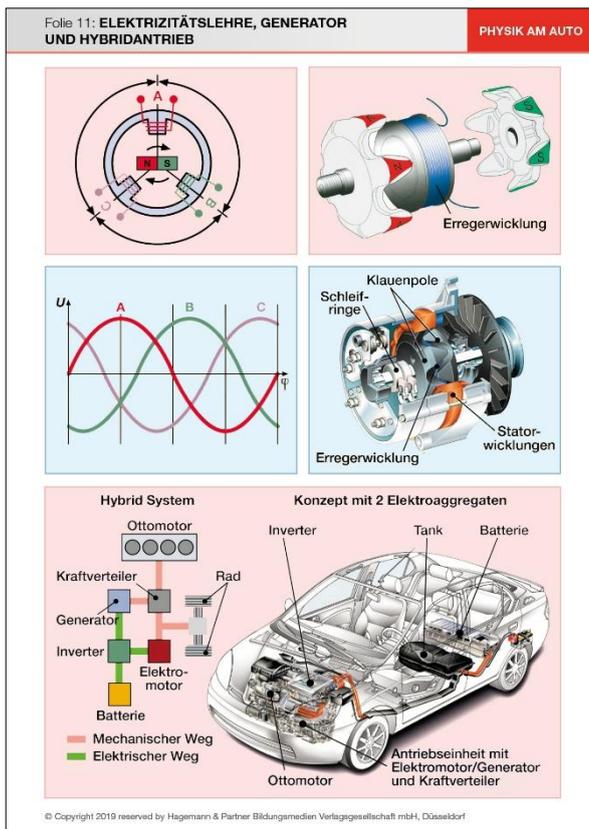


**Thema: Gleichstrom-, Drehstromgenerator; Gleichstrommotor**



den Lehrer die weiter unten in der Lehrerinformation beschriebenen Betriebsarten erarbeiten.

Dass es noch andere Konzepte für Elektroantriebe in Fahrzeugen gibt, kann man aufgreifen, vor allem wenn von Schülerseite aus Fragen oder Beiträge kommen.

**Inhalt**

**Links oben:** Die Abbildung zeigt drei elektrische Spulen in der für die **Drehstromerzeugung** typischen Anordnung, im Kreise versetzt um 120 Grad. Diese entspricht der Anordnung, die mit den in den meisten Physiksammlungen vorhandenen Aufbaumodellen für Elektromotor und Generator nachgebaut werden kann. Sollte dies noch nicht in einer früheren Unterrichtsstunde geschehen sein, kann man den Aufbau parallel zum Einsatz dieser Folie vornehmen. Im Kreismittelpunkt befindet sich ein drehbar gelagerter Dauermagnet. Wenn dieser rotiert, kommen dessen Pole der Reihe nach im Wechsel an den Polschuhen der Spulen vorbei. Dadurch wird in jeder der drei Spulen, die farblich mit drei verschiedenen Farben gekennzeichnet sind, eine **Wechselspannung** induziert.

**Links Mitte:** Das Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf dieser drei Wechselspannungen. Aufgetragen ist die Spannung **U** in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\varphi$ . Es ergibt sich die drehstromtypische Darstellung mit den drei zeitversetzt „hintereinander hereilenden“ Wechselspannungskurven. Hier entspricht die Farbgebung den Kennfarben der entsprechenden Spulen, in denen die Wechselspannungen erzeugt werden.

**Rechts oben:** Dargestellt ist die **elektrische Spule**, die beim realen **Drehstromgenerator** den Dauermagneten des Versuchs (Bild links oben) ersetzt. In der dargestellten Position erzeugt sie ihre Magnetpole links und rechts neben der Kupferwicklung. An diesen Stellen werden speziell geformte eiserne **Polschuhe** angebracht. (Im Bild auf der Folie sind diese nach außen geschoben, damit man die Spulenwicklung dazwischen besser erkennt.) In der normalen Einbauposition greifen diese Polschuhe klauenartig ineinander und vervielfachen die jeweilige Polarität auf ihrer Seite (Nordpol bzw. Südpol) entsprechend der Anzahl ihrer „Klauenpole“. Diese gesamte Einheit rotiert nun im Inneren eines Drehstromgenerators. Während des Rotierens muss die Spule mit Strom versorgt werden, damit sie ein kräftiges Permanentmagnetfeld aufbauen und wie der rotierende Dauermagnet im Bild links auf feststehende Spulen wirken kann. Die in diesem Bild freien Enden der Spulenwicklung sind daher in Wirklichkeit mit **zwei Schleifringen** auf derselben Achse verbunden, denen Schleifkohlen von außen Gleichstrom zuführen können.

