höheren Drehzahlen mühelos eingesetzt werden und hat gegenüber der Asynchronmaschine geringere Verluste und höhere Leistungsdichten. Die geschaltete Reluktanzmaschine hat ebenfalls höhere Leistungsdichten und geringere Verluste als die Asynchronmaschine, ist aber bei hoher Motorausnutzung geräuschanfällig und empfindlich gegen Rotorextrazentritäten.

4.1.1 Gleichstrommaschine

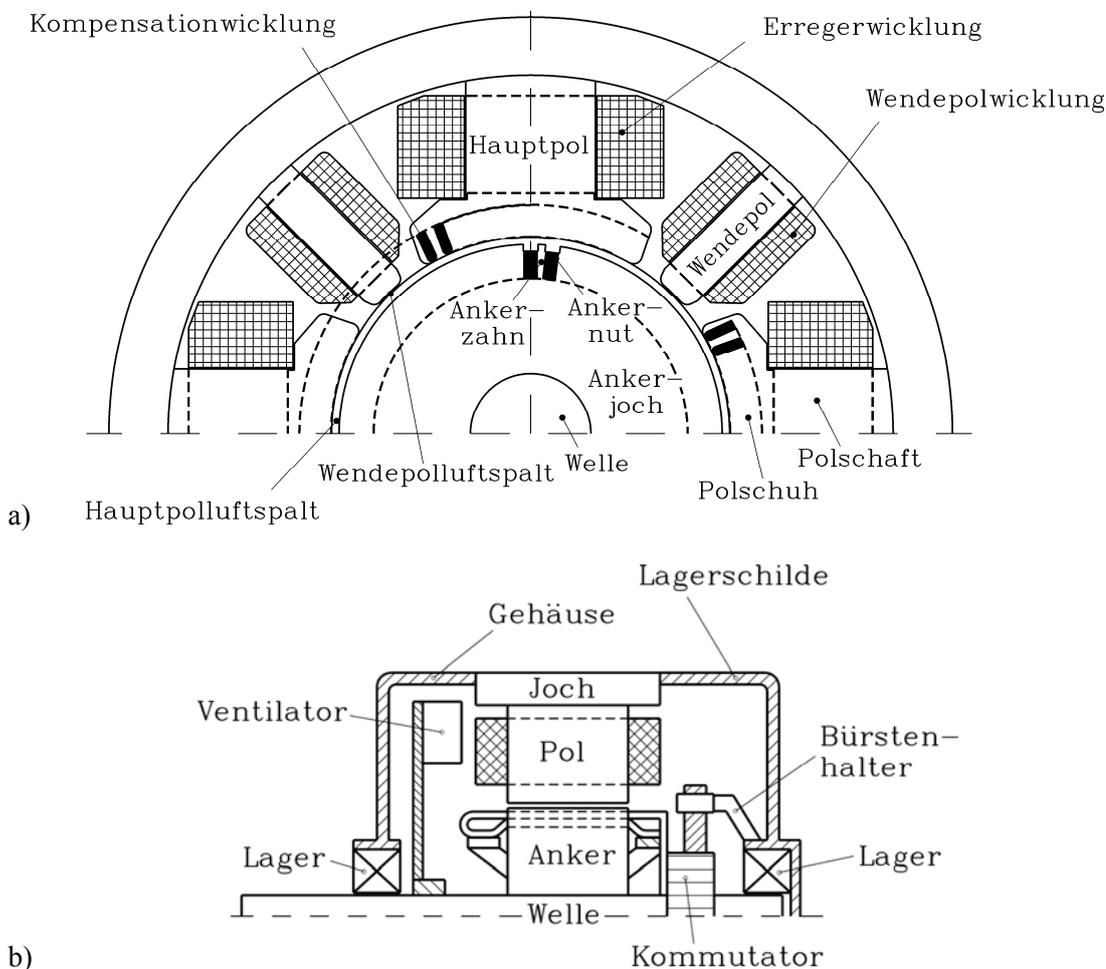


Bild 4.1.1-1: Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine:
a) Querschnitt der Maschine, b) Längsschnitt der Maschine

Die Gleichstrommaschine gibt es als Reihen- und Nebenschlussausführung. Sie kam vor allem bei den ersten rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen zum Einsatz und ist als Reihenschlussmaschine mit großem Anfahrmoment gut für Fahrzeuge geeignet. Als Nebenschlussmaschine wird sie bei Stromrichterspeisung bevorzugt eingesetzt. Dadurch lassen sich die o. g. Grenzkennlinien und die Feldschwächung sehr gut einstellen (Bild 4.1.1-2).

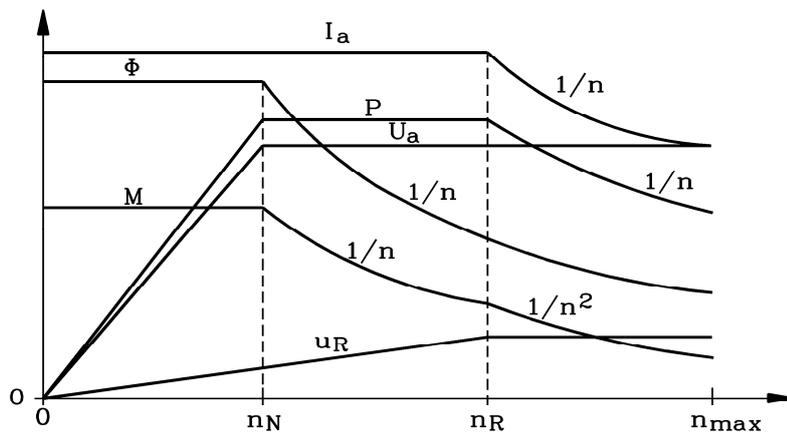


Bild 4.1.1-2: Kennlinienfeld des fremderregten (kompensierten) Gleichstrommotors bei Speisung mit veränderbarer Spannung U_a und veränderbarem Fluss Φ . Maximalwerte von Ankerspannung, Ankerstrom, Drehmoment, Fluss, Leistung und Reaktanzspannung.

Die Vorteile der Gleichstrommaschine sind:

- kostengünstiger Stromrichter (z. B. IGBT-Chopper: 4 Transistoren, 4 Freilaufdioden)
- einfache Regelbarkeit
- geringe Momentenwelligkeit
- gute Kühlmöglichkeiten
- geringe Stromrichterverluste

Nachteile der Gleichstrommaschine:

- Verschleiß durch mechanische Kommutierung
- mechanisch vor allem durch den Kommutator festgelegte Grenzdrehzahl
- hohes Trägheitsmoment durch schweren Kommutator
- Schlechter Wirkungsgrad (Wendepolwicklung, Bürstenverluste), vor allem im Teillastbereich

Die neueren Entwicklungen auf dem Gebiet der Wechselrichter-Technologie haben dazu geführt, dass die Gleichstrommaschine fast vollständig durch die Drehstrom-Asynchronmaschine und die Drehstrom-Synchronmaschine abgelöst wurde. Trotz leichter Regelbarkeit sind die Nachteile durch das zusätzliche Gewicht eines Gleichstrompulswandlers schwerwiegender, vor allem, da Leistungshalbleiter für Drehstrommaschinen immer preisgünstiger werden.

4.1.2 Asynchronmaschine

Drehfeldmaschinen besitzen im Stator eine verteilte $2p$ -polige Wicklung z. B. aus drei am Umfang um je ein Drittel einer Polpaarteilung versetzten Wicklungsträngen, die z. B. in Stern geschaltet sind. Werden diese 3 Stränge mit Wechselströmen (Frequenz f), die um je ein Drittel ihrer Schwingungsperiode $T = 1/f$ zeitlich versetzt sind, gespeist, so entsteht ein drehendes Luftspalt-Magnetfeld, das mit Synchrondrehzahl n_{syn} rotiert (Bild 4.1.2-1 und Bild 4.1.2-2).

$$n_{syn} = f / p \quad (4.1.2-1)$$

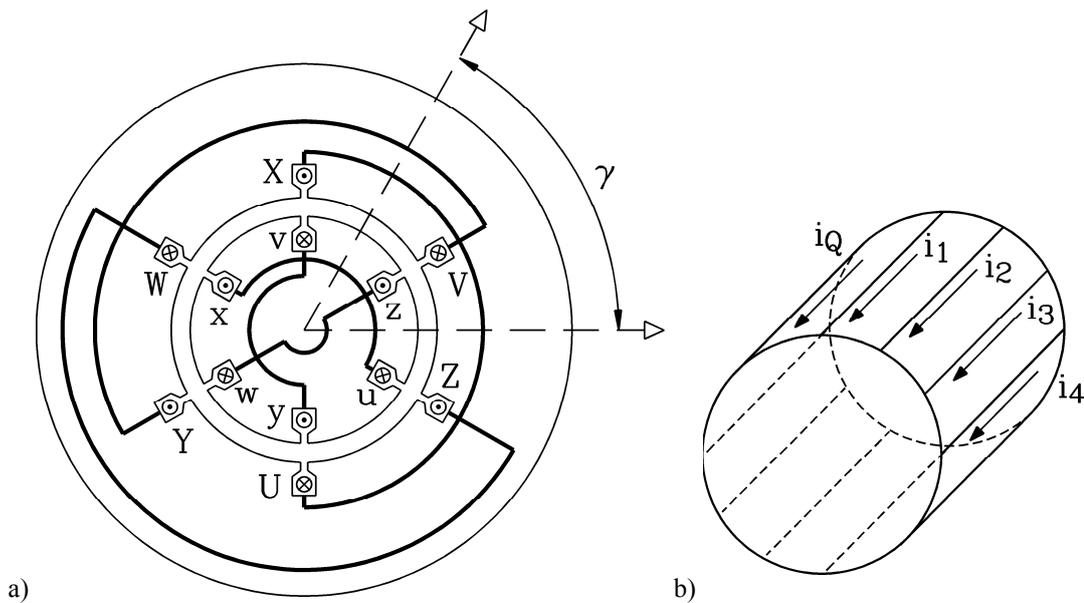


Bild 4.1.2-1: a) Dreisträngige Drehfeldwicklung im Stator einer elektrischen Maschine mit konstantem Luftspalt (Querschnittsdarstellung $2p = 2$). Der Rotor ist hier gleichartig aufgebaut. Bei Käfigläufer ist der Rotor durch einen Kurzschlusskäfig b) ersetzt.

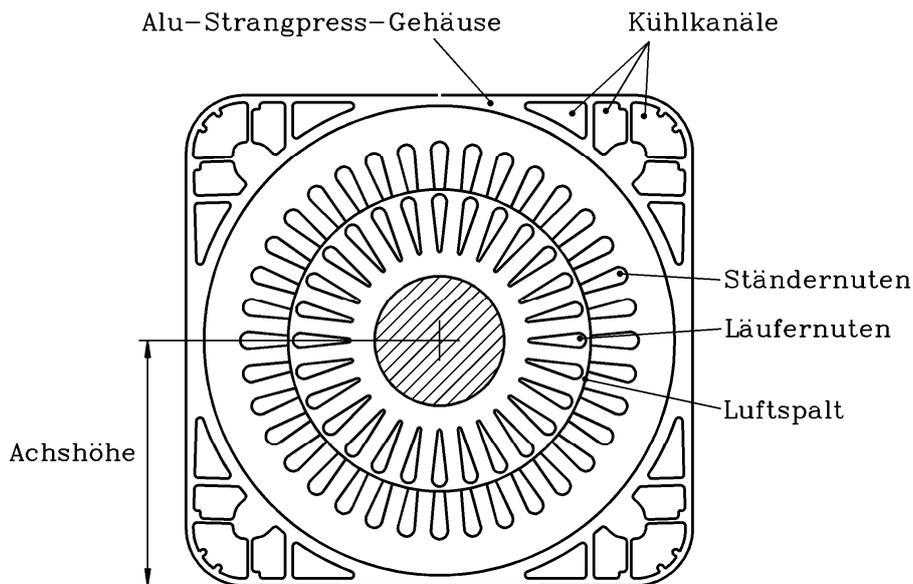


Bild 4.1.2-2: Querschnitt eines vierpoligen, oberflächenbelüfteten Kurzschlussläufer-Asynchronmotors mit Aluminium-Druckguss-Käfig ($n_{max} = 15000/min$, Achshöhe 112 mm), Betrieb am Frequenzumrichter, geschlossene birnenförmige Läufer-nuten, fremdgekühlt mit Luft, Hauptspindelantrieb in einer Werkzeugmaschinen

Bei den Drehstrommotoren unterscheidet man Synchronmotoren und Asynchronmotoren, wobei sich die Asynchronmaschinen wiederum aufteilen in Käfig- und in Schleifringläufer. Letztere haben in Fahrzeugen keine Bedeutung, so dass hier der Käfigläufer behandelt wird. Das Drehfeld induziert im langsamer laufenden Läufer (Drehzahl $n < n_{syn}$) Spannungen, die Käfig Ströme treiben, die mit dem Ständerfeld ein Drehmoment erzeugen. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie (*Kloss'sche Funktion*) zeigt ein ausgeprägtes Maximalmoment (Kippmoment), wobei das Moment Null ist, wenn der Läufer gleich schnell wie das Drehfeld rotiert: $n = n_{syn}$. Dieser Leerlaufpunkt kann bei Umrichterbetrieb verschoben werden, da der Umrichter den Motor mit veränderbarer Spannungshöhe U und Frequenz f speist. Wird $U \sim f$ erhöht, bleibt bei f -Erhöhung das Kippmoment $M_b \sim (U/f)^2$ konstant. Wird die Maximalspannung erreicht, so sinkt das Kippmoment $\sim 1/f^2$. Der Fluss sinkt wegen (4-2) $1/n$ bzw. $1/f$, so

dass sich Feldschwächung einstellt und das Moment bei Nennstrom I_N wegen (4-1) proportional $1/n$ bzw. $1/f$ sinkt. Ab dem Schnittpunkt dieser Momentengrenze mit der Kippmomentgrenze muss das Moment $1/f^2$ sinken.

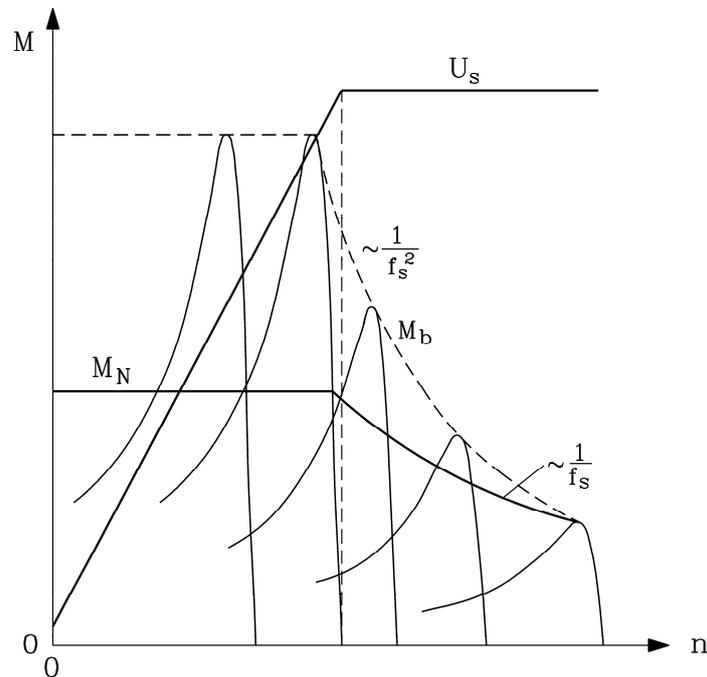


Bild 4.1.2-3: Über den Umrichter parallel verschobene Kloss'sche $M(n)$ -Funktionen und deren Einhüllende als Grenzkennlinien einer ASM (vereinfachte Darstellung) bei Umrichterspeisung mit der Leistungsgrenze, gegeben durch Umrichtermaximalspannung und -strom

Die Verlustbilanz des Asynchronmotors für einen festen Betriebspunkt (Drehzahl, Drehmoment) sieht wie folgt aus:

Zugeführte elektrische Leistung $P_{e,in}$.

Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung $P_{Cu,s}$

Ummagnetisierungsverluste (Wirbelstrom- und Hystereseverluste) im Ständerblechpaket $P_{Fe,s}$

Zusatzverluste in der Ständerwicklung und im Blechpaket

- durch Abweichungen des Felds von der Sinusform (Oberwellen) bei Sinusstromspeisung
- durch Abweichungen der Spannung von der Sinusform bei Umrichterspeisung, die Oberschwingungsströme erzeugt

Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung $P_{Cu,r}$

Wegen der niedrigen Läuferfrequenz im Nennbetrieb sind die Ummagnetisierungsverluste im Läuferblechpaket vernachlässigbar klein.

Reibungs- und Ventilationsverluste P_R

Zusatzverluste P_Z durch die Oberwellen als Wirbelströme im Läufer auftreten, die den Läufer bremsen

Abgabeleistung an der Welle $P_{m,out}$

Damit ist das **Wellenmoment (Kupplungsmoment) M_s** um das **Läuferverlustmoment M_d** geringer als das elektromagnetische Moment M_e im Luftspalt.

Die Muschelkurve Bild 4.1.2-4 zeigt die Betriebspunkte gleicher Wirkungsgrade in Form von Höhenlinien an. Als Motor-Ausgangsgröße bestimmen Drehzahl und Drehmoment den Wirkungsgrad im jeweiligen Arbeitspunkt. Die hohen Wirkungsgrade liegen im oberen Drehzahlbereich. Bei Umrichterbetrieb ist es möglich, mit dem Kippmoment anzufahren, was ein hohes Anfahrmoment bei relativ niedrigem Anlaufstrom (ca. doppeltem Nennstrom) ermöglicht.

Vorteile des Asynchronmotors:

- technisch ausgereift
- Drehzahlgeber für drehzahlregelten Betrieb notwendig, aber kein Rotorlagegeber
- robuste Bauweise
- kurzzeitig bis zur Kippgrenze überbelastbar

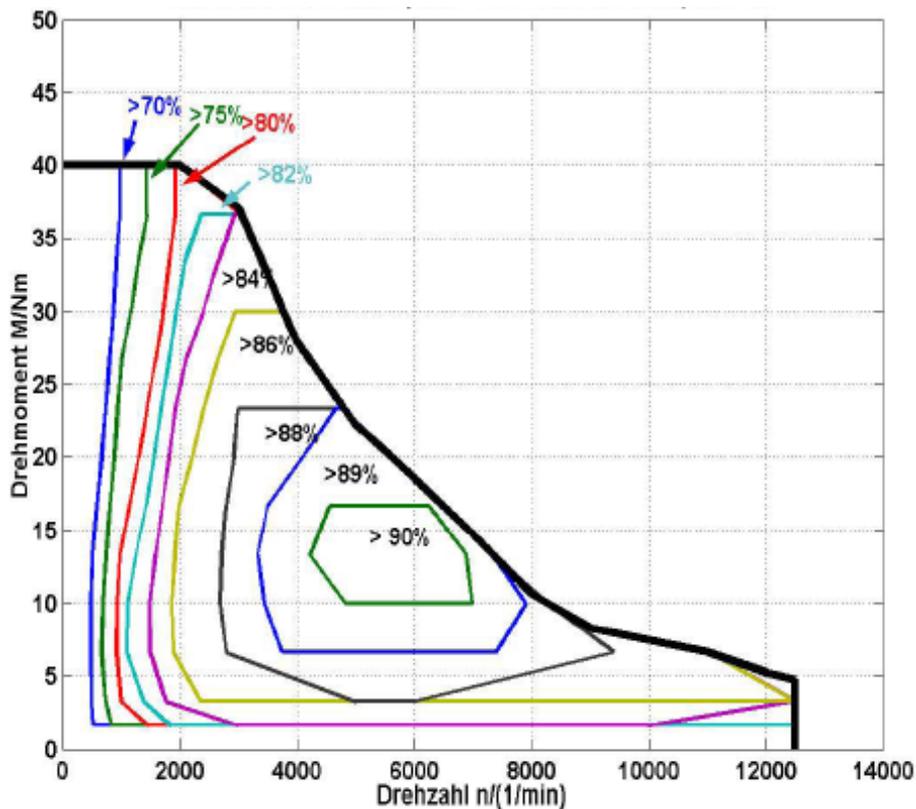


Bild 4.1.2-4: Linien konstanten Wirkungsgrads bei drehzahlveränderbarem Betrieb eines vierpoligen Asynchronmotors bei Umrichterbetrieb (Muschelkurve). Der Motor wurde für ein Hybridautomobil eigens konstruiert und ist mit einer Flüssigkeitsmantelkühlung versehen. Die Grenzkennlinie des Motors für Kurzzeitbetrieb gemäß Bild 4.1.2-3 ist durch die Umrichterspannungs- und -stromgrenze bedingt.

Nachteile:

- geringer Wirkungsgrad im niedrigen Drehzahlbereich und bei Teillast wegen des Magnetisierungsstroms
- Läuferverlustleistung unvermeidbar

4.1.3 Permanentmagneterregte Synchronmaschine

Bei der **permanentmagneterregten Synchron-Maschine (PSM)** wird das Magnetfeld ohne Energieaufwand durch Permanentmagnete im Läufer erzeugt. Die Synchronmaschine ist wie die Asynchronmaschine eine Drehstrommaschine. Die Ständerwicklung erzeugt ein Drehfeld, das die Permanentmagnete des Läufers mit gleicher Drehzahl $n = n_{syn}$ synchron mitzieht. Sie benötigt daher für drehzahlvariablen Betrieb wie die Asynchronmaschine die Verwendung eines Frequenzumrichters.

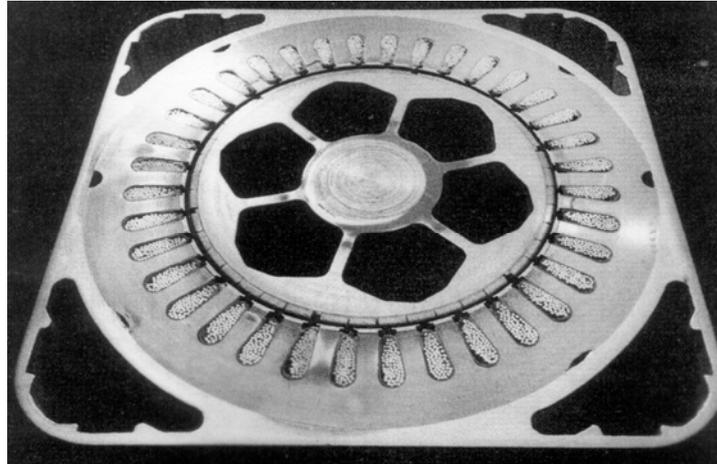


Bild 4.1.3-1: Schnitt durch eine sechspolige Permanentmagnet-Maschine mit Oberflächenmagneten aus Neodymium-Eisen-Bor (fixiert mit Glasfaserbandage) im Läufer (Werkbild Siemens AG)

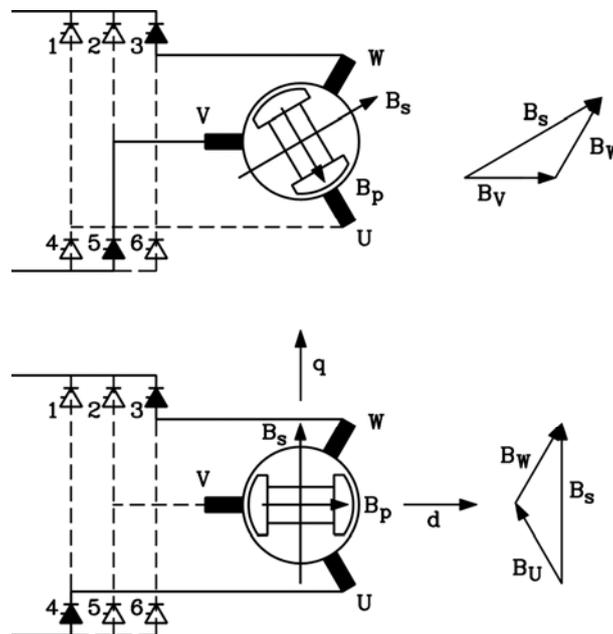


Bild 4.1.3-2: Polradlagegeber-Steuerung: Durch eine Fortschaltung des Statorstroms („Querstrom“) von Strang V und W auf Strang U und W für 2 verschiedene Rotorstellungen im Zeitabstand von 1/6 Periode wird stets der Winkel zwischen Läufer- und Ständerfeld konstant gehalten und so z. B. das größtmögliche Drehmoment erzielt. Für Zwischenstellungen zwischen den beiden angegebenen Läufer-Stellungen wird durch Hin- und Herschalten zwischen Leistungsschalter 4 und 5 im Mittel das Ständerfeld so eingepreßt, dass der Winkel zwischen Ständer- und Läuferfeld konstant bleibt. Die dafür erforderlichen Freilaufdioden antiparallel zu den Leistungsschaltern 1...6 sind nicht eingezeichnet.

Der Winkel zwischen der Lage des Nordpols des Ständerfelds und dem Südpol des Läuferfelds ist bei Leerlauf Null. Es wird kein Drehmoment erzeugt. Bei Belastung des Läufers wird dieser Winkel größer. Der Läufer („Polrad“) wird über die kraftbildenden Magnetfeldlinien wie eine „Drehfeder“ aufgespannt.

Wird ein maximaler Winkel von 90° überschritten, so fällt der Läufer „außer Tritt“ und bleibt stehen. Das maximale Moment (synchrones Kippmoment) begrenzt somit bei gegebener Spannung und damit eingepprägtem Strom die Überlastfähigkeit des Motors. Das Drehmoment kann somit als proportional zum Läuferfeld (Flussdichte B_p , erzeugt von den Permanentmagneten), zum Ständerfeld (Flussdichte B_s , erzeugt vom Ständerstrom I) und zum eingeschlossenen Winkel zwischen Ständer- und Läuferfeld betrachtet werden. Misst man mit einem „Polradlagegeber“ die Läuferlage, so kann man bei Zunahme der Belastung und damit des Läuferwinkels relativ zum Ständerdrehfeld über den Umrichter die Spannung so erhöhen, dass über den dann erhöhten Strom das Drehmoment auch bei kleinerem Winkel konstant bleibt, da B_s erhöht wird (Bild 4.1.3-2). Damit kann stets der maximale Winkel 90° zwischen Ständer- und Läuferfeld und damit zu gegebenem Strom das maximale Drehmoment erzeugt werden, was einem verlustoptimalen Betrieb entspricht. Das Ständerfeld steht quer zum Läuferfeld, weshalb der Ständerstrom „Querstrom“ I_q heißt. Der Lagegeber kann auch als Drehzahlgeber verwendet werden, so dass eine Drehzahlregelung über die Frequenzanpassung des Umrichters realisiert werden kann.

Bei 20°C	AlNiCo	NdFeB (A)	NdFeB (B)	Sm ₂ Co ₁₇	Ba-Ferrit	Gummi + Ferrit
B_R / T	1.3	1.4	1.2	0.95	0.4	0.24
$H_{CB} / kA/m$	90	1100	900	710	270	175
A_M/A_0	1	0.93	1.08	1.36	3.25	5.4
h_M/h_0	1	0.08	0.1	0.13	0.33	0.51
V_M/V_0	1	0.076	0.11	0.18	1.08	2.8

Tabelle 4.1.3-1: Vergleich unterschiedlicher Magnetmaterialien

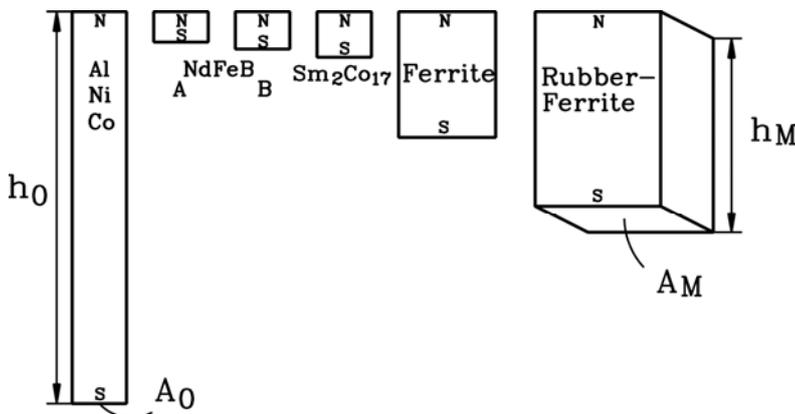


Bild 4.1.3-3: Vergleich unterschiedlicher Magnetmaterialien (1) AlNiCo, (2) Selten-Erd-Magnet NdFeB, Typ A für Dauerbetriebstemperatur 70°C, (3) NdFeB, Typ B für Dauerbetriebstemperatur 180°C, (4) Sm₂Co₁₇, (5) Ba-Ferrit, (6) Komposit aus Gummi und Ba-Ferrit

Die Remanenzflussdichte B_R gibt an, welche maximale Flussdichte der Läufer erzeugen kann (bei Luftspalt Null zwischen Stator und Rotor). Sie sinkt mit steigender Temperatur mit ca. 0.1%/K bei NdFeB. Je größer B_R ist, desto kleiner kann die Polfläche für denselben Fluss sein. Die Koerzitivfeldstärke H_{CB} gibt an, welches von außen gegen die Magnetisierungsrichtung der Magnete angelegte Magnetfeld erforderlich ist, um die Flussdichte der Läufermagnete auf Null zu drücken. sehr klein (Bild 4.1.3-3) und daher der Läufer sehr kompakt. Je höher H_{CB} ist, desto kürzer kann die Magnethöhe ausfallen. Dank der hohen Energiedichte der Selten-Erd-Magneten NdFeB und SmCo, dargestellt als das Produkt aus Remanenzflussdichte B_R und der Koerzitivfeldstärke H_{CB} , sind die Läufermagnete sehr klein (Bild 4.1.3-3) und daher der Läufer sehr kompakt.

NdFeB hat das kleinste Volumen bei gleichem Fluss und gleicher Entmagnetisierfestigkeit, allerdings eine größere Abnahme der Werte mit steigender Temperatur als SmCo. Bei Materialien für höhere

Dauertemperatur sind dafür nur geringere Energiedichten möglich. Rotordauertemperaturen bis ca. 180°C sind z. Zt. mit NdFeB sinnvoll realisierbar, mit SmCo auch Werte deutlich über 200°C. Bei steigender Drehzahl steigt gemäß (4-1) die induzierte Ständerspannung $U_i = U_p$ („Polradspannung“) mit n an, da der PM-Fluss des Läufers konstant ist (Bild 4.1.3-4). Wenn die Umrichterspannung $U_{s,max}$ erreicht ist und gleich U_p ist, kann kein Strom mehr in die Ständerwicklung fließen, und das Moment wäre Null, wenn nicht durch eine zusätzliche Stromkomponenten im Ständer (I_d) ein Ständermagnetfeld erzeugt wird, das direkt dem Läuferfeld entgegen gerichtet ist und dieses schwächt, so dass die resultierende induzierte Spannung $U_i < U_p$ in der Ständerwicklung wieder kleiner als $U_{s,max}$ ist. Da die Stromkomponente I_d ein Ständer-Magnetfeld erzeugt, was antiparallel zum Läuferfeld ist, als längs des Läuferfelds wirkt, nennt man diese Stromkomponente Längsstrom. Da der Gesamtstrom in der Ständerwicklung konstant bleiben muss („Stromgrenze“ des Umrichters, Verlustgrenze des Motors), ist dieser Feldschwächbetrieb über I_d nur möglich, wenn die momentenbildende Stromkomponente I_q verringert wird. Da der Sinusstrom $i_d(t)$ gegenüber dem Sinusstrom $i_q(t)$ in jedem Wicklungsstrang um eine Viertelschwingungsperiode phasenversetzt ist, gilt für deren Überlagerung zum resultierenden Ständerstrom je Strang:

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.1.3-1)$$

Gemäß Bild 4.1.3-4 ist dies möglich, wenn für $n > n_N$ die Leistung konstant bleiben soll, also $M \sim 1/n$ sinkt, weil dann gemäß (4-1) auch $I_q \sim 1/n$ sinkt.

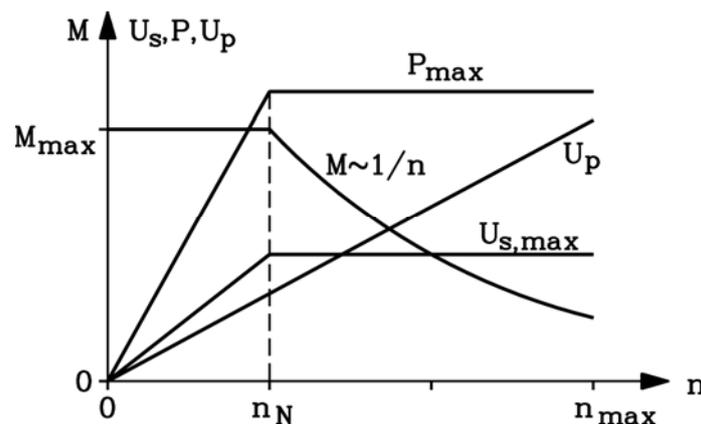


Bild 4.1.3-4: PM-Motor bei drehzahlvariablem Betrieb, wobei ab der Eckdrehzahl n_N die Motorausgangsleistung P_{max} konstant bleibt. Das Maximalmoment des Motors, die Polradspannung, die vom Umrichter zur Verfügung gestellte Spannung und die Motorausgangsleistung sind dargestellt.

Die Größe des Ständer-Gegenfelds ist direkt proportional zum Strom I_d und zur Ständerinduktivität L , so dass ein größeres L ein kleineres I_d und damit geringere Stromwärmeverluste erlaubt und damit einen höheren Feldschwächbereich. Die Gestaltung der PM-Maschine entscheidet also wesentlich über ihre Betriebseigenschaften. Der Betrieb des PM-Synchronmotors mit Feldschwächung ist beispielhaft für die Umrichterspannungsgrenze $U_{s,max} = U_N$ (=100%) und die Umrichterstromgrenze $I_{s,max} = 2I_N$ (= 200% des Nennstroms) erläutert. Die Reaktanz des Ständers je Wicklungsstrang (Produkt aus Ständerfrequenz und Ständerstranginduktivität: $X_d = 2\pi f_N \cdot L$) ist – bezogen auf $Z_N = U_N / I_N$: $x_d = X_d / Z_N = 0.33$ p.u.. Die Polradspannung bei Nenndrehzahl ist $U_p / U_N = 0.7$. Es sind die Betriebspunkt a) bis d) dargestellt.

- Nenndrehzahl, Nenndrehmoment,
- Nenndrehzahl, doppeltes Nenndrehmoment,,
- 170% Nenndrehzahl, vermindertes Drehmoment durch Feldschwächung infolge eines verringerten Querstroms und eines Gegenfelds durch negativen I_d -Strom,
- 400% Nenndrehzahl bei starker Feldschwächung

	Spannung u_s	Strom i_s	i_{sd}	i_{sq}	Leistung	Drehzahl n
a)	0.8	1.0	0	1.0	P_N	n_N
b)	1.0	2.0	0	2.0	$2P_N$	n_N
c)	1.0	1.5	-0.8	1.27	$2P_N$	$1.7n_N$
d)	1.0	1.7	-1.6	0.5	$2P_N$	$4n_N$

Tabelle 4.1.3-2: Elektrische Betriebsdaten eines PM-Motors bei drehzahlveränderbarem Betrieb mit Feldschwächung (p.u.-Werte: $u_s = U_s/U_N$, $i_s = I_s/I_N$)

Vorteile der PM-Synchronmaschine:

- Technisch ausgereift
- Wartungsarm und robust, da keine Schleifringe etc. benötigt werden
- Kompakt dank der Hochenergiemagnete (NdFeB oder SmCo), dadurch geringe Masse
- hohe Drehzahlen möglich, wenn die Läufermagnete gut fixiert sind (z.B. Kohlefaserbandage)
- höherer Wirkungsgrad als Gleichstrom- und Asynchronmotoren
- hohe Momentendichte
- geringe Geräuschentwicklung

Nachteile:

- höherer Steueraufwand
- Drehzahl- und Rotor-Lagegeber notwendig

Die PM-Synchronmaschine ist die in modernen Hybridfahrzeugen am meisten eingesetzte elektrische Maschine, da sie auch bei hohen Drehzahlen trotz des dann erforderlichen feldschwächenden d-Stroms eine hohe Leistungsdichte hat. Dies ist vor allem dann möglich, wenn die Magnete im Läuferisen versenkt werden. Es entsteht dann ein Reluktanzunterschied zwischen den Flusspfaden in der d - und q -Achse des Läufers, so dass das Rotoreisen auch ohne Läufermagnete mit dem Ständerfeld ein Drehmoment entwickelt (Reluktanzmoment). Dieses Reluktanzmoment unterstützt das PM-Moment, so dass der q -Strom für das PM-Moment verringert werden kann, was Raum für einen ausreichenden d -Feldschwächstrom gibt, ohne die Verluste durch den Gesamtstrom zu groß werden zu lassen. In Bild 4.1.3-5 kann der q -Strom auch bei weggelassenen Magneten ein Ständer-Feld erzeugen, das sich gut im Läufer ausbildet, da sich seine Flusspfade über den Ständer, Luftspalt und das Läuferisen zwischen den zwei Magnetschichten schließen können. Dieses Feld hat sein Maximum im Luftspalt an den Stellen, wo das PM-Magnetfeld seine Nullstellen hat, also in vertikaler und horizontaler Richtung. Genau dort fließt der d -Strom mit maximaler Amplitude und erzeugt so mit dem Feld des q -Stroms ein Drehmoment (**Reluktanzmoment**), das bei negativem (also feldschwächendem d -Strom) in die gleiche Richtung zeigt wie das von den Läufermagneten und vom q -Strom erzeugte PM-Synchronmoment.

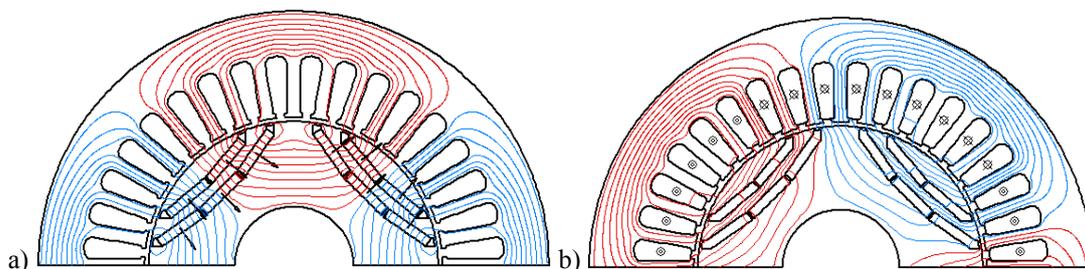


Bild 4.1.3-5: Vierpoliger PM-Motor mit versenkten Magneten in mehreren Schichten, obere Hälfte dargestellt: a) Leerlauf, Magnetisierungsrichtungen der Läufermagnete durch Pfeile angedeutet, Ständerstrom ist Null, b) Feld bei Nennmoment, Bestromungsrichtungen in den Ständermuten angegeben (positiv oder negativ), Programm FEMAG. Der Strom besteht aus q - und negativer d -Stromkomponente, um auch das Reluktanzmoment zu nutzen.

4.1.4 Geschaltete Reluktanzmaschine (switched reluctance machine)

Reluktanzmaschinen arbeiten ausschließlich mit dem Reluktanzunterschied zwischen d- und q-Achse, um ein Drehmoment zu erzeugen. Bei der geschalteten Reluktanzmaschine ist dieser Unterschied im Ständer UND Rotor durch ausgeprägte Lücken zwischen den Ständer- und Läuferzähnen ausgebildet, um ein großes Drehmoment zu erreichen. Die geschaltete Reluktanzmaschine zeichnet sich durch ihren einfachen Aufbau aus, was vor allem auf den Rotor zutrifft, und ist daher sehr kostengünstig herzustellen.

Stator und Rotor der haben unterschiedliche Nutenzahlen, z. B.: Stator: 8 Zähne und Nuten, Rotor: 6 Zähne und Nuten (Bild 4.1.4-1). Die Statorzähne tragen um sie gewickelte Spulen (Zahnspulen), die gemäß der gewünschten Strangzahl m zu unterschiedlichen Strängen zusammen geschaltet sind. Im Gegensatz zur verteilten Drehstromwicklung liegt hier eine einfach zu fertigende Zahnspulenwicklung (konzentrierte Wicklung) vor. Im Bild 4.1.4-1 sind vier Stränge 1, 2, 3, 4 mit je 2 Spulen einer 2-poligen Maschine dargestellt. Jeder der Stränge wird mit positiven (unipolarem) Gleichstrompuls aus voneinander unabhängigen Transistor-Halbbrücken angesteuert. Es wird jener Strang bestromt, dessen Ständerzähne den entsprechenden Läuferzähnen am nächsten stehen. Der tangentielle magnetische Zug der Feldlinien erzeugt das Reluktanzmoment. Sind Ständer- und Läuferzähne des betrachteten Strangs untereinander ausgerichtet, erlischt der tangentielle Zug. Daraufhin wird der Strang abgeschaltet und der nächste Strang wird bestromt. Die Drehrichtung wird durch geänderte Bestromungsabfolge der vier Stränge erreicht. Damit auch beim Anlauf die richtige Strangbestromung erfolgt und eine Drehzahlregelung im Betrieb möglich ist, wird eine Messung der Läuferlage wie bei der PM-Maschine vorgenommen. Da der magnetische Zug als Kraft pro Fläche durch

$$\sigma = B^2 / (2\mu_0) \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)} \quad (4.1.4-1)$$

gegeben ist, ist die magnetische Tangentialkraft und damit das Drehmoment wegen $B \sim I$ proportional zum Quadrat des Stromes. Bei Überlast ist auf Grund der hohen Flussdichte in den Zähnen und Jochen das Eisen gesättigt, so dass die Flussdichte im Eisen nur noch mit etwa $B \sim \sqrt{I}$ ansteigt. Daher ist bei hohen Strömen das Drehmoment proportional zu I (Bild 4.1.4-4a). Um die Anzahl der Leistungshalbleiter-Schalter zu minimieren, wird in der Regel die 3-strängige geschaltete Reluktanzmaschine bevorzugt (Bild 4.1.4-2).

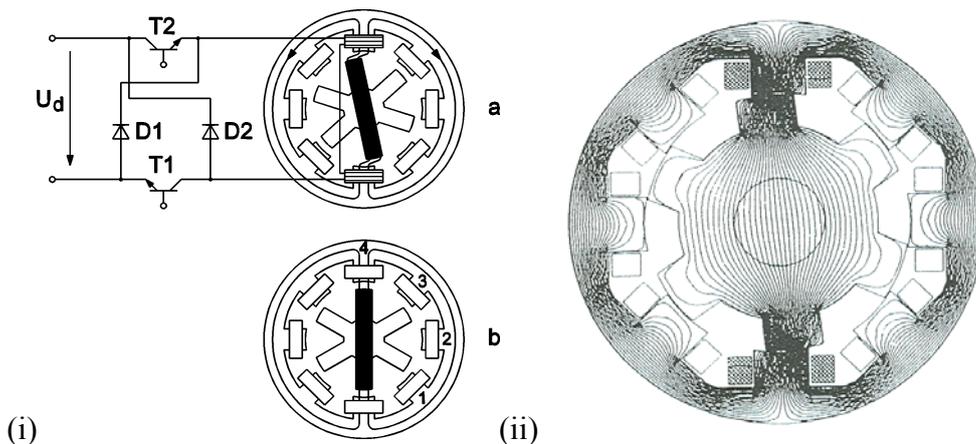


Bild 4.1.4-1: Zweipolige, vierphasige geschaltete Reluktanzmaschine (Axialschnitt): (i) Strang "4" ist bestromt aus der Transistor-H-Brücke, die über Pulsweitenmodulation aus dem Gleichspannungszwischenkreis U_d die gewünschte Gleichstromamplitude einstellt. Der Tangential-Magnetzug zieht die nächstliegenden Rotorzähne in die unter Strang 4 ausgerichtete Lage, (ii) Numerische Feldberechnung, Strang "1" bestromt (Motordaten: Statoraußendurchmesser: 320 mm, Luftspalt: 1 mm, Eisenpaketlänge: 320 mm, Wellendurchmesser: 70 mm, Zahnspulenwindungszahl: 10, Gleichstrom je Spule: 10 A DC)

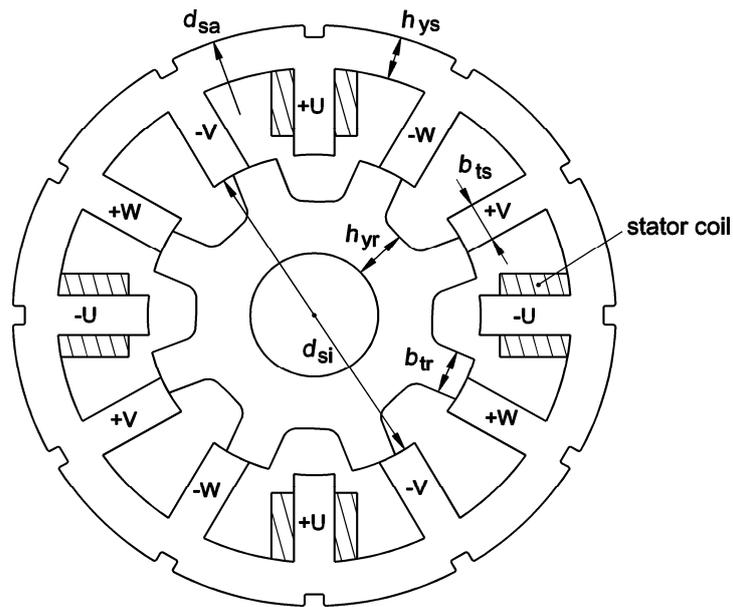


Bild 4.1.4.2: Querschnitt einer vierpoligen, dreisträngigen geschalteten Reluktanzmaschine

Um den Unterschied an Reluktanz zwischen Nut-Zahn- und Zahn-Zahn-Stellung möglichst groß zu gestalten, wird der Luftspalt zwischen den Rotor- und Statorzähnen möglichst klein gemacht – ähnlich wie bei der Asynchronmaschine. Die Bestromung mit ideal rechteckförmigem Gleichstrom erfolgt bei niedriger Drehzahl über Pulsweitenmodulation annähernd korrekt (Bild 4.1.4-3a), bei hohen Drehzahlen verbleibt wegen der kurzen Stromflussdauern nicht mehr die Zeit für PWM, so dass die Stromkurvenform verzerrt ist. Selbst bei ideal rechteckförmigem Strom ist das Drehmoment wegen des Luftspaltfelds nicht gleichförmig (Bild 4.1.4-3b). Die Drehmomentpulsation nimmt bei nicht idealem Strom zu. Das ergibt auch radial ungleichförmige Kräfte, so dass eine magnetische Geräuscherzeugung leicht möglich ist, da das schwingende Statorblechpaket wie ein Lautsprecher wirkt. Auf Grund der verformten Strompulse bei hohen Drehzahlen ist das Drehmoment bei gleichem Stromscheitelwert deutlich kleiner als bei niedrigen Drehzahlen, da der Mittelwert des Stroms deutlich kleiner ist. Es ergibt sich bei hohen Drehzahlen etwa ein mit $1/n$ sinkendes Verhältnis von Strommittelwert zu Stromscheitelwert. Das Eisen ist ungesättigt und das Drehmoment (proportional zum Quadrat des Stromes) sinkt mit $1/n^2$ (Bild 4.1.4-4b). Bei Leerlauf und Teillast ist wegen des geringen Drehmoments der Strom und damit der Fluss in der Maschine klein und daher auch der magnetische Zug, so dass im Leerlauf auch die Kraftanregung für Geräusche klein ist. Im Leerlauf ist daher die Maschine im magnetischen Geräusch i. a. unauffällig, kann aber unter Last durch Anregung von Schwingungsresonanzen des dünnen Ständerjochs erhebliche Geräuschpegel L erreichen (Bild 4.1.4-5).