**Rechts Mitte:** Hier ist der komplette Generator aufgeschnitten dargestellt. Man erkennt hier auch die feststehenden Spulen (**Statorwicklung**), die den drei Spulen aus dem Bild links oben entsprechen. Auch hier handelt es sich um drei um 120° versetzte Spulen. Sie sind hier in einem **Spulenpaket** zusammengewickelt worden. Rechts erkennt man das Lüfterrad, mit dem der Generator im Betrieb gekühlt wird, sowie die Keilriemenscheibe, über die seine Achse vom Motor angetrieben wird. Die weiteren Teile im Generator links (Dioden, Regler) werden im Zusammenhang mit der **Kopiervorlage** verständlich. Dort wird thematisiert, dass die erzeugte Stromart „Wechselstrom“ ohne Gleichrichtung

**Einsatz der Folie**

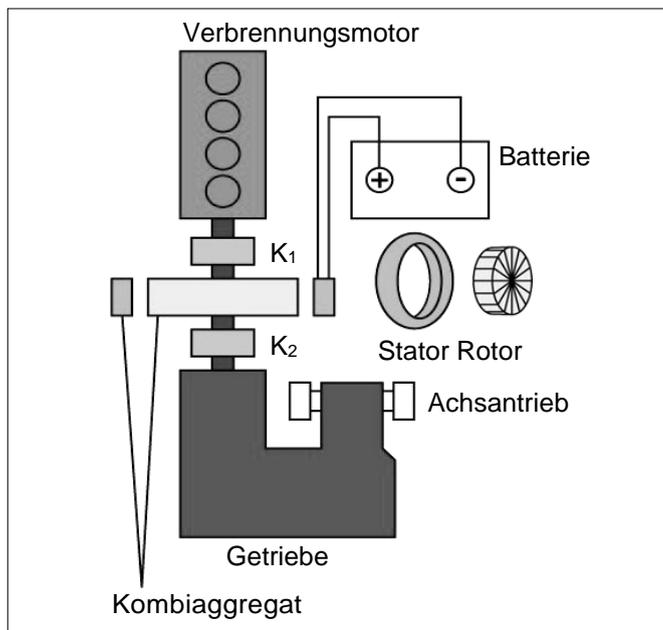
Beide Teile dieser Folie sind für die Elektrizitätslehre II (Sek I) konzipiert. Sie sind allerdings nicht für einen Einsatz in unmittelbarer Folge vorgesehen. Der **obere Teil** der Folie bringt exemplarisch für die Nutzung des Generatorprinzips den heute in nahezu allen Fahrzeugen eingesetzten **Drehstromgenerator**. Dieser Generatortyp ist in unserer unmittelbaren technischen Umwelt die am meisten verwendete Bauart, allerdings nicht die einfachste. Daher kann die Folie erst eingesetzt werden, wenn zuvor die Grundlagen des Generatorprinzips im Unterricht behandelt worden sind. Dann kann dieser obere Folienteil zur Wiederholung und Vertiefung des Grundprinzips und zum Kennenlernen einer interessanten technischen Anwendung eingesetzt werden.

Der **untere Teil** der Folie zeigt ein Kraftfahrzeug mit **Hybridantrieb**, d. h. mit gemischter Verwendung von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor im selben Fahrzeug. Der Fahrer muss dabei keine Abstriche an gewohntem Komfort, Platzangebot oder Fahrleistungen hinnehmen. Auch braucht er nicht die Anschaffung zweier Fahrzeuge (eines mit Elektroantrieb für die tägliche Kurzstrecke zur Arbeit, eines mit Verbrennungsmotor für die längeren Strecken und die Urlaubsfahrt) in Betracht zu ziehen.

Dieser Folienteil kann eingesetzt werden, wenn sowohl Elektromotor als auch Generator im Unterricht behandelt und die Artverwandtschaft dieser Maschinen angesprochen worden sind. Der Einsatz lohnt sich unbedingt, wenn man über die Informationen hinaus, die in jedem Physikbuch zum Thema „Elektromotor“ und „Generator“ zu finden sind, eine potentielle zukünftige Nutzung exemplarisch vorstellen möchte. Die Schüler sollen über die Chancen, die ein solcher Antrieb bietet, diskutieren und von selbst oder mit leichter Hilfe durch

für das Auto nicht verwendbar ist, und dass außerdem ein Generator entsprechend der abverlangten Energiemenge „geregelt“ werden muss.

**Unten links:** Die Abbildung auf der Folie zeigt im Schema den **Hybridantrieb** eines Serienfahrzeugs. Es handelt sich um den Toyota Prius I, der auf einem Konzept mit zwei Elektroaggregaten beruht. Zum besseren Verständnis sei hier erst ein allgemeines Hybridantriebskonzept vorgestellt.



Das hier gezeigte Konzept benutzt die Kombination eines Verbrennungsmotors und eines elektrischen Kombiaggregates, das zugleich die Rolle des **elektrischen Starters** für den Verbrennungsmotor, die des **elektrischen Fahrmotors** und schließlich die des Generators zur Bordstromversorgung spielen kann.

Als Verbrennungsmotor wird hier ein kleinerer **Dieselmotor** eingesetzt. Heute werden meistens Benzinmotoren in Hybridfahrzeugen eingesetzt.

Der Tank zur Kraftstoffversorgung des Verbrennungsmotors und die Batterien zur Versorgung des elektrischen Fahrmotors sind unten im Fahrzeug eingebaut. Die Batterien können entweder am öffentlichen Stromnetz aufgeladen werden, während das Fahrzeug ruht – vorzugsweise in der Garage zu Hause. Sie können aber auch während der Fahrt aufgeladen werden, wenn das Kombiaggregat in dieser Betriebsphase als Generator benutzt wird. Zwei Kupplungen (auf dem Bild mit  $K_1$  und  $K_2$  dargestellt) werden so gesteuert, dass die Möglichkeiten dieses Antriebskonzepts stets intelligent genutzt werden. Sie können das Kombiaggregat einerseits vom Verbrennungsmotor und andererseits vom Getriebe trennen. Es ergeben sich folgende Situationen:

**Alltägliche Benutzung des Fahrzeugs:** Die Batterien im Fahrzeug wurden, etwa über Nacht, aus dem Stromnetz aufgeladen. Kupplung  $K_1$  kann getrennt bleiben, Kupplung  $K_2$  verbindet das Kombiaggregat mit dem Getriebe und der Fahrer kann ausschließlich mit dem Kombiaggregat (als Elektromotor geschaltet) als Antriebsquelle losfahren. Unter den üblichen Bedingungen des Berufspendlers reicht die gespeicherte Energie für die Fahrt zur Arbeit und zurück aus.

**Besondere Fahrsituationen:** Ergibt die Fahrsituation die Notwendigkeit einer größeren Kraftentfaltung (z. B. Überholvorgang, Steigungsstrecke), reicht die Antriebskraft des Elektroantriebs nicht aus. Dann wird automatisch durch das Treten des Gaspedals und Einkuppeln der Kupplung  $K_1$  der **Verbrennungsmotor zugeschaltet**. Das Kombiaggregat wird in die Betriebsart „Generator“ umgeschaltet, und solange der Verbrennungsmotor arbeitet, werden die Batterien nachgeladen. Gleiches gilt, wenn bei einer **Autobahnfahrt** die Antriebskraft des Elektroantriebs nicht für die gewünschte Geschwindigkeit ausreicht. So kann mit diesem Fahrzeug auch eine längere Strecke zurückgelegt werden. Bei langsamerer Fahrt, Stau und nach dem Verlassen der Autobahn wird auf reinen Elektroantrieb umgeschaltet. Bei der **Fahrt auf der Landstraße** treten abwechselnd Phasen geringerer und höherer Leistungsanforderung auf. Die Fahrzeugelektronik muss in der Lage sein, hierbei unter Umständen recht häufig zwischen den Antriebsarten zu wechseln, ohne dass dies zu Ruckeln des Fahrzeugs durch vorübergehendes Aussetzen des Kraftschlusses führt.

**Energierückgewinnung:** Das Antriebskonzept erlaubt eine Energierückgewinnung, da beim Befahren von Gefällstrecken der Verbrennungsmotor abgeschaltet und das Kombiaggregat als Generator betrieben wird. Er wird vom Getriebe bewegt.