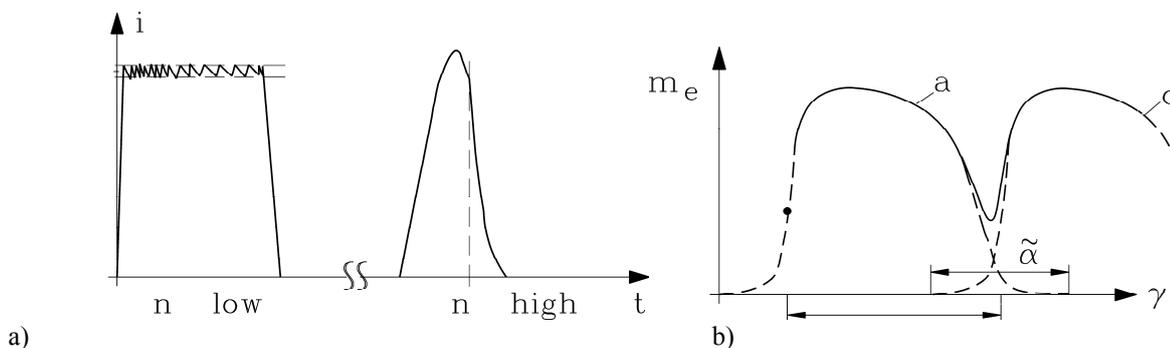


Bild 4.1.4-3: a) Stromverlauf in einem Strang bei niedriger (links) und hoher Drehzahl (rechts). Der Zeitmaßstab ist im rechten Bild gegenüber links deutlich gedehnt. B) Momentenwelligkeit bei ideal rechteckförmigem Stromverlauf.

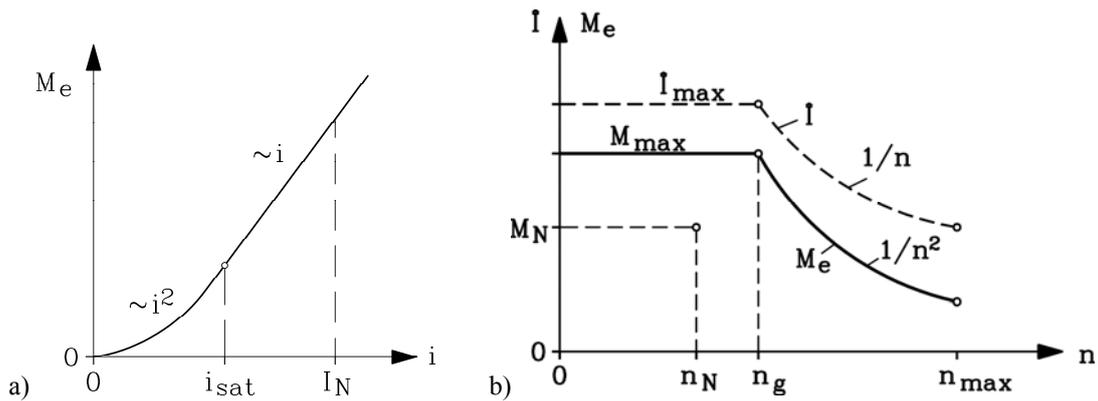


Bild 4.1.4-4: a) Drehmoment in Abhängigkeit vom Strom bei fester Drehzahl: ungesättigt: $i < i_{sat}$: $M \sim i^2$, gesättigt $i > i_{sat}$: $M \sim i$, (I_N : Nennstrom), b) Grenzkennlinie des Drehmoments in Abhängigkeit der Drehzahl bei vom Umrichter vorgegebener Stromgrenze I_{max} . Oberhalb der Grenzdrehzahl sinkt auf Grund des verzerrten Strompulses der Mittelwert des Stromes rasch ab, so dass das Drehmoment ebenfalls sinkt

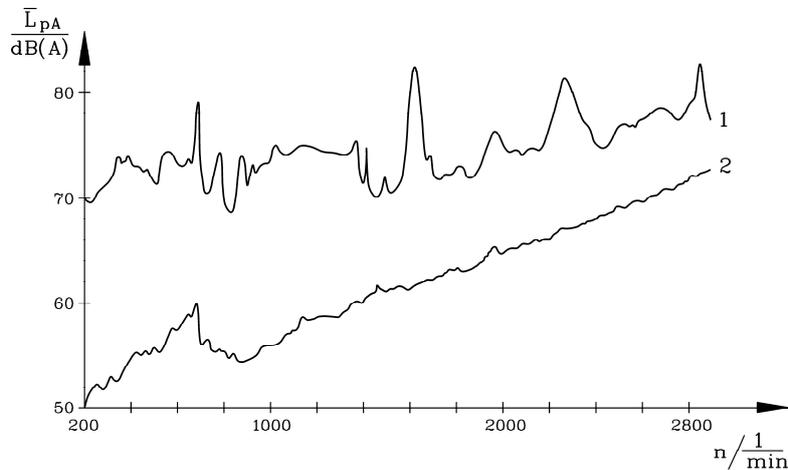


Bild 4.1.4-5: Gemessener Schalldruckpegel einer mit Wellenlüfter luftgekühlten 7.5 kW 12/8-Switched Reluctance-Maschine (Bild 4.1.4-2) im Schallmessraum (1: Betrieb mit Nennstrom, 2: Betrieb im Leerlauf). Im Leerlauf sind Drehmoment und Strom sehr klein, so dass wegen $B \sim i$ die anregende Radialkraft pro Flächeneinheit $f_r \sim B^2 \sim i^2$ ebenfalls klein ist und nur geringe Geräusche anregt. Bei Nennbetrieb sind durch Resonanzanregung hohe Geräuschspitzen gemessen.

	Switched-Reluctance-Maschine	Asynchronmaschine
Eingangs- / Ausgangsleistung P_{in}/P_{out}	9440 W/ 8480 W	9950 W/ 8480 W
Strangstrom (eff./peak) I/\hat{I}	13.3 A/ 27.5 A	17.45 A/ 30 A
Statorfrequenz f_s	200 Hz	52 Hz ($U_{s,k=1} = 225.5V$)
Ständerwicklungserwärmung	110 K	101 K
Eisen- / Reibungsverluste	200 W/ 165 W	265 W/ 55 W
Stromwärmeverluste Stator / Rotor	595 W/ 0 W	650 W/ 350 W
Zusatzverluste	0 W	150 W
Stator Stromdichte J_s	5.25 A/mm ²	8.23 A/mm ²
Strombelag $A = 2mN_s I_s / (d_{si} \pi)$	513 A/cm	305 A/cm
Motorwirkungsgrad η_{mot}	89.8 %	85.2 %
Umrichterwirkungsgrad η_{inv}	96.6 %	97.0%
Antriebswirkungsgrad η	86.7 %	82.6 %

Tabelle 4.4.4-1: Gemessene Verlustbilanz und Betriebsdaten aus Erwärmungsläufen im Dauerbetrieb bei 1500/min, 54 Nm und $U_d = 540$ V Zwischenkreisspannung einer vierpoligen Norm-Asynchronmaschine und einer geschalteten Reluktanzmaschine gleicher Baugröße und Nennleistung (Wellenlüfter, Luftkühlung, Oberflächenkühlung mit verripptem Statorgehäuse und Lüfterhaube).

Gegenüber der Asynchronmaschine entfallen die Läuferkäfigverluste und auch die Zusatzverluste bei Umrichterspeisung sind dadurch kleiner. Es ergeben sich wegen der kompakten Zahnspulen auch i. a. ein guter Wärmeübergang und damit geringere Wicklungserwärmungen bei gleichen Stromdichten, so dass die Stromwärmeverluste im Stator kleiner als bei der Asynchronmaschine sind. In Summe ergibt sich bei gleicher Baugröße i. a. ein höherer Wirkungsgrad als bei der Asynchronmaschine. Die in Tabelle 4.1.4-1 angegebene Asynchronmaschine ist allerdings für Netzbetrieb vorgesehen und nicht für Umrichterbetrieb optimiert, wo stromverdrängungsarme Läuferkäfige zum Einsatz kommen.

Vorteile der geschalteten Reluktanzmaschine:

- einfacher, kostengünstiger Aufbau
- robuster Läufer
- wartungsarm
- keine verteilte Drehstromwicklung, sondern Einzelzahnwicklung
- hohe Drehzahlen
- geringes Läuferträgheitsmoment
- Ausfallsicherheit durch getrenntes Einspeisen der Wicklungsstränge (auch 2-strängiger Anfahrbetrieb möglich)
- Hohe Momentendichte und hohes Anfahrmoment
- hohe Motorausnutzung dank kompakter Zahnspulen und hoher Eisenflussdichten
- hoher Wirkungsgrad (geringe Läuferverluste nur durch Ummagnetisierung)
- hohe Überlastbarkeit
- hohes Dauerdrehmoment
- geringe Erwärmung bei kleinen Drehzahlen

Nachteile:

- hohe Momentenwelligkeit
- starke Geräuschentwicklung
- von Drehzahl abhängiges Steuerverfahren
- Drehzahl- und Lagegeber notwendig



Bild 4.1.4-6: Läufer und Statorblechpaket eines 3-phasigen, zweipoligen 6/4-geschalteten Reluktanzmotors

4.1.5 Transversalflussmaschine (TFM)

Die TFM ist eine rotorlagegeber-gesteuerte PM-Synchronmaschine mit der Besonderheit, dass der Fluss transversal zur Rotationsrichtung geführt wird (Bild 4.1.5-1). Das bedingt die Notwendigkeit, zwei Magnetreihen mit alternierender Polarität unterhalb der Ringspule eines Ständerwicklungsstrangs anzubringen, wobei geblechte U-Eisen-Joche im Abstand der doppelten Polteilung den Magnetfluss entweder der N-Pole oder (bei Weiterbewegen des Läufers um eine Polteilung) der S-Pole um die Ringspulen führen. Dadurch, dass nur p U-Joche vorhanden sind, können nur z. B. die p N-Pole einer Magnetreihe und die ihnen gegenüberliegenden p S-Pole der zweiten Reihe einen Fluss ausbilden, so dass die Flussverkettung im Bild 4.1.5-1 nur im Uhrzeigersinn der Feldlinien erfolgt. Nach einem Weiterrücken des Läufers um eine Polteilung kehrt sich die Flussverkettung um, so dass eine Wechselflussverkettung der Ständerringspule entsteht und so in diese – wie bei der konventionellen PM-Maschine - eine „Polradspannung“ induziert wird (Bild 4.1.5-2). Werden die Magneten durch stromdurchflossene Spulen gedanklich ersetzt (Bild 4.1.5-3), so erkennt man, dass bei Wechselstromspeisung eines Strangs immer dann eine Tangentialkraft entsteht, wenn die Pollücken der Magnete unter den U-Jochen liegen. Über die Polradlagegeber wird der Umrichter daher so gesteuert, dass dann maximaler Strom in der Ringwicklung fließt.

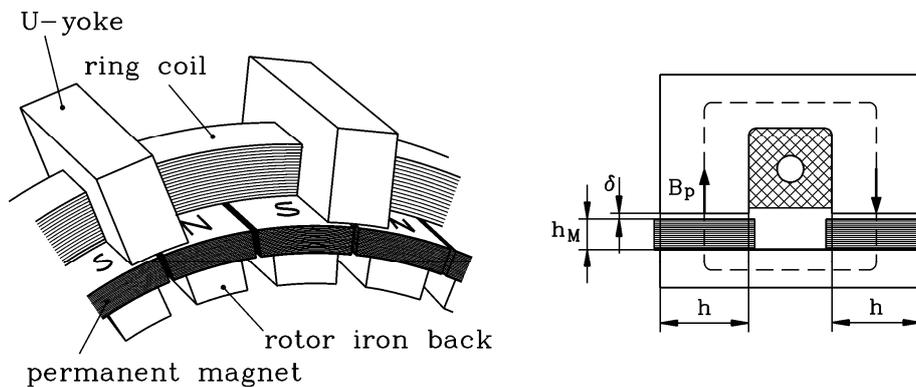


Bild 4.1.5.-1: Transversalflussmaschine: Darstellung eines Strangs, bestehend aus einer Ringspule, p U-Jochen und $2p$ Magneten alternierender Polarität in zwei parallelen Reihen mit entgegengesetzter Polarität (links), Erregung des Läufer-PM-Leerlaufes bei stromloser Ringwicklung, das sich über die U-Joche schließt (rechts)

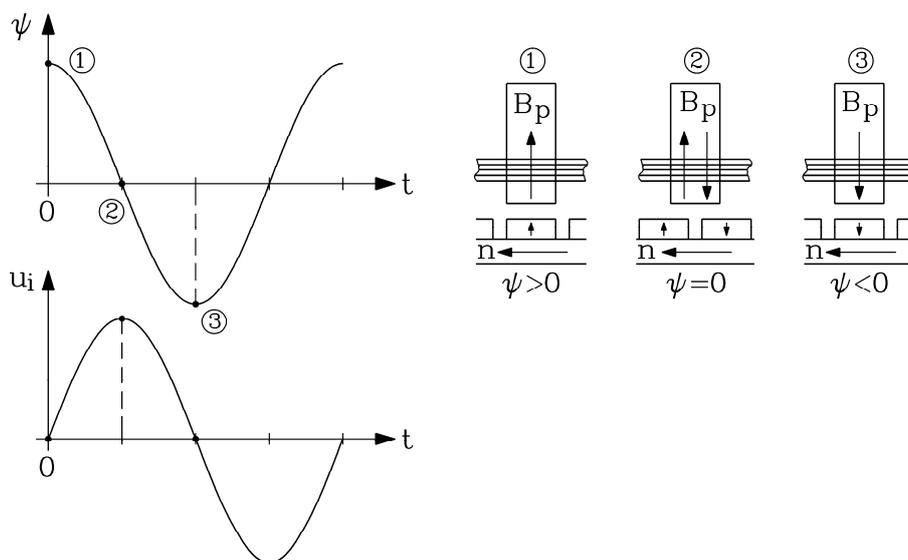


Bild 4.1.5-2: Spannungsenduktion in die Ständerringspule einer Transversalflussmaschine: Die wechselnde Flussverkettung ψ induziert die Polradspannung $u_i = u_p$

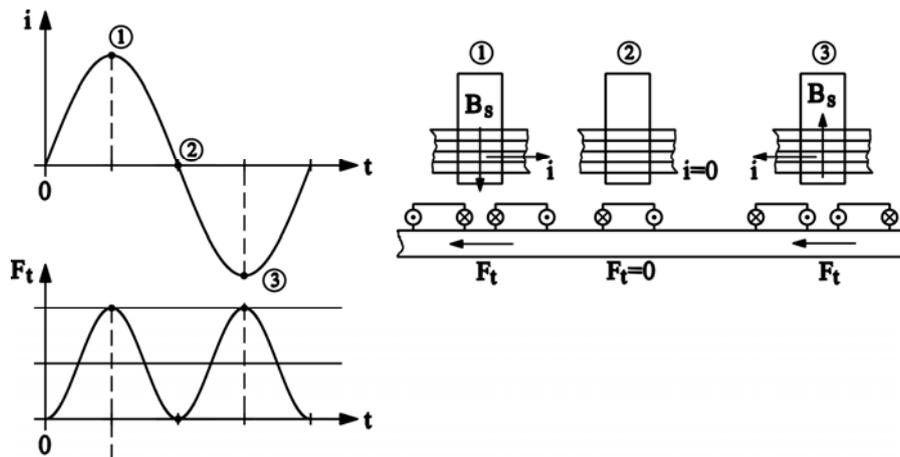


Bild 4.1.5-3: Die Wechselstromspeisung i einer Statorringspule erzeugt ein Ständermagnetfeld B_s , das mit der Ersatzstromanordnung der PM-Maschine gemäß dem *Lorentz-Kraftgesetz* eine Tangentialkraft F_t erzeugt, die mit doppelter Speisefrequenz $2f$ pulsiert.

Zwei um eine Viertelpolteilung zueinander versetzte Ringspulen und U-Jochfolgen ergeben zwei versetzt pulsierende Tangentialkräfte, so dass die Summentangentialkraft bei sinusförmiger Pulsation theoretisch konstant ist. Auf diese Weise entsteht eine zweiphasige TFM (Bild 4.1.5-4). In gleicher Weise lassen sich drei- und mehrphasige Maschinen darstellen, indem z. B. drei Ringspulen um $1/3$ einer doppelten Polteilung angeordnet werden. Da die Kraftpulsationen i. a. nicht sinusförmig sind, verbleibt auch in der resultierenden Tangentialkraft eine Kraftwelligkeit ähnlich wie bei der geschalteten Reluktanzmaschine. Es kann in ähnlicher Weise zu erheblichen Geräuschanregungen kommen.

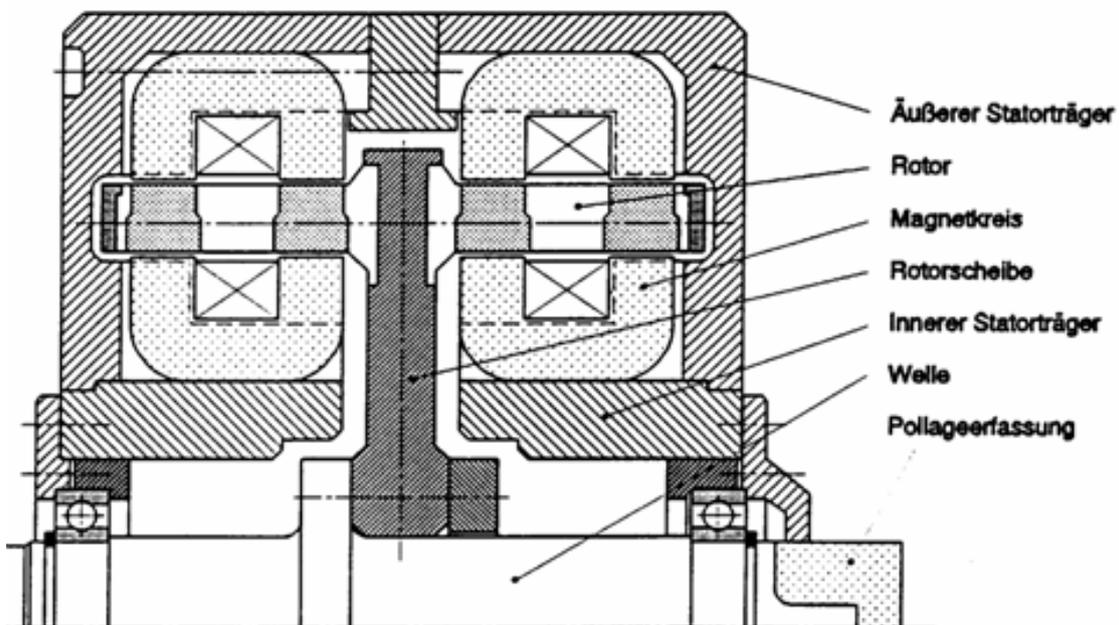


Bild 4.1.5-4: Zweisträngige Transversalflussmaschine im Längsschnitt nach Prof. *Weh*, TU Braunschweig, Läufermagnete in Sammleranordnung, doppelt wirkende TFM mit je einer Ringspule ober- und unterhalb der Magnetreihen je Strang

Da pro U-Joch ein Kraftbeitrag erzeugt wird, kann das Drehmoment durch Erhöhung der U-Jochzahl bei gleichzeitiger Verringerung der Magnetbreite in Umfangsrichtung erhöht werden, was zu hohen Momentendichten führt, aber auch zu hohen Polzahlen. Damit ist die Speisefrequenz für das Erreichen höherer Drehzahlen hoch (im kHz-Bereich), was zu hohen Zusatzverlusten führt und die damit den Wirkungsgrad empfindlich verringert. Durch Anordnung einer Ringspule oberhalb und unterhalb der

Magnetreihen kann der Drehschub (nahezu) verdoppelt werden, wenn die Magnete in Sammleranordnung senkrecht aufgestellt werden (Bild 4.1.5-5). Dann besitzt die TFM das höchste spezifische Leistungsgewicht und kann unmittelbar als Direktmotor ohne Getriebe im radnahen Bereich eingebaut werden. Der relativ einfachen Ringwicklung stehen die komplexen magnetischen Pfade im Läufer gegenüber. Für den Einsatz in Serienfahrzeugen ist die TFM bis jetzt noch nicht geeignet, da sie in erster Linie als Direktantrieb geeignet ist. Als solcher sind Busantriebe als Prototypen der Fa. Voith auf Basis der Patente von Prof. Weh im Einsatz. Die erste Generation dieser Antriebe ist in Bild 4.1.5-6 dargestellt, während die zweite Generation mit nochmals erhöhter Leistungsdichte nunmehr zum Einsatz kommt.

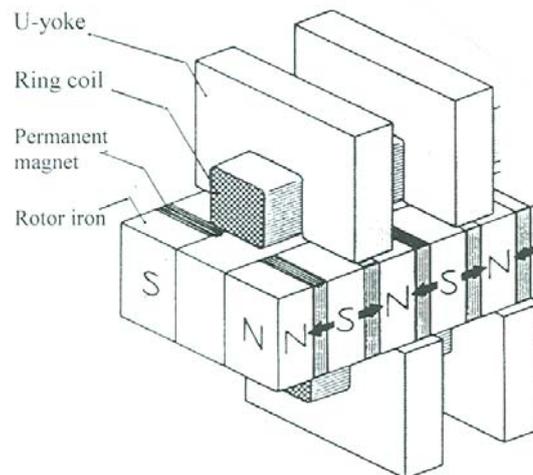


Bild 4.1.5-5: Magnetische Flusskonzentration im Rotor durch hochkant gestellte Läufermagnete (Sammleranordnung) mit oberhalb und unterhalb angeordneter Ringspule und zugeordneten U-Jochen

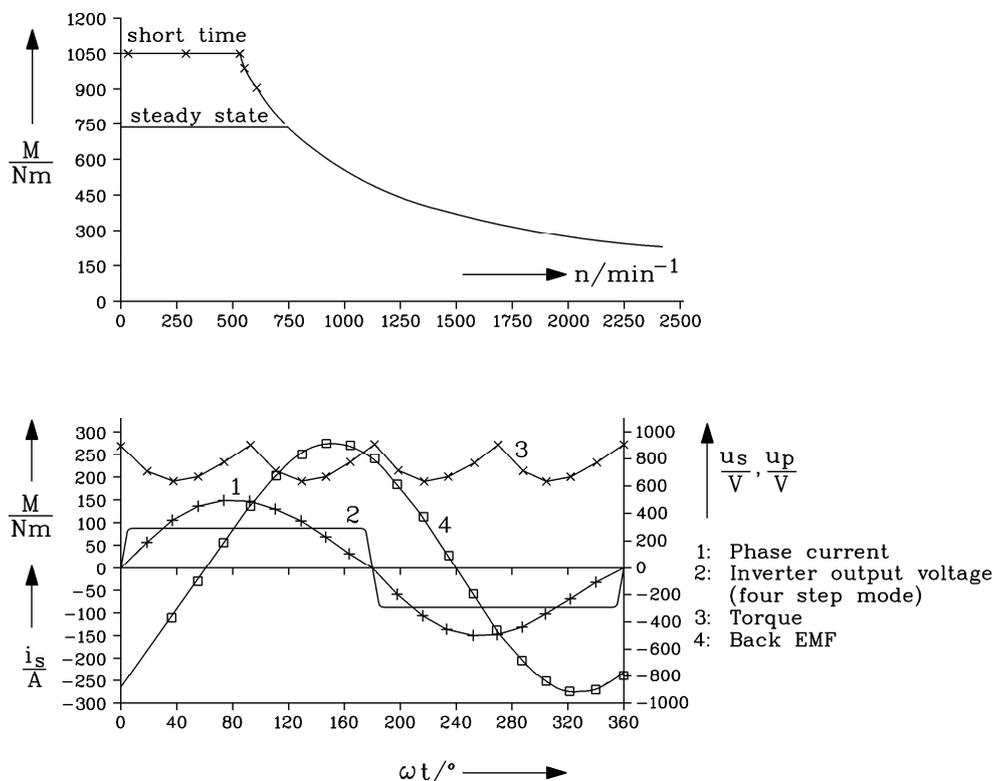


Bild 4.1.5-6: 57kW TFM: Berechnete elektrische Betriebsdaten für einen City-Bus-Antrieb (Voith, Germany). Oben: Drehmoment-Drehzahl-Grenzkennlinie, Unten: Berechnete Zeitverläufe von Strangstrom i_s , Polradspannung u_p , Umrichterausgangsspannung u_s im Blockspannungsbetrieb bei maximaler Drehzahl 2500/min, Drehmoment. Drehmomentwelligkeit 17% mit 4-facher Ständerfrequenz 5.4 kHz.

Die erste Generation von Prototypen einer TFM-Reihe für City-Busse (Voith, Heidenheim, Germany) hatte folgende Eckdaten: $n_{\max} = 2500/\text{min}$, $M_{\max} = 1050 \text{ Nm}$, $f_{\max} = 1375\text{Hz}$, Dauerleistung 57 kW, Aussendurchmesser 420 mm, Masse 115 kg, 300 V DC Zwischenkreisspannung, Polzahl $2p = 66$, Anzahl der Wicklungsstränge $m = 2$

Grunddrehzahlbereich: Konstantes Drehmoment	0...750/min	725 Nm Dauermoment 1050 Nm Überlastmoment
Konstantleistungsbereich	750...2500/min	725...218 Nm dauernd

4.2 Vergleich der Motortypen

Während in den älteren, mit Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen noch zu einem erheblichen Anteil Gleichstrommotoren eingesetzt wurde, sind diese in neueren Elektro- oder Hybridfahrzeugen so gut wie verschwunden. Der Trend bewegt sich bei neueren Fahrzeugen in Richtung der PSM, was im Wesentlichen auf die Verwendung neuer Hochenergiepermanente Magnete aus Selten-Erd-Metallen und dem hohen Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich und auch bei Teillast zurückzuführen ist. Bei hohen Drehzahlen ist durch die feldschwächende d-Stromkomponente der Wirkungsgrad der PSM i.a. verschlechtert, während ASM und SRM durch geringere Stromaufnahme „automatisch“ feldschwächen. Sie weisen daher im höheren Drehzahlbereich bessere Wirkungsgrade auf. Bei Verwendung zweier Motoren und Auftreten eines Fehlers z. B. in der Ständerwicklung eines Motors kann durch Abschalten der SRM und der ASM diese Maschine im fail-silent-Modus problemlos mitgeschleppt werden. Bei der PSM ist wegen der Läufer-Magnete der Zustand fail-active. Es wird eine Spannung in die fehlerhafte Ständerwicklung induziert, was bei Windungsschlüssen zu einem Fehlerstrom in der Kurzschlusswindung selbst bei abgeschalteter Maschine führt, solange sie sich dreht. Selbst bei offener Ständerwicklung kommt es zu „Schleppverlusten“ bei rotierender Maschine auf Grund der Ummagnetisierungsverluste im Ständerblechpaket, die über die Wirbelströme im Ständereisen und die Eisenhysterese ein bremsendes Moment erzeugen.

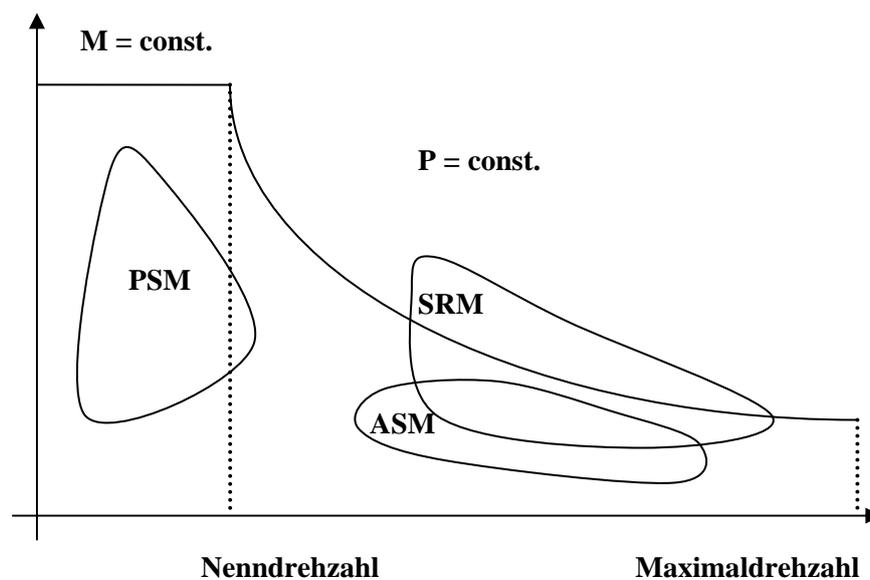


Bild 4.2-1: Gebiete maximalen Wirkungsgrades der drei unterschiedlichen Antriebskonzepte PSM (Permanentmagnet-Synchronmaschine), ASM (Käfigläufer-Asynchronmaschine), SRM (geschaltete Reluktanzmaschine)

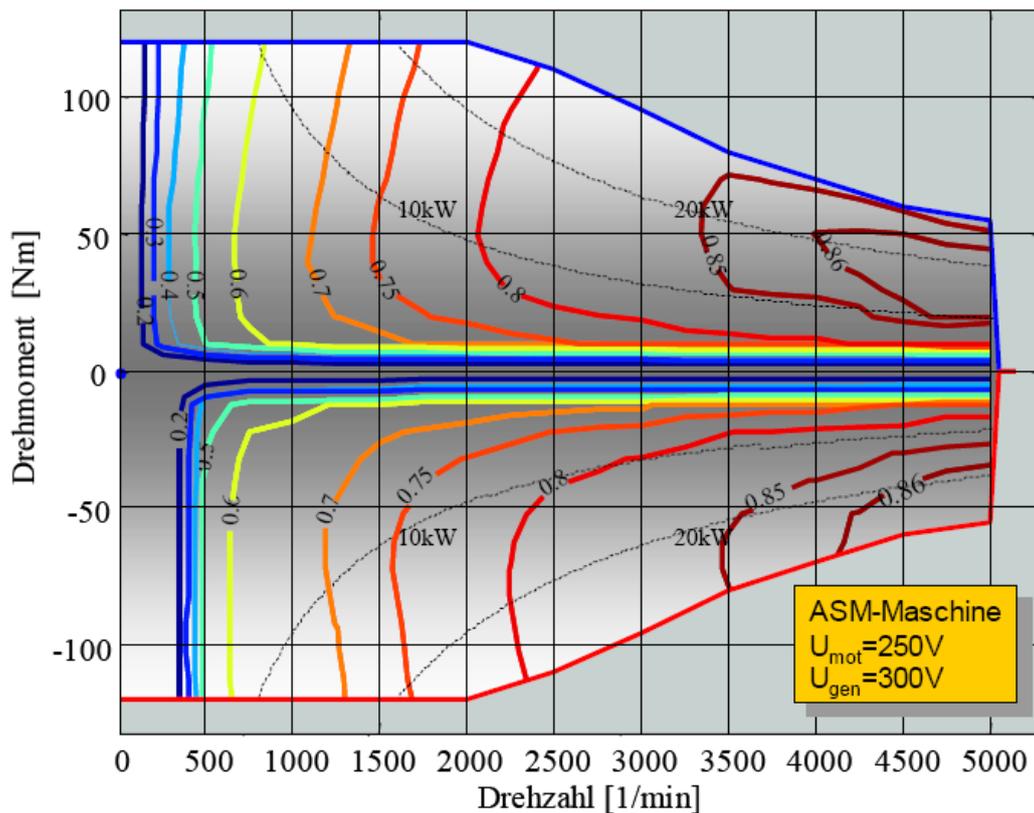


Bild 4.2-2: Wirkungsgrad-Kennlinienfeld einer für ein Hybrid-Fahrzeug konzipierten ASM (aus: Köhle, S.: Der Volkswagen Bora Hybrid, Entwicklungsziele, Fahrzeugbeschreibung und erste Messergebnisse des VW Bora mit Hybridantrieb, 2003)

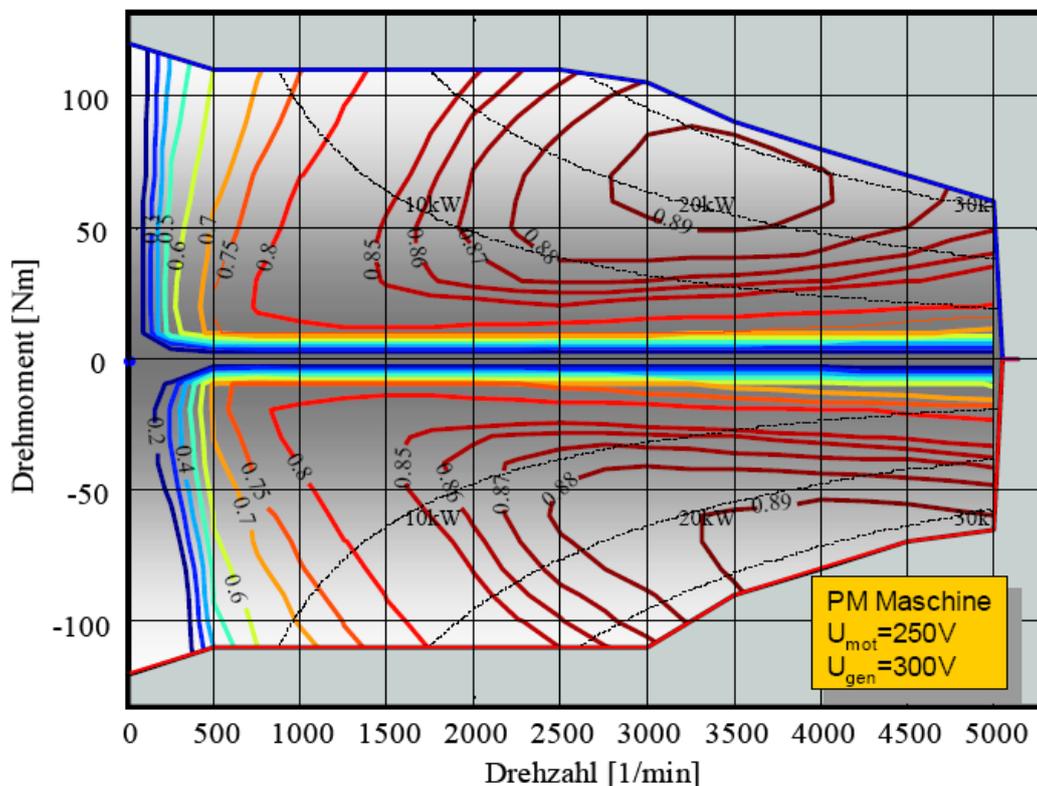


Bild 4.2-3: Wirkungsgrad-Kennlinienfeld einer für ein Hybrid-Fahrzeug konzipierten PSM (aus: Köhle, S.: Der Volkswagen Bora Hybrid, Entwicklungsziele, Fahrzeugbeschreibung und erste Messergebnisse des VW Bora mit Hybridantrieb, 2003)

	ASM	PSM	SRM	TFM	GSM
Momentendichte	0	++	+	++	-
Wirkungsgrad	0	++	0	+	-
Masse	+	++	+	++	-
Stand der Technik	++	+	0	--	++
Wechselrichter	+	0	--	--	++
Kosten	0	-	++	-	-
Fertigung	+	-	++	--	-
Geräusch	+	++	-	--	+

Tabelle 4.2-1: Vor- und Nachteile der elektrischen Maschinen als Traktionsmaschine

PSM (Permanentmagnet-Synchronmaschine), ASM (Käfigläufer-Asynchronmaschine), SRM (geschaltete Reluktanzmaschine), TFM (Transversalflussmaschine), GSM (Gleichstrommaschine)

	Reihenschluss-motor	Fremderregter Gleichstrommotor	ASM	fremderregter Synchronmotor	PSM	geschalteter Reluktanzmotor
Kosten	niedrig	mittel	mittel	mittel	mittel	niedrig
Wirkungsgrad	schlecht	mittel	gut	sehr gut	gut	sehr gut
Entwicklungsreife	hoch	mittel	hoch	mittel	mittel	niedrig
Wartung	ja	ja	nein	nein	nein	nein
Kennlinie	schlecht	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Schaltungsaufwand	sehr gering	gering	hoch	hoch	hoch	mittel
Rekuperation	aufwendig	kein zusätzlicher Aufwand	kein zusätzlicher Aufwand	kein zusätzlicher Aufwand	kein zusätzlicher Aufwand	kein zusätzlicher Aufwand

Tabelle 4.2-2: Vergleich Elektroantriebe für Elektrofahrzeuge

Kostenvergleich zwischen ASM, PSM und GRM bei 25 kW

Ein wesentliches Kriterium für die Wahl des zu verwendenden Motortyps sind die Kosten. In der folgenden Tabelle werden ASM, PSM und SRM im Hinblick auf die Produktionskosten bei Dimensionierung auf gleiche Nenn-Leistung miteinander verglichen.

Die PM-Magnete verteuern die PM gegenüber der ASM und der SRM.

Während die ASM nur einen Drehzahlgeber benötigt, ist für die PSM, die SRM und auch die TFM ein Lagegeber erforderlich, um die genaue Position des Rotors zu bestimmen und somit ein maximales Drehmoment zu ermöglichen. In allen Fällen können auch geberlose Verfahren zum Einsatz kommen, wo z. B.

- a) über injizierte Testsignale in die Ständerwicklung über Reluktanzeffekte oder
- b) über die Erfassung der Polradspannung

die Läuferlage indirekt erfasst wird, ohne einen gesonderten Lagegeber zu benötigen.

Als Lagegeber kommen optische Inkrementalgeber oder Absolutwertgeber einerseits (Bild 4.2-4a) und (die kostengünstigeren, aber ungenaueren) elektromagnetische Resolver (Bild 4.2-4b) andererseits zum Einsatz.

		Asynchronmotor	Permanent-Magnet-erregter Synchronmotor	Geschalteter Reluktanzmotor
Nennleistung	kW	25	25	25
max. Drehmoment	Nm	130	150	130
max. Drehzahl	min ⁻¹	13.500	11.500	13.500
Motormasse	kg	59	55	65
Ständerdurchmesser	mm	235	235	235
Ständerlänge	mm	125	125	125
Luftspaltbreite	mm	0,5	1	0,4
ECE-Zyklenreichweite als Hybridantrieb		100 %	105 %	102,5 %
max. Wechselrichterstrom	A	400	600	400
Drehmomentwelligkeit		2,5 %	3 %	10 bis 15 %
elektromagnetischen Geräusche		i. a. gering, von Nutzzahlen abhängig	i. a. gering. Von Magnetpolkanten abhängig	hohe Geräusche vor allem bei hoher Drehzahl
Erforderliche spezifische Ummagnetisierungsverluste im Statorblechpaket	W/kg 50 Hz 1.5 T	3,2 ... 5,3*) *) Standardmaterial	3,2*) ... 5,3 Höherwertiges Material	2.0 (Hochwertiges Material)
Ausgeführt	W/kg	5.3	3.2	2.0
Systemkosten bei 10.000 Antrieben per annum		100 %	120 %	108 %

Tabelle 4.2-3: Exemplarischer Vergleich zwischen ausgeführten flüssigkeitsmantelgekühlten E-Motoren für E-Fahrzeuge: ASM, PSM und SRM bei 25 kW Bemessungsleistung

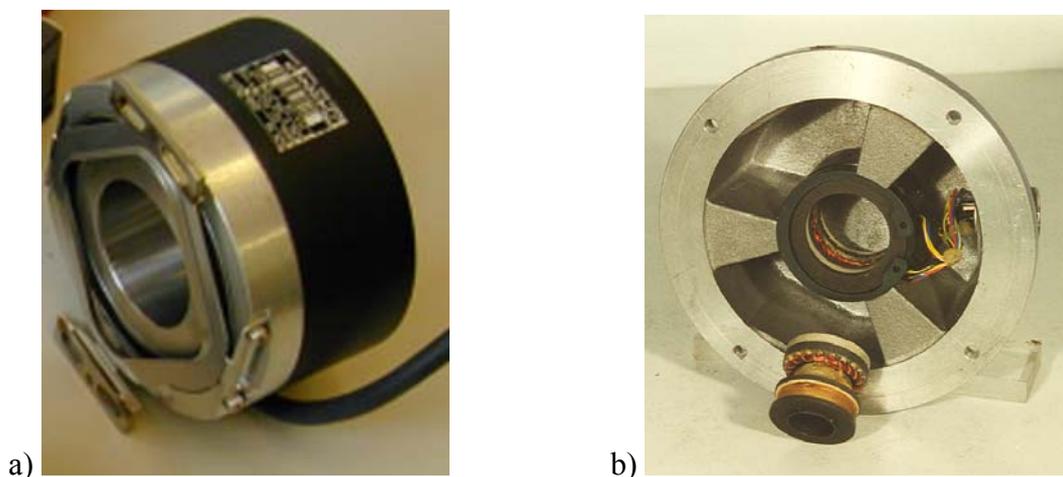


Bild 4.2-4: Polradlagegeber: a) Optischer Inkrementalgeber mit A- und B-Spur zur Richtungserkennung und Nullspur zur Erkennung der Ausgangslage, Auflösung 1024 Striche am Umfang, b) Resolverläufer mit Trafospule für 10 kHz Betriebsfrequenz und der Sinus- und Cosinus-Läuferpule, und dahinter im Lagerschild eingebauter Ständer. Die Auswerteelektronik für a) und b) zur Berechnung des Polradlagewinkels befindet sich im Umrichter.

Für die Weiterentwicklung der E-Motoren hinsichtlich erhöhter leistungsdichte und Effizienz ist folgendes zu beachten: Moderne **Isolierstoffe** erlauben bei gleicher Spannungsfestigkeit geringere Isolierdicken, so dass eine größere Leiter-Querschnittsfläche, besserer Wärmeübergang, geringere Stromdichte und damit niedrigere Verluste und Temperaturen möglich sind. Glasfaserbasierte Isolierstoffe ermöglichen Dauertemperaturen von 180°C (Wärmeklasse H). Mit der speziellen

Wärme Klasse 200, die für den Bahnbetrieb entwickelt wurde, sind Erwärmungen von 200 K dauernd möglich, also Dauertemperaturen von 240°C. Allerdings ist allen Isolierstoffen eigen, dass mit Erhöhung der Dauertemperatur die Lebensdauer sinkt. Für E-Motoren in Fahrzeugen sind die Isolierstoffe für etwa 5000 Betriebsstunden zu optimieren. Das *Montsinger-Gesetz* besagt, dass harzbasierte Isolierstoffe bei 10 K Erhöhung der Dauertemperatur ihre Lebensdauer infolge chemischer Reaktionsprozesse etwa halbieren.

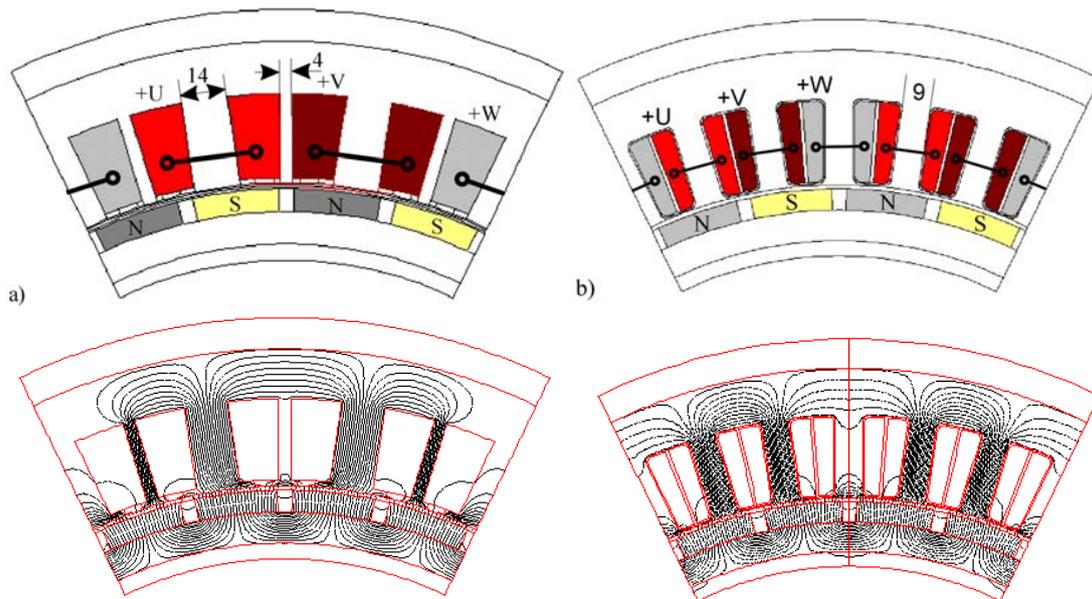


Bild 4.2-5: Modulare PM-Synchronmaschinen haben statt einer verteilten Drehstromwicklung im Ständer Zahnspulenwicklungen ähnlich wie die SRM: Numerisch berechnete Feldlinien der magnetischen Flussdichte bei Leerlauf (Ständerstrom Null) für 2 Polpaare von je einer dreisträngigen PM-Maschine: a) Je ein Zahnspule von U, V, W auf vier Läuferpole: (mit 4 mm breiten Zwischenzähnen zwischen den Spulen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr), b) Je ein Zahnspule von U, V, W auf zwei Läuferpole

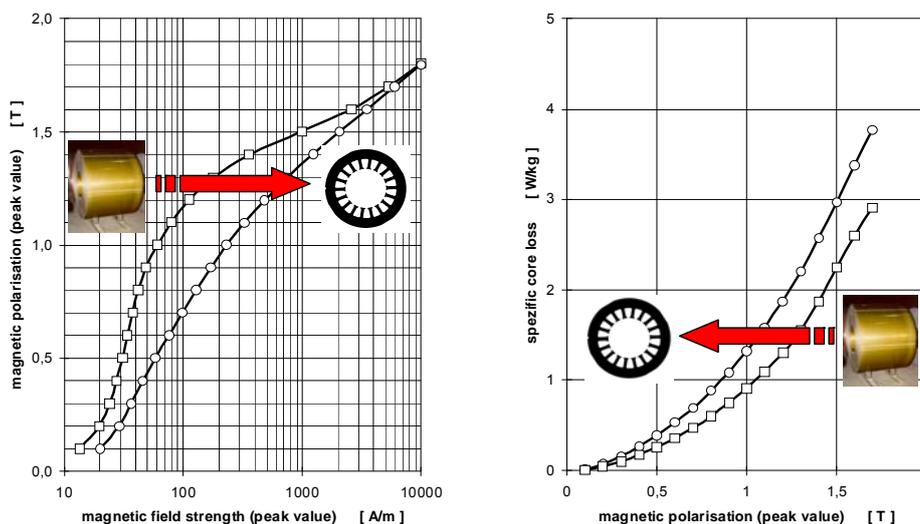


Bild 4.2-6: Blechstanzen: links: Absenkung der magn. Polarisation, rechts: Erhöhung der spezifischen Verluste, (Dissertation Schoppa, A. P.: *Einfluss der Be- und Verarbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von schlussgeglühtem, nichtkornorientiertem Elektromagnetband*, Dissertation, RWTH Aachen, 2001)

Moderne **Hochenergie-Permanentmagnet-Werkstoffe** (PM) mit hohen Remanenzfluss-dichten und Koerzitivfeldstärken (ca. 1.4 T bei ca. 1000 kA/m) erlauben schon jetzt den Bau auch großer permanentmagneterregter Synchronmaschinen im MW-Bereich mit hohen Wirkungsgraden über 93%

trotz niedriger Drehzahlen, doch ist das Entwicklungspotential der PM begrenzt. Allerdings sind mit der PM-Technologie Kombinationen mit der verlustarmen Wicklungstechnologie der Zahnspulentechnik (wie sie bei SRM eingesetzt wird) möglich (Bild 4.2-5). Das erlaubt deutlich kompaktere Motoren dank kurzer Wickelköpfe und verringerte Stromwärmeverluste. Aber die Ständerfeldverteilung im Luftspalt weicht von der erwünschten Sinusform erheblich ab. Speziell bei hohen Drehzahlen steigen die Wirbelstromverluste in den Läufermagneten unter Last stark an, so dass eine sorgfältige Auslegung des Rotors mit unterteilten Magneten nötig ist. Für höhere Drehzahlen ist hier noch Entwicklungsarbeit zu leisten. Die in den leitfähigen Magneten auftretenden Wirbelstromverluste bei drehzahlveränderbaren (umrichter gespeisten) Maschinen sind ein Problemkreis, der geeignete Vorausberechnungen und geometrische Anordnungen (vergrabene oder unterteilte bzw. speziell beschichtete Magnete) erfordert. Das **weichmagnetisches Material** für den Einsatz in elektrischen Maschinen bei höheren Drehzahlen erfordert bei höchst möglicher Permeabilität und Sättigungsinduktion möglichst niedrige spezifischen Verlusten (Wirbelstrom- und Hystereseverluste) in einem weiten Frequenzbereich. Aus Kostengründen werden eisenbasierte Werkstoffe wie Eisen-Silizium-Bleche (z.B. FeSi6.5) zur Verringerung der Wirbelstromverluste, Eisen-Nickel-Werkstoffe (Fe-Ni) sowie Eisen-Kobalt-Werkstoffe (FeCo) eingesetzt. Sinterwerkstoffe auf Eisen-Basis (Soft Magnetic Composites, SMC) für den Einsatz bei hohen Frequenzen im kHz-Bereich wegen niedriger Wirbelstromverluste weisen noch eine relativ niedrige Permeabilität von 1/10 von Reineisen auf. Amorphe (MetGlass) und nanokristallinen Werkstoffe hat sich in Antriebsmotoren bisher noch nicht durchgesetzt. Für Mittelfrequenz-Maschinen (High-Speed-Antriebe oder TFM für gesteigerte Drehzahlen) sind verlustarme, dünne Elektrobleche (z. B. HF20-Blech) zur Verlustbegrenzung erforderlich. Rechnerisch schwer zu fassen ist der **verlust erhöhende Einfluss** der mechanischen Bearbeitung der Bleche mit einer einhergehenden Absenkung der Sättigungspolarisation. Schonende Verfahren (Laserschneiden statt Stanzen, Rekristallisationsglühen) werden nur fallweise eingesetzt (Bild 4.2-5). Die Be-/Verarbeitung von Pulververbundwerkstoffen erfordert neue Herangehensweisen.

5. Wechselrichter

Zur Nutzung und Regelung der den Energiespeichern entnommenen Gleichspannung muss diese durch einen Wechselrichter in eine Wechselspannung umgeformt werden. Bei industriellen Umrichtern erfolgt zunächst eine Gleichrichtung der Drehspannung des öffentlichen Netzes in eine über einen Zwischenkreiskondensator geglättete Gleichspannung. Beim Batterie-Fahrzeug ist diese Gleichspannungsquelle die Batterie selbst. Der Kondensator dient zur Aufnahme der Wechselstromanteile des Motorstroms, die durch die Pulsweitenmodulation des Wechselrichters bedingt sind. Dadurch wird der Stromwechselanteil von der Batterie weitgehend ferngehalten.

Je größer die Kapazität des Kondensators ist, desto geringer ist der dem Gleichstrom überlagerte Wechselstrom in der Batterie. Ist der Energiefluss umgekehrt vom Motor zur Batterie beim Rekuperieren während des Bremsen, so wirkt der Wechselrichter bezüglich der Batterie als Gleichrichter, der aus der im Motor induzierten Wechselspannung eine Gleichspannung erzeugt, die größer als die Batteriespannung ist, so dass Strom in die Batterie fließt. Auf Grund der relativ hohen Batteriespannungen von mehreren Hundert Volt sind die rasch schaltenden MOS-FET-Leistungsschalter (Feldeffekttransistoren) spannungsmäßig zu klein, auch wenn sie im Bereich bis ca. 50 kHz verlustarm schalten können. Die Kombination aus MOS-FET an der Basis herkömmlicher bipolarer Schalttransistoren, die sogenannten IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistoren), erlaubt schnelles, verlustarmes Schalten bis ca. 10 kHz mit deutlich größeren Spannungen und Strömen als bei den MOS-FETS. Die Silizium-basierte Technologie hat aber Temperaturgrenzen bei ca. 125 ... 150°C Sperrschichttemperatur. Die SiC-(Siliziumkarbid)-Technologie stellt bereits im kleineren Leistungsbereich Schottky-Dioden und Leistungstransistoren bis z. B. 5 A zur Verfügung, die aber für die Anwendung in E-Fahrzeugen bei weitem noch nicht ausreichen. Die elektrischen Bauelemente für die Umrichtertechnik bestimmen deren Energieeffizienz.

Bei hartschaltenden Spannungszwischenkreis-Umrichtern entscheiden die Verluste der Leistungshalbleiter, bei resonant schaltenden und bei Stromzwischenkreis-Umrichtern beeinflussen die passiven Bauelemente (z. B. induktive) die Energieeffizienz nennenswert. Prognostiziert wird durch die enge Wechselwirkung zwischen neuen Bauelementen und damit realisierbaren Umrichtertopologien eine Halbierung der Verlustenergie. Leistungshalbleiter aus SiC (Siliziumkarbid) ermöglichen wegen des großen Bandabstandes zwischen Valenz- und Leitfähigkeitsband theoretisch einen stabilen Betrieb bis zu 600°C Sperrschicht-Daueroperatingtemperatur bei deutlich verringerten Schaltverlusten (z. Zt. Si-Halbleiter: 125 ... 150°C). Die hohe kritische Feldstärke in SiC erlaubt dünnere Bauelemente mit niedrigeren Verlusten. Die verfügbaren Anschluss-, Montage- und Isolationstechniken sind für Silizium und daher nur bis ca. 200°C entwickelt worden. Um das Potential von SiC bezüglich hohen Temperaturen zu nutzen, müssen neue Materialien erforscht und zugehörige Anschluss- und Montagetechniken entwickelt werden. Bei den gängigen Silizium-basierten Schalttransistoren (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) wurden die Durchlass- und Schaltverluste stetig gesenkt; hier stößt man aber an Grenzen. In hartschaltenden Umrichtern verursacht der Rückstrom von Si-Leistungsdioden einen erheblichen Anteil der Einschaltverluste der IGBTs. Eine grundlegende Verbesserung wird durch den Übergang zu SiC-Leistungshalbleitern erwartet. In *Deutschland* realisierte Forschung ist auf diesem Gebiet hervorragend positioniert, (weltweit erste SiC-Schottky-Leistungsdiode 2002 durch *Infineon* am Markt). SiC-Bauelemente ermöglichen schnelles Schalten mit sehr kleinen Schaltverlusten bei gleichzeitig niedrigen statischen Verlusten (erste Realisierung eines hartschaltenden Wechselrichters mit JFETs: Siemens, *Rebberh*, 2003). Durch intensive Nutzung wesentlich höherer Schaltfrequenzen können die erzielten Systemvorteile die höheren SiC-Bauelemente-Kosten kompensieren.

Die Art des verwendeten Stromrichters hängt vor allem von der Art des Elektromotors ab.

5.1 Gleichstromsteller

Gleichstrommotoren benötigen einen Gleichstromsteller, der die Spannung pulsformig auf den Motor schaltet. Bei der Chopperschaltung (**Gleichstromsteller**) wird eine unveränderliche Gleichspannung U (Batteriespannung) mittels Transistorschaltern gepulst. Die **Pulsfrequenz**

$$f_p = 1/T \tag{5.1-1}$$

ist auf Grund der guten Schalteigenschaften von Leistungstransistoren relativ hoch (z. B. 1 bis 5 kHz). Diese gepulste Spannung wird der Gleichstrommaschine als Ankerspannung aufgeprägt. Der Mittelwert U_d dieser gepulsten Ankerspannung u_a kann durch das veränderliche Pulsweiten-Pausen-Verhältnis zwischen 0 und U **verändert** werden (Bild 5.1-1b). Während der Pulsbreite T_{on} , wenn der Transistor eingeschaltet ist, fließt der Strom von der Spannungsquelle U zur Maschine. Die Freilaufdiode ist stromlos.

$$U_d = U \frac{T_{on}}{T} \tag{5.1-2}$$

Während der Pause, wenn der Transistor ausgeschaltet ist, muss der Strom auf Grund der Selbstinduktionsspannung der Ankerkreisinduktivität weiter fließen können. Dies ist über die **Freilaufdiode** möglich. Auf Grund der relativ hohen Pulsfrequenz wird der Ankerstrom auch durch die relativ kleine Ankerkreisinduktivität gut geglättet und ist nahezu überschwingungsfrei. Es verbleibt ein kleiner „Sägezahnrippel“ mit Pulsfrequenz, Bild 5.1-1b). Der in Bild 5.1-1a für Ein-Quadranten-Betrieb geeignete Steller kann durch Ergänzung von 3 weiteren Transistoren und Freilaufdioden zum Vier-Quadranten-Steller erweitert werden.

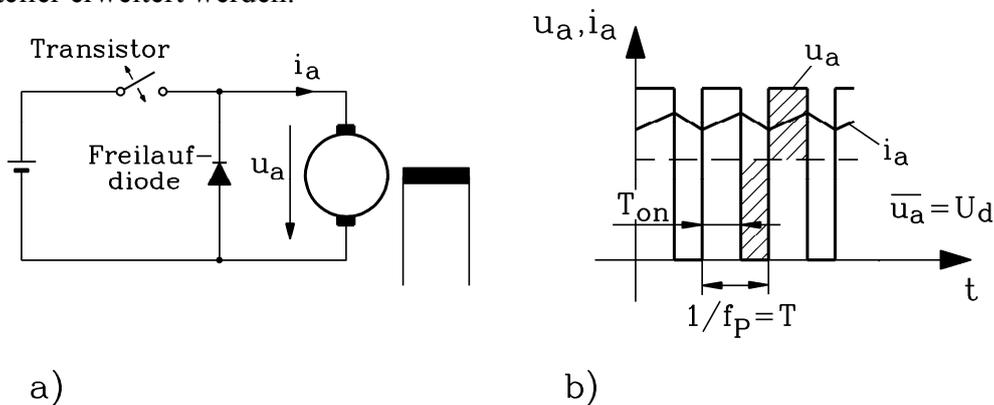


Bild 5.1-1: Gleichstromsteller: a) Prinzip des Ein-Quadranten-Stellers, b) Gepulste Ankerspannung, ihr Mittelwert und Verlauf des Ankerstroms

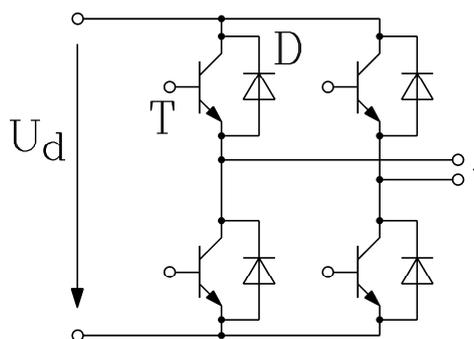


Bild 5.1-2: Vier-Quadranten-Gleichstromsteller (T: Schalttransistor, D: Freilaufdiode)

Zur Regelung des Drehmomentes ist ein Steuergerät notwendig.

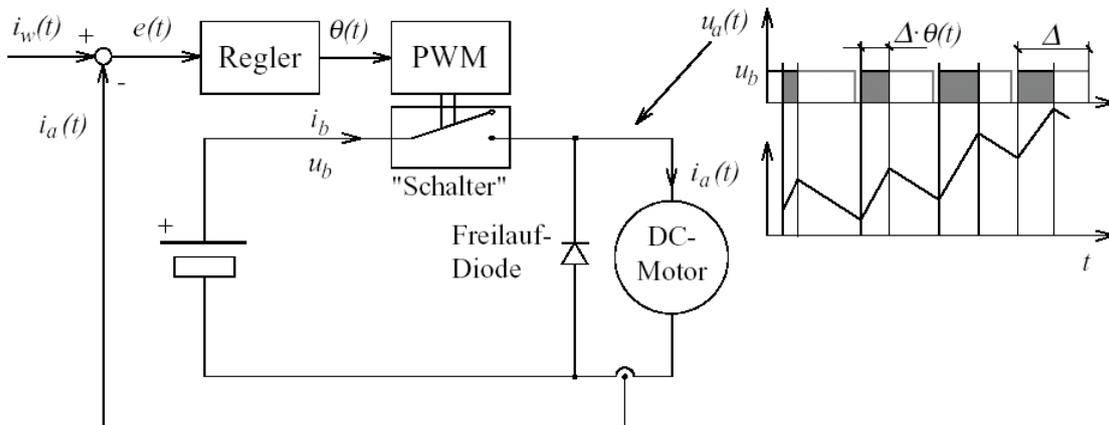


Bild 5.1-3: Prinzip der Stromregelung eines Ein-Quadranten-Gleichstromstellers über PWM

5.2 Wechselrichter für Drehfeldmaschinen

Werden Drehstrommotoren (PSM, ASM, dreiphasige TFM) verwendet, so werden spannungseinprägende Wechselrichter in der Brückenschaltung gemäß Bild 5.2-1 verwendet. Die Funktion des selbstgeführten Pulswechselrichters erfolgt so, dass die 3 Motorklemmen entweder an die positive oder negative Batteriespannung gelegt werden. Dadurch werden die zwischen den drei Motorklemmen auftretenden verketteten Spannungen als pulsweitenmodulierte Gleichspannungen dem Motor aufgeprägt. Werden die Pulsweiten in ihrer Dauer bei fester Schaltfrequenz sinusförmig verändert, so stellen sich auf Grund der glättenden Wirkung der Motorinduktivitäten sinusförmige Ströme mit einem überlagerten Schaltrippel ein (Bild 5.2-2). Dies ermöglicht den Betrieb des Motors mit variabler Frequenz und variabler Spannungsamplitude.

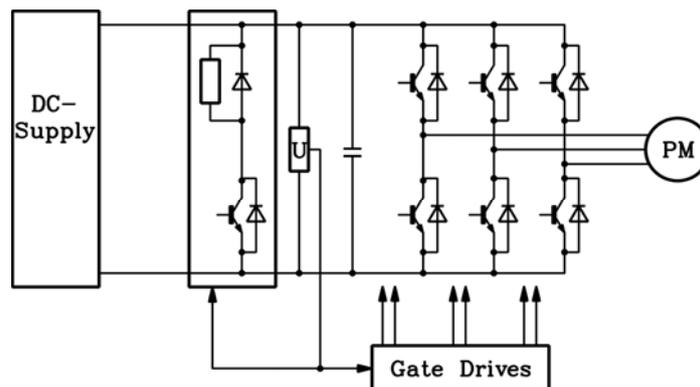


Bild 5.2-1: Spannungseinprägender Umrichter für Drehstrom-Synchronmaschinen

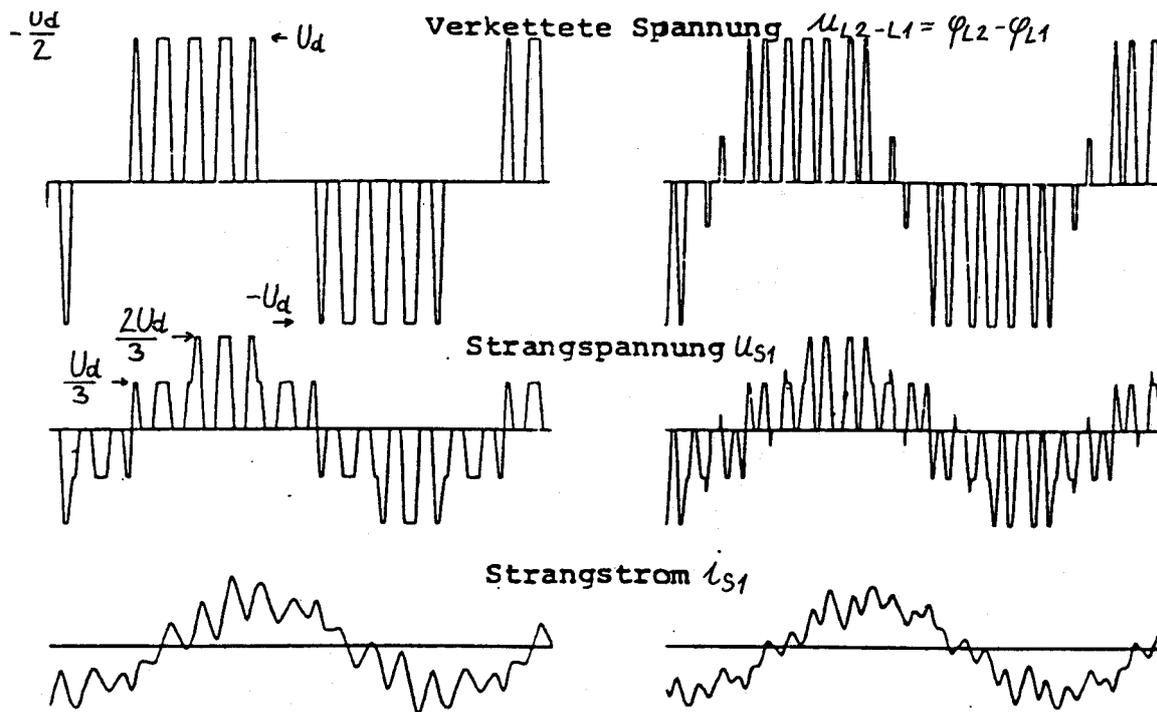


Bild 5.2-2: Spannungspulsmuster und Stromform bei Pulsumrichterbetrieb einer Asynchronmaschine: Schaltfrequenz zu Grundfrequenz: links (Rechteckmodulation): $f_{sch}/f_s = 6$, rechts (Trapezmodulation): $f_{sch}/f_s = 9$

Je nach Aussteuerung (Verhältnis der Spannungsgrundschwungung zur Batteriespannung) dominiert in dem Spannungsspektrum die einfach- oder doppelt-schaltfrequente Spannungsüberschwingung, die den in Bild 5.2-2 dargestellten Stromrippel (dort für relativ niedrige Schaltfrequenzen) verursacht, der Zusatzverluste im Motor hervorruft. Für die Regelung des Motors wird im Wesentlichen die Spannungsgrundschwungung betrachtet. Sowohl für ASM als auch PSM wird für konstanten Motorfluss und daher bei konstantem Strom gemäß (4-1) konstantem Moment die PWM so vorgenommen, dass die Grundschwungung U_s der pulswidenmodulierten Spannung (verkettete und je Strang) in Bild 5.2-2 proportional zur Frequenz der Grundschwungung verändert wird. Nur bei niedrigen Frequenzen, wo die induzierende Wirkung des Magnetfelds gegenüber dem Spannungsfall des Ständerstroms am Wicklungswiderstand R_s klein ist, wird die Spannung angehoben, um den Spannungsfall $R_s I_s$ zu kompensieren (Bild 5.2-3).

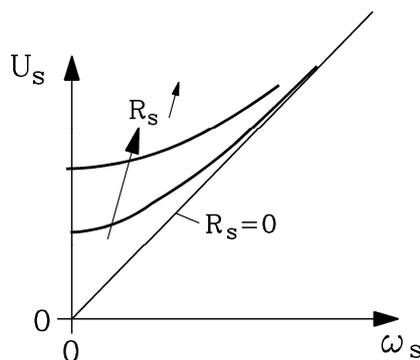


Bild 5.2-3: Steuergesetz $U_s(\omega_s)$ bei kleinen und mittleren Frequenzen

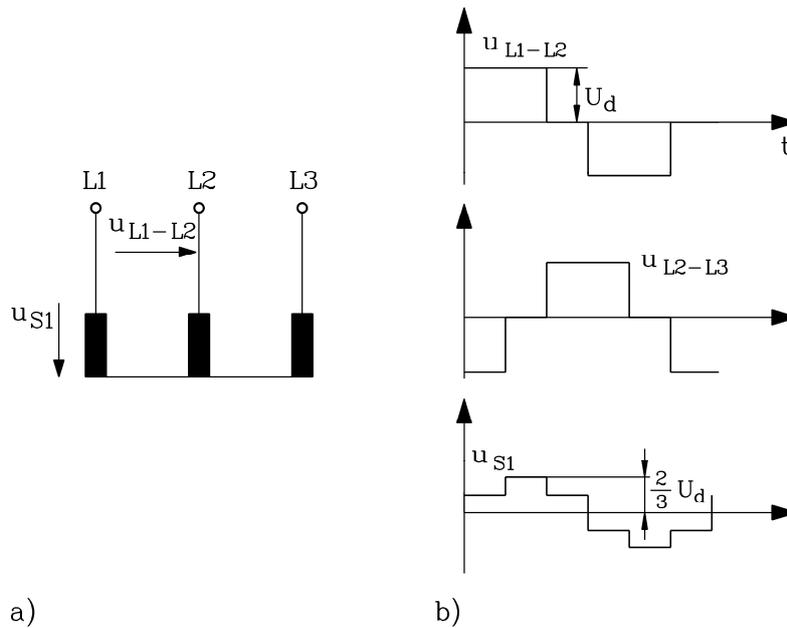


Bild 5.2-4: Blockspannungsbetrieb bei Sternschaltung der Motorständewicklung:
 a) Strangspannung u_s und verkettete Spannung u_L ,
 b) Zeitlicher Verlauf der verketteten Spannung u_L und der Strangspannung u_s

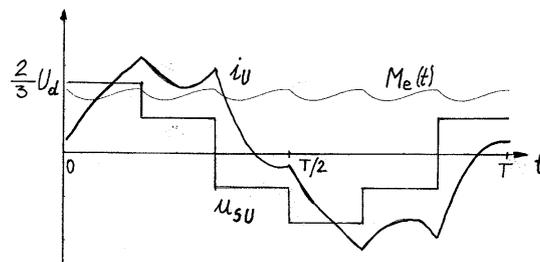


Bild 5.2-5: Berechneter Strangstrom i_U bei Blockspannungsbetrieb (Strangspannung dargestellt), und resultierendes Gleich- u. Wechselmoment

Durch vermindern der Pausen zwischen den Spannungspulsen wird die Amplitude der Grundschwingung gesteigert. Die maximale Spannung wird erreicht, wenn keine Pausen mehr stattfinden (Blockspannungsbetrieb, Bild 5.2-4). Der zugehörige Motorstrom z. B. in einer Asynchronmaschine weist dann eine erhebliche Abweichung von der Sinusform auf, die sich in einer Momentenwelligkeit mit sechsfacher elektrischer Frequenz $6f$ bemerkbar macht.

Die Regelung des Antriebs erfordert z. B. für die PSM eine rechnerische Einstellung von Längs- und Querstrom, die dann als Summenstrom in den drei Strängen über die Umrichter Ausgangsspannung geeignet (phasen- und Amplituden-richtig) einzuprägen ist. Aus Kostengründen wird in der Regel ein Stromwandler eingespart. Der dritte Strom V wird bei Sternschaltung aus den gemessenen Strömen U und W gemäß $i_V = -i_U - i_W$ ermittelt. Die elektrischen Regelvorgänge gehen sehr schnell vor sich, da sich die elektrischen Wicklungszeitkonstanten $T_e = L/R$ im Bereich von deutlich unter 1 Sekunde bewegen. Durch die feldorientierte Regelung können gemäß Bild 5.2-6 der d- und der q-Strom getrennt eingestellt werden. Bei Asynchronmaschinen sind dies der getrennt einstellbare Magnetisierungsstrom zur Veränderung des Flusses und die dazu etwa um eine Viertelperiode verschobene momentenbildende Komponente des Ständerstromes. Auf Grund der schnellen Mikroprozessoren (z. B. 32 bit-Rechnerarchitektur) im Umrichter ist die digitale Regelung mit ihren Rechenoperationen auch mit aufwendigeren Motormodellen schnell möglich. Die Abtastfrequenz des analogen Stromsignals begrenzt

die Dynamik der Regelung (typische Stromabtastzeit unter 0.1 ms) , die für die Bedürfnisse im E-Fahrzeug mit seinen trägen Massen ausreichend schnell ist.

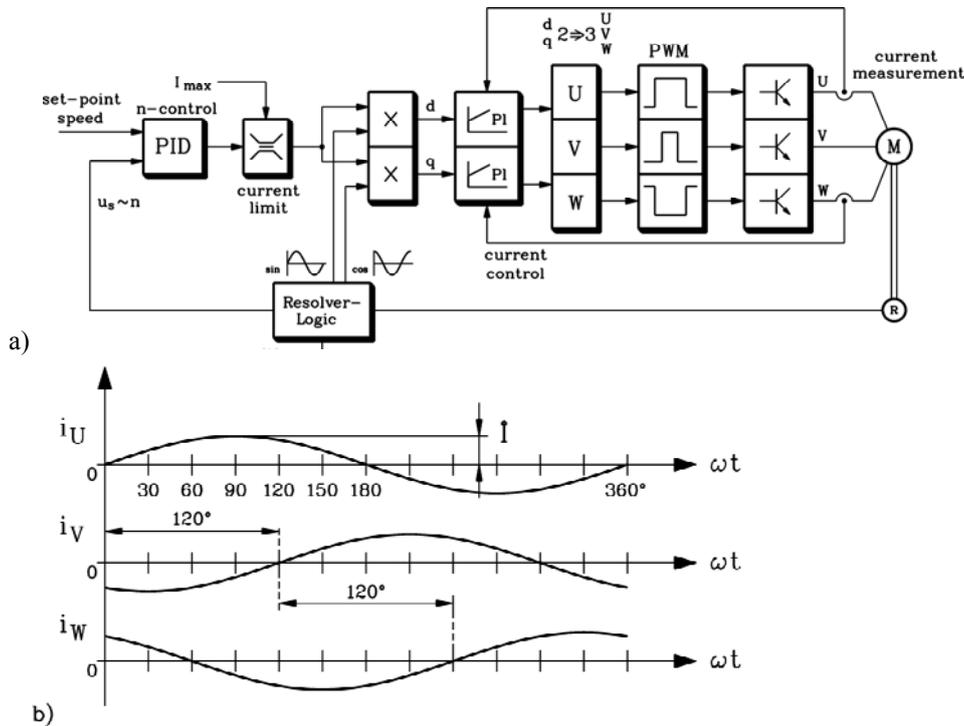


Bild 5.2-6: PSM-Antrieb: a) Antriebskomponenten: M: Motor, R: Polradlagegeber (Resolver). Der Motorstrom wird in zwei Strängen gemessen und dem Motorstromregler zugeführt, der den Sollwert (berechnet aus dem d- und q-Strom über das vom Drehzahlregler vorgegebene Drehmoment) mit dem Iststrom vergleicht und über die PWM die erforderlichen Motorspannungen einstellt. Die Drehzahlregelung ist nur bei Tempomaten wirksam. Ansonsten gibt der Fahrer über das "Gaspedal" den Drehmoment- und damit Stromsollwert vor.

b) Ideales Drehstromsystem ohne schaltfrequenzbedingten Stromrippel

Bei den zweisträngigen TFM wird jede der beiden Wicklungsstränge mit einem Vierquadrantensteller gemäß Bild 5.1-2 angesteuert, so dass statt 6 Transistoren und 6 Freilaufdioden 8 von jeder Sorte nötig sind. Bei dreisträngigen TFM kann der in Bild 5.2-1 dargestellte Wechselrichter verwendet werden.

5.3 Wechselrichter für geschaltete Reluktanzmaschinen

Auch bei den 3- und mehrsträngigen SRM wird jeder der Wicklungsstränge mit einem gesonderten Steller angesteuert, so dass auch zwei oder mehrere Stränge gleichzeitig angesteuert werden können. Dadurch lässt sich die Drehmomentwelligkeit etwas verringern. Da aber der Strom unipolar eingespeist wird, werden (Bild 4.1.4-1) nur 2 Transistoren und 2 Freilaufdioden statt (wie in Bild 5.1-2) jeweils 4 benötigt, da keine Stromumkehr erforderlich ist. Die Spannung kann aber damit umgekehrt werden, so dass der Strom rasch abgeschaltet werden kann. Je nach Bestromung der Wicklung relativ zur Position der Läuferzähne wird ein antreibendes oder bremsendes Moment erzeugt und somit Motor- oder Generatorbetrieb ermöglicht.

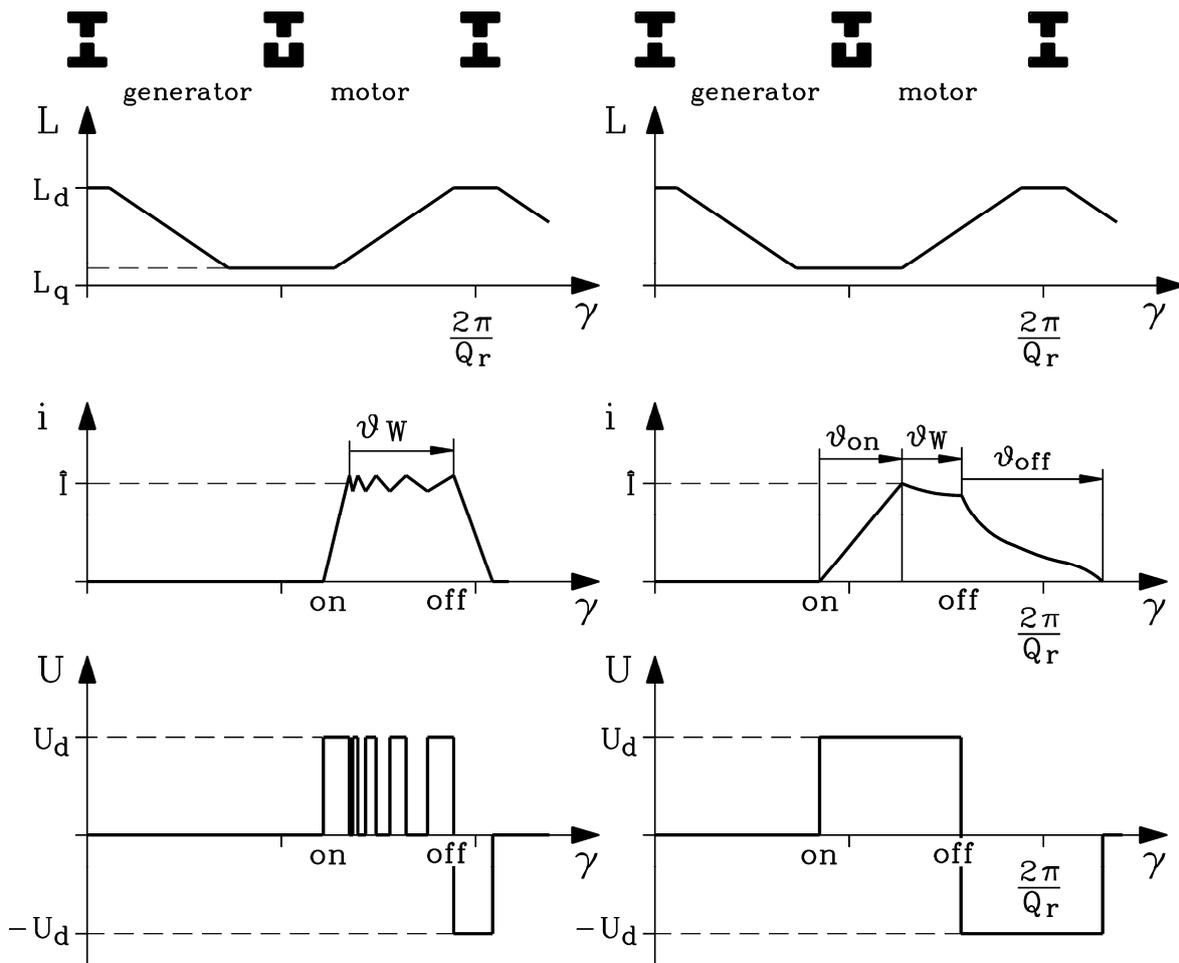


Bild 5.3-1: Erzeugung des Stromverlaufs in der SRM: (γ : Läuferpositionswinkel, L : Ständerwicklungsinduktivität, Q_r : Rotornutzahl)

Links: Bei niedriger Drehzahl kann der Stromregler über eine Schalt-Hysterese den Strom in einem Sollwertband konstant halten und so den gewünschten Blockstrom erzeugen, der durch Spannungsumkehr auch rasch abgeschaltet werden kann.

Rechts: Bei hohen Drehzahlen ist die Zeit so kurz, dass nur der Strom ein- und ausgeschaltet werden kann, was zu einem verzerrten Stromimpuls führt.

6. Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge

Eine aus zwei unterschiedlichen Elektrodenmaterialien in einem Elektrolyten bestehende Anordnung nennt man **galvanisches Element**. Die zwischen seinen Elektroden auftretende elektrische Potentialdifferenz ergibt sich durch die für jedes Elektrodenmaterial unterschiedliche Menge an in den Elektrolyten auf Grund des Diffusionsgesetzes (Ursache für die Diffusion: unterschiedliche Partialdrücke der Ionen in der Elektrode und im Elektrolyten) in Lösung gehende Elektroden-Ionen. Diesem Druckgefälle stellt sich die rückstellende elektrische Anziehungskraft der die Elektrode verlassenden Ionen entgegen, so dass sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Partial-Druckdifferenz und elektrostatischer Anziehungskraft einstellt. Daher dringen die Ionen zunächst nur bis zur Dicke d (*Debye-Hückel-Länge*)

$$d = \sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot kT}{e^2 n_\infty}} \quad (6-1)$$

in den Elektrolyten vor (ε_r : relative Dielektrizitätskonstante des Elektrolyten, Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$, Boltzmann-Konstante $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, T : absolute Temperatur des Systems (K), elektrische Elementarladung: $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, n_∞ : Elektronenkonzentration im ungesörten Elektrolyten (Teilchenzahl/m³). Durch die höhere Konzentration c_1 der Elektroden-Ionen in der jeweiligen Elektrode gegenüber der Ionenkonzentration c_2 im Elektrolyten stellt sich zwischen beiden innerhalb der *Debye-Hückel-Länge* eine elektrische Potentialdifferenz ΔU („Elektronegativität“) ein, die je nach Elektroden- und Elektrolytenmaterial zwischen ca. 3 V und + 1.5 V liegt.

$$\Delta U = -(kT/e) \cdot \ln(c_1/c_2) \quad (6-2)$$

Die sich einstellende Leerlaufspannung U_0 des galvanischen Elements ist die Differenz der Einzelspannungen der Elektroden 1 und 2 gegen den Elektrolyten ΔU_1 und ΔU_2 gemäß

$$U_0 = \Delta U_1 - \Delta U_2 \quad (6-3)$$

Gemäß obiger Angaben liegen diese Leerlaufspannungen je Zelle im Bereich weniger Volt. Zum Erreichen hoher Spannungen müssen viele Zellen in Serie geschaltet werden. Werden galvanische Elemente an einen Lastwiderstand angeschlossen, so fließen die in den Elektroden verbliebenen Elektronen infolge metallischer Leitung durch den Lastwiderstand, während im Elektrolyten die Ionen den Stromfluss in die andere Bewegungsrichtung aufrechterhalten und sich an der anderen Elektrode (der „edleren“ mit der geringeren Elektronegativität ΔU) abscheiden. Durch den Abfluss an Elektronen gehen neue Ionenmengen in Lösung in den Elektrolyten, wodurch die „unedlere“ Elektrode sich zersetzt.

Um **wiederaufladbare galvanische Elemente (Akkumulatoren)** zu erhalten, müssen sich die Elektroden bei Anlegen einer elektrischen Spannung von außen (Ladespannung) und damit umgekehrter Stromrichtung im Elektrolyten regenerieren können. Bei diesen Systemen werden durch das Anlegen einer äußeren Spannung durch das sich im Elektrolyten zwischen den (durchaus auch gleichartig aufgebauten) Elektroden (z. B. Pb-Akku) einstellende E -Feld die Moleküle des Elektrolyten in Ionen dissoziiert, wobei sich an den Elektroden die unterschiedlichen positiven bzw. negativen Ionen anlagern und sich mit den Atomen der äußeren Elektrodenschichten chemisch zu neuen Materialien verbinden. So wird die von außen zugeführte elektrische Energie in chemischer Bindungsenergie gespeichert. Durch Vergrößerung der Elektrodenoberfläche (z. B. Gitterstruktur) kann die so gebundene Ladungsmenge erhöht werden. Beide Elektroden haben nun selbst bei gleichem Ausgangsmaterial eine unterschiedliche

Materialoberfläche. Beide bilden mit dem Elektrolyten auf Grund der sich einstellenden unterschiedlichen Partialdrücke (Konzentrationen) der Ionen in jeder Elektrode zum Elektrolyten (wie oben erklärt) elektrische Potentialdifferenzen ΔU_1 und ΔU_2 gemäß (6-2) aus, deren Differenz der angelegten Ladespannung entgegen wirkt und mit zunehmender Ladezeit zunimmt, bis sie der Ladespannung gleich ist. Dann hört der Ladestromfluss auf – der Akkumulator ist geladen. Die (unterschiedliche) chemische Veränderung der Oberfläche der beiden Elektroden und die damit erzeugte Potentialdifferenz ΔU_1 bzw. ΔU_2 der Elektroden zum Elektrolyten nennt man **elektrolytische Polarisierung der Elektroden**. Sie erlaubt nun, den Akkumulator als galvanisches Element zu benutzen (**Entladung des Akkumulators**). Dabei verlaufen die chemischen Reaktionen selbsttätig in umgekehrter Richtung, wobei sich die Oberflächen der Elektroden wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurück verändern. Die dabei aus den sich abbauenden chemischen Verbindungen entstehenden Ionen stellen den Stromfluss im Elektrolyten dar, wo die positiven und negativen Ionen wieder zu den neutralen Molekülen des Elektrolyten rekombinieren. Die chemische Bindungsenergie wird über den elektrischen Stromfluss in einem äußeren Lastwiderstand direkt in Wärme umgesetzt. Der Vorgang von Laden und Entladen ist ein reversibler Zyklus.

Die im Akku gespeicherte elektrische Ladung Q an den beiden Elektroden (positiv $+Q$ bzw. negativ $-Q$) ist zur umgesetzten Menge an chemischer Substanz an den Elektrodenoberflächen A direkt proportional (1. *Faraday*-Gesetz), deshalb sind große Elektrodenoberflächen nötig, da sich die chemischen Reaktionen nur an der vom Elektrolyten benetzten Oberfläche ereignen. Ist die gesamte Oberfläche der Elektroden beim Laden chemisch verändert worden, würde ein weiteres Laden nur noch zur weiteren Dissoziation des Elektrolyten führen (Elektrolyse), wobei die Ionen gasförmig den Elektrolyten verlassen („**Gasen**“ **des Akkus bei Überladung**). Die **Kapazität C eines Akkus** ist die im Akku gespeicherte Ladung Q in „Ampere-Stunden“, das Produkt aus Entladestrom i und Entladezeit t .

$$Q = \int_0^t i(t) \cdot dt \quad (6-4)$$

Die gespeicherte elektrische Energie auf Grund der Ladespannung $u(t)$ ist

$$W = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (6-5)$$

Auf Grund des inneren Widerstands R des Elektrolyten und der Elektroden entstehen sowohl beim Laden als auch Entladen Verluste, so dass der **Wirkungsgrad** definiert werden kann als Verhältnis der beim Entladen erhaltenen elektrischen Energie im Verhältnis zur zugeführten elektrischen Energie beim Laden.

$$\eta = W_{e,ab} / W_{e,zu} \quad (6-6)$$

Der **Ladungsprozess** einer Traktionsbatterie zeichnet sich dadurch aus, dass eine elektrische Ladungsmenge mit einem durch die technische Auslegung des Ladegerätes bestimmten Strom geladen wird. Die Ladegeräte werden über das Netz gespeist. Somit ist der Ladestrom über den maximal zulässigen Netzstrom begrenzt (z.B. 10 A oder 16 A) und bestimmt damit die Ladedauer. Wenn z. B. ein VW CitySTROMer mit einem Verbrauch von etwa 20 kWh/100 km eine Strecke von 50 km zurücklegt und danach mit einer Leistung von 2.2 kW (= 220 V · 10 A) geladen wird, beträgt die Ladedauer ca. 4 Stunden bis zur Vollladung. Aufgrund der unterschiedlichen Technologien der verschiedenen Batterien müssen die Ladeverfahren jeweils angepasst werden.

Bei Hybridfahrzeugen werden die für hohe Lade- und Entladelleistungen ausgelegten Zwischenkreisbatterien, die z. B. bei der Rekuperation mit Bremsenergie geladen werden, mit wesentlich höheren Strömen aufgeladen als es den „normalen“ Ladeströmen (etwa $C/10$, also bei $C = 100 \text{ Ah}$ mit 10 A) entspricht. Dies ist durch die relativ hohe Bremsleistung bedingt, die i. a. nur während kurzer Zeitabschnitte zur Verfügung steht.