**Unten rechts:** Die Abbildung zeigt schematisch, wo in dem Serienfahrzeug (Toyota Prius I) welche **Elemente des Hybridantriebs** liegen. In Deutschland war er von 2000 bis 2003 als Neufahrzeug auf dem Markt, in Japan schon seit Dezember 1997. Einige der vorherigen Erklärungen gelten ähnlich auch für dieses Hybridauto, doch bestehen auch Unterschiede. So hat dieses Auto keinen Dieselmotor, sondern einen Benzinmotor, der speziell für den Einsatz in diesem Fahrzeug optimiert wurde. Da für kurzfristige Leistungsmaxima immer die Unterstützung durch den Elektroantrieb vorgesehen ist, konnte man den Motor auf eine Höchstdrehzahl von 4 000 Umdrehungen pro Minute auslegen. Daher konnten viele seiner Bauteile kleiner und leichter gestaltet werden, andere konnten so ausgeführt werden, dass die Reibungsverluste insgesamt vermindert werden konnte. Das Auto ist nicht für ein Nachladen an der Steckdose vorgesehen, sondern erzeugt die benötigte elektrische Energie ausschließlich mit seinem bordeigenen Generator während der Benutzung des Verbrennungsmotors. Für die **Batterie** wird eine Nickel-Metall-Hydrid-Technologie verwendet. Solche Batterien sind wartungsfrei und haben eine höhere Energiedichte und größere Lebensdauer als herkömmliche.

Die Auslegung des elektrischen Teils auf zwei Aggregate sowie die neuartige Kopplung dieser Aggregate mit dem Verbrennungsmotor ermöglichen eine besondere Variationsbreite bei den Betriebszuständen. Angefahren wird immer elektrisch, eine herkömmliche Kupplung und ein Schaltgetriebe sind überflüssig. Eine aufwendige Elektronik sorgt während des Fahrens dafür, dass stets ein sinnvoller Kompromiss zwischen momentaner Leistungsanforderung, geringem Schadstoffausstoß und sparsamem Kraftstoffverbrauch gefunden wird. Während längerer Phasen des alltäglichen Fahrbetriebs kann ausschließlich elektrisch gefahren werden. Reicht die Leistung des Elektroantriebs nicht aus oder geht der Energievorrat der Batterien zu Ende, wird der Verbrennungsmotor zugeschaltet. Dieser wird wiederum bei

kurzfristigem Bedarf vom Elektroantrieb zusätzlich unterstützt. Zielvorgabe des Herstellers ist, mit einem solchem Fahrzeug einen Verbrauch von ca. 3,6 Litern/100km (Japan-Version) bzw. unter 5 Litern Benzin/100km (Export-Versionen) zu erreichen. Dieser deutliche Minderverbrauch gegenüber vergleichbaren „normalen“ Limousinen geht zudem mit einem sehr geringen Schadstoffausstoß einher.

Heute werden meistens Benzinmotoren in Hybridfahrzeugen eingesetzt. Die 2019er-Version des Toyota Plug-in-Hybrid verfügt optional über ein Solardach, mit dem der Lithium-Ionen-Akkumulator des Fahrzeugs aufgeladen wird. Der Kraftstoffverbrauch des Toyota Plug-in-Hybrid liegt lt. Hersteller bei 1 Liter Super auf 100 km.

Die Kopiervorlage ergänzt das Thema „Drehstrom-generator“ aus dem oberen Teil der **Folie 11** durch Informationen, die für ein komplettes Verständnis der realen Bauausführungen erforderlich sind. Auf der Folie wird die **Erzeugung des „Drehstroms“** ausführlich vorgestellt. Die für den Einsatz im Auto erforderliche **Gleichrichtung** ist nun Thema der Kopiervorlage. Das Schaltbild zeigt den Einsatz der dazu verwendeten insgesamt 9 Leistungsdioden und beschreibt kurz den Sachverhalt. Zusätzlich wird im Text darauf hingewiesen, dass eine **Regelung** des erzeugten Stromes erforderlich ist. Der dazu benötigte Regler erscheint als Block im Schaltbild.

Die Schüler sollten vor dem Einsatz der Kopiervorlage geringe Kenntnisse über den Einsatz von Halbleitern haben. Ein genaues Verständnis der internen Vorgänge in einer Diode ist zum Verstehen dieser Kopiervorlage nicht erforderlich und kann in einer späteren Unterrichtsreihe folgen. Es sollte aber durch ein Experiment die Gleichrichterwirkung bekannt sein.