Aufgrund von Verlusten in der **Entladephase** ist die aufgenommene Batterieladung Q_{zu} (in Ah) nicht gleich der entnehmbaren Ladung Q_{ab} (in Ah). Der Ladefaktor beschreibt das Verhältnis zwischen aufgenommener und abgegebener Ladung während eines vollen Zyklus.

$$\text{Ladefaktor} = Q_{zu} / Q_{ab} \quad (6-7)$$

Bei verschlossenen Bleibatterien liegt der Ladefaktor bei einem Wert kleiner 1.05. Der Wirkungsgrad einer Batterie (6-6) kann mit dem Ladefaktor formuliert werden.

$$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot t_{ab}}{U_{zu} \cdot I_{zu} \cdot t_{zu}} = \frac{U_{ab} \cdot Q_{ab}}{U_{zu} \cdot Q_{zu}} = \frac{U_{ab}}{U_{zu}} \cdot \frac{1}{\text{Ladefaktor}} \quad (6-8)$$

Dabei gilt $U_{zu} > U_{ab}$, denn wegen des Innenwiderstandes ist die Spannung beim Laden $U_{zu} = U_0 + I_{zu} R_i$ höher als beim Entladen $U_{ab} = U_0 - I_{ab} R_i$. Die Wirkungsgradwerte liegen zwischen 70 und 90%.

Die maximale Stromstärke beim Laden und Entladen (Bildern bzw. Freisetzen der Ionen) ist durch die chemische Reaktionsgeschwindigkeit an den Elektrodenoberflächen der gleichzeitig ablaufenden Reaktionen an unterschiedlichen Stellen der Oberfläche und durch die Größe der Oberfläche selbst begrenzt. Daraus ergeben sich die beim Entladen maximal zulässige Stromstärke und **elektrische Maximalleistung**.

$$I_{\max} \Rightarrow P_{\max} = U_0 I_{\max} \quad (6-9)$$

6.1 Technische Anforderungen an Fahrzeugbatterien

Energieinhalt:

Bei reinen Elektrofahrzeugen dominiert die Forderung nach hohem Energieinhalt für eine hohe damit verbundene Reichweite des Fahrzeugs. Daher veranschlagt man den Energieinhalt eines reinen Elektrofahrzeuges bei einer Masse von 1000 kg mit mehr als 20 kWh , wenn man eine Reichweite von 150 km zu Grunde legt.

Leistung:

Die Leistung eines Elektrofahrzeuges sollte bei ca. 30 kW pro 1000 kg Fahrzeugmasse liegen, um der Fahrndynamik eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor nahe zu kommen.

Für herkömmliche Elektrostraßenfahrzeuge benötigt man Batterien mit einer Leistung von etwa 20 bis 50 kW und einer Energie von 20 bis 50 kWh , so dass das Leistungs-Energie-Verhältnis (LEV) einer solchen Batterie etwa 1 h^{-1} betragen sollte. Dies wird auch von einigen Batterien erfüllt.

$$\text{LEV} = P/W \quad (\text{Einheit: kW/kWh} = 1/\text{h}) \quad (6.1-1)$$

LEV(Pb konventionell)	≈	2 h ⁻¹
LEV (Zn-Br)	≈	1 h ⁻¹
LEV (Zn-O ₂)	≈	0,75 h ⁻¹
LEV (ZEBRA)	≈	1,5 h ⁻¹
LEV (Ni-MH, Ni-Cd)	≈	3 h ⁻¹
LEV (Li-Ion)	≈	3 h ⁻¹

Tabelle 6.1-1: Vergleich des Leistungs-Energie-Verhältnisses unterschiedlicher Batteriesysteme

Der LEV beträgt in Abhängigkeit von der Auslegung des Hybridfahrzeugs 5 bis 20 h⁻¹. Sollte dies nicht der Fall sein, wie zum Beispiel beim Zink-Luft-System, wird in der Regel die Energie erhöht, um auf die erforderliche Leistung zu kommen. Kritisch kann es bei einigen Batterien am Ende der Entladung bei praktischen Fahrprofilen werden, bei denen kurzzeitig sehr hohe Anfahr- und Beschleunigungsleistungen gebraucht werden.

Ladefähigkeit:

Die gängigen Haushaltsanschlüsse erlauben eine maximale Ladeleistung von 3 kW. Damit benötigt ein Elektrofahrzeug mit einer Batterie mit 20 kWh Energieinhalt 7 Stunden für einen Ladevorgang. Allerdings sind kürzere Ladezeiten von weniger als einer Stunde wünschenswert, was auch durch die Installation eines speziellen Anschlusses möglich ist.

Lebensdauer:

Energiespeicher von Elektrofahrzeugen sollten eine Lebensdauer besitzen, die idealerweise der Lebensdauer des Fahrzeugs entspricht, also einer „Laufleistung“ von ca. 200.000 km bzw. einer Lebensdauer von 10 Jahre, um den teuren Batteriewechsel zu vermeiden.

Wirkungsgrad:

Auf Grund der häufigen Lade- und Entladevorgänge sollte der Wirkungsgrad von 90% nicht unterschritten werden.

		Elektrofahrzeuge	Hybridfahrzeuge
Energieinhalt	(kWh/1000 kg)	20	1,5
Leistung	(kW/1000 kg)	30	30 – 60
Ladefähigkeit	(kW/1000 kg)	> 3	10 – 30
Lebensdauer		200.000 km oder 10 Jahre	
Wirkungsgrad		90%	

Tabelle 6.1-2: Vergleich der Anforderungen an Batterien bei Elektro- und Hybridfahrzeugen

6.2 Überblick - Elektrochemische Energiespeichersysteme

Folgende fünf Batteriesysteme kommen oder kamen in der E-Fahrzeugtechnik zum Einsatz:

- ◆ Blei-Batterien (Pb/PbO₂)
- ◆ Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd)
- ◆ Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH)
- ◆ Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperatur-Batterien (NaNiCl₂)
- ◆ Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion)

Neben der Weiterentwicklung der konventionellen Bleibatterie wird in der Forschung verstärkt die Entwicklung von **Nickel-Metallhydrid-** und **Lithium-Ionen**-Batterien vorangetrieben.

Nicht durchsetzen konnten sich in der Fahrzeugtechnik bislang folgende Batterie-Systeme:

- Nickel-Schwefel
- Nickel-Eisen (NiFe): instabile Eisen-Elektrode => Wasserstoffgasung
=> wartungsintensiv
- Nickel-Zink (NiZn): Feinschlussproblematik => Zn-Dendriten-Bildung
- Zink-Brom / -Chlor: nicht beherrschbare Sicherheitsdefizite

Energiespeicher der gleichen Art können bedingt durch ihre Bauart, Geometrie und chemische Zusammensetzung bezüglich Energieinhalt und Leistungsvermögen variieren. In der Regel geht ein höherer Energieinhalt mit geringerer Leistung einher.

Blei-Batterien (Pb/PbO₂)

Bei den technischen Ausführungen unterscheidet man in

- Pb-Flüssigsäure-Batterien
- Pb-Gel-Batterien
- Pb-AGM-Batterien (**A**bsorbant-**G**las-**M**aterial)

Unterschiede im Aufbau der Blei-Traktionsbatterien betreffen im die Gestaltung des Elektrodenaufbaus, die Zellgeometrie und den Elektrolyten. Durch die Verwendung von dünneren Elektroden lassen sich die elektrischen Leistungsdaten generell steigern, allerdings meistens auf Kosten der Energiedichte und der Lebensdauer. Sonderformen des Pb-Batteriesystems sind **Wickelzellen**. Diese Bauform bietet gegenüber Batterien in **Plattenbauweise** höhere Belastbarkeit (besonders bei tiefen Temperaturen) sowie eine erhöhte Lebensdauer. Pb-Batterien weisen eine beschränkte Zyklenfestigkeit auf.

Nickel-Cadmium-Batterien (Ni/Cd):

Nickel-Cadmium-Batterien sind ähnlich wie Bleibatterien vor allem für Vollelektrofahrzeuge interessant. Allerdings haben sie gegenüber den Bleibatterien den Vorteil der höheren Lebensdauer. Dem gegenüber stehen die höheren Herstellungskosten. Die schnelle Ladefähigkeit der Ni/Cd-Batterien lässt sich infrastrukturbedingt nicht immer und überall ausnutzen.

Nickel-Metallhydridbatterie (NiMH):

Die NiMH-Batterie gilt als Nachfolger der NiCd-Batterie. Ähnlich wie bei anderen Batteriesystemen sind Energieinhalt und Leistungsfähigkeit abhängig von der Menge des eingebrachten Aktivmaterials sowie der technischen Auslegung von Elektroden- und Zellgeometrie. Erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben zum einen die Ausbildung der Kollektorstruktur und zum anderen die Auswahl des Aktivmaterials.

Natrium-Nickel-Chlorid-Batterien (Na/NiCl₂)

Die Na/NiCl₂-Batterie gehört zu den Hochtemperaturbatterien (bzw. Hochenergiebatterien) und wird auch ZEBRA-Batterie (engl. Zero-Emission-Battery) genannt. Die Energiedichte der Na/NiCl₂-Batterie übersteigt die der Blei-, der Nickel-Cadmium- bzw. Nickel-Metallhydridbatterien deutlich. Sie weist zudem eine höhere Lebensdauer auf. Ein Batteriesatz ermöglicht bis zu 150 000 km Fahrleistung. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Systems sind die Eigenschaften des Keramik-Separators und der Dichtung. Zudem besitzt die Na/NiCl₂-Batterie den Vorteil gegenüber den o. g. Batteriesystemen, dass bei Bruch oder Defekt des keramischen Separators die betreffende Zelle elektrisch leitfähig bleibt und es zu keiner Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des übrigen Zellverbandes kommt. Nachteilig ist die hohe Betriebstemperatur von ca. 300°C, die bei einer täglichen

Fahrleistung von weniger als 40 km durch thermische Verluste von ca. 5 W pro kW Speichervermögen den Wirkungsgrad negativ beeinflusst.

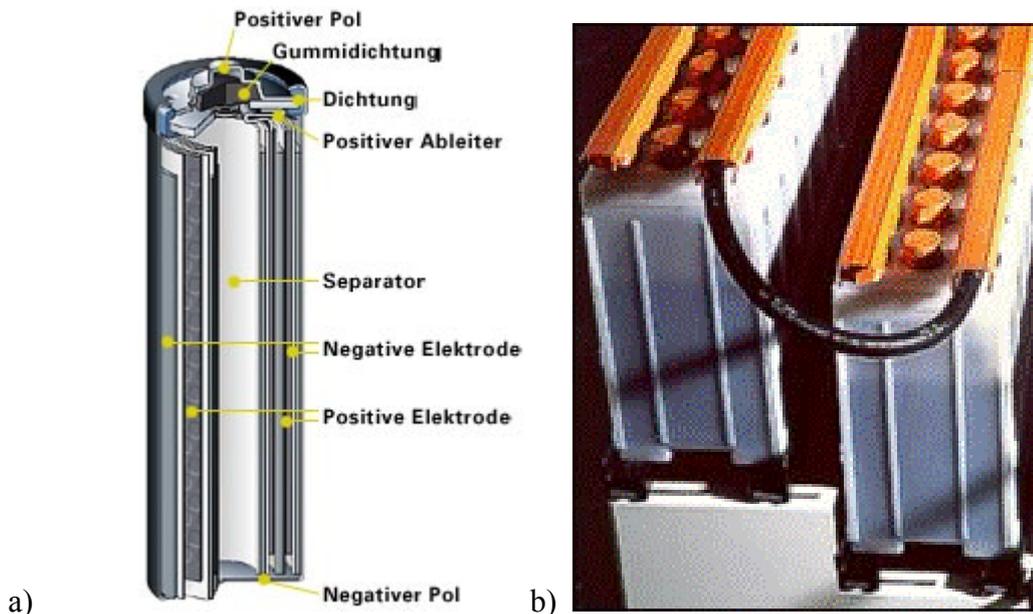


Bild 6.2-1: NiCd-Batterie: a) Schematischer Aufbau, b) Technische Ausführung (<http://www.elektroauto-tipp.de>)



Bild 6.2-2: NiMH-Batterie von Toyota (Toyota Hybrid System THS II, Presseinformation, www.toyota.co.jp, 2003)



Bild 6.2-3: ZEBRA-Batterie von VARTA (<http://de.varta.com/index.html>)

Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion):

Die Lithium-Ionen-Batterien stellen die technisch jüngste Entwicklung auf dem Gebiet der Batterietechnik dar und zeichnen sich aus durch einen relativ hohen Fertigungsaufwand. Ein Batterieverband aus Li-Ionen-Batterien lässt sich Dank der hohen Spannung der Einzelzelle, die bei 2.7 ... 4.1 V liegt und durch aktives Batteriemangement in einem bestimmten Rahmen gehalten werden muss, mit einer relativ geringen Anzahl von Einzelbatterien aufbauen. Daraus resultieren ein geringer Platzbedarf und eine Gewichtsreduzierung. Allerdings ist nach momentanem Entwicklungsstand die kalendarische Lebensdauer noch nicht ausreichend für den Einsatz in Fahrzeugen. Außerdem besteht noch Klärungsbedarf hinsichtlich Sicherheit und Kosten.

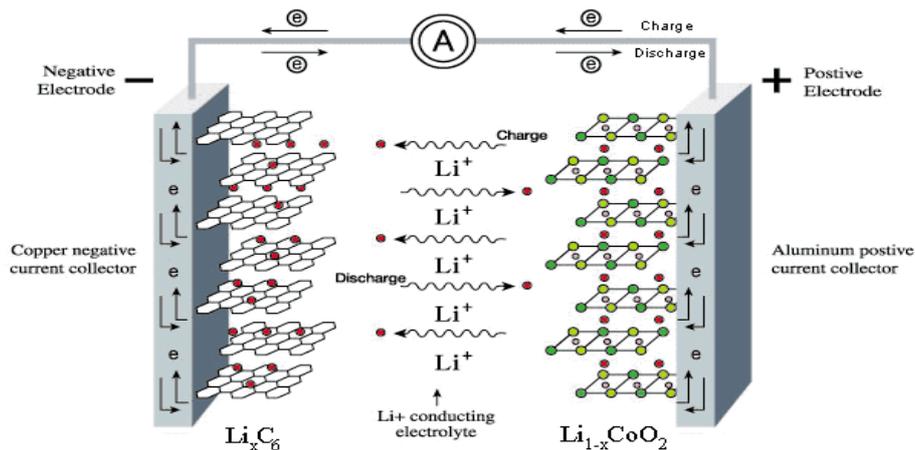


Bild 6.2-4: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (<http://www.ict.fhg.de/deutsch/scope/ae/Libattery.gif>)

Batterietyp	Energiedichte		Leistungsdichte		Lebensdauer		Kosten
	Wh/kg	Wh/dm ³	W/kg	W/dm ³	Zyklen	Jahre	Euro/kWh
Blei	30-50	70-120	150-400	350-1000	50-1000	3-5	100-150
Nickel-Cadmium	40-60	80-130	80-175	180-350	> 2000	3-10*	225*-350
Nickel-Metallhydrid	60-80	150-200	200-300	400-500	500-1000	5-10*	225*-300
Natrium-Nickelchlorid	85-100	150-175	155	255	800-1000	5-10*	225*-300
Lithium-Ionen	90-120	160-200	ca.300	300	1000	5-10*	275*
Lithium-Polymer	150	220	ca.300	450	< 1000	-	< 225*
Zink-Luft	100-220	120-250	ca.100	120	-	-	60

Tabelle 6.2-1: Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten verschiedener Batterietypen (* = Prognosewerte); (Gerl, B.: Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002)

Im Folgenden wird auf die einzelnen Batterietypen genauer eingegangen.

6.3 Blei-Säure-Akkumulator

Bei Blei-Akkumulatoren wird zwischen dem

- offenen, dem
- geschlossenen und dem
- verschlossenen System unterschieden.

Aufgrund der Auslaufgefahr ist ein offener Akkumulator für den Einsatz in Fahrzeugen ausgeschlossen. Vorteile, wie zum Beispiel Wartungsfreiheit, führen dazu, dass für Elektrofahrzeuge nur eine verschlossene, gasdichte Batterie in Frage kommt. Beim gasdichten System VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid Batterie) ist jede Zelle mit einem Ventil versehen, über das bei Überdruck das Wasserstoffgas entweichen kann. Des Weiteren wird durch dieses das Eindringen von Luft verhindert.

Elektroden:	
Negative Elektrode:	Bleischwamm (auf Blei-Calcium-Antimon-legiertem Gitter)
Positive Elektrode:	poröses Bleidioxid (auf Blei-Calcium-Antimon-legiertem Gitter)
Elektrolyt:	Wasser-Schwefelsäure-Mischung
Separator:	Entweder Glasfaser zur Absorbierung des flüssigen Elektrolyten oder Kunststoffe bzw. Vinylplatten beim gelierten Elektrolyten.
Zellreaktionen:	
- Anode:	$\text{Pb} + (2 \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}) \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Kathode:	$\text{PbO}_2 + (2 \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}) + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Gesamtzellreaktion:	$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow 2 \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

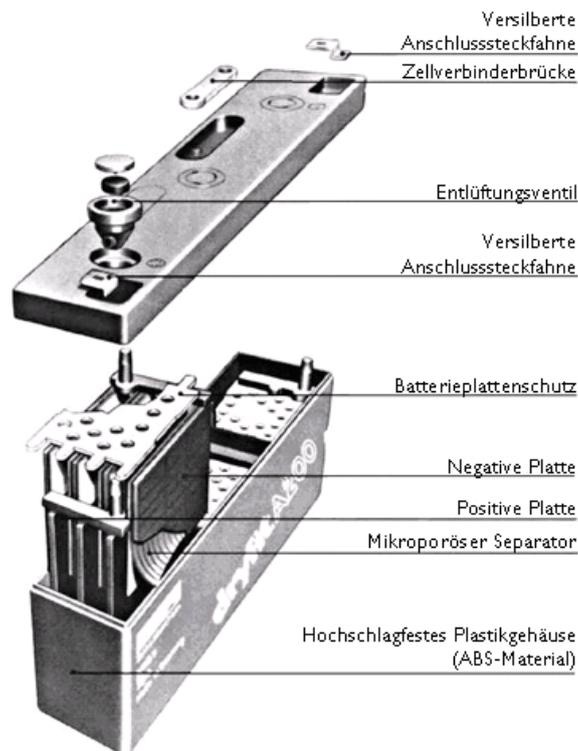


Bild 6.3-1: Aufbau eines verschlossenen Bleiakкумуляtors mit Gitterplatten (Akkumulatorenfabrik *Sonnenschein GmbH*)

Im geladenen Zustand bestehen die positiven Röhrenplatten („Panzerplatten“) aus Bleidioxid (PbO_2) und die negativen Gitterplatten aus Bleischwamm. Beim Entladen wird sowohl das Bleidioxid als auch das Blei in Bleisulfat (PbSO_4) verwandelt. Dieses Bleisulfat und das gebildete Wasser sind Verbindungen, die energetisch ein niedrigeres Niveau aufweisen als Bleidioxid, Blei und Schwefelsäure (Elektrolyt). Die Energiedifferenz wird in Form elektrischer Energie abgegeben. Der Elektrolyt aus Schwefelsäure (H_2SO_4) ist entweder über Gel oder über die Absorption durch einen Glasfaserseparator - als AGM (= Absorbed Glass Material)-Technik bezeichnet - festgelegt. Somit wird ermöglicht, dass im verschlossenen System bei voller Wiederaufladung die Wasserzersetzung und damit auch der Wasserverlust verhindert werden. Über Kanäle wandert der Sauerstoff zur negativen Platte, wo er mit dem Wasserstoff wieder zu Wasser rekombiniert. Der Elektrolyt ist an der Reaktion beteiligt, so dass beim Entladen der Batterie die Säuredichte sinkt. Bei geladenen Akkumulatoren liegt die Säuredichte zwischen 1,26 und 1,29 g/cm^3 und bei entladenen zwischen 1,12 und 1,10 g/cm^3 . Die Blei-Calcium-Antimon-Legierung garantiert die mechanische Stabilität der Platten und setzt die Gasungsspannung des Systems auf höhere Werte.

In den 90er Jahren wurde aufgrund des niedrigen Entwicklungsniveaus anderer Batteriesysteme ein Bleiakкумуляtor in das Hybridfahrzeug *Audi Duo* eingesetzt. Die Leerlaufspannung der 22 in Reihe

geschalteten Module betrug 264 V und der Energieinhalt 10 kWh bei fünfstündiger Entladung. Das Gewicht des Systems belief sich auf etwa 320 kg

Lade- und Entladevorgang:

Für Traktionsbatterien kommen zwei Lademethoden in Frage:

1. Laden mit Konstantladespannung
2. Laden mit Konstantladespannung und Konstantladestrom

Bei der ersten Methode wird an den Elektroden eine konstante Ladespannung von etwa 2,3 V pro Zelle bei Temperaturen zwischen 20 und 25 °C angelegt. Die Batterie ist voll aufgeladen, wenn der Ladestrom sich stabilisiert.

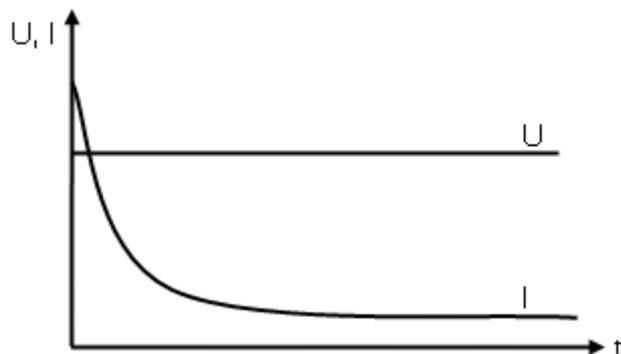


Bild 6.3-2: Strom- und Spannungsverlauf während des Ladens mit konstanter Spannung

Bei der zweiten Methode wird anfangs mit einem konstanten Strom solange geladen, bis die Ladespannung einen bestimmten Wert erreicht. Ab diesem Zeitpunkt wird mit gleichbleibender Spannung weitergeladen.

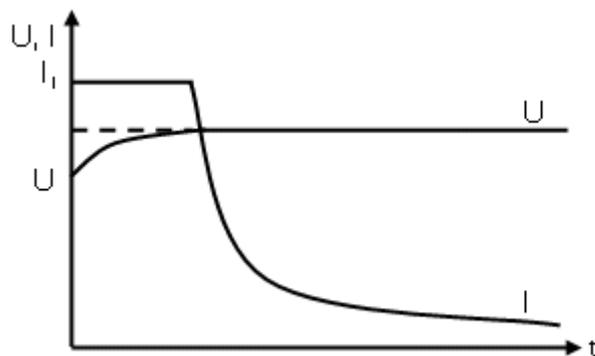


Bild 6.3-3: Strom- und Spannungsverlauf während des Ladens mit konstantem Strom, solange die Spannung unter einem bestimmten Grenzwert ist (*I-U-Ladeverfahren*)

Beim Laden wird das Wasser als Bestandteil des Elektrolyts in Wasser- und Sauerstoff dissoziiert, und die negative Elektrode nimmt den Sauerstoff auf. Überladen wird die Batterie, wenn mehr Sauerstoff erzeugt wird, als durch die Kathode absorbiert werden kann. Über das Ventil entweicht das überschüssige Gas, was eine Verminderung der Elektrolytmenge bedeutet. Dadurch werden die chemischen Reaktionen ineffizient. Die Folge ist eine deutliche Reduktion der Batterieleistung. Bei 1 Ah Überladung entsteht ein Wasserverlust von 0,33 g. Das Gasgemisch (Knallgas), das beim Ladevorgang entsteht, kann explodieren, wenn der Volumenanteil des Wasserstoffes gleich oder größer 4% beträgt. Hieraus ergeben sich eine Reihe von Vorsichtsmaßnahmen, die unbedingt einzuhalten sind:

- Batterien nur in gut belüfteten Räumen laden (Luftdurchzug)

- In der Nähe der Batterie sollte nicht geraucht werden, auch offene Flammen oder Funkenbildung sind zu vermeiden
- Ladegerät nicht über der zu ladenden Batterie positionieren; Gase aus der Batterie können das Ladegerät zerfressen und beschädigen.

Die Ladespannung, oberhalb welcher eine Batterie deutlich zu Gasen beginnt, wird **Gasungsspannung** genannt. Beim Blei-Akkumulator liegt diese bei 2,40 V/Zelle. Anhand der Entladekurven kann man erkennen, dass mit steigendem Entladestrom der Blei-Akkumulator tiefer entladen werden kann. Dabei ist I_{20} der Wert desjenigen Konstantstroms, mit dem der Akkumulator binnen 20 Stunden auf 80% entladen wird.

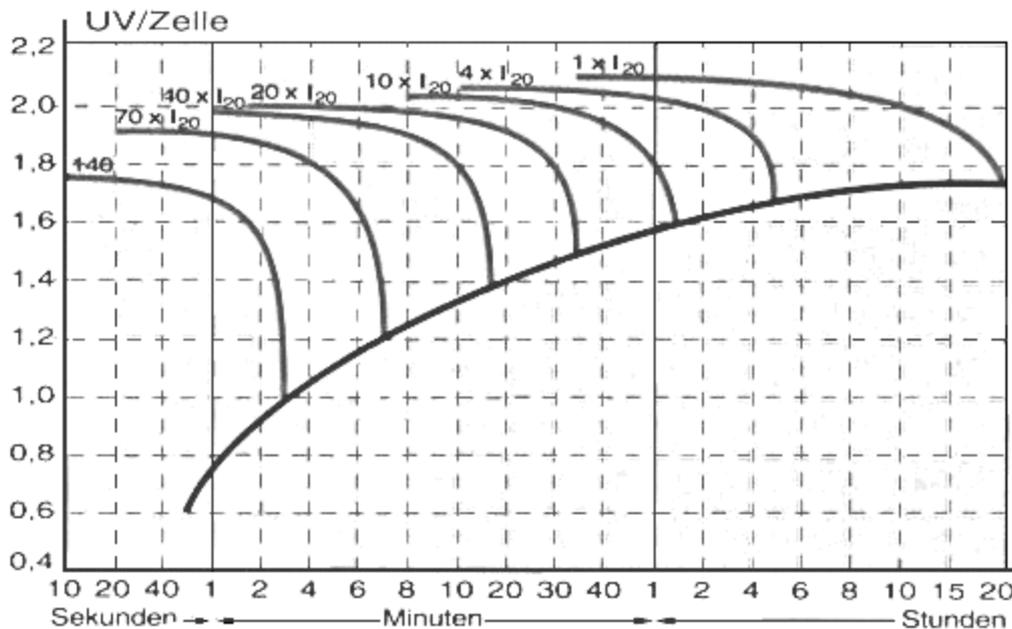


Bild 6.3-4: Entladekurven des Blei-Akkumulators Modells A500 der Firma Sonnenschein

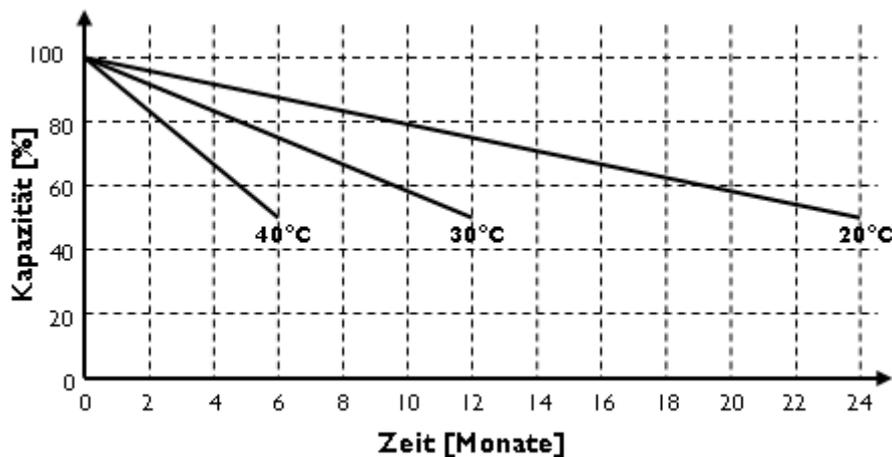


Bild 6.3-5: Selbstentladung des Blei-Akkumulators in Abhängigkeit der Temperatur (Sonnenschein)

Die **Tiefentladung** reduziert die Leitfähigkeit des Elektrolyten erheblich. Ein weiteres Problem bildet die Bleisulfatbildung, die einen Volumenüberschuss zur Folge hat und damit eine erhöhte mechanische Beanspruchung für das System darstellt. Batteriehersteller haben jedoch Methoden entwickelt, um den durch die Tiefentladung entstandenen Schäden entgegenzuwirken bzw. diese zu reduzieren. Durch die Verwendung sehr reinen Bleis als Gittermaterial für die Elektroden konnte die Selbstentladung stark vermindert werden. Bei Raumtemperatur beträgt der Kapazitätsverlust etwa 6 bis 8% pro Monat. Höhere Temperaturen bewirken allerdings ein verstärktes Ansteigen der Selbstentladungsrate.

6.4 Nickel-Cadmium-Akkumulator

Elektroden:

Negative Elektrode: Cadmiumhydroxid (entladen);
Genutzt wird hier eine kunststoffverstärkte Elektrode. Hergestellt wird diese, indem man die aktive Masse mit einem Polymerschlämme mischt und auf ein nickelbeschichtetes Stahlgitter mehrmals aufträgt. Diese Herstellweise ist kostengünstiger als die der herkömmlichen Sinterelektrode

Positive Elektrode: Nickel(II)-Hydroxid (entladen); Foam-Elektrode

Elektrolyt: Kalilauge (KOH); nimmt an der Reaktion nicht teil, seine Konzentration bleibt nahezu unverändert

Separator: Hochporöses Kunststoffvlies (Polyamid- oder Polypropylen-Folie)

Zellreaktionen:

- Anode: $\text{Cd} + 2 \text{OH}^- \leftrightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$

- Kathode: $2 \text{NiOOH} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2 \text{Ni}(\text{OH})_2 + 2 \text{OH}^-$

Gesamtzellreaktion: $\text{Cd} + 2 \text{NiOOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Cd}(\text{OH})_2$

Der Nickel-Cadmium-Akkumulator wurde bereits 1899 durch den Schweden *Waldemar Jungner* (1869 - 1924) entwickelt. Aufgrund der Eigenschaften wie zum Beispiel schnelle und einfache Aufladung, Robustheit, Wartungsfreiheit etc. eignet sich auch der Nickel-Cadmium-Akkumulator als Traktionsbatterie. Allerdings müssen Nachteile wie der später in diesem Kapitel erklärte Memory-Effekt oder die giftigen Inhaltsstoffe in Kauf genommen werden. Die Entwicklung der Nickel-Cadmium-Batterie basiert auf den verschiedenen Ausführungen der Elektrode. In den ersten Ausführungen wurden Masselektroden, nämlich Taschen- beziehungsweise Röhrenplatten, eingesetzt. Hierbei sind die aktiven Massen (Cadmium, Nickelhydroxid) in Taschen oder Röhren aus perforiertem Stahlblech eingeschlossen. Schon in den 30er Jahren wurde die Sinterelektrode entwickelt. Dieser Elektrodentyp hat den Vorteil, dass er mit sehr hohen Strömen belastet werden kann. Basis der Sinterelektrode ist ein Sinterkörper aus Nickel mit etwa 80% Porenvolumen. Das aktive Material wird durch Ausfällen einer Lösung aus Nickel- oder Cadmium-Salzen eingebracht. Charakteristisch für diese Elektrode ist eine dünne Schicht aus aktivem Material, die eng beim Stromableiter liegt. In den 80er Jahren erschien die Foam-Elektrode (oder auch Faser-Struktur-Elektrode) auf dem Markt. Ein Nickelgerüst mit etwa 95% freiem Volumen wird durch chemisches (stromloses) Vernickeln von entsprechend porösem Kunststoff (geschäumtes Polyurethan) und anschließender Pyrolyse des Kunststoffkörpers erzeugt. Da das Porenvolumen der Foam-Elektrode größer ist als das der Sinterelektrode, besitzt die Foam-Elektrode eine höhere Kapazität bei gleichem Volumen. Das aktive Material wird als Paste eingebracht, die endgültige Dicke der Elektrode wird danach durch Walzen festgelegt.

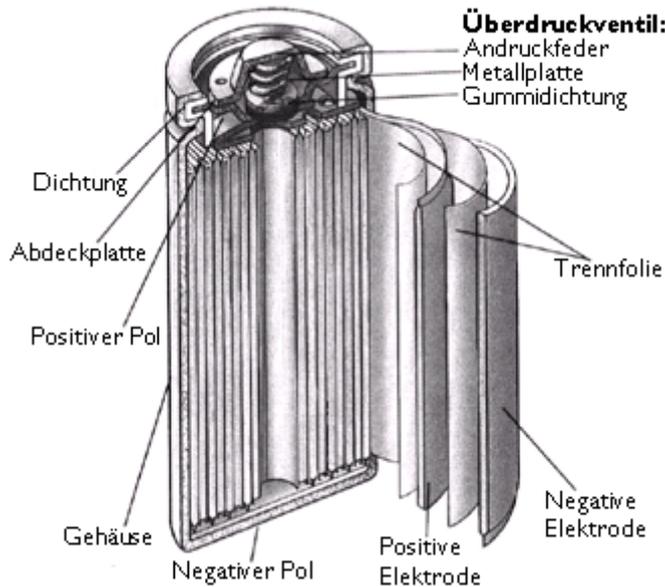


Bild 6.4-1: Schematischer Aufbau einer zylindrischen Nickel-Cadmium-Zelle (*Sanyo Rechargeable CADNICA Batteries*)

Lade- und Entladevorgang:

Es gibt verschiedene Methoden, einen Nickel-Cadmium-Akkumulator aufzuladen. Es wird dabei nach der Einsatzart a) Arbeits- oder b) Stützbatterie, unterschieden. In Fahrzeugen werden die Energiespeicher als Arbeitsbatterien eingesetzt. Die von *Panasonic* empfohlenen Lademethoden für Arbeitsbatterien sind in Bild 6.4-2 aufgeführt.

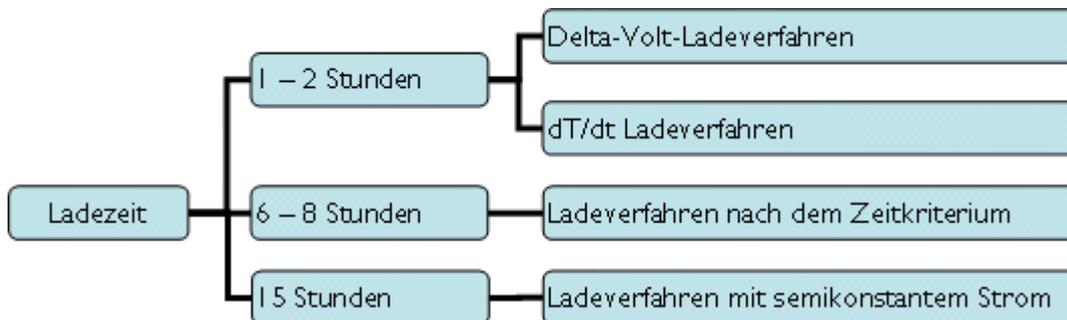


Bild 6.4-2: Lademethoden für Nickel-Cadmium-Zelle (*Panasonic*)

a) **Das Delta-Volt-Ladeverfahren** – auch Delta-Peak-Ladeverfahren genannt – ist ein Schnellladeverfahren, bei welchem der Ladestrom konstant gehalten wird. Der Ladestrom beträgt hierbei 50% bis 100% des Nennstroms. Der Spannungsknick am Ende der Ladekurve wird zum Erkennen der vollen Ladung und zur Abschaltung genutzt.

b) Auch das Ladeverfahren mit der Beobachtung der Temperaturänderung dT/dt als Abschaltkriterium ist ein Schnellladeverfahren. Der Ladestrom beträgt 50% bis 100% des Nennstroms. Der absolute Temperaturwert der Batterie dient nur als Sicherheitskriterium. Mögliche Kriterien sind die Temperaturänderung ΔT seit Beginn des Ladevorgangs oder die aktuelle Änderungsrate („Steigung“) der Temperatur. Je nach Anfangswert liegt die zulässige „Steigung dT/dt “ bei 1 bis 6 K pro Minute.

c) Das Ladeverfahren nach dem **Zeitkriterium** ist einfach und kostengünstig zu realisieren. Doch es hat auch einen Nachteil: Wenn keine weiteren Abschaltkriterien hinzugezogen werden, kann es je nach Anfangszustand zu einer Unterladung, zur Überladung oder zur richtigen Abschaltung kommen.

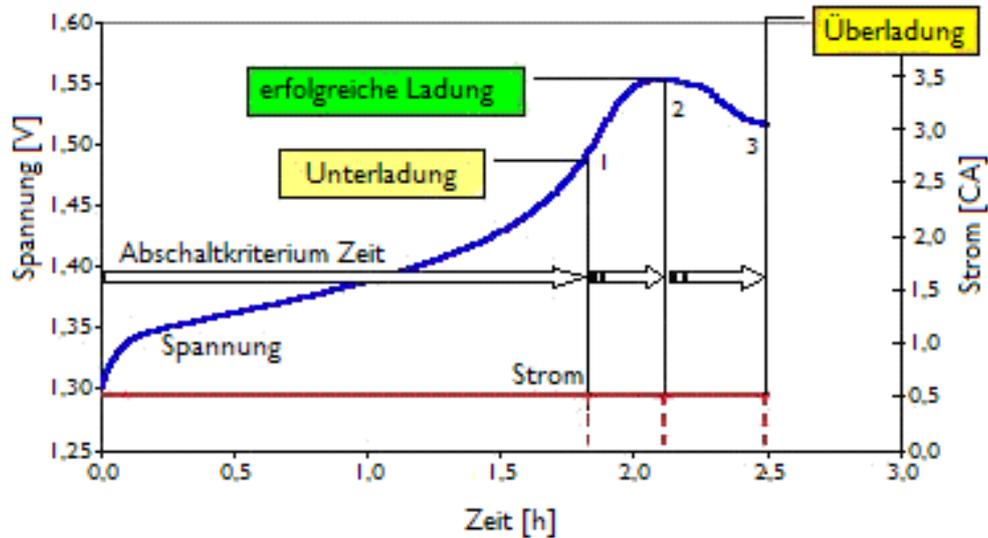


Bild 6.4-3: Ladeverfahren nach dem Zeitkriterium Nickel-Cadmium-Zelle (Panasonic)

d) Beim Ladeverfahren mit semikonstantem Strom wird ein Widerstand R zwischen Energiequelle und Batterie geschaltet, der für einen stabilen Ladestrom sorgen soll. Indem man den Ladestrom niedrig hält, wird keine Wärme generiert und der Vorgang muss nicht weiter kontrolliert werden. Der Ladestrom berechnet sich wie folgt:

$$I_{\text{Lade}} = \frac{U_0 - U_B}{R} = \frac{U_z \cdot N \cdot (K) - U_z \cdot N}{R} \quad (6.4-1)$$

mit: I_{Lade} - Ladestrom

U_0 - Ausgangsspannung der Energiequelle

U_z - Zellspannung (durchschnittlich 1,45 V/Zelle bei Ladestrom von 0,1 I_N und 20 °C)

N - Anzahl von verwendeten Zellen

U_B - Batteriespannung ($U_z \cdot N$)

R - Widerstand zur Stabilisierung des Ladestroms

(K) - Stabilitätskonstante (wird dem Verwendungszweck entsprechend gewählt)

Die Entladeeigenschaften von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren hängen unter anderem von der Temperatur und dem Entladestrom ab. Im Vergleich zu Trockenbatterien ist der Entladeprozess stabiler und auch bei hohen Entladeströmen kommt es zu keinem großen Verlust der Kapazität.

Die Angabe der **Lade- und Entladeströme** bezieht sich auf die Nennkapazität. Üblich sind Bezeichnungen wie zum Beispiel $C/10$ (bzw. 0,1 C). „ C “ bezieht sich auf die Nennkapazität und „10“ auf die Dauer der Ladung bzw. Entladung (z. B. 10 Stunden). Somit würde die Angabe $C/10$ bei einer 1-Ah-Zelle bedeuten, dass der Wert des Ladestroms 0,1 A (= 1 Ah/10 h) beträgt.

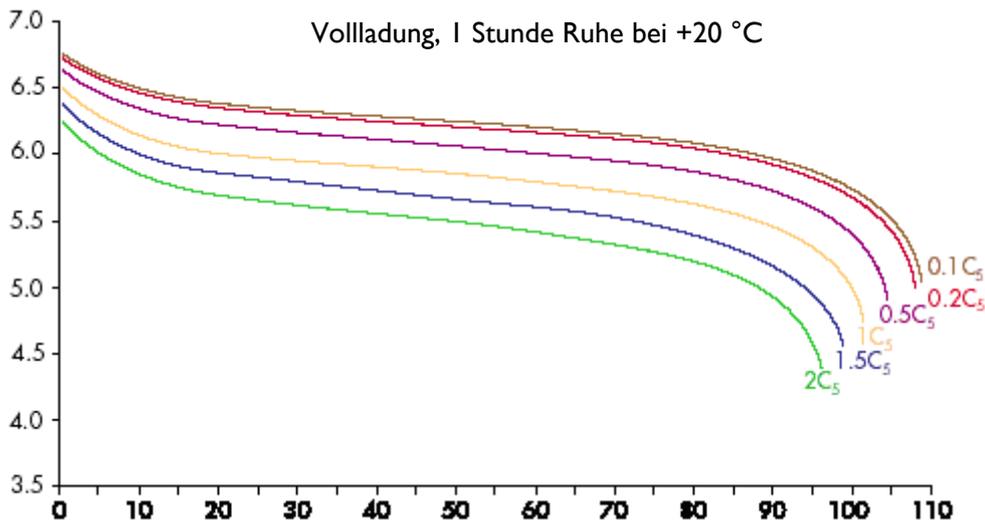


Bild 6.4-4: Abhängigkeit der Modulspannung U_z in Volt in Abhängigkeit der Ladungsabfuhr in % der Batteriekapazität $\%C_5$ (in Ah) bei Entladung mit verschiedenen Strömen (NiCd-Akku) (http://www.saftbatteries.com/130-Catalogue/PDF/data_STM_en.pdf)

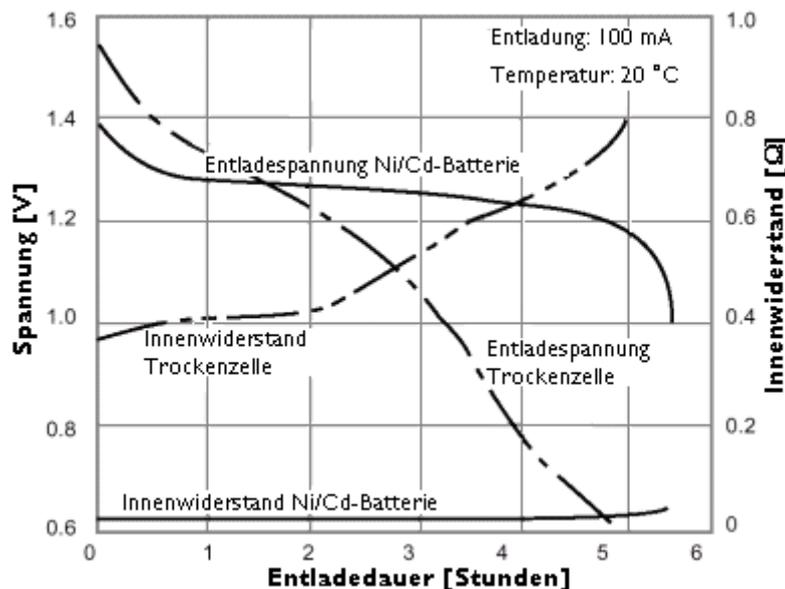


Bild 6.4-5: Vergleich der Entladekurve einer Nickel-Cadmium-Batterie und einer Trockenbatterie (<http://www.ni-cd.net/accusphp/theorie/decharge/nicd.php>)

Wird der Akkumulator nur teilweise entladen und dann sofort wieder aufgeladen, so kann jener (restliche) Teil des nicht umgesetzten Cadmiums Großkristalle bilden. Wird der Ni-Cd-Akku danach über diese bisherige Entladetiefe hinaus beansprucht, so reagiert er an der bezeichneten Stelle mit einer Erhöhung des Innenwiderstands. Daraus resultiert ein Einbruch im Verlauf der Entladespannung, der umso deutlicher ausfällt, je höher der Entladestrom ist. Dieser Memory-Effekt macht sich somit vorwiegend bei hoher Stromentnahme störend bemerkbar. Es sieht dann so aus, als habe sich die Zelle genau jenen Punkt „gemerkt“, bis zu dem sie bisher immer entladen wurde. Wenn der Memory-Effekt bereits eingetreten ist, kann nur das definierte Entladen mit kleinen Strömen ($< 0,3C$) bis auf 1 V/Zelle Abhilfe schaffen. Ähnliches passiert, wenn ein Nickel-Cadmium-Akkumulator ständig nur mit kleinen Dauerströmen geladen wird. Kleine Ladeströme unterstützen das Wachstum großer Kristalle. Diese bieten aber gegenüber dem Elektrolyten weniger Reaktionsoberfläche. Damit steigt der Innenwiderstand der Zellen an. Dies wirkt sich jedoch im Gegensatz zum wirklichen Memory-Effekt auf die gesamte

Entladekennlinie aus. Ladepulse mit Strompausen oder kurzen Entladeimpulsen dazwischen (Reflexladen) sind demnach besser als kleine andauernde Ladeströme.

Ebenfalls von der negativen Elektrode ausgehend ist schließlich das so genannte Dendritenwachstum. Hier erreicht die Kristallgröße derartige Ausmaße, dass eine Kristallspitze schließlich den Separator durchstoßen und bis zur positiven Elektrode vordringen kann. Es bilden sich lokale Kurzschlüsse. So „erkrankte“ Zellen sind im Batterieverbund zwar voll stromdurchlässig, weisen selbst aber keine Klemmenspannung mehr auf. Gefördert wird dieses ungezügelte Kristallwachstum durch zu geringe, lang andauernde Ladeströme und hohe Temperaturen. Zwar sind „Spezialmethoden“ bekannt, die mit Hilfe kurzzeitiger Impulsstromstöße ($I > 100 \text{ A}$) diese Dendriten durch Abschmelzen beseitigen können. Es bleiben jedoch die schädlichen Folgen des vorausgegangenen Kurzschlusses wie etwa durch Hitzeeinwirkung entstandene Leckstellen im Separator zurück.

6.5 Nickel-Metallhydrid-Akkumulator

Der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator wird als direkter Nachfolger der Nickel-Cadmium-Batterie angesehen. Die wesentlichen Vorteile des Nickel-Metallhydrid-Systems sind zum einen die höhere Energiedichte und zum anderen die größere Umweltfreundlichkeit aufgrund des Verzichts auf das giftige Cadmium. Der Nachteil ist jedoch die geringere Leistungsdichte.

Elektroden:

Negative Elektrode: wasserstoffspeichernde Legierung sowie ein Metallhydrid (MeH_2) (aufgeladener Zustand)

Positive Elektrode: Nickelhydroxid (aufgeladener Zustand)

Elektrolyt: Wässrige Kalilauge mit geringen Anteilen an Lithiumhydroxid

Separator: feine Fasern

Gehäuse: Edelstahl

Zellreaktionen:

- Anode: $\text{MH} + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$

- Kathode: $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$

Gesamtzellreaktion: $\text{MH} + \text{NiOOH} \leftrightarrow \text{M} + \text{Ni}(\text{OH})_2$

Der Aufbau kann entweder prismatisch (Bild 6.5-1) oder zylindrisch (Bild 6.5-2) erfolgen. Letzterer hat den Vorteil, dass keine Leerräume entstehen und somit die volumetrische Energiedichte höher ist. Wie in der Nickel-Cadmium-Batterie besteht bei diesem System die Anode aus Nickelhydroxid. Die Kathode wird aus wasserstoffabsorbierenden Legierungen hergestellt. Das einzigartige Merkmal dieser Legierungen ist die Fähigkeit, das Hundertfache seines eigenen Wasserstoffgasgehaltes bei einem Druck, der geringer ist als der Umgebungsdruck, zu speichern. Verwendete Legierungen sind

a) AB_5 -Legierungen, wie zum Beispiel LaNi_5 ,

b) AB_2 -Legierungen, wie zum Beispiel TiMn_2 oder ZrMn_2 .

Sowohl im *Toyota Prius* (Bild 6.2-2) als auch im *Honda Civic Hybrid* wird der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator eingesetzt.



Bild 6.5-1: Ni-MH-Akku mit prismatischem Aufbau (Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

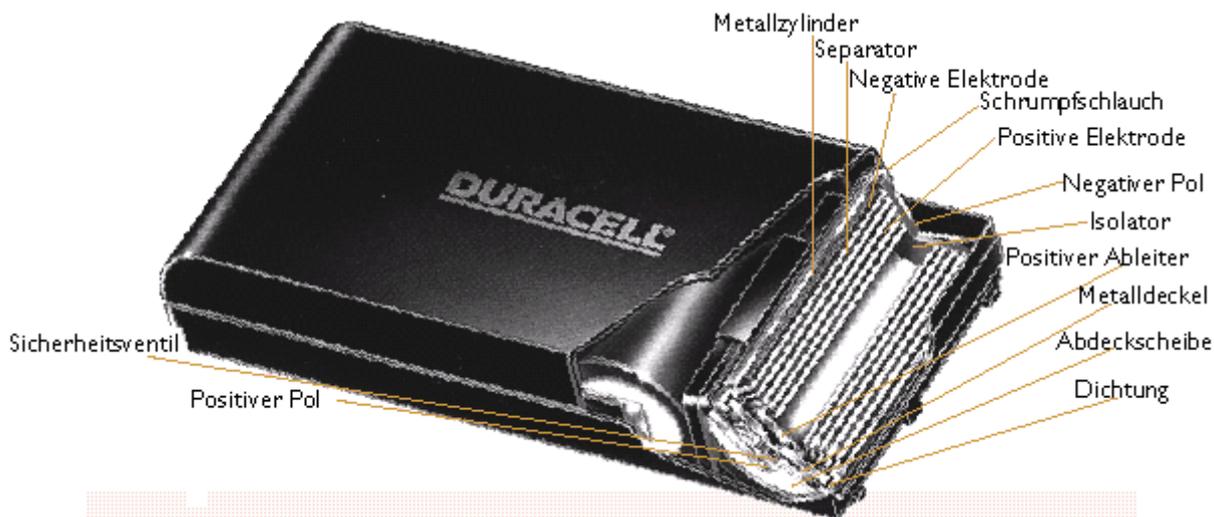


Bild 6.5-2: Ni-MH-Akku mit zylindrischem Aufbau (Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

		<i>Toyota Prius</i>	<i>Honda Civic Hybrid</i>
Nennspannung	V	201,6	144
Anzahl de Module		28	20
Kapazität	Ah	6,5	6,5
Energie	Wh	1310	936
Masse	kg	39	k.A.

Tabelle 6.5-1: Batteriedaten des *Toyota Prius* und des *Honda Civic Hybrid*

Lade- und Entladevorgang:

Das Aufladen des Nickel-Metallhydrid-Akkumulators unterliegt drei Hauptkriterien:

1. Wahl einer geeigneten Ladegeschwindigkeit
2. Begrenzung der Temperatur

3. Wahl einer geeigneten Ladetechnik

Die Ladeigenschaften des Nickel-Metallhydrid-Systems ähneln denen des Nickel-Cadmium-Systems, wobei das Nickel-Metallhydrid-System gegen Überladung empfindlicher ist. Die üblichste Methode ist das **Aufladen mit konstantem Strom**. Durch die Strombegrenzung werden eine exzessive Temperaturerhöhung und eine übermäßige Sauerstoffrekombination, die eine unerwünschte Gasung zur Folge hat, vermieden.

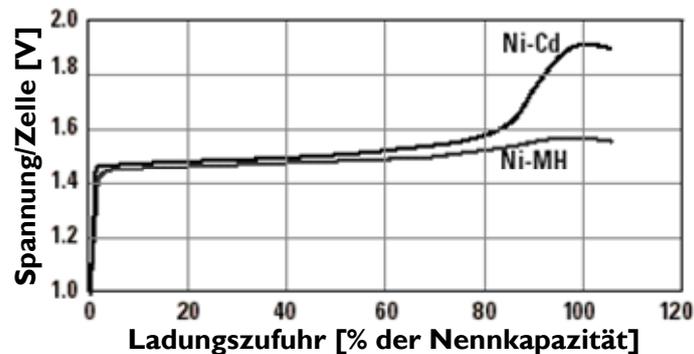


Bild 6.5-3: Typische Ladespannungskurven von Ni-MH- und Ni-Cd-Batterien
Bedingungen: Ladung mit 1°C bei 21 °C bis zu einer Spannungsänderung von -10 mV je Zelle
(Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

Beim Vergleich der Ladespannungskurven von Ni-MH- und Ni-Cd-Systemen fällt auf, dass ab dem Erreichen von etwa 80% der Kapazität die Spannung beim Ni-MH-Akku ansteigt. Der Grund dafür ist die Sauerstoffgeneration an der positiven Elektrode. Sobald die Batterie überladen wird, nimmt die Spannung wieder ab. Dieser Effekt ist beim Nickel-Cadmium-System stärker ausgeprägt als beim Nickel-Metallhydrid-System.

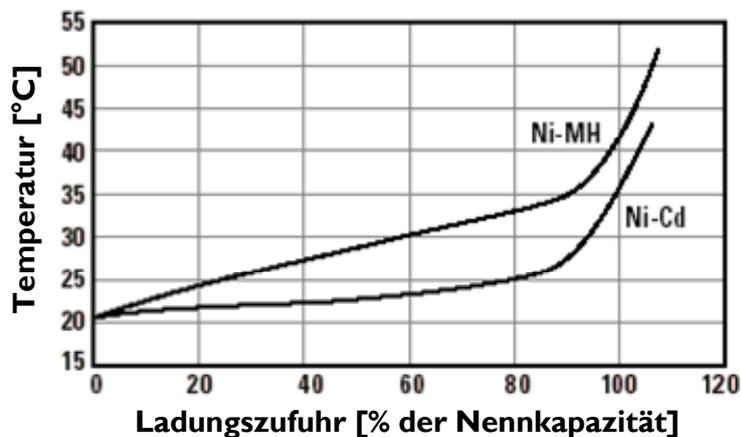


Bild 6.5-4: Typische Temperaturkurven während des Ladens bei Ni-MH- und Ni-Cd-Batterien
Bedingungen: Ladung mit 1°C bei 21 °C bis zu einer Spannungsänderung von -10 mV je Zelle
(Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

Der stärkere Anstieg der Temperatur während der Aufladung bis zu 80% der Nennkapazität beim Ni-MH-Akku liegt an der exothermen Eigenschaft der Ladereaktion. Die Reaktion des Nickel-Cadmium-Systems dagegen ist endothermer Natur, was den geringeren Anstieg der Temperaturkurve erklärt. Ab einem Ladezustand von ca. 80 % ... 85 % ergibt sich bei beiden Systemen eine stärkere Temperaturerhöhung. Dies ist auf die exotherme Sauerstoffreaktion zurückzuführen. Wie beim Nickel-Cadmium-System werden auch beim Ni-MH-System sowohl die einsetzende Spannungsabnahme ($-\Delta U$) nach Erreichen des Spannungsmaximums (Bild 6.5-3) als auch der Temperaturanstieg (6.5-4) beim Laden als Indikatoren für das Erreichen der vollen Ladung genutzt. Der Spannungsverlauf während des Ladevorgangs hängt von mehreren Faktoren ab, vor allem von der Temperatur und dem Strom. Die

Spannung beim Laden verläuft auf einem höheren Niveau bei geringerer Temperatur. Auch die Ladeeffizienz wird durch die Temperatur beeinflusst, denn je höher diese ist, desto mehr Sauerstoff wird an der positiven Elektrode gebildet. Folglich gilt, dass sich das Laden bei hohen Temperaturen negativ auf die Kapazität auswirkt. Ebenso liegt die Spannung beim Laden umso höher, je größer die Ladeströme gewählt werden.

Das **Entladeverhalten** eines Nickel-Metallhydrid-Akkumulators ist mit dem eines Nickel-Cadmium-Akkumulators vergleichbar. Bei beiden Systemen verläuft die Spannung in Abhängigkeit der entnommenen Lademenge während fast des gesamten Entladevorgangs relativ flach (Bild 6.5-5). Dabei ist bei gleicher Zellengröße die Kapazität der Nickel-Metallhydrid-Zelle im Allgemeinen um 40% höher als die der Nickel-Cadmium-Zelle.

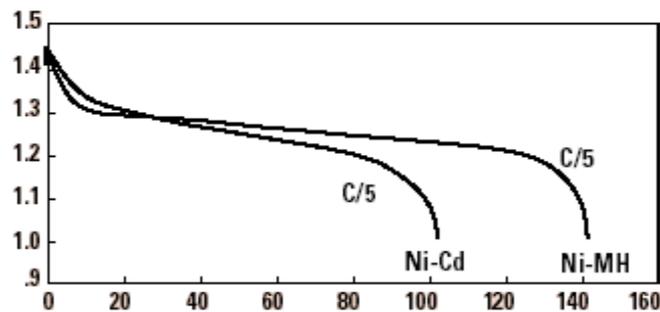


Bild 6.5-5: Spannung in V in Abhängigkeit der Ladungsentnahme in % der Nennkapazität: Vergleich der Entladekurven einer Ni-MH- und einer Ni-Cd-Zelle gleicher Größe

Bedingungen: Ladung zuvor mit C/3 während 5 Stunden; Temperatur: 21°C

(Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

Bei höheren Entladeströmen verläuft die Entlade-Kurve der Batteriespannung auf einem geringeren Spannungsniveau. Auch die nutzbare Kapazität der Ni-MH-Batterie ist dann geringer. Das Gleiche ist zu beobachten, wenn man die Ni-MH-Batterie zwar mit dem gleichen Strom, jedoch bei tieferer Temperatur, entlädt. Werden Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren gelagert, so verringert sich der Ladezustand bzw. die Kapazität in Abhängigkeit der Temperatur und der Lagerungsdauer (Bild 6.5-6). Die **Selbstentladung** ist in der Reaktion des in der Batterie übrig gebliebenen Wasserstoffes mit der positiven Elektrode begründet. Auch die langsame und reversible Auflösung der positiven Elektrode trägt dazu bei. Je höher die Lagertemperatur, desto höher auch die Selbstentladungsrate. Die verlorene Kapazität aufgrund der Selbstentladung kann durch geeignetes Laden wiedererlangt werden.

Ein Nachteil, der bei Nickel-Metallhydrid-Batterien im Falle unsachgemäßer Entladung auftreten kann, ist der **reversible Lazy-Battery-Effekt**. Prinzipiell ist dieser mit dem Memory-Effekt vergleichbar. Er entsteht durch eine nicht vollständige Entladung des Akkumulators während des Betriebes bzw. durch eine Dauerladung mit einem zu geringen, nicht spezifikations-konformen Strom. Ähnlich wie beim Memory-Effekt bilden sich Kristalle an der positiven Nickelhydroxid-Elektrode aus. Allerdings bricht die Spannung beim Lazy-Battery-Effekt nicht erst an der Stelle der Teilentladung ein, sondern sie fällt über die gesamte Entladezeit geringfügig ab. Bei unsachgemäßer Pflege vermindert sich so die Kapazität des Nickel-Metallhydrid-Akkumulators über die gesamte Entladezeit.

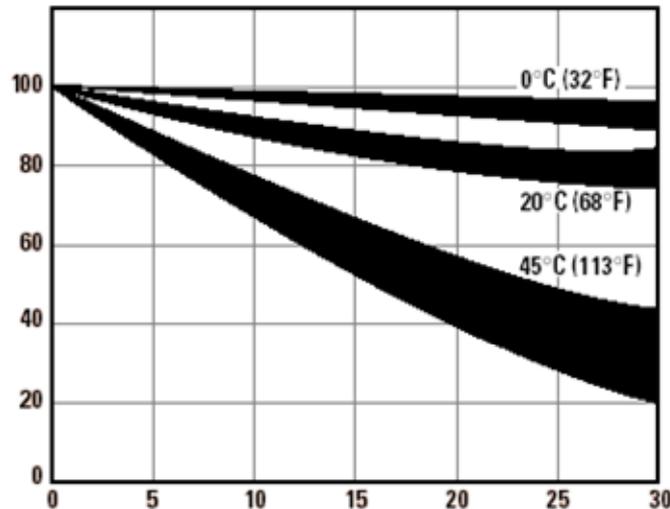


Bild 6.5-6: Kapazitätsabnahme der Ni-MH-Batterie in % der Nennkapazität in Abhängigkeit der Lagerungsdauer in Tagen: Selbstentladung bei verschiedenen Temperaturen Bedingungen:

Ausgangsbedingung: Ladung mit C/3 während 5 Stunden; danach Entladung mit C/5 bis 1,0 V bei einer Temperatur 21 °C (Duracell, <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/TECHBULL.pdf>)

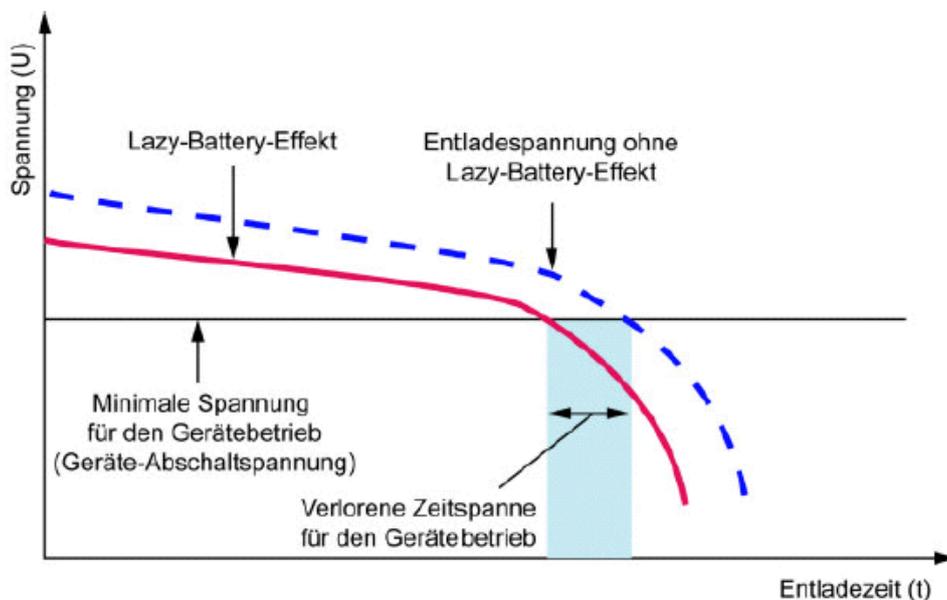


Bild 6.5-7: Ni-MH-Batterie: Auswirkung des Lazy-Battery-Effekts auf die Batteriespannung (<http://www.tecchannel.de/hardware/1191/8.html>)

Der Lazy-Battery-Effekt wirkt sich weit weniger dramatisch aus als der Memory-Effekt. Die Akkumulatorspannung liegt beim Entladen zwar unter der Normspannung, allerdings verkürzt das die Betriebsdauer nur geringfügig. Um diese negative Eigenschaft zu beseitigen, muss der Akkumulator zwei bis drei Mal hintereinander vollständig entladen werden. Wie schon beim Memory-Effekt kann hier ein modernes Ladegerät mit entsprechenden Lade- und Entladefunktionen helfen, die ursprüngliche Leistungsfähigkeit des Akkus wiederherzustellen.

6.6 Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (ZEBRA)

Die ZEBRA-Batterie ist eine Variante des Natrium-Schwefel-Akkumulators, der hier nicht näher beschrieben wird. Unterschiedlich ist das Material der positiven Elektrode. Anstatt des Schwefels wird hier Nickelchlorid eingesetzt. Ein weiterer Unterschied besteht in der Anordnung der Elektroden. Bei diesem System umgibt das Natrium die Keramik von außen. Durch Reihen- und Parallelschaltung werden die einzelnen Zellen, die jeweils eine Kapazität von 40 Ah haben, zu einer Batterie zusammengefügt. Wegen der hohen Betriebstemperatur von etwa 300 °C befinden sich die Zellen in einem Gehäuse, das mit einer Vakuumisolierung versehen ist. Damit bleibt die äußere Oberfläche des Batteriegehäuses kalt und der Wärmeabfluss aus der Batterie gering. Bei Inbetriebnahme oder nach Erkalten muss die Batterie zuerst auf die entsprechende Betriebstemperatur erwärmt werden. Dies geschieht mit einer eingebauten Elektroheizung. Sobald die Batterie eine Temperatur von etwas 200 °C erreicht, kann der Ladevorgang beginnen.

Elektroden:

Negative Elektrode: Schmelzflüssiges Natrium

Positive Elektrode: Nickelchlorid, im entladenen Zustand Kochsalz und Nickel

Festelektrolyt und Separator: Rohr aus β -Aluminiumoxid

Zweiter Elektrolyt: schmelzflüssiges Natriumaluminiumchlorid innerhalb des Festelektrolytrohrs

Bemerkung: Beide Elektrolyten sind nicht an der Reaktion beteiligt, sondern dienen lediglich zur Natriumionenleitung

Gehäuse: Edelstahl, hermetisch verschweißt mit thermischen Isolierung versehen

Zellreaktionen:

- Anode: $2 \text{ Na} \leftrightarrow 2 \text{ Na}^+ + 2 \text{ e}^-$

- Kathode: $\text{NiCl}_2 + 2 \text{ Na}^+ + 2 \text{ e}^- \leftrightarrow \text{Ni} + 2 \text{ NaCl}$

Gesamtzellreaktion: $2 \text{ Na} + \text{NiCl}_2 \leftrightarrow \text{Ni} + 2 \text{ NaCl}$

Lade- und Entladevorgang:

Die ZEBRA-Batterie ist aus rohrförmigen Zellen aufgebaut. Die positive Festkörperelektrode befindet sich im Inneren des keramischen Elektrolytrohrs und verfügt über einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Stromableiter in der Mitte. Beim Laden wandert die Reaktionszone von der Elektrolytkeramik radial auf den Stromableiter zu. Mit fortschreitender Ladereaktion bewegt sich die Reaktionszone in die Festkörperelektrode hinein. Dabei verkleinert sich zwangsläufig die Reaktionsfläche. Das Ladeverfahren muss diesen Umstand Rechnung tragen. Damit die Stromdichte nicht mit fortschreitender Ladung zunimmt, muss der Ladestrom abnehmen, um die Stromdichte konstant zu halten. Daher ist das *I-U*-Ladeverfahren für diesen Zellentyp besonders geeignet (Bild 6.3-3). Es wird mit konstantem Strom geladen, solange die Spannung unter einem bestimmten Grenzwert ist. Nach Erreichen der maximalen Spannung nimmt der Strom stetig ab, bis das Ladeende erreicht wird. Werden für die Konstantstrom-Phase sehr kleine Ströme gewählt, so verläuft die Konstantstromphase nahezu bis zum Ladeende, so dass beim Laden mit kleinen Strömen auch das Verfahren der Konstantstromladung angewendet werden kann. Dann sind aber die Ladezeiten länger als bei der *I-U*-Ladung.

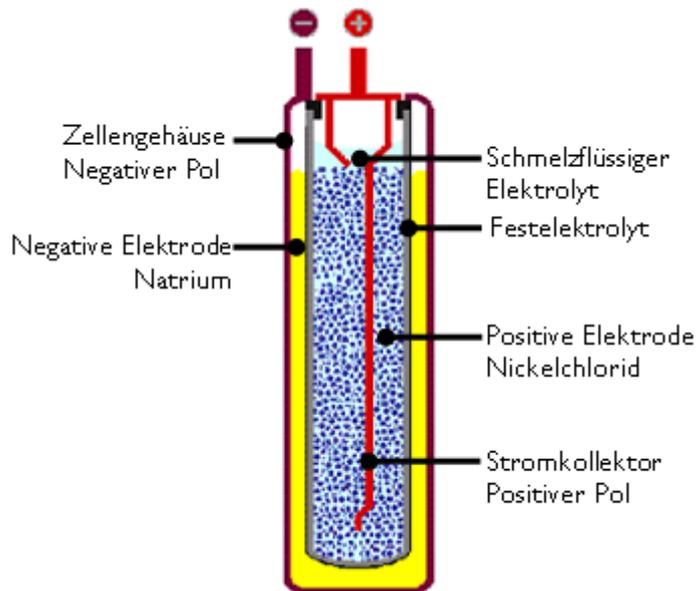


Bild 6.6-1: Aufbau eines Natrium-Nickelchlorid-Akkumulators (<http://www.basytec.de/batallg/batallg.htm>)

Für den praktischen Betrieb vorteilhaft ist die - im Rahmen gewisser Grenzen gegebene - Unempfindlichkeit gegen Überladen und Tiefentladen. Die dabei ablaufenden Reaktionen sind reversibel und schädigen die Zelle nicht. Dieser Vorteil wird durch einen Natriumüberschuss ermöglicht. Bild 6.6-2 demonstriert den Spannungsverlauf und die entsprechenden chemischen Reaktionen in Abhängigkeit des Ladezustands.

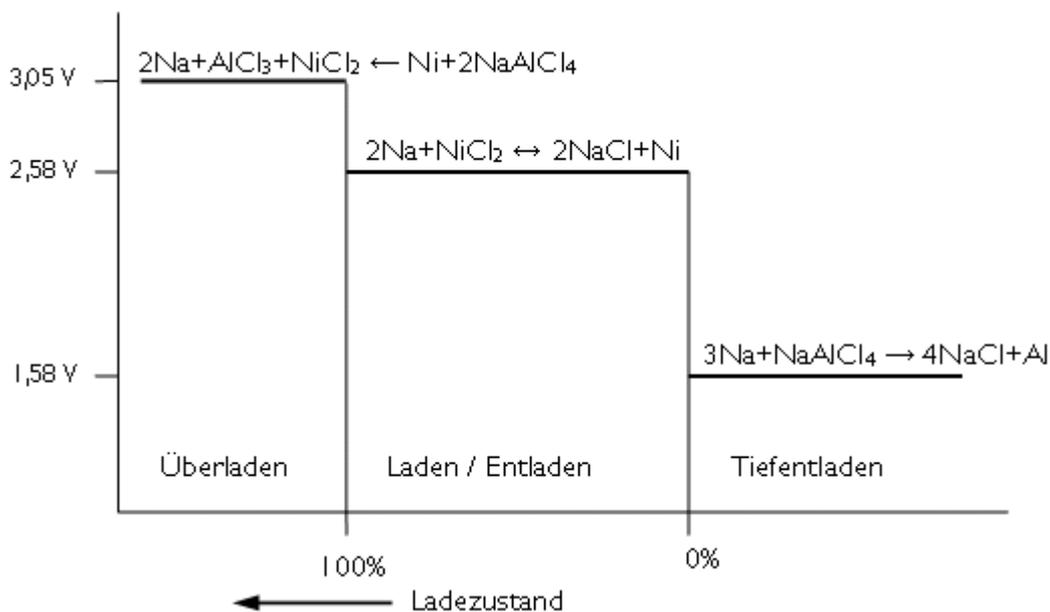


Bild 6.6-2: Lade- und Entladereaktion in einer ZEBRA-Zelle (aus: Naunin, D. [Hrsg.]: Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven. DGES-Tagung 29./30. April 1999. Karlsruhe)

Wenn der Batterie beim Entladevorgang über längere Zeit sehr hohe Leistung entnommen wird, so erwärmt sich die Batterie aufgrund ihres Innenwiderstandes weiter. Damit die Erwärmung begrenzt bleibt, muss die Batterie beim Überschreiten der vorgegebenen Temperatur mit einem Luftgebläse gekühlt werden. Das ZEBRA-System zeigt keine elektrochemische Selbstentladung, da der

Keramikelektrolyt elektrische Selbstentladung ausschließt (Ah-Wirkungsgrad 100%). Allerdings ist eine thermische Selbstentladung von ca. 5.5 W pro gespeicherte Kilowattstunde unvermeidbar.

6.7 Lithium-Ionen-Akkumulator

Die ersten Arbeiten mit Lithiumbatterien begannen 1912 unter *G. N. Lewis*, aber erst ab 1970 waren die ersten wiederaufladbaren Lithiumbatterien kommerziell lieferbar. Verschiedene Versuche, eine wiederaufladbare Lithiumbatterie zu entwickeln, scheiterten hauptsächlich an den Sicherheitsproblemen. Aufgrund der natürlichen Instabilität von metallischem Lithium - speziell während des Ladungsprozesses - bewegte sich die Entwicklung in Richtung einer nicht metallischen Lithiumbatterie, bei der nur Lithium-Ionen eingesetzt würden. Zwar liefert dieser Akkumulator eine etwas kleinere Energiedichte als einer aus metallischem Lithium, doch ist diese Ausführung sicherer, vorausgesetzt, dass während der Ladung und Entladung gewisse Vorkehrungen getroffen werden. 1991 brachte *Sony Corporation* die erste Lithium-Ionen-Batterie kommerziell auf den Markt. Andere Hersteller folgten. Als Material für die Kathode des Lithium-Ionen-Systems wird eine Lithiumverbindung eingesetzt, die aus Cobalt-, Mangan- oder Nickel-Oxid bestehen kann. Die Anoden setzen sich aus einer Graphitverbindung zusammen.

Elektroden:

Negative Elektrode: Graphit

Positive Elektrode: Lithium-einlagerungsfähiges Metalloxid, zum Beispiel Cobaltdioxid, (LiCoO_2), Nickeloxid (LiNiO_2) oder Manganoxid (LiMn_2O_4)

Elektrolyt: Zum Beispiel Lithium-Phosphor-Hexafluorid

Separator: Polyäthylenfilm

Zellreaktionen: Unter Verwendung von Cobaltdioxid

- Anode: $\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}_{1-x} \text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + x\text{e}^-$

- Kathode: $\text{C} + x\text{Li}^+ + x\text{e}^- \rightarrow \text{CLi}_x$

Gesamtzellreaktion: $\text{LiCoO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Li}_{1-x} \text{CoO}_2 + \text{CLi}_x$

Lithium ist ein hoch reaktives Leichtmetall. Dieses leicht entzündliche Material kann bei starker Erwärmung explodieren. Um die nötige Sicherheit zu gewährleisten, muss die Lithium-Ionen-Batterie mit einer Schutzschaltung und einem Ventil zum Druckabbau versehen werden. Zusätzlich werden die Zellen in ein druckfestes Gehäuse eingebaut. Die Funktion dieser Schutzschaltung ist die Begrenzung der Spitzenspannung jeder Zelle während des Ladevorgangs und das Vermeiden einer zu tiefen Zellenspannung während des Entladevorgangs. Die Zelltemperatur wird überwacht, um extreme Temperaturen zu verhindern. Der maximale Ladestrom ist auf 1°C und der Entladestrom auf 2°C begrenzt. Aufgrund dieser Vorkehrungen wird eine Lithiummetallisierung, die bei der Überladung entstehen kann, praktisch vermieden. Diese Sicherheitsmaßnahmen schlagen sich im relativ hohen Kosten für das Li-Ionen-System nieder. So ist eine wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterie gegenüber einem Nickel-Metallhydrid-Akkumulator um etwa 30% teurer.

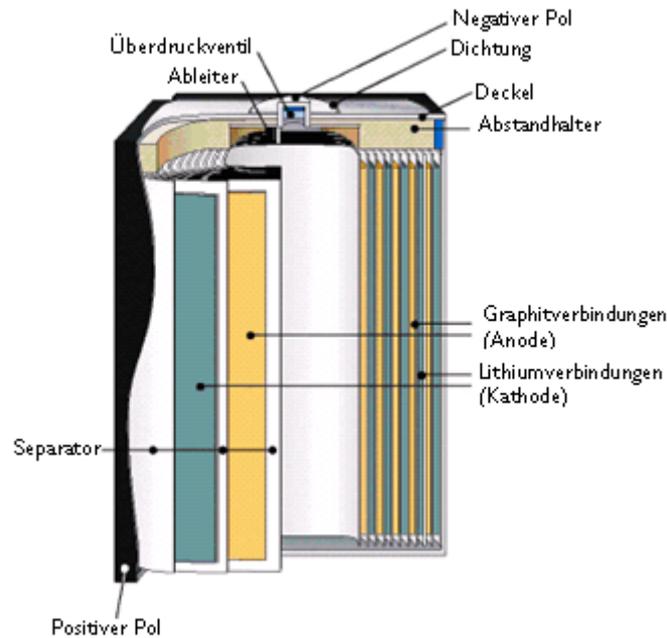


Bild 6.7-1: Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkus (<http://www.tecchannel.de/hardware/1191/8.html>)

Die **Alterung** der Lithium-Ionen-Batterien ist zur Zeit noch ein Problem dieses Systems. Eine Abnahme der Batteriespeicherkapazität ist bereits nach einem Jahr bemerkbar, ob nun die Batterie gebraucht wurde oder nicht. Die Batterie versagt ihren Dienst häufig nach zwei oder drei Jahren. Auch andere Batteriesysteme unterliegen prinzipiell einer Abnahme der Speicherkapazität aufgrund der Alterung, vor allem die Nickel-Metallhydrid-Batterien, wenn sie zu hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt waren.

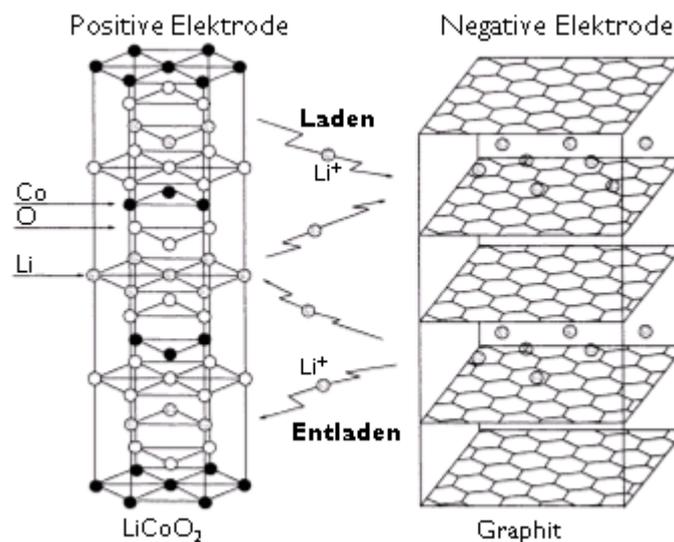
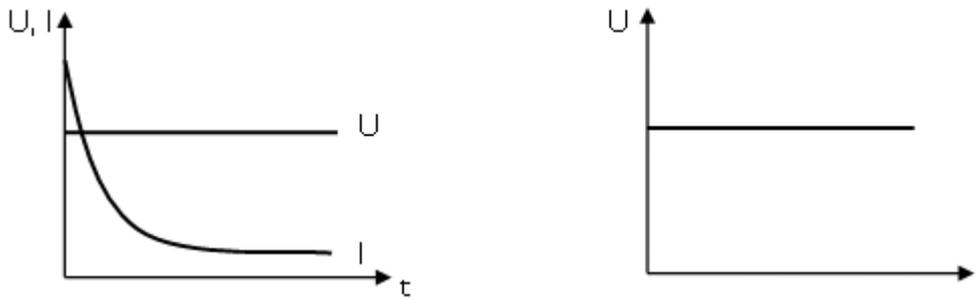


Bild 6.7-2: Schema der chemischen Reaktion eines Lithium-Ionen-Akkumulators (*Panasonic* http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_LiIon_Overview.pdf)

Lade- und Entladevorgang:

Im Lithium-Ionen-System ergibt sich beim Laden folgende chemische Reaktion: Während der Ladung wird das Lithium in der positiven Elektrode ionisiert. Die Li-Ionen wandern in die einzelnen Gitterebenen der hexagonalen Kristallschichtstruktur der negativen Graphit-Elektrode, wo sie sich einlagern. Während der Entladung wandern die Ionen von der negativen Elektrode zur positiven zurück.

Der Lithium-Akkumulator wird grundsätzlich nach der U -Kennlinie (Bild 6.7-3) geladen, wobei in der Anfangsphase eine Strombegrenzung nötig sein kann. Die Herstellerangaben bezüglich des maximalen Ladestroms bewegen sich zwischen $0.5 \cdot C$ und $1 \cdot C$. Eine feste Ladeschlussspannung muss eingehalten werden.



a) b)
 Bild 6.7-3: Laden mit konstanter Spannung: a) Zeitverlauf von Strom und Spannung, b) Spannungs-Strom-Kennlinie

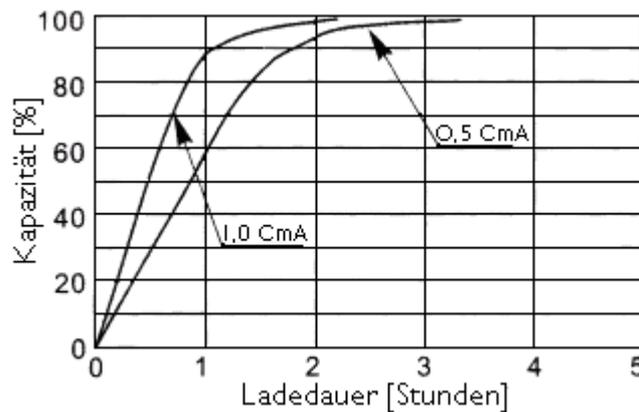


Bild 6.7-4: Kapazitätsverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei der Ladung eines Li-Ionen-Akkus (<http://www.huanyubattery.com/en/product-1-1.asp?sort=Characteristics&sort2=Li-ion%20Battery>)

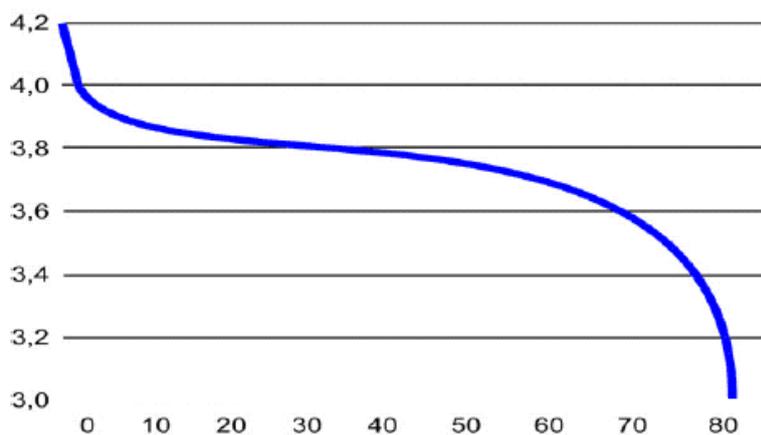


Bild 6.7-5: Batteriespannung in Volt in Abhängigkeit der Entladedauer in Minuten: Entladekurve eines Lithium-Ionen-Akkus (<http://www.tecchannel.de/hardware/1191/9.html>)

Mit dem vorgegebenen Ladestrom von $0.5 \cdot C$ bis $1 \cdot C$ erreichen die Lithium-Ionen-Batterien innerhalb von 70 bis 120 Minuten 90% der Nennkapazität (Bild 6.7-4). **Panasonic** beschreibt den Ladevorgang eines einzelligen Batteriepacks anhand des Ablaufdiagramms Bild 6.7-6, wobei zuerst mit Konstantstrom und danach mit Konstantspannung (I - U -Verfahren) geladen wird. Die darin vorkommenden Abkürzungen und Bezeichnungen sind nachfolgend erläutert.

- CV - Laden mit konstanter Spannung (constant voltage)
- i_L - Ladestrom
- i_{set1} - festgelegter Soll-Stromwert 1
- i_{set2} - festgelegter Soll-Stromwert 2
- OCV - Leerlaufspannung der Batterie (open circuit voltage)
- t_{bat} - Temperatur der Batterie
- t_{min} - Mindesttemperaturschwelle, festgelegter Wert
- t_{max} - Höchsttemperaturschwelle, festgelegter Wert
- T_1 - Zeitähler Gesamtzeit
- T_2 - Zeitähler vollständige Ladung
- T_3 - Zeitähler Wiederaufladung

Aus Bild 6.7-5 ist ersichtlich, dass die Spannung während des Entladevorgangs nahezu über die gesamte Zeitspannung über der Nennspannung von 3.6 V liegt. Negative Phänomene wie zum Beispiel der Memory- oder Lazy-Battery-Effekt treten beim Li-Ionen-System nicht auf.

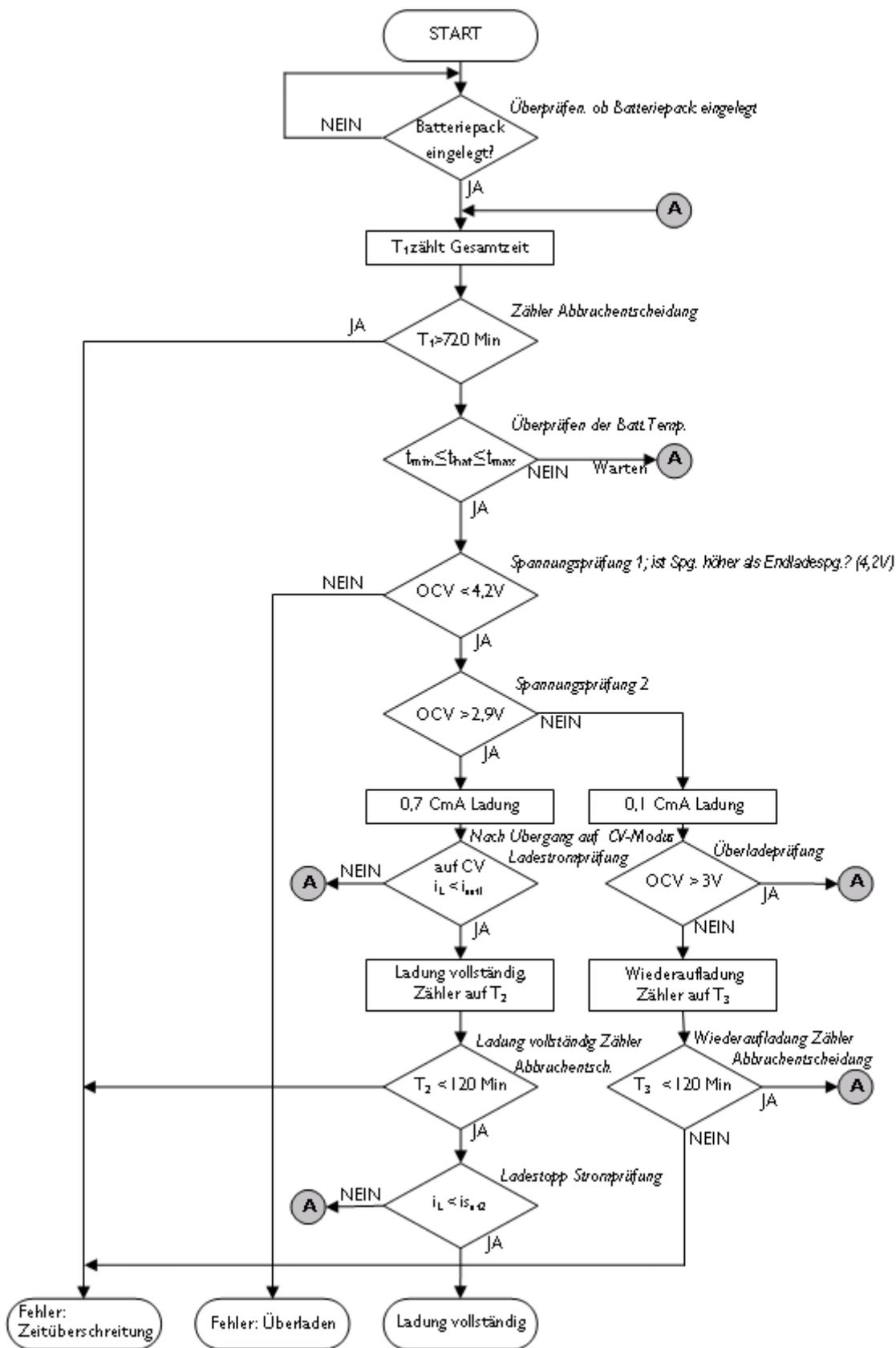


Bild 6.7-6: Ladevorgang eines Lithium-Ionen-Akkumulators
 (http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_LiIon_C)

6.8 Zink-Brom-Akkumulator

Elektroden:

Negative Elektrode: Zink

Positive Elektrode: Brom

Elektrolyt: Wässrige Lösung aus Zink-Bromid und quaternären Ammoniumsalzen

Separator: Mikroporöses Polyäthylen

Zellreaktionen:

- Anode: $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{Br}^-$

- Kathode: $\text{Zn} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

Gesamtzellreaktion: $\text{Br}_2 + \text{Zn} \leftrightarrow \text{ZnBr}_2$

Die Entwicklung des Zn-Br-Batteriesystems begann in den 70er Jahren zunächst bei *EXXON* in den USA gefolgt ab 1983 in Europa durch intensive Arbeiten bei der „*Studiengesellschaft für Energiespeicher und Antriebssysteme*“ (*SEA*) in Österreich. Ab 1990 wurden ausgedehnte Laborprüfungen und Erprobungen in E-Fahrzeugen durchgeführt. Die Zink-Brom-Batterie weicht vom Aufbau einer „klassischen“ Zelle ab, denn das aktive Material der positiven Elektrode ist nicht in den Elektroden gelagert, sondern liegt geladen wie ungeladen in gelöster Form vor. Es wird in einem separaten Tank gelagert. Dadurch kann mehr Material zur Verfügung gestellt werden, als üblicherweise in Elektroden Platz findet. Für die negative Elektrode (Zn) ist wichtig, dass bei der Aufladung die galvanische Abscheidung des Zinks aus dem strömenden Elektrolyten erfolgt. Dadurch wird eine gleichmäßige Abscheidung erreicht und das sonst bei Lösungselektroden auftretende Problem der Formänderung wird hier nicht beobachtet. Eine weitere Besonderheit dieses Systems ist, dass zwei Elektrolyte benötigt werden, je eine dreimolare Zinkbromidlösung und eine Bromlösung. Letzterer wird viermolares Kaliumchlorid zur Erhöhung der Leitfähigkeit, sowie Ammoniumbromid als Komplexbildungsmittel zugegeben. Die Elektrolyte zirkulieren in getrennten Kreisläufen; Anoden- und Kathodenraum sind durch eine mikroporöse Kunststoffmembran voneinander getrennt. Durch ein darin eingepreßtes Warzenprofil bleibt auch bei einer allfälligen Verformung der Elektroden ein minimaler Zwischenraum für die Elektrolytlösungen erhalten. Um hohe Stromdichten zu erreichen, die Temperatur zu kontrollieren und beim Laden eine einheitliche Abscheidung des Zinks zu gewährleisten, müssen die Elektrolyte zwischen den Elektroden zirkulieren. Dazu sind zwei Pumpen erforderlich. Das aktive Material der negativen Elektroden ist im entladenen Zustand als Zinkbromid (ZnBr_2) gelöst und befindet sich dann zum Teil in dem auf der linken Seite in Bild 6.8-1 erkennbaren Tank. Als Elektrodenmaterial dient Polyäthylen, das durch Einarbeiten von Kohlenstoff eine Leitfähigkeit von etwa 1 S/cm erreicht. Die Elektroden werden bipolar ausgeführt, d.h. auf einer Seite fungieren sie als Anode und auf der andern als Kathode. Der Einsatz von Brom schließt jegliche Verwendung von Metallelektroden aus; sogar Titanium würde korrodieren. Die Reaktionsfläche wird vergrößert, indem an der positiven Seite der Elektrode eine großflächige Karbonschicht aufgetragen wird.