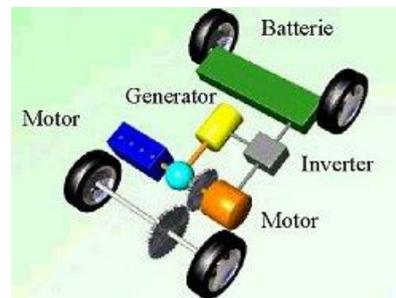
Die Informationen und das Schaltbild werden durch zwei Aufgaben ergänzt, die zur Vertiefung und Lernerfolgskontrolle dienen.

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler sollen

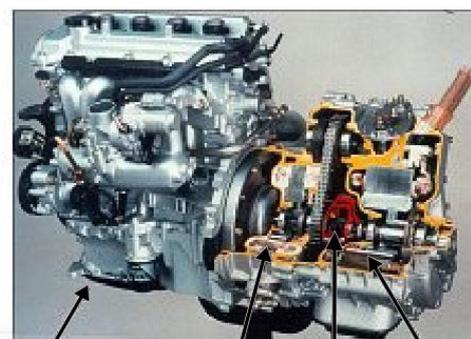
- die in der Schaltskizze gezeichneten Leitungszüge hinsichtlich der jeweils durchfließenden Stromart kennzeichnen können.
- den Einsatz von Dioden beim Drehstromgenerator begründen und anhand des vorgegebenen Schaltbilds beschreiben können.
- die Notwendigkeit einer Regelung des erzeugten Stromes kurz begründen und das Funktionsprinzip dieser Regelung (Stromregelung bei der Erreger- spule) beschreiben können.

**Elektromotor und Generator; Hybridantrieb**

Drei weitere Darstellungen veranschaulichen und ergänzen die Erläuterungen zum Hybridsystem (Toyota Prius). Das Bild des seriellen und parallelen Hybridsystems vermittelt in einer perspektivischen Prinzipskizze den Überblick, wo in dem Fahrzeug welche Elemente des realisierten Hybridkonzepts liegen.



Das Foto (unten) zeigt das "Herz" des Hybridantriebs im Schnittbild. Man erkennt links den Verbrennungsmotor, rechts die zwei elektrischen Komponenten, die vom Hersteller beide mit "Motor-Generator" – MG1 (Generator) und MG2 (Elektromotor) – bezeichnet werden. Dies zeigt die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten dieser Antriebseinheit.



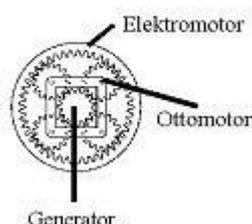
Otto Motor    Generator    Elektromotor  
Kraftverteiler

Es wäre sogar möglich bei starker Beschleunigungen kurzfristig beide Elektroaggregate als Motoren einzusetzen. Umgekehrt besteht die Option, bei hinreichend starkem Schiebetrieb im Gefälle oder bei starkem Bremsen beide Elektromaschinen als Generatoren zur Rückgewinnung elektrischer Energie zu verwenden. Das Bild vermittelt außerdem einen Eindruck des erheblichen mechanisch-technischen Aufwands dieses Bauprinzips. Man beachte, dass in dem Bild auf die gesamte Elektronik zur Steuerung und Regelung aller Vorgänge verzichtet wurde. Die beiden Abbildungen der Komponenten des Hybridsystem zeigen die mechanische Kraftverteilung im Detail. In der Skizze des Kraftverteilers erkennt man, dass der Verbrennungsmotor sowie die beiden Elektroaggregate über ein Planetenradgetriebe miteinander verbunden sind: "Motor-Generator 2" (das ist im Normalfall der Elektromotor) ist mit dem äußeren Tellerrad verbunden; der Verbrennungsmotor mit dem Planetenradträger, und "Motor-Generator 1" (im Normalfall: der Generator) ist an das zentrale Sonnenrad gekoppelt.



Das Planetengetriebe lässt sich im Foto (Schnittbild) in der Mitte erkennen. Von dort aus erfolgt der weitere Antrieb mit der - im Bild gut erkennbaren - sehr stabilen Kette. Sie führt vom Planetengetriebe aus nach oben zum Achsantrieb.