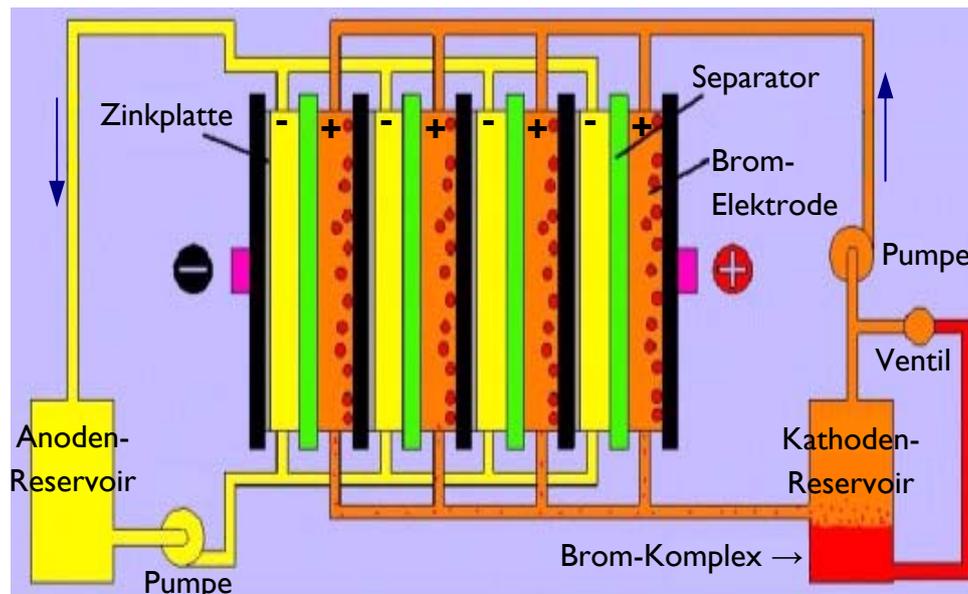


Bild 6.8-1: Elektrolytflusssystem in der Zn-Br-Batterie (<http://www.zbbenergy.com/technology.htm>)

Der Zink-Brom-Akkumulator ermöglicht mit einem Elektroauto Reichweiten von 150 bis 200 km. Probleme gibt es beim Zn-Br-System hinsichtlich des komplexen Aufbaus und der Aggressivität des Halogens. Auch die Leistungsdichte und die Zyklenlebensdauer sind nicht besonders hoch. Während eines Autorennens im Frühjahr 1992 in *Phoenix (Arizona, USA)* kam zu einem Unfall mit einem elektrifizierten *Opel Kadett*, bei welchem ein Zink-Brom-Akkumulator eingebaut war. Seitdem ist die Akzeptanz dieses Systems gesunken.

Lade- und Entladevorgang:

Während des **Ladevorgangs** wird Zink an der negativen Elektrode abgeschieden, während Brom als flüssiger Komplex mit Bromid- und Ammoniumionen gebunden und in einem Reservoir in Form eines Sumpfes gespeichert wird. Beim **Entladen** entstehen Zink- und Brom-Ionen an den jeweiligen Elektroden. Der Brom-Komplex wird durch ein automatisch betätigtes Ventil dem Elektrolyten wieder dosiert zugeführt und mit diesem durch das Zellenpaket gepumpt. Das Brom wird an der Anode elektrochemisch zu Bromid entladen. An der Kathode wird gleichzeitig der Zinkfilm abgebaut. Der mikroporöse Separator zwischen den Elektrodenoberflächen verhindert, dass Brom zur Zinklage gelangt. Dadurch wird die direkte chemische Reaktion gemindert und folglich auch die Selbstentladung der Zelle. Der Umlauf des Elektrolyten reduziert gleichzeitig die Bildung von Zinkdendriten und vereinfacht das thermische Management der Batterie. Die Ladung und Entladung von Zink-Brom-Akkumulatoren erfolgt bei Stromdichten von 15 bis 30 mA/cm². Die Ladungsmenge hängt vom Zinkgehalt ab, bei dem der Ladungszustand als 100% definiert ist. Diese Menge ist geringer als die gesamte im Elektrolyt aufgelöste Menge an Zink-Ionen.

6.9 Der Lithium-Polymer-Akkumulator

Der Aufbau der Lithium-Polymer-Akkumulatoren ist bis auf den Elektrolyten identisch mit dem Aufbau der Lithium-Ionen-Batterie. Der Elektrolyt dieses Systems ist nicht wässrig und deshalb auslaufsicher. Der flüssige Reaktionsstoff wurde durch ein gelartiges Polymerelektrolyt ersetzt. Der Vorteil des festen Elektrolyten ist die Gestaltungsfreiheit bei der Form des Gehäuses.

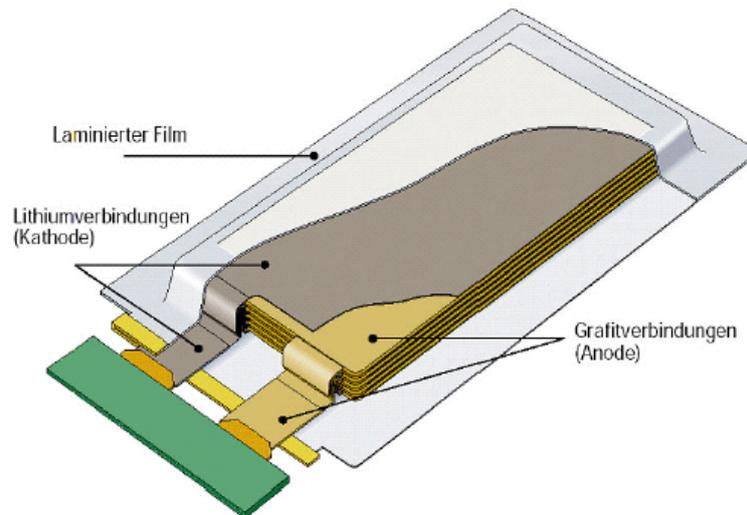


Bild 6.9-1: Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkumulators (<http://www.tecchannel.de/hardware/1191/10.html>)

6.10 Die Zink-Luft-Batterie (ZOXY)

Die Entwicklung der Zink-Luft-Batterie geht zurück auf den amerikanischen Erfinder *Thomas Alva Edison (1847 - 1931)*. Die Batterie besteht aus einer positiven Elektrode aus porösem Kohlenstoff, einer negativen Elektrode aus Zink und einem Elektrolyten aus Kaliumlauge (KOH). Die Betriebstemperatur liegt bei 60 °C. An die positive Elektrode gelangt Luft, Luftsauerstoff wird reduziert. Das bedeutet, dass das aktive Material nicht in der Elektrode enthalten ist, sondern es wird bei Bedarf der Atmosphäre entnommen. Aufgeladen wird die Batterie mechanisch, indem das in Kassetten untergebrachte Zink ausgetauscht wird. Das Zink wird in entsprechenden Anlagen wieder aufbereitet und zu neuen Elektroden verarbeitet. Die spezifische Energie der Zink-Luft-Batterie beträgt 120 bis 160 Wh/kg, die Leistungsdichte 50 W/kg. Ein VW CitySTROMer wurde mit einem solchem System ausgestattet. Die Batterie bestand aus 179 Zellen mit einem gesamten Energieinhalt von 45 kWh. Die Masse betrug 358 kg.

6.11 Lithium-Eisen Phosphat (LiFePO₄)

Dies ist eine der aktuellsten Implementierungen von Lithium Ionen Batterien. Lithium Eisen Phosphat welches durch Nanopartikel modifiziert wurde, wird als Kathodenmaterial verwendet. Hierdurch wird eine höhere Cellstabilität, sowohl gegen Temperatureinflüsse als auch Chemisch, erreicht. Weitere Vorteile sind die gestiegene Zyklenzahl, die Erhöhung der Ladeströme und die Eliminierung des Explosionsrisikos. Außerdem ist es nicht mehr zwingend erforderlich einzelne Zellen beim Laden zu überwachen. Durch die Überwachung kann aber die Lebensdauer erhöht werden. Nachteilig an dieser Implementierung ist die gegenüber anderen Lithium Batterien etwas kleinere Energiedichte, welche teilweise durch die etwas kleinere Spannung von 3,0 - 3,3 V hervorgerufen wird.

6.12 Vergleich der Akkumulatoren

Traktionsbatterien werden nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Energieinhalt
- Leistung
- Volumen
- Masse
- Schnellladefähigkeit
- Lebensdauer

- Wartungsfreiheit
- Sicherheit
- Verfügbarkeit
- Serienreife
- Preis bzw. Kosten
- Umweltverträglichkeit und Recyclingfähigkeit.

Bei Elektrofahrzeugen ist hauptsächlich die Energiedichte wegen der erzielbaren Reichweite, bei Hybridfahrzeugen besonders die Leistungsdichte wegen der raschen Lade- und Entladevorgänge zufolge der Kooperation des elektrischen Antriebssystems mit der Verbrennungskraftmaschine von größerer Bedeutung. Die Werte der Energie- und Leistungsdichte eines Energiespeichers werden im *Ragone*-Diagramm visualisiert (Bild 6.12-1). Mit diesem Diagramm können auch die Reichweiten bei den jeweiligen Geschwindigkeiten graphisch dargestellt werden (Bild 6.12-2)

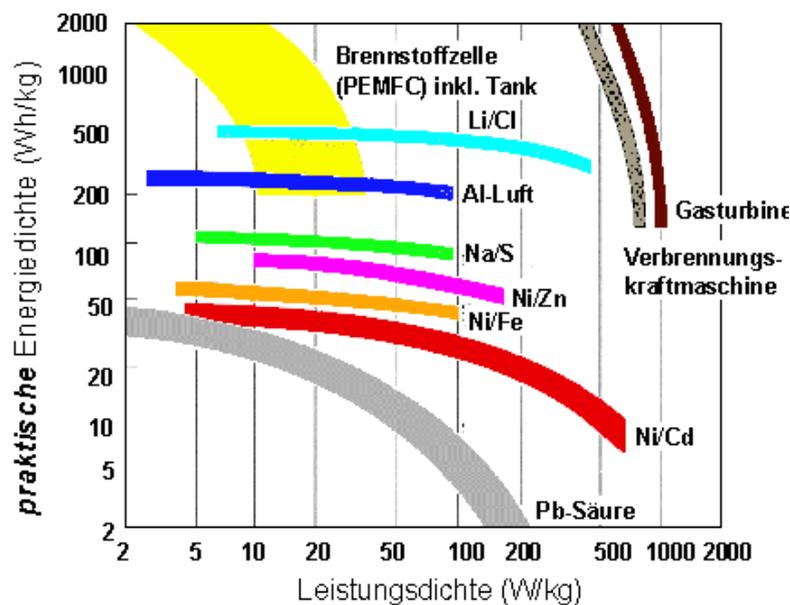


Bild 6.12-1: *Ragone*-Diagramm wichtiger Energiespeicher im Vergleich mit thermischen Antrieben und PEM-Brennstoffzellen (<http://www.iwe.uni-karlsruhe.de/plainhtml/lehre/bb/v8/sld014.htm>)

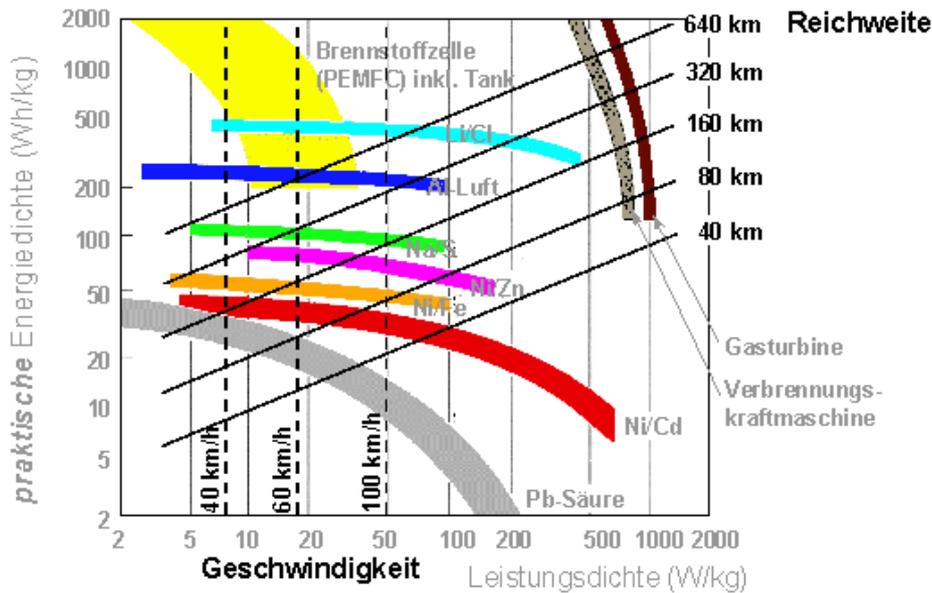


Bild 6.12-2: Reichweiten und Geschwindigkeiten von Elektrofahrzeugen (<http://www.iwe.uni-karlsruhe.de/plainhtml/lehre/bb/v8/sld015.htm>)

Aus den Tabellen 6.12-1 bis 6.12.4 unterschiedlicher Autoren geht die Lithium-Ionen-Batterie als aussichtsreichstes System hinsichtlich hoher Energie- und Leistungsdichte hervor. Nachteilig aber sind die bis dato zu geringe Lebensdauer, die aufwendige Herstellung und die damit verbundenen hohen Kosten. Auch hinsichtlich der Betriebssicherheit besteht noch Entwicklungsbedarf. Auch der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator zeigt gute Werte bei Energie- und Leistungsdichte und wird deshalb z. Zt. hauptsächlich in Hybridfahrzeugen eingesetzt (Bild 6.12-3).

Systembezeichnung		Blei	Ni-Cd	Ni-MH	Na-NiCl	Li-Ion	Li-Poly	LiFePO ₄	Zn-Luft	Zielwerte
Energiedichte	Wh/kg	30 - 35	45 - 50	60 - 70	90 - 100	90 - 140	110 - 130	90 - 110	100 - 220	100 - 200
Leistungsdichte	W/kg	200 - 300	80 - 175	200 - 300	160	300 - 600	ca. 300	> 3000	ca. 100	75 - 200
Lebensdauer	Jahre	2 - 3	3 - 10	10	5 - 10	< 5	k.A.*)	k.A.	k.A.	10
	Zyklen	300 - 400	> 2000	> 1000	1000	500 - 750	< 600	k.A.	k.A.	1000
Kosten	€/kWh	100 - 150	< 600	300 - 350	< 300	300 - 600	300	k.A.	60	100 - 150

*) keine gesicherten Angaben

Tabelle 6.12-1: Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten verschiedener Batteriesysteme (Baumann, W./ Muth, A.: Batterien. Daten und Fakten zum Umweltschutz. Berlin u.a. 1996. Springer-Verlag.)

Systembezeichnung			Blei	Ni-Cd	Na-S	Na-NiCl	Zn-Br
Ruhe spannung /Zelle	V		1,93	1,24	2,08	2,59	1,79
Energiedichte gravimetrisch	theor.	Wh/kg	161	210	795	k.A.	430
	prakt.	Wh/kg	50	50	110	90	75
Energiedichte volumetrisch	theor.	Wh/dm ³	690	700	1.200	k.A.	1.600
	prakt.	Wh/dm ³	100	110	130	110	85
Leistungsdichte praktisch	grav.	W/kg	220	260	250	110	110
	vol.	W/dm ³	240	360	140	130	130
Wirkungsgrad	%		< 80	65	90	90	75
Lebensdauer (80% Entladung)	Kalendarisch	Jahre	5 - 15	10 - 20	3 - 8	2 - 4	1 - 2
	Zyklen		2000	3000	1500	1500	1500
Tiefentladbarkeit			schlecht	sehr gut	sehr gut	sehr gut	k.A.
Arbeitstemperatur	°C		20	20	300	300	20

Tabelle 6.12-2: Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten ausgewählter Batteriesysteme (Hartkopf, T. (2001): Skript zur Vorlesung: Rationelle Energieverwendung. Institut für El. Energiesysteme, Fachgebiet Regenerative Energien, TU Darmstadt)

Akkumulatoren mit hoher Leistungsdichte (für Hybridfahrzeug)						
		Pb/PbO ₂	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion	
Energiedichte	Wh/kg	32	35	40	70	
Energiedichte	Wh/dm ³	68	100	100	150	
Leistungsdichte	W/kg	430	700	1.200	2.000	
Leistungsdichte	W/dm ³	910	2000	3000	4200	

Tabelle 6.12-3: Vergleich verschiedener Batteriesysteme für den Einsatz in Hybridfahrzeugen (Naunin, D. [Hrsg.]: Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven. DGES-Tagung 29./30. April 1999. Karlsruhe)

Akkumulatoren mit hoher Energiedichte (für Elektrofahrzeuge)						
		Pb/Pb	Ni-Cd	Ni-MH	Na/NiCl ₂	Li-Ion
Energiedichte	Wh/kg	35	50	70	120	100
Energiedichte	Wh/dm ³	90	150	200	190	250
Leistungsdichte	W/kg	200	200	140	180	200
Leistungsdichte	W/dm ³	510	600	400	270	500

Tabelle 6.12-4: Vergleich verschiedener Batteriesysteme für den Einsatz in Elektrofahrzeugen (Naunin, D. [Hrsg.]: Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven. DGES-Tagung 29./30. April 1999. Karlsruhe)

Allerdings ist eine kostengünstige Verfügbarkeit des Rohstoffs Nickel ein Problem. Der Preis dieser Ressource stieg auf dem Metallmarkt. Eine ältere Schätzung der Verfügbarkeit der verwendeten Rohstoffe bei konstant angenommenem Bedarf (1994) zeigt Tabelle 6.12-5.

Rohstoff	Blei	Nickel	Lithium	Zink	Natrium
Verfügbarkeit [Jahre]	40	110	400	40	6.000

Tabelle 6.12-5: Verfügbarkeit einiger in Akkumulatoren eingesetzter Rohstoffe (Naunin, D. [Hrsg.]: Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven. DGES-Tagung 29./30. April 1999. Karlsruhe)

Die in der Tabelle angegebene Verfügbarkeit errechnet sich folgendermaßen:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Vorräte}}{\text{Jahresverbrauch 1994}} \tag{6.12-1}$$

Hier wird ersichtlich, dass das Bleisystem an seine Grenzen gelangt, das aber am besten bekannt und am weitesten entwickelt ist; andere Batteriesysteme stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung. Mit 43% (2004) dominiert der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator den prozentualen Anteil der verwendeten Akkumulatoren in Hybridfahrzeugen.

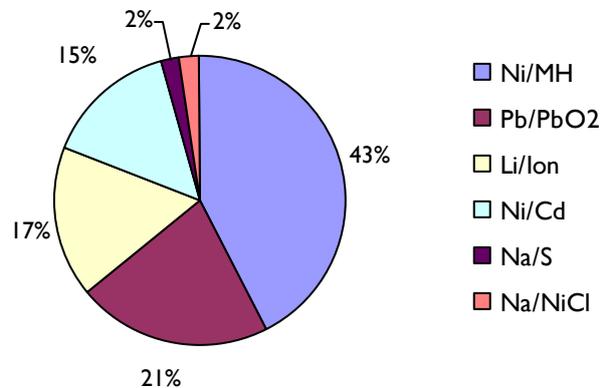


Bild 6.12-3: In Hybridfahrzeugen eingesetzte Batterie-Systeme (Stand 2004)

7. Elektrochemische Kondensatoren

Während Batterien elektrische Ladung speichern, indem chemische Energie an den Elektroden gespeichert wird, wird in Kondensatoren die elektrische Energie zwischen einer positiv und einer negativ geladenen Elektrode mit einem dazwischen befindlichem Dielektrikum gespeichert. Die an den Kondensatorelektroden angelegte Spannung U ist der auf den Elektroden angesammelten positiven und negativen Ladung $+Q$ und $-Q$ über die **Kapazität** C des Kondensators direkt proportional.

$$Q = C \cdot U \quad (7-1)$$

Diese Kapazität C (in Farad: $1 \text{ F} = 1 \text{ As/V}$) ist nicht mit der Kapazität C der Akkumulatoren zu verwechseln (in Ah). Das **elektrische Feld** E bzw. **elektrische Flussdichte** $D = \varepsilon E$ ("dielektrische Verschiebung") in einem idealisierten Plattenkondensator (Bild 7-1) bestimmen die Potentialdifferenz U zwischen den Elektroden (Elektrodenabstand d) bzw. die Ladung Q auf den Elektroden (Elektrodenoberfläche A):

$$U = E \cdot d \quad Q = D \cdot A \quad (7-2)$$

Daraus ergibt sich die Kapazität des Plattenkondensators C :

$$C = Q/U = D \cdot A / (E \cdot d) = \varepsilon \cdot A / d \quad (7-3)$$

Große Permittivitäten ε des Dielektrikums (Material zwischen den Elektroden), große Elektrodenoberflächen und geringe Elektrodenabstände bewirken große Kapazitäten. Das Dielektrikum besteht aus Molekülen, deren positive Ladungsschwerpunkte (Atomkern) und negativen Ladungsschwerpunkte (Elektronenhülle) auf Grund der Molekülstruktur nicht zusammenfallen (polare Moleküle). Sie erfahren daher im äußeren E -Feld eine resultierende elektrostatische Kraft, die sie in Richtung des E -Felds auszurichten versucht. Die Permittivität beschreibt die Verstärkung des elektrischen Feldes im Dielektrikum durch die im E -Feld ausgerichteten polaren Moleküle des Dielektrikums, die ihre Eigenfeld P (dielektrische Polarisierung) dem E -Feld zum resultierenden Feld D überlagern, das die Ansammlung der Ladung Q auf den Elektroden bestimmt.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (7-4)$$

Im homogenen isotropen Dielektrikum ist ε eine reine Zahl (Skalar). Die **Energiedichte** w (= Energie je Volumeneinheit) im elektrischen Feldpaar D, E ist dann

$$w = \int_0^E \vec{D} \cdot d\vec{E} = \frac{D \cdot E}{2} = \frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon} \quad (7-5)$$

Die in einem **Kondensator** (Plattenabstand d zwischen Plus- und Minusplatte, Plattenfläche A) (Bild 7-1) gespeicherte elektrische Energie W ist das Produkt "Volumen x Energiedichte":

$$W = (A \cdot d) \cdot \frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} \quad (7-6)$$

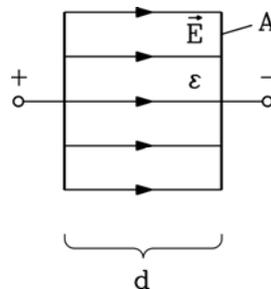


Bild 7-1: Gespeicherte elektrische Energie im idealisierten Plattenkondensator (Aussenfeld vernachlässigt, Innenfeld homogen angenommen)

Mit (7-1), (7-2) wird die gespeicherte Energie durch die Kapazität und die Spannung ausgedrückt.

$$W = C \cdot U^2 / 2 \quad (7-7)$$

Wird der Kondensator über einen Widerstand R entladen, so fließt im ersten Moment der Strom $\hat{i} = U/R$, und es entsteht im Widerstand die Augenblicksleistung $\hat{p} = U^2/R$. Die gespeicherte Energie W wird in die thermische Leistung $p(t)$ im Widerstand umgesetzt, in dem Ladungen von den Platten abfließen. Dadurch sinken die Spannung am Kondensator $u(t)$ und der Entladestrom $i(t) = dQ/dt$ exponentiell mit der Zeitkonstante $T = R \cdot C$.

$$i(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-t/T} \quad u(t) = U \cdot e^{-t/T} \quad (7-8)$$

Es werden zwei Kondensatortypen unterschieden:

- a) physikalische Kondensatoren
- b) elektrochemische Kondensatoren.

a) **Physikalische Kondensatoren** basieren auf der eben beschriebenen elektrischen Flussdichte D und dem elektrischen Feld E zwischen den elektronischen Ladungsmengen Q , die durch ein Dielektrikum getrennt sind. Bei der Ladung bzw. Entladung kommt es nur zur Verschiebung von Leitungselektronen in den metallischen Elektroden, während im Dielektrikum nur die Ausrichtung der polaren Moleküle erfolgt, aber keine Masse bewegt wird (dielektrische Polarisation, nicht zu verwechseln mit der

elektrochemischen Polarisation der Akkumulatorelektroden (siehe Abschnitt 6)). Entscheidend für die Speichermöglichkeit der Energie ist die Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums. Bei hoher Permittivität sind zwar D und Q hoch, aber E klein (7-4), so dass die Spannung U ausreichend klein ist und eventuelle Überschlüge zwischen den Kondensatorplatten nicht befürchtet werden müssen.

Material	ϵ_r
Vakuum	1
Polyäthylen	2,2 – 2,4
Aluminiumoxid	9,3 – 11,5
Tantaloxid	27,6
Wasser	80

Tabelle 7-1: Relative Dielektrizitätskonstanten (Permittivitäten) verschiedener Stoffe (Dielektrika) (Clausert, H./ Wiesemann, G.: Grundgebiete der Elektrotechnik 1. Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder. 6. verb. Aufl., München 1993. Oldenbourg Verlag GmbH.)

Die spezifische Kapazität je cm^2 Elektrodenfläche liegt bei physikalischen Kondensatoren in einer Größenordnung von einigen 100 pF/cm^2 , und ist damit relativ gering. Jedoch sind relativ hohe Spannungswerte U bis zu 400 V möglich.

b) Elektrochemische Kondensatoren:

Das Kondensatorprinzip kann auch mit elektrochemischen Elektroden aufgebaut werden. Dieses Ladungstrennungssystem basiert auf dem von *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 - 1894)* bereits 1856 beschriebenen Effekt. Es handelt sich dabei um die Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht beim Anlegen einer Spannung an eine in leitende Flüssigkeit getauchte Elektrode, wie sie in Abschnitt 6 bei der Entstehung der Galvani-Elemente beschrieben wurde. Diese Doppelschicht zeichnet sich durch eine Reihenschaltung von einer elektronisch (z. B. Metallelektrode) und einer ionisch leitenden Elektrode (z. B. Elektrolyt) aus (vgl. Abschnitt 6). Im Gleichgewicht kommt es an der Grenzfläche (am Phasenübergang) zwischen beiden aufgrund der Angleichung der *Fermi*-Energieniveaus beider Phasen zu einem Ladungsübergang von einer Phase auf die andere („Partialdruckausgleich“ – Diffusionsgesetz und rückstellende elektrostatische Kraft). Die Konsequenz ist eine Anhäufung von Ladungen an der Phasengrenze in der **elektrochemischen Doppelschicht**, die damit einen Kondensator bildet, der einen sehr geringen „Elektrodenabstand“ d aufweist. Dadurch ergeben sich zwar sehr kleine Spannungen U , aber sehr hohe Kapazitäten C . Bei diesen Doppelschichtkondensator liegt der Abstand d der Ladungstrennung in der Größenordnung des Ionenradius ($\sim 10 \text{ \AA}$ bzw. 1 nm). Je nach physikalischem Wirkprinzip, eingesetzten Materialien oder speicherbarer Energiemenge werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet (Tabelle 7-2, nach *B. Conway*).

Wirkprinzip	Material	Energiequantität
Doppelschichtspeicherung: <i>Doppelschichtkondensator (DSK), electrical double layer capacitor (EDLC)</i>	Kohlenstoff: <i>Kohlenstoff-Kondensator</i>	<i>UltraCap</i>
Faraday-Speicherung: <i>Faraday-Kondensator, Redox-Kondensator</i>	Ruthenium: <i>Ruthenium-Kondensator</i>	<i>SuperCap</i>
	Leitfähige Polymere: <i>Polymer-Kondensator</i>	

Tabelle 7-2: Namensgebung elektrochemischer Kondensatoren nach *B. Conway* (VDI-Gesellschaft Energietechnik: Energietechnik für elektrische Netze. Tagung Gelsenkirchen, 10./11. November 1998. VDI-Berichte 1404. Düsseldorf 1998. VDI-Verlag.)

Die einzelnen Kondensatortypen von Tab. 7-2 werden in den folgenden Kapitelabschnitten erläutert.

7.1 UltraCaps



Bild 7.1-1: Aufbau eines UltraCapacitors (http://www.epcos.com/inf/20/35/ds/ultracap_2005.pdf)

UltraCaps sind Speichersysteme, die hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte die Lücke zwischen herkömmlichen Kondensatoren und Batterien schließen.

		Physikalische Kondensatoren („konventionelle“ Kondensatoren)	UltraCaps	Batterien
Leistungsdichte	W/kg	> 10000	5000	300
Energiedichte	Wh/kg	0.1	4	40

Tabelle 7.1-1: Vergleich der typischen Werte für die Leistungs- und Energiedichte der drei Energiespeichersysteme „physik. Kondensatoren“, Ultracaps, Akkumulatoren (Batterien) (http://www.epcos.com/inf/20/35/ds/ultracap_2005.pdf)

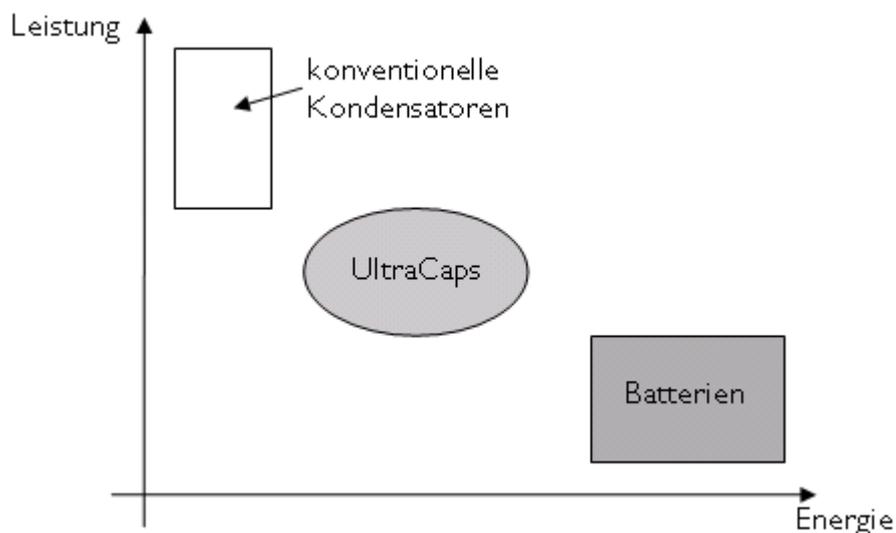


Bild 7.1-2: Ragone-Diagramm der drei verschiedenen Energiespeichersysteme „physik. (= konventionelle) Kondensatoren“, Ultracaps, Akkumulatoren (Batterien) (VDI-Gesellschaft Energietechnik: Energietechnik für elektrische Netze. Tagung Gelsenkirchen, 10./11. November 1998. VDI-Berichte 1404. Düsseldorf 1998. VDI-Verlag.)

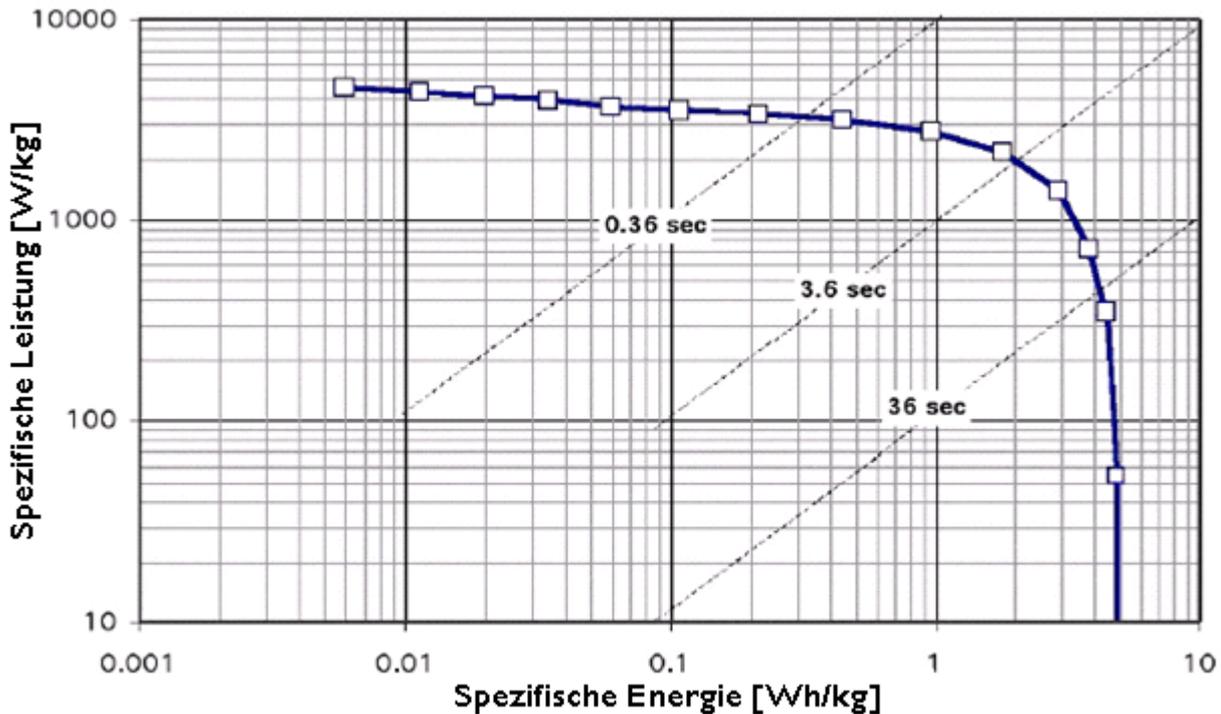


Bild 7.1-3: Ragone-Diagramm eines typischen Doppelschichtkondensators mit organischen Elektrolyten (Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik: Kötz, R.: Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. http://ecl.web.psi.ch/Publications/cap_pub/ISET2002.pdf)

Die Aussagekraft dieser Maximalwerte ist beim praktischen Einsatz von geringerer Bedeutung. Der Grund dafür ist, dass die maximale Energie nur bei geringer Leistung zur Verfügung steht und die maximale Leistung nur für sehr kurze Zeit entnommen werden kann (Ragone-Diagramm Bild 7.1-3). Für dessen Erstellung wurde ein Doppelschichtkondensator mit organischem Elektrolyten und einer Kapazität von 1800 Farad verwendet. Unter Annahme einer linearen Annäherung wurden mittels Impedanzmessungen die Daten berechnet. Der Arbeitsbereich des Kondensators liegt bei einer Zeitkonstante $T = RC$ von etwa 4 Sekunden; hier kann annähernd die halbe Nennenergie mit der halben Nennleistung genutzt werden.

Die Doppelschichtkondensatoren erreichen Kapazitätswerte von 5 bis 5000 Farad, die Spannungswerte liegen bei etwa 2.5 V. Mit einer Zyklenzahl von bis zu 500 000 sind diese Kondensatoren verglichen mit den Batterien weitestgehend alterungsunempfindlich.

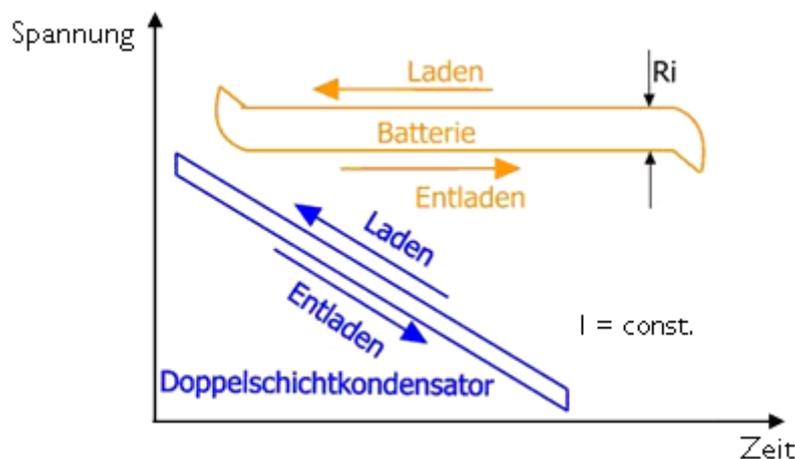


Bild 7.1-4: Vergleich der Lade- und Entladekurven von Doppelschichtkondensator und Batterie (<http://www.udomi.de/fuelcell/ultracap-basics.html>)

In UltraCaps ist das verwendete Elektrodenmaterial Aktivkohle. Als Elektrolyt werden vorwiegend organische Elektrolyte auf der Basis von quaternären Salzen wie Tetraethylammoniumborofluorid (TEABF) und Acetonitril oder Propylenkarbonat als Lösungsmittel eingesetzt. Organische Elektrolyte erlauben eine Zellspannung von etwa 2.5 V. Höhere Spannungen können für kurze Zeiten angelegt werden, reduzieren aber die Lebensdauer des Kondensators. Die relativ geringe spezifische Leitfähigkeit organischer Elektrolyte von etwa 20 mS/cm ist allerdings ein Nachteil („hoher Innenwiderstand R_i “), der die Leistungsdichte des UltraCaps ($\sim U^2 / (R_i + R)$) reduziert. Wässrige Elektrolyte wie Kalilauge (KOH) oder H_2SO_4 werden nur in wenigen Kondensatoren eingesetzt. Obwohl Zellen mit wässrigen Elektrolyten nur eine Nennspannung von maximal 1.2 V aufweisen, erlaubt die höhere Leitfähigkeit des Elektrolyten von etwa 1 S/cm einen deutlich kleineren Innenwiderstand und damit höhere Leistungen. UltraCaps haben aufgrund der hohen Porosität des Kohlenstoffs eine Oberfläche von bis zu 2000 m²/g (je Gramm Kohlenstoff). Es können etwas 20 bis 40 $\mu F/cm^2$ gespeichert werden. Bei diesen Kondensatoren hängt die Ladungstrennung ja nicht vom Plattenabstand, sondern vom Durchmesser der Ionen ab. Die folgende Abbildung veranschaulicht das Zusammenspiel zwischen der Porosität der Kohle-Elektrode und der Ionengröße.

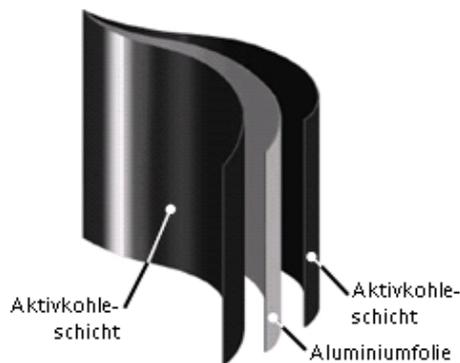


Bild 7.1-5: Aufbau einer Elektrode eines Ultracaps (http://www.epcos.com/inf/20/35/ds/ultracap_2005.pdf)

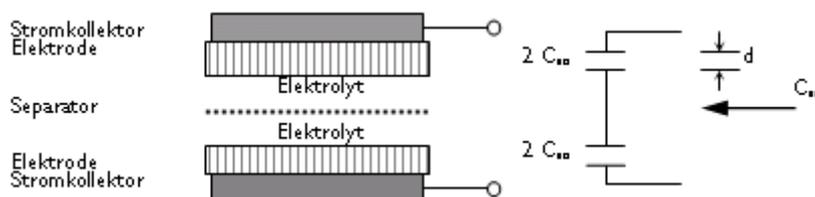


Bild 7.1-6: Schematischer Aufbau eines UltraCaps und elektrisches Ersatzschaltbild (Miller, J. M.: Propulsion systems for hybrid vehicles. London 2004.)

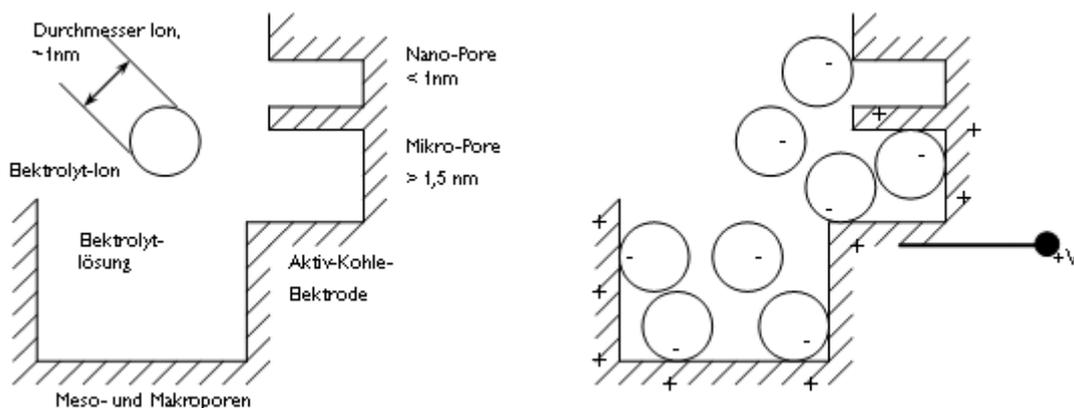


Bild 7.1-7: Schematische Skizze eines Doppelschichtkondensators (Miller, J. M.: Propulsion systems for hybrid vehicles. London 2004.)

Poren, deren Größe im Nano-Bereich liegt, können nicht von Ionen besetzt werden. Wenn die Poren ausschließlich in dieser Größenordnung liegen, tritt der für Doppelschicht-kondensatoren typische Effekt weder für wässrige noch für organische Elektrolyte ein. Die Zahl der Ladungsträger kann nicht beliebig erhöht werden, da es mit steigender gespeicherter Ladung zu einer Erhöhung der Spannung kommt. Wird die Spannung und damit die Energie der Elektronen so hoch, dass sie die Phasengrenze durchschreiten können, so kommt es in der Regel zur Zersetzung des Elektrolyten. Dies ist identisch mit dem elektrischen „Durchbruch“ des konventionellen Kondensators. In der Elektrochemie werden diese Reaktionen, die mit solchem Ladungsdurchgang durch die Doppelschicht verbunden sind, *Faraday*-Reaktionen genannt. Die Spannung und die Ladungsträgerzahl in der Doppelschicht sollten so niedrig gehalten werden, dass keine *Faraday*-Reaktion auftritt. Die Ladungsspeicherung in der Doppelschicht erfolgt also nicht-*faradayisch* und nur auf elektrostatischer Basis. Die Durchbruchspannung ist demnach durch die Zersetzungsspannung des Elektrolyten festgelegt. Diese ist abhängig vom Material und der Temperatur und beträgt für wässrige Elektrolyte etwa 1.5 bis 2 V. Damit liegt die Obergrenze der Arbeitsspannung von Doppelschichtkondensatoren bei maximal 1.5 V. Für organische Elektrolyte ist die Elektrolytzersetzungsspannung höher und liegt bei etwa 3 bis 4 V. Da die Leitfähigkeit der organischen wesentlich geringer als die der wässrigen Elektrolyte ist, wird man überall dort, wo relativ hohe Energien, aber nicht extrem hohe Leistungen gefordert werden, organischen Elektrolyten bevorzugen. In Elektro- und Hybridfahrzeugen werden Ultrakondensatoren für die Abdeckung von Spitzenleistungen und zusätzlich für die Rückspeicherung von Bremsenergie eingesetzt. Hierbei sind Energiedichten von 5 Wh/kg erforderlich. Da gemäß Tabelle 7.1-1 die Leistungsdichte der Batterien begrenzt ist, ist vor allem bei kurzzeitigen Beschleunigen und Bremsen in Hybridfahrzeugen eine Kombination der Batterie mit einem elektrochemischen Kondensator sinnvoll (Bild 7.1-8). Auch bei reinen E-Fahrzeugen kann diese Kombination zur Schonung der Batterie eingesetzt werden. Die Daten von Bild 7.1-8 wurden mit einem Elektrofahrzeug im Stadtbetrieb aufgezeichnet, jeweils einmal ohne und mit UltraCap. Der Kondensator wurde parallel zur Batterie geschaltet. Es ist ein deutlicher Unterschied der Batterieleistungen in den beiden Fällen zu verzeichnen. Während ohne UltraCap die Batterie den Leistungsspitzen ausgesetzt ist, bleibt mit UltraCap die Leistung relativ konstant. Die Leistungsspitzen werden hier vom Kondensator aufgefangen.

Die Aufnahme der Spitzenlasten durch einen UltraCap hilft die Batterie zu schonen. Zum Beispiel unterliegen Bleibatterien, die den hohen Leistungsspitzen des Stadtverkehrs ausgesetzt sind, einer schnelleren Alterung. Auch steigert sich bei dieser deutlich die entnehmbare Kapazität bei einer Entladung mit konstantem Strom. Weiter kann sowohl bei Hybrid- als auch bei E-Fahrzeugen der Ultra-Kondensator zur Speicherung der zum Teil sehr hohen Bremsleistungen dienen. Um die maximale Energiemenge in einem UltraCap speichern zu können, muss die angelegte Spannung den maximalen Spannungswert erreichen. UltraCaps mit organischem Elektrolyten sind - wie erwähnt - auf Spannungswerte von 2.7 V begrenzt. Wenn 3 V überschritten werden, beginnt die Zelle zu gasen. Wenn die Spannung über 4 V steigt, dann birst die Zelle nach kurzem Gebrauch.

Wegen der niedrigen Zellspannung müssen viele Zellen in Serie geschaltet werden, um eine ausreichend hohe Betriebsspannung zu erreichen. Weiter werden leistungselektronische DC/DC-Wandler (= getaktete Hochsetzsteller) verwendet, um die niedrigere Betriebsspannung der Ultracaps auf ein höheres DC-Spannungsniveau anzuheben. In einer Serienschaltung von Kondensatoren würde auf Grund geringer Unterschiede von Zelle zu Zelle (der tatsächliche Kapazitätswert kann bis zu 10% unter bzw. 30% über dem Nennwert liegen!) die Spannung über die einzelnen Zellen nicht gleichmäßig aufgeteilt werden. Dies kann zu gravierenden Überspannungen und damit Über-Belastungen einzelner Zellen führen, und folglich zu deren frühzeitigem Ausfall, der in einem Dominoeffekt dann die verbliebenen Zellen zu einer höheren Spannungsbelastung führt, die wiederum zu weiteren Ausfällen und schließlich zum Totalausfall führt. Übliche Techniken zum Zellenspannungsausgleich (gleichmäßige Zellenspannung) sind passive

oder aktive Komponenten bzw. verlustreiche oder verlustlose Entzerrer (equalizer). Diese anfänglichen Schwierigkeiten, bei den in Serie und parallel geschalteten Ultracaps die einzelnen Spannungen zu überwachen und zu symmetrieren, um eine Überlastung zu vermeiden, werden durch die stetige Weiterentwicklung der Ultracaps überwunden. Wegen ihrer hohen Leistungsdichte und der Hoffnung auf Steigerung der Zyklenzahl wird diesem leistungselektronischen Speicher eine große Zukunft vorausgesagt.

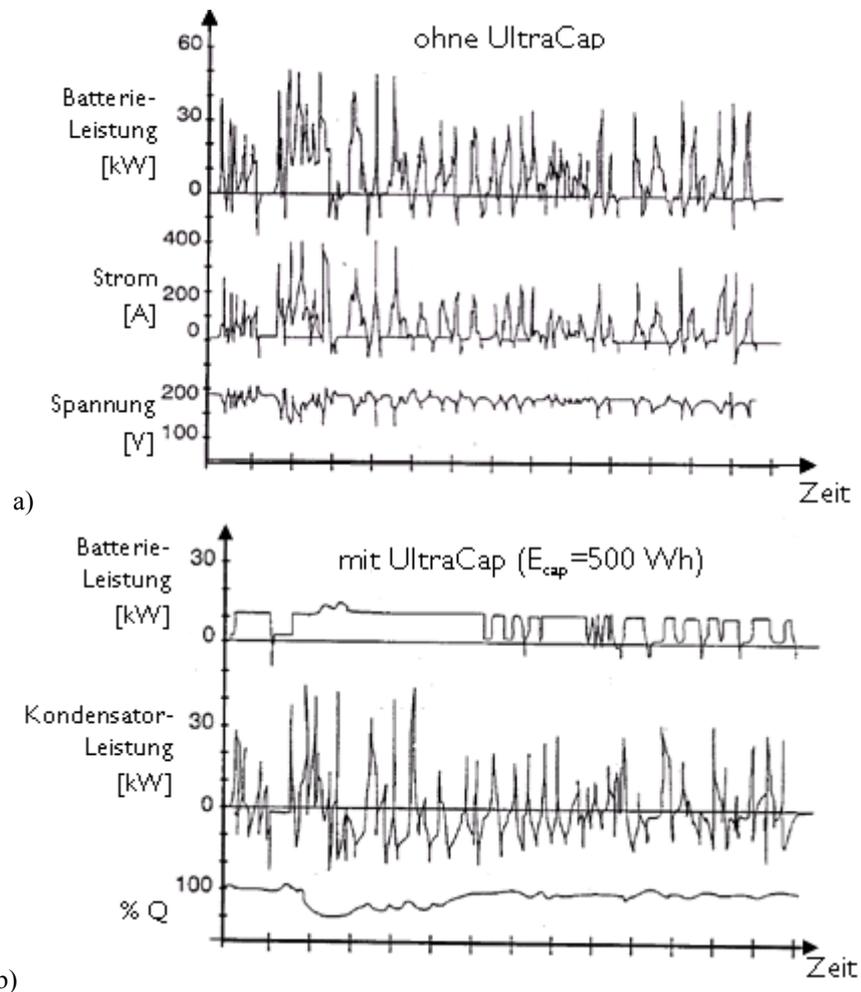


Bild 7.1-8: Fahrzyklus eines batteriebetriebenen E-Fahrzeugs im Stadtverkehr a) ohne, b) mit UltraCap parallel zur Batterie (http://www.nesscap.com/prod/Articles/Univ.%20of%20Alberta.pdf)

7.2 SuperCaps

Nur bei einigen wenigen elektrochemischen Reaktionen wird das elektrische Verhalten des Spannungsabfalls mit der Entladung eines Kondensators beobachtet, obwohl ein Ladungsdurchgang durch die elektrische Doppelschicht stattfand. Bei Ladungsdurchtritt durch die Doppelschicht (*Faraday*-Reaktion) kann es aufgrund von Redoxreaktionen zu gravierenden Strukturänderungen kommen. Redoxreaktionen sind chemische Reaktionen, die aus den Teilreaktionen Oxidation und Reduktion bestehen. Bei den in 7.1 beschriebenen elektrochemischen Reaktionen ist das nicht der Fall.

Das für die *Faraday*-Reaktion eigentümliche elektrische Verhalten der starken Spannungsänderung an den Elektroden bei Ladung/Entladung, das auf die Beibehaltung der Kristallstruktur bei gleichzeitiger

Änderung des Oxidationszustandes zurückzuführen ist, wird im elektrischen Ersatzschaltbild durch eine so genannte „Pseudokapazität“ modelliert.

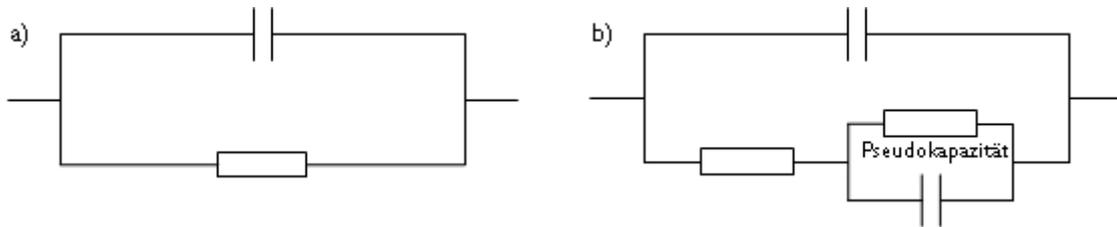


Bild 7.2-1: Ersatzschaltbild elektrochemischer Kondensatorelektroden

a) EDSC-Elektrode; b) Elektrode mit *Faraday*-Reaktion

(Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik: Kötz, R.: Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. http://ecl.web.psi.ch/Publications/cap_pub/ISET2002.pdf)

Insbesondere die so genannten Intercalationsreaktionen zeigen ein *Faraday*-Verhalten.

Es gibt zwei Stoffklassen von größerem praktischem Interesse:

- | | |
|------------------------|---|
| a) Rutheniumoxide | → Protonenintercalation |
| b) Leitfähige Polymere | → Li^+ - und Anionen-Intercalation |

a) Beim Einsatz von **Ruthenium-Materialien** wurden Kapazitätswerte von bis zu 720 F/g (je Gramm Elektrodenmaterial) gemessen. Diese hohe spezifische Kapazität kompensiert die niedrige Zellspannung von 1 V. Der Grund dieses geringen Wertes liegt darin, dass Rutheniumoxid nur mit wässrigem Elektrolyten eingesetzt werden kann. Die Materialkosten von Rutheniumoxid sind sehr hoch. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Kondensatoren aus diesem Material nur für Spezialanwendungen oder kleinere Kondensatoren geeignet. Hier verlieren die Kosten an Bedeutung.

b) Bei den **leitfähigen Polymeren** konzentrieren sich die Entwicklungen hauptsächlich auf die Polyacetylene, Polypyrrole, Polyaniline, Polyphenylene und die Polythiophene. Die erreichten spezifischen Kapazitätswerte sind ähnlich denen der Rutheniumoxide. Es wurde zum Beispiel ein Wert von 400 F/g für Polypyrrole berichtet. Das größte Entwicklungsproblem stellt die während der Betriebszeit über die Lebensdauer permanent abnehmende Kapazität dar. Dieser Effekt wird durch chemische Instabilitäten, wie zum Beispiel Wasserspuren oder Oxidationserscheinungen ausgelöst.

8. Batteriemanagementsystem

In einem Batteriesystem bestimmt das schwächste Modul das gesamte elektrische Betriebsverhalten. Somit ist es notwendig, ein gutes Betriebsverhalten für das schwächste Modul zu gewährleisten. In modernen Batteriesystemen sind Batteriemanagementsysteme (BMS) enthalten, die folgende Ziele verfolgen:

- Erhöhung der Lebensdauer
- Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit
- Bestimmung des jeweiligen Ladezustandes zur Berechnung der Restreichweite in einem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug bzw. zur Information des Energiemanagementsystems der Antriebskomponenten in einem Hybridfahrzeug. Dazu muss das BMS sowohl den Lade- als auch den Entladeprozess beobachten und steuern.

Aufgrund des dezentralen Aufbaus moderner Batteriemanagementsysteme wird die Kommunikation der einzelnen Komponenten über ein Bussystem realisiert. Folgende Anforderungen muss die Batterie erfüllen, damit ein optimales Betriebsverhalten sichergestellt werden kann:

- Zellen- bzw. Modulspannung innerhalb zulässiger Grenzen

- Steuerung des Lade- und Entladeprozess im vorgeschriebenen Rahmen, ggf. mit Ladungsausgleich
- Strombegrenzung als Tiefentladeschutz
- Batterietemperierung im Betriebsbereich
- Temperatenausgleich zwischen allen Modulen.

Die Speicherung von Betriebsdaten zu Diagnosezwecken und zur Regulierung von Gewährleistungsansprüchen ist ein weiterer wichtiger Punkt. Zur Erfüllung dieser Anforderungen stehen dem BMS die folgenden messbaren Größen zur Verfügung:

- Batteriemodul- bzw. Batteriezellenspannungen
- Batteriestrom
- Batterietemperaturen.

Durch die Auswertungen dieser physikalischen Größen und die Erfüllung der Anforderungen durch das BMS soll gewährleistet werden, dass keine Streuungen im Betriebsverhalten der Batteriemodule auftreten und somit das Alterungsverhalten der einzelnen Module einen ähnlichen Verlauf aufweist. So kann z. B. jedem Modul ein Spannungs- und ein Temperatursensor zugeordnet werden (Bild 8-1). Über das BMS werden sämtliche Teilspannungen gemessen und ausgewertet und über einen Vergleich dieser Daten können defekte Module entdeckt werden. Aufgabe des Batteriemagements kann dann entweder eine gezielte Nachbehandlung (z.B. durch Ladungsausgleich) oder eine Aufforderung an den Benutzer bzw. den Servicedienst zum Austausch der detektierten Module sein.

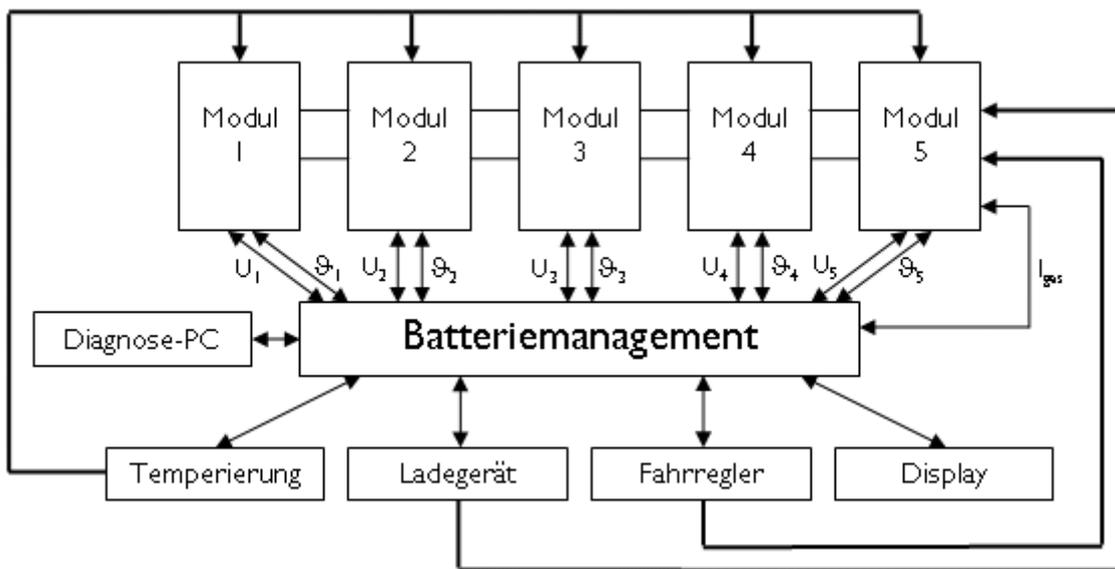


Bild 8-1: Prinzipielle Struktur eines Batteriemagementsystems

Eine Stromüberwachung ist zur Regelung des Ladestromes und zur Erfassung von Kurzschlüssen notwendig. Ein geregeltes Kühlungs- bzw. Heizsystem mit Luft oder Wasser realisiert die Temperierung. Die Stellung des Brems- und „Gaspedals“ wird elektrisch erfasst; beide Pedale sind im Fahrregler zusammengefasst.

Überladungen und Tiefentladungen können die Batterie schädigen bzw. ihre Alterung beschleunigen. Durch das BMS sollen diese Betriebszustände verhindert werden. Im Rahmen der Batteriealterung verändern sich die Parameter jedes einzelnen Moduls. Zum Beispiel kann der Innenwiderstand ansteigen und die entnehmbare Kapazität geringer werden. Bilden sich unterschiedlich entnehmbare Kapazitäten in den einzelnen Modulen aus, so wird bei unzureichender Überwachung der Traktionsbatterie ständig in schädigenden Bereichen der betroffenen Module gearbeitet. Ein Indikator für beginnende **Tiefentladung** ist ein bestimmtes Spannungsniveau. Bei Bleibatterien liegt dieser Spannungswert bei etwa 1.7 V. Zum

Schutz gegen Tiefentladung begrenzt das Batteriemanagementsystem automatisch den Strom. Folglich kann das Fahrzeug nur noch mit verminderter Leistung weiterbetrieben werden. Nur in Gefahrensituationen kann durch einen „kick-down“ des Fahrpedals die Strombegrenzung aufgehoben werden.

Bei älteren Batteriesystemen kann eine ungleiche Modulkapazität auftreten, welche zur Lebensdauerverlängerung ausgeglichen werden sollte, da sonst Schädigungen auftreten. Dabei liegt das Problem darin, dass z. B. beim Laden einige Module schon die Vollladung überschritten haben - und somit überladen werden und gasen -, während andere noch nicht voll geladen sind. Ein Verfahren zum Ladungsausgleich ist das **Shunting (By-passing)**. Bei diesem Verfahren wird ein Teil der Ladestromes durch ein steuerbares leistungselektronisches Schaltelement an den bereits vollen Modulen vorbeigeführt. Schwächere Module erhalten weiterhin den stärkeren Ladestrom. Mit der Anzahl der Module mit aktivem By-Pass sinkt der Ladewirkungsgrad.

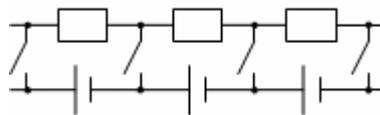


Bild 8-2: Prinzipielle Struktur beim Shunting

Es ist wichtig, Traktionsbatterien in ihrem optimalen Temperaturbereich zu betreiben. Es sollten für alle Module gleiche Betriebszustände und damit gleiche Temperaturbedingungen realisiert werden. Zu beachten ist, dass die Temperatur im Inneren des Batterietrogs höher ist als am Rand. Unterschiedliche Temperaturen bringen unterschiedlich schnelle elektrochemische Reaktionen mit sich und damit auch unterschiedliches Langzeitverhalten. Bei Überschreiten des zulässigen Temperaturbereichs kann es zu bleibenden Schäden kommen. Folglich ist eine Aufgabe des Batteriemanagementsystems das Eingreifen in den Lade- bzw. Entladeprozess, falls der zulässige Temperaturbereich überschritten wird und keine Klimatisierung vorhanden ist. Zur Angleichung der Temperatur der einzelnen Module kann entweder eine Luft- oder eine Wasserkühlung eingesetzt werden. Die Temperaturdifferenz zwischen dem wärmsten und kältesten Modul kann bei guten Kühlbedingungen unter $\Delta\theta = 5 \text{ K}$ gehalten werden. Aufgrund dieser geringeren Temperaturdifferenz werden weniger Temperaturfühler benötigt, um die wärmste und die kälteste Stelle der Batterie zu bestimmen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Batterie bei guten Kühlungsbedingungen leichter in dem zulässigen Temperaturbereich betrieben werden kann.

- a) Luftkühlung: Bei der Kühlung mit Luft wird ein Fremdlüfter benötigt. Parallele Luftwege durch das Batteriesystem müssen auf Grund unterschiedlicher Luftspalte und Strömungsquerschnitte optimiert werden.
- b) Wasserkühlung: Eine Wasserkühlung wird über Wassertaschen bzw. doppelwandige Module, die durch Schläuche zu einem Wasserkreislauf verbunden werden, realisiert. Die Wasserpumpe wälzt mit geringer Leistung das Wasser um. Die Strömungsquerschnitte sind deutlich kleiner als bei a).

Damit man

- a) die Restreichweite eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs bzw.
- b) die verfügbare Energie zur Beschleunigung und die mögliche Aufnahme von rekuperativer Bremsenergie eines Hybridfahrzeugs

abschätzen kann, ist die Kenntnis der Betriebsdaten der Batterie notwendig. Die Gesamtheit dieser Daten wird „innerer Zustand“ genannt. Erfasst werden dabei Temperatur, Alter, Zyklenzahl, Innenwiderstand und Ladezustand.

Die entnehmbare Kapazität einer Batterie ist nicht nur vom Entladestrom, sondern auch von diesem „inneren Zustand“ abhängig. Durch die nichtlinearen Zusammenhänge der einzelnen Parameter ist die Bestimmung des Ladezustandes sehr komplex (Bild 8-3).

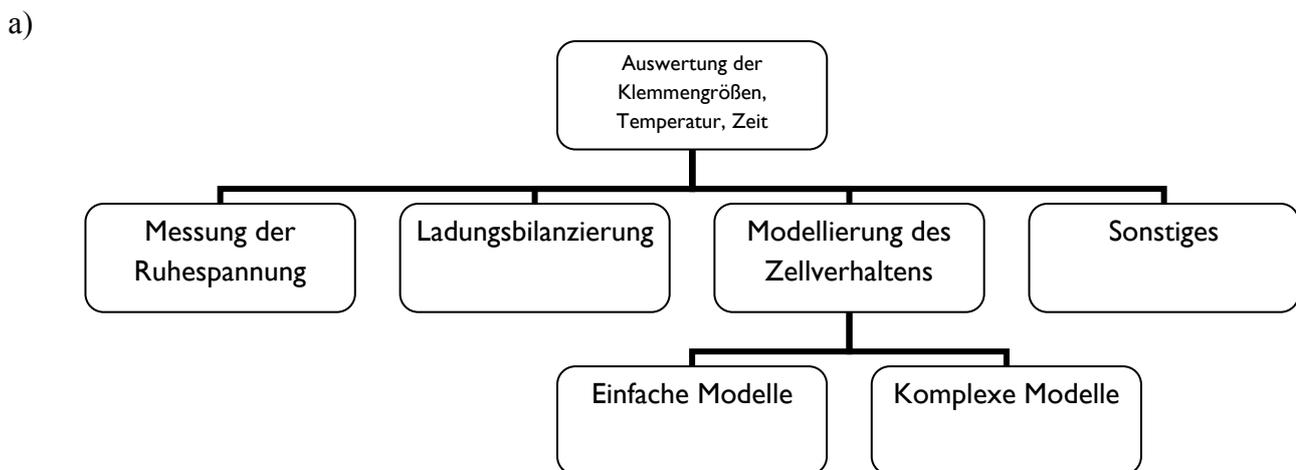
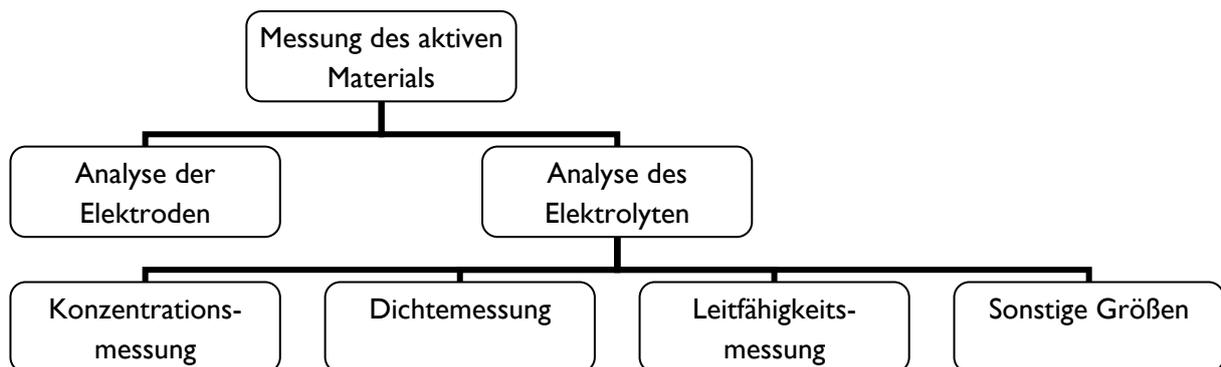
- a) Verfahren zur Messung des chemisch aktiven Materials an den Elektroden zur Ladezustandsbestimmung (Bild 8-3a) sind z. Zt. nur unter großem Aufwand für eine automobilgerechte Serienrealisierung durchführbar.
- b) Deshalb ist die Ladungsbilanzierung (eines der Verfahren von Bild 8-3b) das klassische Verfahren zur Ladezustandsbestimmung im Fahrzeug. Die während des Betriebs entnommene Ladung wird aus dem Klemmenstrom gemessen:

$$Q_{ab} = \int_{t=0}^{t_{ab}} I(t) dt \tag{8-1}$$

Daraus wird der Ladezustand (SOC – „State of Charge“, meist angegeben in % der Kapazität C (=Nennladungsmenge Q_N)) berechnet.

$$SOC = 1 - Q_{ab} / Q_N \tag{8-2}$$

Der Nachteil dieses Verfahrens ist der über die Einsatzdauer nicht konstant bleibende Wert $C = Q_N$. Die Kapazität C bei vollständiger Ladung ist abhängig von der Temperatur, dem Entladestrom, dem Lastprofil und dem Alterungsverhalten. Zur Rekalibrierung wird die Vollladung vorausgesetzt. Deshalb ist bei längeren Standzeiten die Selbstentladung zu berücksichtigen.



b) Bild 8-3: Zwei verschiedene Methoden a) und b) zur Ladezustandsbestimmung einer Batterie

Effektiver sind die Verfahren, bei denen physikalische Modelle das Batterieverhalten beschreiben. Einfache Modelle bilden die Batterie durch Ersatzschaltbilder nach, komplexere Modelle nutzen Expertenwissen, dass z. B. durch ein Fuzzy-System nachgebildet wird.

Energiemanagementsystem für Batterie und UltraCap:

UltraCaps werden hauptsächlich bei Spitzenlasten eingesetzt, d.h. wenn große Leistungen über einen kurzen Zeitraum gespeichert oder zu Verfügung gestellt werden müssen, da Batterien für diesen Betriebszustand weniger geeignet sind. Damit die entnehmbare Kapazität einer Batterie optimal ausgenutzt wird, sollte die Entladung mit konstantem Strom erfolgen. Durchschnittslasten sollten von der Batterie entnommen werden und Spitzenlasten von einem **power-assist Leistungsspeicher**, wie zum Beispiel einem UltraCap. Diese Kondensatoren sollten während Phasen geringer Stromaufnahme durch den Antrieb über einen DC/DC-Wandler oder durch Rekuperation der Bremsenergie aufgeladen werden. Die Wechselwirkung beider Energiespeicher werden über ein **Energiemanagementsystem (EMS)** geregelt. Stellt das EMS ein Zusammenbrechen der Batteriespannung fest, so wird von einer Beschleunigung ausgegangen und der UltraCap wird per Boost-Modus entladen. Steigt dagegen die Batteriespannung deutlich an, so deutet dies auf eine Rekuperation der Bremsenergie hin. Über den Buck-Modus wird die Energie in den UltraCap eingespeichert.

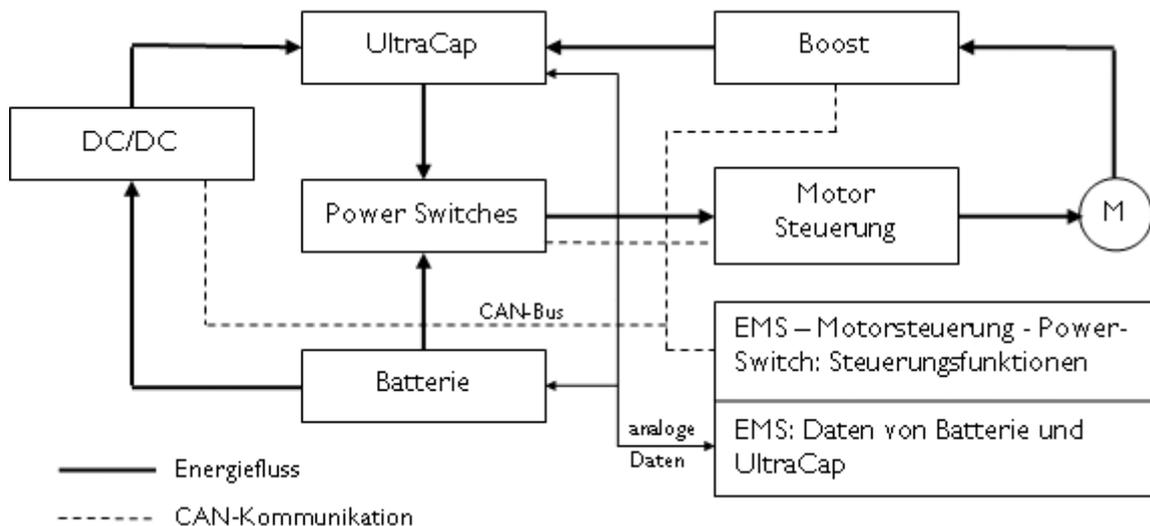


Bild 8-4: Struktur des Energiemanagementsystems mit geschaltetem Batterie- und power-assist-UltraCap-Speicher

Der Ladezustand kann auch in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit kontrolliert werden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten sollte der UltraCap nachgeladen werden, da mit einer Beschleunigung des Fahrzeugs in absehbarer Zeit zu rechnen ist. Dagegen ist bei hohen Geschwindigkeiten eher mit einer Verzögerung zu rechnen und folglich mit einer Rekuperation der Bremsenergie. Um diese aufnehmen zu können, sollte der UltraCap vorher entladen werden.

In beschleunigungslosen Phasen sollte die Energie aus der Batterie geliefert werden. Sobald das EMS die Ladung freigibt, wird auch der UltraCap über diese Ladung aufgeladen. Beschleunigungen werden aus dem UltraCap gefahren. Das EMS nimmt die Daten der Batterie und des UltraCaps auf und sendet Steuersignale an den Leistungsschalter (Power Switch), den DC/DC-Wandler und den Boost-Konverter.

9. Elektrische Straßenfahrzeuge

In der jetzigen Zeit befasst sich ein Großteil der in der Automobilbranche arbeitenden Firmen mit der Einführung der Elektrofahrzeugtechnik. Im Folgenden soll deshalb ein kurzer historischer Überblick über in den Verkehr gebrachte Elektrofahrzeuge einiger Hersteller gegeben werden, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Die Reihenfolge der vorgestellten Fahrzeuge entspricht keiner Wertung und ist zufällig.

9.1 VW

Als einziger Groß-Serien-Hersteller von Elektrofahrzeugen auf dem deutschen Markt bis 2007 ist VW zu nennen. Seit den 70er Jahren rüstete VW mehrere Modelle des *Golf* mit einem elektrischen Antrieb aus, wobei die unterschiedlichsten Batteriesysteme zum Einsatz kamen.

9.1.1 *Golf City-Stromer*

Im Jahr 1994 ging der *VW Golf City-Stromer* auf der Basis des *Golf III* in Serienproduktion. Er wurde in erster Linie für Großkunden und Behörden angeboten und europaweit 300 Mal verkauft. *Volkswagen* war damit der erste Hersteller, der ein Elektrofahrzeug zur Serienreife brachte und zum Verkauf anbot. Der *Golf City-Stromer* wurde angetrieben von einem sechspoligen Drehstrom-PM-Synchron-Motor der Fa. *Siemens AG* und verfügte über ein 5-Gang-Schaltgetriebe.



Bild 9.1.1-1: *Golf City-Stromer*

Elektromotor: PSM		
Leistung	18/25	kW
Batterie: Blei-Gel		
Spannung	96	V
Energie	11.4	kWh
Masse	480	kg
Fahrleistung		
v_{\max}	100	km/h
Steigfähigkeit	20	%
Beschleunigung von 0 auf 50 km/h	in 13	s
Reichweite	50-60	km

Tabelle 9.1.1-1: *Golf City-Stromer* – technische Daten (Josefowitz, W., Köhle, S.: Volkswagen Elektro- u. Hybridfahrzeuge, Aktivitäten bei Hybrid-Antriebssystemen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft und Beschreibung von Schlüsselkomponenten und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, Braunschweiger Symposium, TU Braunschweig 2002)

9.1.2 Bora & Golf Electric

Zwei aktuellere Modelle, welche Volkswagen mit einem Elektroantrieb ausgestattet hat, sind der *Golf* und der *Bora Electric*. Beide können mit Antrieben unterschiedlicher Leistungsklassen ausgestattet werden. Dabei sind Beschleunigungen von 0-100 km/h in 12 Sekunden oder Höchstgeschwindigkeiten von max. 140 km/h in Abhängigkeit vom jeweiligen Antrieb möglich. Die dafür notwendige Energie wird durch Li-Ionen-Batterien bereitgestellt, deren Masse bei 300 kg liegt.



Bild 9.1.2-1: VW Bora Electric & VW Golf IV Electric (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.2 Daimler-Chrysler

9.2.1 A-Klasse ZEBRA

Die *A-Klasse ZEBRA* ist ein reines Elektroauto, das (Name!) mit einer ZEBRA-Batterie ausgestattet ist (NaNiCl – Hochtemperaturbatterie von AEG Anglo Batteries).

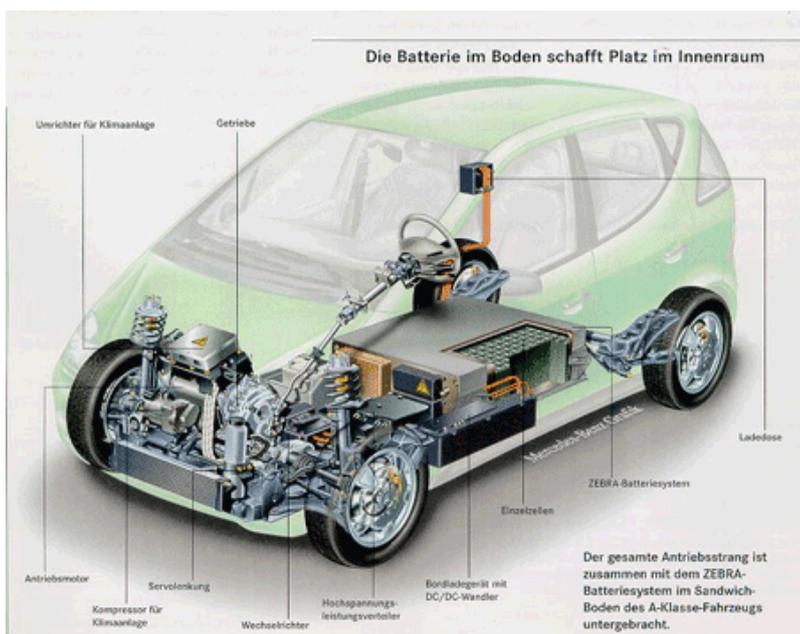


Bild 9.2.1-1: A-Klasse Zebra (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Fahrleistung		
Beschleunigung von 0 auf 100km/h	in 16.5	s
Max. Geschwindigkeit (km/h)	130	km/h
Reichweite (km)	200	Km
Batterie: NaNiCl (Hersteller: AEG Anglo Batteries)		
Anzahl (Stück)	1	Stück
Nennkapazität	104	Ah
Nennspannung	289	V
Spannungsbereich	193-347	V
Leistungsdichte	155	W/kg
Energiedichte	81	Wh/kg
Abmessungen (L x B x H)	993x793x280-	mm
Zellenzahl	448	Stück
Max. Ausgangsleistung (80% DOD, 2/3 OCV, 30s, 335°C)	56	kW
Max. Ausgangsstrom < 1 min	260	A
Kühlmedium	Öl/Wasser	
zul. Umgebungstemperatur Batterie	-40 bis +70	°C
Masse		
Leermasse mit Batterie	1380	kg
Masse – Batterie	370	kg
Zulässige Gesamtmasse	1730	kg
Ladegerät		
Spannung einphasig	230	V
Ladezeit mit Bordladegerät	7	h
Ladezeit mit externem Ladegerät	1	h
Abmessungen		
Länge	3575	mm
Breite	1719	mm
Höhe	1601	mm
Motor: Asynchronmotor mit Käfigläufer		
Dauerlast	30	kW
Spitzenlast	50	kW
Max. Drehzahl	9700	min ⁻¹
Max. Drehmoment	180	Nm

DOD: Depth of Discharge, OCV: Open Circuit Voltage

Tabelle 9.2.1-1: Technische Daten der *Zebra-A-Klasse* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Allerdings konzentrierte sich der Konzern bei der Weiterentwicklung einer *A-Klasse* mit alternativem Antriebskonzept verstärkt auf die Modelle *NECAR 3, 4* und *5*, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet waren.

9.2.2 *Epic Minivan*

1998 führte *Chrysler* den für den Flottenbetrieb vorgesehenen *Epic Minivan* ein. *EPIC* steht für „*Electric Powered Interurban Commuter*“.

Der *Epic* ist auf der Basis zweier weiterer Fahrzeuge von *Chrysler* entstanden, zum einen auf Basis des *Dodge Caravan* und zum anderen auf der des *Plymouth Voyager*.

Motor: ASM (Hersteller: <i>Siemens</i>)		
Dauerleistung	55	kW
Spitzenleistung	73	kW
Batterie: NiMH (Hersteller: <i>SAFT</i>)		
Spannung	336 (28x12)	V
Fahrleistung		
v_{\max}	135	km/h
Beschleunigung von 0 auf 100 km/h	in 17	s
Reichweite	135 - 150	km

Tabelle 9.2.2-1: Technische Daten des *Chrysler Epic Minivan* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)Bild 9.2.2-1: *Chrysler Epic Minivan* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.3 BMW

Bevor sich *BMW* auf die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen konzentrierte, sammelte das Unternehmen schon seit den 80er Jahren Erfahrungen auf dem Gebiet von Hochleistungsbatterien, speziell auf Basis der Natrium-Schwefel-Batterie. Im Zuge dieser Entwicklungsarbeit wurde 1991 das erste Versuchsfahrzeug mit Elektroantrieb von *BMW* präsentiert, der *E1*.

Bild 9.3-1: *BMW E1* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor		
Leistung	32	kW
Drehmoment	150	Nm
Batterie (Natrium-Schwefel)		
Spannung	120	V
Kapazität		
Energieinhalt	19	kWh
Fahrleistung		
v_{\max}	120	km/h
Beschleunigung von 0 auf 50 km/h	in 6	s
Reichweite	250	km

Tabelle 9.3-1: Technische Daten des *BMW E1* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.4 Opel

Opel stattete in den 90ern vereinzelt Fahrzeuge mit Elektroantrieben aus. Als Modellplattform dienten dabei der *Opel Astra Impuls 2* und *3*. Neuere Entwicklungsbemühungen von Opel konzentrierten sich, ähnlich wie auch andere deutsche Hersteller, auf Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeuge.



Bild 9.4-1: Opel Astra Plattform (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Modell		<i>Opel GT</i>	<i>Opel Kadett Impuls</i>	<i>Opel Astra Impuls 2</i>	<i>Opel Astra Impuls 3</i>
Jahr		1970	1990	1991	1993
Batterie		Ni-Cd	Ni-Cd	Blei-Säure	Ni-Cd oder NaNiCl ₂
Reichweite	km	44	80	70	160
Leistung	kW	100	20	85	45
v_{\max}	km/h	100	100	120	120

Tabelle 9.4-1: Technische Daten der Opel-Elektromodelle (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.5 Ford

9.5.1 e-KA

In Zusammenarbeit mit dem französischen Unternehmen SAFT entwickelte das Aachener Ford-Forschungszentrum das Lithium-Ionen-Batteriesystem, welches sich durch seine hohe Energiedichte und Speicherfähigkeit auszeichnet. Erstmals wurde diese Technik für ein reines Elektroauto von Ford für den e-KA realisiert und im Mai 2001 der Öffentlichkeit vorgestellt.



Bild 9.5.1-1: Ford e-KA (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Käfigläufer-Asynchronmaschine		
Leistung	65	kW
Drehmoment	190	Nm
Batterie (Lithium-Ionen)		
Spannung	120	V
Energieinhalt	28	kWh
Masse	280	kg
Fahrleistung		
v_{\max}	130	km/h
Beschleunigung 0-50 km/h	in 3.9	s
Beschleunigung 0-100 km/h	in 12.7	s
Reichweite	>150	km
Reichweite bei $v = 80$ km/h	200	km

Tabelle 9.5.1-1: Technische Daten des Ford e-KA (http://www.tuningford.de/sonder_ka_elektroantrieb.htm)

9.5.2 Ranger

Der *Ford Ranger* wird seit seiner Markteinführung 1998 in den USA in Serie gebaut und ist immer noch eines der wenigen reinen auf dem Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge. Er besitzt ebenfalls die Möglichkeit, Energie während der Fahrt in die Batterie zurückzuspeisen. Er besitzt einen vierpoligen Asynchronmotor in Transaxle-Ausführung der Fa. *Siemens AG* mit Flüssigkeitsmantelkühlung.



Bild 9.5.2-1: Ford Ranger (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.5.3 *Th!nk*

1998 stieg *Ford* in die Produktion von Elektromobilen ein, indem sie den Produzenten des norwegischen „*Pivko*“ aufkauften und eine eigene Produktion starteten. Daraus entstand der *Th!nk*. Allerdings litt die Marktfähigkeit dieses Modells ähnlich wie bei vielen anderen Herstellern an der beschränkten Batteriekapazität, so dass *Ford* die Produktion 2002 schließlich einstellte.



Bild 9.5.3-1: *Ford Th!nk* (<http://www. Elektroauto-tipp.de>)

Motor: Asynchronmotor		
Batterie: Nickel-Cadmium (Hersteller: <i>SAFT</i>)		
Energieinhalt	11.5	kWh
Fahrleistung		
v_{\max}	90	km/h
Reichweite	85	km

Tabelle 9.5.3-1: Technische Daten des *Ford Th!nk* (<http://www. Elektroauto-tipp.de>)

9.5.4 *Ford Transit Connect Electric*

Der *Ford Transit Connect Electric* ist ein Kleintransporter, der sich speziell für den Liefer- und Verteilerverkehr in begrenzten Regionen eignet. Das Auto basiert auf dem konventionellen *Ford Transit*, welcher 2010 in *Nordamerika* zum „Truck des Jahres“ ernannt wurde. Produziert wird die elektrische Variante von *Ford* und der amerikanischen *Azure Dynamics Corporation*, die für den patentierten „*Force Drive*“ Elektroantrieb verantwortlich ist. Die *Azure Dynamics Corporation* zählt weltweit zu den Technologieführern von Elektro-Hybrid-Antrieben, elektrischen Komponenten und Antriebssystemen.



Bild 9.5.4-1: *Ford Transit Connect Electric* (<http://media.ford.com>)

Beschreibung	Spezifikation	Angabe
Abmessungen	Länge	4587 mm
	Breite	1795 mm
	Höhe	2014 mm
	Radstand	2910 mm
Beladung	Kofferraumvolumen	3822 Liter
	Leermasse	1790 kg
	Zul. Gesamtmasse	2244 kg
	Zuladung	454 kg
	Plätze	2
Fahreigenschaften	Energieverbrauch	218 Wh/km
	Reichweite	128 km
	max. Geschwindigkeit	120 km/h
Batteriedaten	Nennspannung	672 V
	Elektrische Ladung	41 Ah
	Energie	27552 Wh
	Masse	k.A.
	Energiedichte	k.A.
Motordaten	Typ	Asynchronmotor
	Nennleistung	k.A.
	max. Drehmoment	235 Nm

Tabelle 9.5.1-1: Technische Daten *Ford Transit Connect Electric* (<http://media.ford.com/>)

9.6 Renault

9.6.1 Renault Clio électrique

Als Antrieb wurde neben dem Gleichstrommotor der Fa. *ABB* auch ein Asynchronmotor der Fa. *Siemens* AG erprobt.

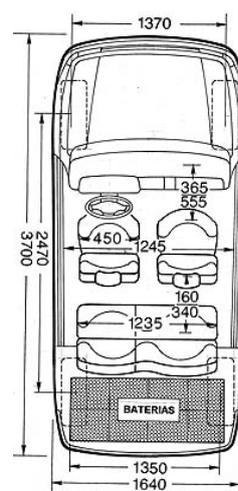


Bild 9.6.1-1: *Renault Clio électrique* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Gleichstrommotor (Hersteller: <i>ABB</i>)		
Nennleistung	16.3	kW
Max.Leistung	21.7	kW
Max.Drehmoment	135	Nm
Batterie: NiCd		
Anzahl	19	
Spannung	114	V
Kapazität	100	Ah
Verbrauch	0,22	kWh/km
Fahrleistung		
v_{\max}	95	km/h
Beschleunigung von 0 auf 50 km/h	in 8.5	s
Reichweite	80	km
Masse	1150	kg

Tabelle 9.6.1-1: Technische Daten des *Renault Clio électrique* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.6.2 *Renault Kangoo électrique*

Von dem *Renault Kangoo électrique* existieren sowohl Ausführungen mit NiCd-Batterien als auch mit Li-Ionen-Batterien des Herstellers *SAFT*. Der Energieinhalt liegt bei 28 kWh.

9.6.3 *Kangoo Rapid Z.E.*

Auf der *IAA (Internationale Automobil-Ausstellung)* für Nutzfahrzeuge in *Frankfurt/Main* im September 2010 wurde der *Renault Kangoo Rapid Zero Emission* erstmals öffentlich vorgestellt. Der in Großserie hergestellte Lieferwagen wird Ende 2011 zu einem Preis von ca. 24.000 € in *Deutschland* auf den Markt kommen. In dem Preis enthalten sind allerdings nicht die Batterien. Diese müssen für eine Laufzeit von 48 Monaten bei einer Fahrleistung von 15.000 km/Jahr von *Renault* geleast werden. Die Leasingkosten belaufen sich auf 85,68 € pro Monat. Der Vorteil für den Kunden besteht darin, dass die einmaligen Anschaffungskosten geringer sind und nach den vier Jahren auf eine neue Batterietechnologie umgestiegen werden kann, ohne die alten Batterien entsorgen bzw. lagern zu müssen. Der Nachteil ist allerdings die Bindung an *Renault* für vier Jahre. Der Elektrolieferwagen ist ebenso wie der *Ford Transit Connect* eine interessante Alternative für Lieferdienste oder Handwerksbetriebe.



Bild 9.6.3-1: *Kangoo Rapid Z.E.* (<http://www.renault-ze.com>)

Beschreibung	Spezifikation	Angabe
Abmessungen	Länge	4213 mm
	Breite	2133 mm
	Höhe	1818 mm
	Radstand	2697 mm
Beladung	Kofferraumvolumen	3500 Liter
	Leermasse	1410 kg
	Zul. Gesamtmasse	2060 kg
	Zuladung	650 kg
	Plätze	2
Fahreigenschaften	Energieverbrauch	137,5 Wh/km
	Reichweite	160 km ¹
	max. Geschwindigkeit	130 km/h
Batteriedaten	Nennspannung	360 V
	Elektrische Ladung	66 Ah
	Energie	23760 Wh
	Masse	182 kg
	Energiedichte	130 Wh/kg
Motordaten	Typ	PM Synchronmotor
	Nennleistung	44 kW
	max. Drehmoment	226 Nm

¹Nach EU-Norm RL 93/116/EWG

Tabelle 9.6.3-1: Technische Daten *Kangoo Rapid Z.E.* (<http://www.renault-ze.com>)

9.7 Peugeot

9.7.1 Peugeot Partner électrique

Motor: Gleichstrommotor		
Kühlung	Luftstöße	
Max. Leistung	28	kW
Max. Drehzahl	6500	min ⁻¹
Batterie NiCd (Hersteller: SAFT)		
Spannung	162	V
Kapazität	100	Ah
Verbrauch	28	kWh/100km
Masse	355	kg
Fahrleistung		
v _{max}	95	km/h
Reichweite	80-100	km

Tabelle 9.7.1-1: Technische Daten des *Peugeot Partner électrique* (<http://www.dges.de>)

9.7.2 Peugeot 106 électrique



Bild 9.7.1-1: Peugeot 106 électrique (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.8 Citroen

Die Modelle von *Citroen* sind in erster Linie auf dem europäischen, insbesondere auf dem französischen, dem deutschen und dem schweizer Markt erhältlich.

9.8.1 Citroen Saxo électrique

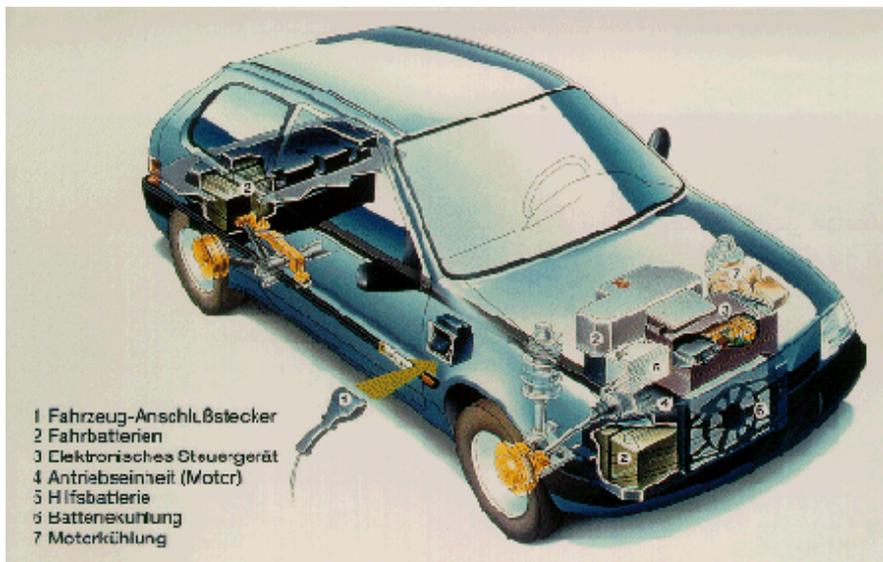


Bild 9.8.1-1: Citroen Saxo électrique (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Gleichstrommotor		
Nennleistung	20	kW
Batterie: NiCd		
Spannung	120	V
Verbrauch	18	kW/100km
Fahrleistung		
v_{\max}	91	km/h
Beschleunigung g von 0-50km/h	in 8.4	s
Reichweite	75	km

Tabelle 9.8.1-1: Technische Daten des Citroen Saxo électrique (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.8.2 Citroen Berlingo



Bild 9.8.2-1: Citroen Berlingo (<http://www.dges.de>)

Motor: GM		
Kühlung	Luftstöße	
Nennleistung	15,5	kW
Max. Leistung bei Drehzahl	28 1500-5500	kW min ⁻¹
Max Drehmoment bei Drehzahl	180 0-1500	Nm min ⁻¹
Batterie: NiCd		
Spannung	162	V
Fahrleistung		
v _{max}	95	km/h
Beschleunigung (0-50km/h)	8,4	s
Reichweite	95	km

Tabelle 9.8.2-1: Technische Daten des Citroen Berlingo (<http://www.e-mobile.ch>)

9.9 Honda

9.9.1 Honda EV



Bild 9.9.1-1: Honda EV (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Der *Honda EV* konnte seit März 1997 in den *USA* geleast, nicht aber gekauft werden. Allerdings wurde schon 1999 die Produktion nach weniger als 400 Fahrzeugen eingestellt, da das Unternehmen auf Grund des hohen Gewichts und der geringen Reichweite der Batterieeinheiten dem Elektromobil keine Marktchancen ausrechnete. Auch *Honda* hat sich mittlerweile auf dem Gebiet der Brennstoffzelle und des Hybridantriebs weiterentwickelt (*Honda Civic*).

Motor: Permanentmagnet-Synchronmaschine		
Position	Frontmotor	
Leistung bei Drehzahl	49 1700 – 8750	kW min ⁻¹
Drehmoment bei Drehzahl	275 0-1700	Nm min ⁻¹
Batterie: Nickel-Metall-Hydrid		
Position	Unterflur	
Anzahl	24	
Spannung	288	V
Kapazität	95	Ah
Ladeleistung	110V/1,1 kW od. 220 V/4,2kW	
Ladedauer	8	h
Kraftübertragung	Frontantrieb	
Getriebe	1-Gang	
Übersetzung	7.446	
Fahrleistung		
v_{\max}	130	km/h
Beschleunigung von 0 auf 100km/h	18.7	s
Reichweite	160	km

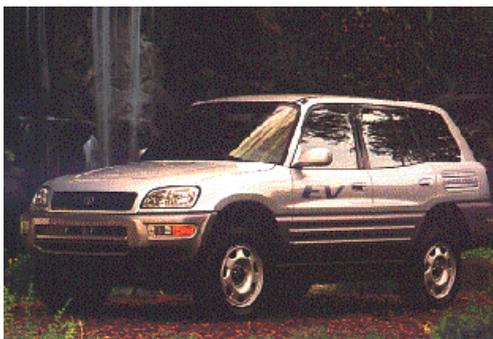
Tabelle 9.9.1-1: Technische Daten des *Honda EV* (<http://www.e-mobile.ch>)

9.10 Toyota

Toyota, langjähriger Marktführer auf dem Gebiet des Hybridantriebs, hat auch für den reinen Elektrofahrzeugmarkt Modelle entwickelt.

9.10.1 Toyota RAV 4 EV

Der *Toyota RAV 4 EV* gelangte zu seiner Markteinführung im Herbst 1997 auf dem kalifornischen Markt. Es war das erste Serienmodell mit einem rein elektrischen Antrieb von *Toyota*. Bereits ein Jahr zuvor war der *RAV 4 EV* bereits auf dem japanischen Markt erhältlich für umgerechnet etwa 35.000 €. Im *Toyota RAV 4 EV* kamen zum ersten Mal die Nickel-Metall-Hydrid-Batterien serienmäßig zum Einsatz. Die Entwicklung und Produktion der Batteriesysteme wurde allerdings nicht allein von *Toyota* getragen. Es handelte sich hierbei um ein Joint Venture mit *Matsushita Electric Industrial*, an dem *Toyota* mit 40% beteiligt war.

Bild 9.10.1-1: *Toyota RAV 4 EV* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Permanentmagnet-Synchronmotor		
Max. Leistung bei Drehzahl	45 2600-8600	kW min ⁻¹
Max. Drehmoment bei Drehzahl	165 0-2600	Nm min ⁻¹
Batterie: Nickel-Metall-Hydrid (gasdicht)		
Anzahl (Zellen)	24	
Spannung	12	V/Zelle
Kapazität	95	Ah
Fahrleistung		
v_{\max}	125	km/h
Reichweite	215	km
Abmessungen		
Länge	3565	mm
Breite	1695	mm
Höhe	1620	mm
Masse	1460	kg

Tabelle 9.10.1-1: Technische Daten des *Toyota RAV 4 EV* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.10.2 *Toyota e-com*

Der *Toyota e-com* ist ein kleines zweisitziges Fahrzeug, das 1997 für den Pendelverkehr konzipiert worden war. Seit 1999 testeten 50 *Toyota*-Mitarbeiter den *Toyota e-com* für genau diesen Einsatz, da auch die Einführung auf dem amerikanischen Markt zu diesem Zeitpunkt bereits geplant war.

Bild 9.10.2-1: *Toyota e-com* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Käfigläufer-Asynchronmaschine		
Max. Leistung bei Drehzahl	18,5 2300-4500	kW min ⁻¹
Batterie: Nickel-Metallhydrid (gasdicht)		
Anzahl (Zellen)	24	
Spannung	24x12=288	V
Fahrleistung		
v_{\max}	100	km/h
Reichweite	100	km

Tabelle 9.10.2-1: Technische Daten des *Toyota e-com* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.11 Nissan

9.11.1 Nissan Altra

Der *Nissan Altra* ist ein Kompakt-Van, ausgestattet mit einer Lithium-Batterie von *Sony*, mit dem von 1998 bis 2000 umfangreiche Flottenversuche unternommen wurden, bevor er 2000 auch in den Autohäusern zum Verkauf angeboten wurde.



Bild 9.11.1-1: *Nissan Altra* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Permanetmagnet-Synchronmotor (NdFeB)		
Leistung	62	kW
Drehzahl	13000	min ⁻¹
Batterie: Lithium-Ionen (Hersteller: <i>Sony</i>)		
Kapazität	282	Ah
Spannung	345	V
Module pro Batteriepack	12	
Fahrleistung		
v_{\max}	120	km/h
Reichweite	190	km
Verbrauch (Autobahn/Stadt)	190/213	Wh/km
Abmessungen		
Länge	4850	mm
Breite	1760	mm
Höhe	1690	mm
Masse	1700	kg

Tabelle 9.11.1-1: Technische Daten des *Nissan Altra* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.11.2 *HyperMini*

Das besondere an dem 1999 in *Tokio* erstmals vorgestellten Kompakt-Elektrofahrzeug ist seine aus recyceltem Kunststoff gefertigte Karosserie.



Bild 9.11.2-1: *Nissan Hyper Mini* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Neodym PSM		
Leistung	20	kW
Drehzahl	15000	min ⁻¹
Batterie: Lithium-Ionen		
Kapazität	270	Ah
Spannung	120	V
Module pro Batteriepack	4	
Fahrleistung		
v _{max}	100	km/h
Reichweite	130	km

Tabelle 9.11.2-1: Technische Daten des *Nissan Hyper Mini* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

9.11.3 *Nissan LEAF*

Der *Nissan LEAF* wurde erstmals im August 2009 in *Japan* der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Abkürzung *LEAF* steht für "*Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family Car*". Der Wagen gehört als Fünftürer zur Kompaktklasse. Ende 2011 war der *LEAF in Deutschland* für ca. 35.000€ verfügbar.



Bild 9.11.3-1: *Nissan LEAF* (www.spiegel.de)

Beschreibung	Spezifikation	Angabe
Abmessungen	Länge	4445 mm
	Breite	1770 mm
	Höhe	1545 mm
	Radstand	2700 mm
Beladung	Kofferraumvolumen	330 Liter
	Leermasse	1595 kg
	Zul. Gesamtmasse	2035 kg
	Zuladung	440 kg
	Plätze	5 Personen
Fahreigenschaften	Energieverbrauch	149 Wh/km
	Reichweite	160 km ¹
	max. Geschwindigkeit	144 km/h
Batteriedaten	Nennspannung	360 V
	Elektrische Ladung	66 Ah
	Energie	23760 Wh
	Masse	182 kg
	Energiedichte	130 Wh/kg
Motordaten	Typ	PM Synchronmotor
	Nennleistung	80 kW
	max. Drehmoment	280 Nm

¹ Ermittelt im US EPA LA4 Fahrzyklus

Tabelle 9.11.3-1: Daten *Nissan LEAF* (<http://www.nissan-zeroemission.com>)

9.12 General Motors

9.12.1 GM EV I GEN II

Das Elektrofahrzeug *EV I* von *GM* ist wohl eines der populärsten Elektrofahrzeuge aus den *USA*. Der Prototyp des *EV I GEN II* stellte einen Geschwindigkeitsrekord für Elektrofahrzeuge auf, welcher bei knapp 300 km/h (183 mph) lag. Das Sportcoupé wird seit Dezember 1996 in *Südkalifornien* und *Arizona* verkauft. Laut Firmenangaben soll es das erste reine Elektroauto gewesen sein, dass von der Fahrleistung her mit einem herkömmlichen Fahrzeug mithalten konnte.

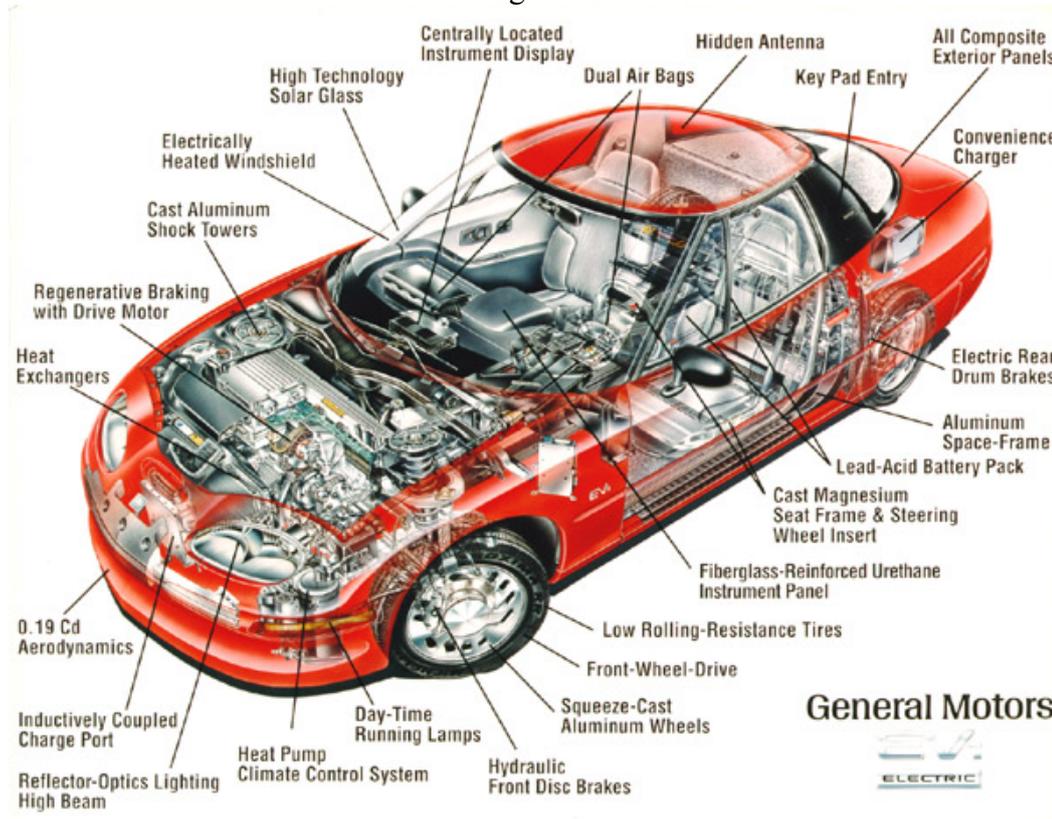


Bild 9.12.1-1: *GM EV I GEN II* (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Käfigläufer-Asynchronmotor		
Leistung	102	kW
Drehmoment (Motor bei Drehzahl)	110 7000	Nm min ⁻¹
Drehmoment (Achse bei Drehzahl)	1209 636	Nm min ⁻¹
Batterie: Bleisäure		
Spannung	12	V
Module pro Batteriepack	26	
Fahrleistung		
Beschleunigung (0-100 km/h)	9	s
Beschleunigung von 0 auf 50km/h	in 3	s
v _{max}	130	km/h
Reichweite	80-150	km

Tabelle 9.12.1-1: Technische Daten des *GM EV I GEN II* (<http://www.gm.com>)

9.12.2 Chevrolet S-10 EV



Bild 9.12.2-1: Chevrolet S-10 EV (<http://www.elektroauto-tipp.de>)

Motor: Käfigläufer-Asynchronmotor		
Leistung	85	kW
Drehzahl	15000	min ⁻¹
Batterie: Bleisäure (<i>Panasonic</i>)		
Kapazität	60	Ah
Spannung	312	V
Module pro Batteriepack	26	
Fahrleistung		
v_{\max}	115	km/h
Reichweite	65-74	km
Maße		
Länge	4780	mm
Breite	1724	mm
Höhe	1620	mm

Tabelle 9.12.2-1: Technische Daten des Chevrolet S-10 EV (<http://www.gm.com>)

9.13 Mitsubishi

9.13.1 i-Miev

Der Mitsubishi i-MiEV des japanischen Automobilherstellers Mitsubishi Motors basiert auf dem 2006 eingeführten Mitsubishi i. Die Abkürzung MiEV steht für „Mitsubishi innovative electric vehicle“. Am 5. Juni 2009 startete die Serienproduktion in Japan, und Ende des gleichen Jahres gab es erste Tests mit rechtsgesteuerten Fahrzeugen in Deutschland. Ende Dezember 2010 war der Verkaufsstart der europäischen Version in Deutschland. Für die europäische Variante musste das Auto an die EU-Spezifikationen angepasst werden. Dazu gehören nicht nur die Ausführung als Linkslenker, sondern auch verschiedene Anpassungen an lokale Regularien wie z.B. größere Außenspiegel, Wegfahrsperrleuchte, Seiten- und Kopfairbags, Gurtwarnleuchte, vergrößerte Kopfstützen und Nebelschlussleuchte. Der Preis betrug 2010 laut Mitsubishi 34.390 €.



Bild 9.13.1-1: Mitsubishi i-MiEV (<http://presse.mitsubishi-motors.de>)

Beschreibung	Spezifikation	Angabe
Abmessungen	Länge	3475 mm
	Breite	1475 mm
	Höhe	1610 mm
	Radstand	2550 mm
Beladung	Kofferraumvolumen	227 / 860 Liter
	Leermasse	1110 kg
	Zul. Gesamtmasse	1450 kg
	Zuladung	340 kg
	Plätze	4 Personen
Fahreigenschaften	Energieverbrauch	135 Wh/km
	Reichweite	150 km ¹
	max. Geschwindigkeit	130 km/h
Batteriedaten	Nennspannung	330 V
	Elektrische Ladung	50 Ah
	Energie	16500 Wh
	Masse	165 kg
	Energiedichte	100 Wh/kg
Motordaten	Typ	PM Synchronmotor
	Nennleistung	35 kW
	max. Drehmoment	180 Nm

¹ Daten ermittelt im NEFZ

Tabelle 9.13.1-1: Technische Daten Mitsubishi i-MiEV (<http://www.imiev.de>)

9.14 Daten einiger im Jahre 2016 verfügbarer Elektrostrassenfahrzeuge

ELEKTROAUTOS

UNTER 30 000 EURO



1a | Kia Soul EV

Motorleistung:	81 kW/110 PS
Batteriekapazität:	27 kWh
Ladezeit:	14 h (230 V)
Reichweite:	212 km
Verbrauch:	14,7 kWh/100 km
Leergewicht:	1565 kg
Höchstgeschwindigkeit:	145 km/h
Basispreis:	28890 €



1b | Nissan Leaf 24

Motorleistung:	80 kW/109 PS
Batteriekapazität:	24 kWh
Ladezeit:	10 h (230 V)
Reichweite:	250 km
Verbrauch:	15,0 kWh/100 km
Leergewicht:	1475 kg
Höchstgeschwindigkeit:	144 km/h
Basispreis:	29265 €

ÜBER 30 000 EURO



2a | VW e-Golf

Motorleistung:	85 kW/115 PS
Batteriekapazität:	24,2 kWh
Ladezeit:	8 h (230 V)
Reichweite:	190 km
Verbrauch:	12,7 kWh/100 km
Leergewicht:	1585 kg
Höchstgeschwindigkeit:	140 km/h
Basispreis:	34900 €



2b | Ford Focus electric

Motorleistung:	107 kW/145 PS
Batteriekapazität:	23,0 kWh
Ladezeit:	10-11h (230 V)
Reichweite:	162 km
Verbrauch:	15,4 kWh/100 km
Leergewicht:	1700 kg
Höchstgeschwindigkeit:	137 km/h
Basispreis:	34900 €



1c | Renault ZOE

Motorleistung:	65 kW/88 PS
Batteriekapazität:	22,0 kWh
Ladezeit:	6-9 h (230 V)
Reichweite:	240 km
Verbrauch:	14,6 kWh/100 km
Leergewicht:	1503 kg
Höchstgeschwindigkeit:	135 km/h
Basispreis:	21500 €



1d | Mitsubishi i-MIEV

Motorleistung:	49 kW/67 PS
Batteriekapazität:	16,0 kWh
Ladezeit:	8 h (230 V)
Reichweite:	160 km
Verbrauch:	12,5 kWh/100 km
Leergewicht:	1185 kg
Höchstgeschwindigkeit:	130 km/h
Basispreis:	23790 €



2c | BMW i3

Motorleistung:	125 kW/170 PS
Batteriekapazität:	21,6 kWh
Ladezeit:	8 h (230 V)
Reichweite:	190 km
Verbrauch:	12,9 kWh/100 km
Leergewicht:	1195/1270 kg
Höchstgeschwindigkeit:	150 km/h
Basispreis:	34950 €



2d | Mercedes B 250 e Sports Tourer

Motorleistung:	132 kW/179 PS
Batteriekapazität:	28,0 kWh
Ladezeit:	2,4 h (400 V)
Reichweite:	200 km
Energie:	ab 16,6 kWh/100 km
Leergewicht:	1725 kg
Höchstgeschwindigkeit:	160 km/h
Basispreis:	39151 €

Quelle: T. Westermann, Elektromobile für „Windhunde“, in: e-vision, Beilage zu „Die Zeit“, Juni 2016, p. 12 [40]

10. Hybridfahrzeuge – Historischer Überblick

In der jetzigen Zeit befasst sich ein Großteil der in der Automobilbranche arbeitenden Firmen mit der Einführung der Hybridfahrzeugtechnik. Im Folgenden soll deshalb ein kurzer historischer Überblick über in den Verkehr gebrachte Hybridfahrzeuge einiger Hersteller gegeben werden, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Die Reihenfolge der vorgestellten Fahrzeuge entspricht keiner Wertung und ist zufällig.

Tabelle 10-1: Einordnung verschiedener Hybridfahrzeuge in Hybridisierungsklassen und Hybridtopologien

	Mildhybrid	Vollhybrid
Serieller Hybrid	(nicht sinnvoll)	Audi: <ul style="list-style-type: none"> • <i>A1 e-tron (Plug-In) (2013)</i> BMW: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Megacity Vehicle (Plug-In)(2013)</i>
Paralleler Hybrid: Momentenaddition	Honda („IMA“): <ul style="list-style-type: none"> • <i>Jazz</i> • <i>Insight</i> • <i>CR-Z</i> BMW: <ul style="list-style-type: none"> • <i>ActiveHybrid 7</i> Mercedes-Benz: <ul style="list-style-type: none"> • <i>S400 BlueHYBRID</i> 	Audi: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Q5 Hybrid (2011)</i></u> • <u><i>A8 Hybrid (2011)</i></u> VW: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Touareg Hybrid (2011)</i></u> Porsche: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Cayenne S Hybrid</i></u>
Paralleler Hybrid: Zugkraftaddition	(nicht bekannt)	Peugeot („Hybrid4“): <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>3008 (2011)</i></u> Audi: <ul style="list-style-type: none"> • <i>e-tron Spyder (Studie aus 2010)</i>
Mischhybrid: kombiniert	(nicht sinnvoll)	Opel: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Ampera (2011)</i></u> Chevrolet: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Volt (2011)</i></u>
Mischhybrid: leistungsverzweigt (One-Mode)	(nicht sinnvoll)	Toyota („HSD“): <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>Prius 3</i></u> • <i>Auris HSD</i> Lexus („HSD“): <ul style="list-style-type: none"> • <i>CT 200h</i> • <u><i>HS 240h</i></u> • <u><i>GS 450h</i></u> • <i>LS 600h</i> • <u><i>RX 450h</i></u>
Mischhybrid: leistungsverzweigt (Two-Mode)	(nicht sinnvoll)	BMW: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>X6 ActiveHybrid</i></u> Mercedes: <ul style="list-style-type: none"> • <u><i>ML 450 Hybrid</i></u>

Ungefähre Einordnung in Fahrzeugklassen:

Kompaktklasse Mittelklasse *obere Mittelklasse* **Oberklasse** Sportwagen SUV/Geländewagen

10.1 Audi

Es wurden 2010 mehrere Studien bzw. Prototypen vorgestellt.

10.1.1 Audi Q5 Hybrid Quattro 2010

Tabelle 10.1.1-1: Leistungsdaten des Audi Q5 Hybrid Quattro 2010
(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	1984 ccm
Bemessungsleistung	155 kW / 211 PS
Maximales Drehmoment	350 Nm
E-Maschine	
Bauart	PMSM
Maximaleistung (10 s)	33 kW / 45 PS
Maximales Drehmoment	211 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	1.3 kWh
Gewicht	38 kg
Gesamtfahrzeug	
Gesamtsystemleistung	180 kW / 245 PS
Gesamtdrehmoment	480 Nm
Mittlerer Verbrauch	< 7.0 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	2000 kg



Bild 10.1.1-1: Audi Q5 Hybrid Quattro 2010
(<http://www.hybrid-autos.info>)

Aufgrund der Leistungsdaten ist davon auszugehen, dass dieses SUV ein Vollhybrid ist. Laut Audi sollen sowohl rein elektrisches Fahren als auch alleiniges Fahren mit dem Verbrennungsmotor möglich sein. Hieraus kann vermutet werden, dass es sich um eine Form des parallelen Hybrid handelt, bei der es möglich ist, die VKM mittels einer Kupplung vom Antriebsstrang abzutrennen.

10.1.2 Audi A8 Hybrid 2010Tabelle 10.1.2-1: Leistungsdaten des *Audi A8 Hybrid* 2010

(http://www.hybrid-autos.info)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	1984 ccm
Bemessungsleistung	155 kW / 211 PS
Maximales Drehmoment	350 Nm
E-Maschine	
Bauart	PMSM
Maximalleistung (10 s)	33 kW / 45 PS
Maximales Drehmoment	211 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	1.3 kWh
Gewicht	38 kg
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	6.2 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	1885 kg

Bild 10.1.2-1: *Audi A8 Hybrid* 2010

(http://www.hybrid-autos.info)

Wie zuvor bei dem Modell *Audi Q5 Hybrid Quattro*, das über denselben Antriebsstrang verfügt, ist davon auszugehen, dass es sich bei dieser Limousine um einen Vollhybrid in der Ausführung einer parallelen Topologie handelt.

10.1.3 Audi e-tron Spyder 2010

Tabelle 10.1.3-1: Leistungsdaten des Audi e-tron Spyder 2010

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Diesel
Hubraum	3000 ccm
Bemessungsleistung	221 kW / 300 PS
Maximales Drehmoment	650 Nm
E-Maschinen	
Bauart	2 x ASM
Maximalleistung (10 s)	2 x 32 kW / 2 x 44 PS
Maximales Drehmoment	352 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	9.1 kWh
Gewicht	(unbekannt)
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	2.2 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	1450 kg



Bild 10.1.3-1: Audi e-tron Spyder 2010

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Diese Sportwagen-Studie ist als Vollhybrid ausgelegt und besitzt eine parallele „*through-the-road*“-Architektur, bei der die E-Maschinen die Hinterachse und der Verbrennungsmotor die Vorderachse antreiben.

10.1.4 Audi A1 e-tron 2010

Tabelle 10.1.4-1: Leistungsdaten des Audi A1 e-tron 2010

(http://www.hybrid-autos.info)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	254 ccm
Bemessungsleistung	(unbekannt, versorgt einen 15 kW / 20 PS Generator)
E-Maschine	
Bauart	Synchronmaschine
Leistung	61 kW / 83 PS (max. 75 kW / 103 PS)
Drehmoment	150 Nm (max. 240 Nm)
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	12 kWh
Gewicht	(unbekannt)
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	1,9 Liter
Fahrzeug-Gesamtgewicht	1200 kg



Bild 10.1.4-1: Audi A1 e-tron 2010

(http://www.hybrid-autos.info)

Dieser Kleinwagen ist als serieller Plug-In Hybrid mit einer maximalen Reichweite von 50 km konzipiert. Die Funktion des „Range-Extenders“ wird in dieser Anordnung von einem Wankelmotor wahrgenommen.

10.2 BMW

Nach den Studien „*Concept X6*“ im Jahr 2007 und „*Concept 7*“ im Jahr 2008, bot *BMW* ab 2009/2010 die beiden Modelle *ActiveHybrid 7* und *ActiveHybrid X6* zum Verkauf an.

10.2.1 BMW ActiveHybrid 7 2009

Tabelle 10.2.1-1: Leistungsdaten des *BMW ActiveHybrid 7* 2009
(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	4395 ccm
Bemessungsleistung	330 kW / 449 PS
Maximales Drehmoment	700 Nm
E-Maschine	
Bauart	PMSM
Bemessungsleistung	15 kW / 20 PS
Maximales Drehmoment	210 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	0.4 kWh
Gewicht	27 kg
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	9.4 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	2045 kg



Bild 10.2.1-1: *BMW ActiveHybrid 7* 2009

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Bei dieser Limousine handelt es sich um einen Mildhybrid, bei dem die E-Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Wandler des Automatikgetriebes platziert ist. Diese soll, erkennbar an ihrer Dimensionierung im Verhältnis zum Gesamtfahrzeug, also keinen alleinigen Antrieb ermöglichen, sondern primär als Unterstützung für den Verbrennungsmotor arbeiten.

10.2.2 BMW ActiveHybrid X6 2009Tabelle 10.2.2-1: Leistungsdaten des *BMW ActiveHybrid X6 2009*

(http://www.hybrid-autos.info)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	5.0 l
Bemessungsleistung	300 kW / 407 PS
Maximales Drehmoment	600 Nm
E-Maschinen	
Bauart	2 x PMSM
Bemessungsleistung	67 kW / 91 PS bzw. 63 kW / 86 PS
Maximales Drehmoment	280 Nm bzw. 260 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Nickel-Metallhydrid
Energieinhalt	2.4 kWh
Gewicht	(unbekannt)
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	9.9 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	(unbekannt)

Bild 10.2.2-1: BMW ActiveHybrid X6 2009

(http://www.hybrid-autos.info)

Bei diesem als „Sport Activity Vehicle“ (kurz: SAC) angepriesenen Fahrzeug, das seit August 2010 verkauft wurde, handelt es sich um einen Vollhybrid. Es verwendet ein Two-Mode-Getriebe und fällt somit in die Kategorie der leistungsverzweigten Hybride.

10.3 Citroën

Citroën und die Konzernschwester *Peugeot* legten ihren Fokus auf die Entwicklung von Dieselhysbriden. Bereits im Jahr 2006 wurde ein entsprechender Prototyp vorgestellt:

10.3.1 Citroën C4 Hdi Hybrid 2006 (Prototyp)

Tabelle 10.3.1-1: Leistungsdaten des *Citroën C4 Hdi Hybrid 2006*
(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Diesel
Hubraum	1.6 l
Bemessungsleistung	66 kW / 92 PS
Maximales Drehmoment	(unbekannt)
E-Maschine	
Bauart	PMSM
Bemessungsleistung	16 kW / 21 PS
Maximales Drehmoment	(unbekannt)
Energiespeicher	
Bauart	Nickel-Metallhydrid
Energieinhalt	6.5 kWh
Gewicht	(unbekannt)
Gesamtfahrzeug	
Verbrauch im Stadtbetrieb	3.0 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	(unbekannt)



Bild 10.3.1-1: *Citroën C4 Hdi Hybrid 2006*
(<http://www.hybrid-autos.info>)

Dieses Model ist technisch baugleich mit dem *Peugeot 307 Hdi Hybrid* und soll als Einwellenhybrid eine rein elektrische Fahrt von bis zu 5 km ermöglichen. Inzwischen existiert eine käuflich zu erwerbende Version, die als Mild-Hybrid angepriesen wird.

10.4 Mercedes-Benz

Neben dem in den USA erhältlichen *ML 450 Hybrid* veröffentlichte *Mercedes-Benz* verschiedene Forschungsfahrzeuge und Prototypen, bspw. von seiner im Oberklassensegment angesiedelten *S-Klasse*.

10.4.1 Mercedes-Benz ML 450 Hybrid

Tabelle 10.4.1-1: Leistungsdaten des *Mercedes-Benz ML 450 Hybrid*

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	3498 ccm
Maximale Leistung	205 kW / 279 PS
Maximales Drehmoment	350 Nm
E-Maschinen	
Bauart	2 x PMSM
Bemessungsleistung	62 kW / 84 PS bzw. 60 kW / 82 PS
Maximales Drehmoment	235 Nm bzw. 260 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Nickel-Metallhydrid
Energieinhalt	2.4 kWh
Gewicht	83 kg
Gesamtfahrzeug	
Max. Systemgesamtleistung	250 kW / 340 PS
Max. Gesamtdrehmoment	517 Nm
Verbrauch im Stadtbetrieb	(unbekannt)
Fahrzeug-Gesamtgewicht	(unbekannt)



Bild 10.4.1-1: *Mercedes-Benz ML 450 Hybrid*

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Dieses SUV verfügt über ein Two-Mode-Getriebe und fällt somit in die Kategorie leistungsverzweigter Hybride.

10.4.2 Mercedes-Benz S 500 Plug-In Hybrid (Prototyp)

Tabelle 10.4.2-1: Leistungsdaten des Mercedes-Benz S 500 Hybrid
 Plug-In 2009
 (<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	3500 ccm
Maximale Leistung	(unbekannt)
Maximales Drehmoment	(unbekannt)
E-Maschinen	
Bauart	PMSM
Bemessungsleistung	44 kW / 60 PS
Maximales Drehmoment	250 Nm
Energiespeicher	
Bauart	Lithium-Ionen
Energieinhalt	10 kWh
Gewicht	130 kg
Gesamtfahrzeug	
Mittlerer Verbrauch	3.2 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	(unbekannt)



Bild 10.4.2-1: Mercedes-Benz S 500 Hybrid
 Plug-In 2009

(Quelle: <http://www.hybrid-autos.info>)

Bei diesem Limousinenprototyp befindet sich der Hybridmodul im Gehäuse des Getriebes, was bedeutet, dass es sich hierbei um einen parallelen Hybrid mit Momentenaddition handelt.

10.5 Toyota

Toyota stellt einen der Hersteller mit der größten Erfahrung beim Bau von Hybridfahrzeugen dar. Stellvertretend für die verschiedenen hybridifizierten Modelle sei hier der *Prius* betrachtet.

10.5.1 Toyota Prius 3

Tabelle 10.5.1-1: Leistungsdaten des *Toyota Prius 3*

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Verbrennungsmotor	
Kraftstoff	Benzin
Hubraum	1.8 l
Maximale Leistung	72 kW / 98 PS
Maximales Drehmoment	350 Nm
E-Maschinen	
Bauart	2 x PMSM
Energiespeicher	
Bauart	Nickel-Metallhydrid
Gesamtfahrzeug	
Verbrauch im Stadtbetrieb	3.9 Liter / 100 km
Fahrzeug-Gesamtgewicht	1445 kg



Bild 10.5.1-1: *Toyota Prius 3*

(<http://www.hybrid-autos.info>)

Der *Toyota Prius* verfügt über die bekannte Architektur des leistungsverzweigten Hybrids mit Planetengetriebe.

10.6 Daten einiger im Jahre 2016 verfügbarer Hybridstrassenfahrzeuge

PLUG-IN-HYBRIDE

UNTER 40 000 EURO

ÜBER 40 000 EURO



3a | VW Golf GTE

Systemleistung:	150 kW/204 PS
Batteriekapazität:	8,7 kWh
Ladezeit:	3 h
Reichweite elektrisch:	50 km
Verbrauch:	1,7 l B/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1599 kg
Höchstgeschwindigkeit:	222 km/h
Basispreis:	36900 €



3b | BMW 225xe Active Tourer

Systemleistung:	165 kW/224 PS
Batteriekapazität:	7,6 kWh
Ladezeit:	3 h
Reichweite elektrisch:	41 km
Verbrauch:	2,0 l B/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1575 kg
Höchstgeschwindigkeit:	202 km/h
Basispreis:	38700 €



4a | VW Passat GTE

Systemleistung:	160 kW/218 PS
Batteriekapazität:	9,9 kWh
Ladezeit:	4,5 h
Reichweite elektrisch:	50 km
Verbrauch:	1,6 l B/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1772 kg
Höchstgeschwindigkeit:	225 km/h
Basispreis:	44250 €



4b | Mitsubishi Outlander PHEV Plus

Systemleistung:	209 kW/285 PS
Batteriekapazität:	12 kWh
Ladezeit:	5 h
Reichweite elektrisch:	52 km
Verbrauch:	1,8 l/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1910 kg
Höchstgeschwindigkeit:	170 km/h
Basispreis:	45990 €



3c | Audi A3 e-tron

Systemleistung:	150 kW/204 PS
Batteriekapazität:	8,8 kWh
Ladezeit:	3 h
Reichweite elektrisch:	50 km
Verbrauch:	1,5 l B/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1655 kg
Höchstgeschwindigkeit:	222 km/h
Basispreis:	38400 €



3d | Toyota Prius Plug-in

Systemleistung:	100 kW/136 PS
Batteriekapazität:	5,2 kWh
Ladezeit:	1,5 h
Reichweite elektrisch:	25 km
Verbrauch:	2,1 l B/100 km (NEFZ)
Leergewicht:	1525 kg
Höchstgeschwindigkeit:	180 km/h
Basispreis:	36600 €



4c | Mercedes C 350 e Limousine

Systemleistung:	205 kW/279 PS
Batteriekapazität:	6,4 kWh
Ladezeit:	2 h
Reichweite elektrisch:	31 km
Verbrauch:	2,1 l/100 km
Leergewicht:	1780 kg
Höchstgeschwindigkeit:	250 km/h
Basispreis:	51051 €



4d | Volvo V60 D6 Twin engine AWD

Systemleistung:	212 kW/288 PS
Batteriekapazität:	11,2 kWh
Ladezeit:	3,5 h
Reichweite elektrisch:	50 km
Verbrauch:	1,8 l D/100 km
Leergewicht:	2048 kg
Höchstgeschwindigkeit:	230 km/h
Basispreis:	56900 €

Fotos: Getty Images, Presse Hersteller (17)

Quelle: T. Westermann, Elektromobile für „Windhunde“, in: e-vision, Beilage zu „Die Zeit“, Juni 2016, p. 13 [40]

11 Literaturverzeichnis

- [1] Binder, A.: Skriptum „Electrical Machines and drives“, TU Darmstadt, 2010
- [2] Binder, A.: Skriptum „Motor development for electrical drive systems“, TU Darmstadt, 2010
- [3] Binder, A.: Skriptum „Neue Technologien elektrischer Energiewandler“, TU Darmstadt, 2010
- [4] Neudorfer, H.: Skriptum „Aktuelle Konzepte für Elektro- und Hybridfahrzeuge“, TU Darmstadt 2010
- [5] Josefowitz, W., Köhle, S.: Volkswagen Elektro – und Hybridfahrzeuge, Aktivitäten bei Hybrid Antriebssystemen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft und Beschreibung von Schlüsselkomponenten und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, Beitrag zum Braunschweiger Symposium, TU Braunschweig, 2002
- [6] Köhle, S.: Der Volkswagen Bora Hybrid, Entwicklungsziele, Fahrzeugbeschreibung und erste Messergebnisse des VW Bora mit Hybridantrieb, 2003
- [7] Honda Insight – Technik und Daten, Honda Motor Europe GmbH, 5/2000
- [8] Honda Presse Information „Civic Hybrid mit neuem IMA-System“, Honda Motor Europe GmbH
- [9] Toyota Hybrid System THS II, Presseinformation, www.toyota.co.jp, 2003
- [10] Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen, Renningen: Expert Verlag, 2004
- [11] Hybridfahrzeuge und Energiemanagement: Beiträge zum gleichnamigen 1. Braunschweiger Symposium, Technische Universität Braunschweig, 2002
- [12] Köhler, U.: Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge, aus Quelle [10], Seite 34 – 48
- [13] Heinemann, D.: Batteriemangement mit Batterien und Super Caps, aus Quelle [10], Seite 49 – 64
- [14] Biemann, J.: Der Elektro-Hybrid – eine Übersicht zu einem Erfolg versprechendem, alternativen Fahrzeugantrieb, aus Quelle [10], Seite 65 – 76
- [15] Noreikat, K.E., Neiß, K.: Hybride Fahrzeugantriebe – Marktfähig nur mit Mehrwert?, aus Quelle [10], Seite 78 – 88
- [16] Kok, D., Ploumen, S., Spijker, E., Karden, E.: Strategien zum Energiemanagement in Hybridfahrzeugen, aus Quelle [10], Seite 89 – 101
- [17] Wandt, H.-P., Brachmann, T.: Das Marktangebot von Hybrid-Elektrofahrzeugen, aus Quelle [10], Seite 104 – 113
- [18] Gerl, B.: Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002
- [19] Krasser, B., Blome, F., Kozlowski, F.: Continental Mild-Hybrid: Kraftstoffeinsparung durch modular aufgebauten, universell einsetzbaren elektrischen Antrieb im KFZ, Continental Temic, 2003
- [20] Neudorfer, H., Binder, A., Ade, M.: Energieeinsparungspotential bei Hybridfahrzeugen durch den Einsatz von innovativen elektrischen Antriebssystemen, VDE Kongress, 18.-20.10.2004 Berlin, Fachtagungsberichte Band 1, p.459-465
- [21] DGES, Elektrofahrzeuge: Entwicklungen und Perspektiven, Fachtagung Karlsruhe, 1999
- [22] DGES, Elektrofahrzeuge – Hybridtechnik im Aufschwung, Fachtagung Aachen, 2003
- [23] Auto Bild, Ausgabe Nr. 7, März 2004, Seite 54-58
- [24] Auto Bild, Ausgabe Nr.11, März 2004, Seite 13
- [25] Auto Bild, Ausgabe Nr.22, Mai 2004, Seite 22
- [26] Auto Bild, Ausgabe Nr.31, Juli 2004, Seite 11-14
- [27] Auto Bild, Ausgabe Nr.32, August 2004, Seite 28
- [28] Lexus 2006 RX 400h product information
- [29] Poslednik, E.: Marktstudie über Einsatz und Akzeptanz von Elektro- und Hybridfahrzeugen aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht; Diplomarbeit TU Darmstadt, 2003

- [30] Schlenter, D.: Chancen und Risiken innovativer Elektro- und Hybridfahrzeuge in Abhängigkeit von ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen, Diplomarbeit TU Darmstadt 2004
- [31] Klementz, C.: Erstellung einer Marktanalyse von Brennstoffzellen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen, Studienarbeit TU Darmstadt, 2004
- [32] Voelcker, J.: Lithium batteries take to the road, IEEE Spectrum, Sept. 2007, p.18-23
- [33] Thounthong, P.; Davat, B.; Rael, S.: Drive friendly – Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid power sources for future automotive power generation, IEEE power & energy magazine, Jan./Feb. 2008, p. 69-76
- [34] Kukuck, H.-A. (Hrsg.): Die Zukunft des Elektroautos, Reihe „Stromdiskussion“, Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft IZE, Frankfurt/Main, 1996 (250 Seiten)
- [35] Zweibel, K.; Mason, J.; Fthenakis, V.: Amerikas Weg ins solare Zeitalter, Spektrum der Wissenschaften, März 2008, p. 61-70
- [36] Kusko, A.; Dedad, J.: Stored energy – short-term and long-term storage methods for standby electric power systems, IEEE Ind. Appl. Magazine, July/Aug. 2007, p.66-72 (ausführliche Bibliographie dort!)
- [37] Benger, R.; Ropeter, C.; Wenzl, H.; Beck, H.-P.: Auswirkungen steiler Stromänderungen auf elektrochemische Systeme, etz Zeitschrift, H.3/2008, p. 54-61
- [38] Brüggemann, M.: Hybride Antriebe für Straßenfahrzeuge - Topologien, Möglichkeiten und Stand der Technik; Studienarbeit TU Darmstadt, 2011
- [39] Schuck, M.: Evaluation of Different Accumulator Chemistries for Usage in Electric Bicycle; Seminararbeit TU Darmstadt, 2011
- [40] Westermann, T.: Elektromobile für „Windhunde“, in: e-vision, Beilage zu „Die Zeit“, Juni 2016, p. 12-13

Internet-Quellenverzeichnis

Quelle	Adresse
[1.01]	http://de.lexus-hybrid.com/how/index.html
[1.02]	http://de.varta.com/index.html
[1.03]	http://planetis.quotidienauto.com/mag/030324/electroad/default.asp
[1.04]	http://www.adac.de
[1.05]	http://www.autobild.de
[1.06]	http://www.automobiles.honda.com
[1.07]	http://www.auto-motor-und-sport.de
[1.08]	http://www.bmw.de
[1.09]	http://www.bmwworld.com/software1.htm
[1.10]	http://www.chrysler.com/home_flash.html
[1.11]	http://www.city-el.de
[1.12]	http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continentalisad/continentalisad/themen/isad/folder_de.html
[1.13]	http://www.daimlerchrysler.com/dccom
[1.14]	http://www.dges.de
[1.15]	http://www.elektroauto-tipp.de
[1.16]	http://www.el-mundo.es/motor/Mvnumeros/97/MV009/MV009renaultficha.html#ficha
[1.17]	http://www.e-mobile.ch
[1.18]	http://www.energie.ch/at/sonder
[1.19]	http://www.ford.com
[1.20]	http://www.gm.com
[1.21]	http://www.honda.com
[1.22]	http://www.honda.de
[1.23]	http://www.honda.fr/html/fr1/corporate/recherche04.shtml
[1.24]	http://www.hybridford.com/index.asp
[1.25]	http://www.ict.fhg.de/deutsch/scope/ae/Libattery.gif
[1.26]	http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr_logistik/bericht-6093.html
[1.27]	http://www.nissan.de
[1.28]	http://www.opel.de
[1.29]	http://www.peugeot.fr
[1.30]	http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/nuit.php
[1.31]	http://www.renault.fr/index_fr.html
[1.32]	http://www.rwth-aachen.de
[1.33]	http://www.toyota.com
[1.34]	http://www.toyota.de
[1.35]	http://www.tu-braunschweig.de
[1.36]	http://www.tuning-ford.de/sonder_ka_elektroantrieb.htm
[1.37]	http://www.twike.de
[1.38]	http://www.volkswagen.de