Kraftverteiler



### Startergenerator

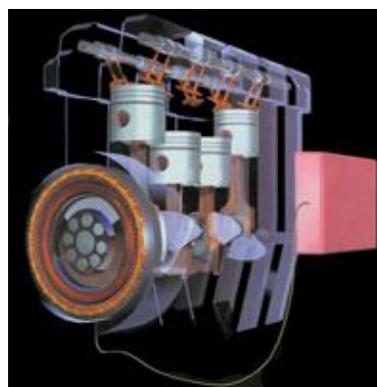
Schon in anderen Informationen zu Generatoren auf diesen Internetseiten wird neben dem "Toyota Prius I" ein weiteres Konzept zum Thema "Hybridantrieb" vorgestellt. Gegenüber der technischen Auslegung des "Prius I" erscheint dieses einfacher. Es benutzt als Elektroaggregat einzig eine Kombination aus Elektromotor und Generator, die üblicherweise **Starter-generator** genannt wird. Auch spricht man in Fachkreisen von einer "DynaStart-Anlage" (geschützte Bezeichnung von ZF-Sachs: "Dyna" stammt von "Dynamo" [= Lichtmaschine = Generator], "Start" von "Starter" [= Anlasser]).

### Stand der Technik 2019

1. Im Generatorbetrieb liefert das Aggregat bei einer entsprechenden Ausführung der Spulen nicht nur die übliche 12 V Bordnetzspannung, sondern versorgt auch ein seit 2010 ergänzend eingesetztes Teilbordnetz in Hybridkraftfahrzeugen mit 48 V Spannung.



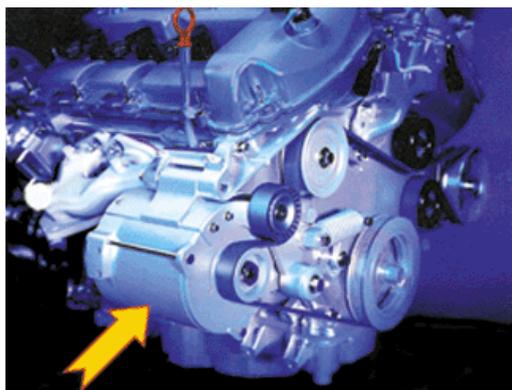
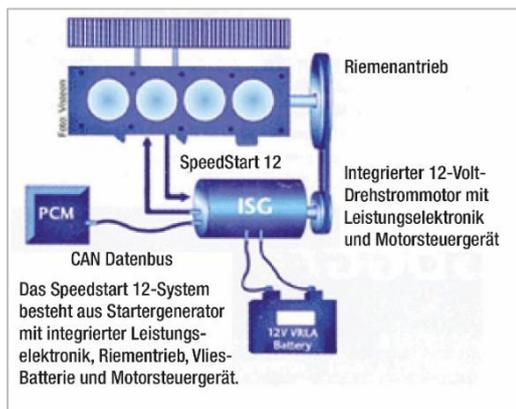
2. In Full Hybrid/Plugin- und EV-Fahrzeugen wird für den Energietransfer der Komponenten ein zweites Bordnetz mit 400 - 420 V eingesetzt.
3. Mit der Zunahme der Bordelektronik kann ein solches mit Spulen versehenes Schwungrad noch für einen weiteren Zweck benutzt werden: Vom Hersteller Continental wird das System "ISAD" (Integrierter Starter-Alternator-Dämpfer) angeboten. Hier wird – elektronisch gesteuert – auf die Kurbelwelle des Motors mithilfe des Startergenerators (Bild rechts) elektromagnetisch jeweils ein solches Drehmoment übertragen, sodass der Verbrennungsmotor deutlich ruhiger läuft. Bisherige Ausgleichswellen und Dämpfer werden dadurch überflüssig. Auch lassen sich Drehschwingungen, wie sie in Folge von Last- und Gangwechseln auftreten, erfolgreich unterdrücken. Da es bei ISAD hauptsächlich darum geht, das Kraftfahrzeug zusätzlich als mobilen Stromgenerator einzusetzen, wird es von deutschen Automobilherstellern nicht eingesetzt.



4. Beim Verzögern des Fahrzeugs und bei Bergabfahrten kann elektrische Energie gewonnen werden (Rekuperation). Bei starkem Beschleunigen kann das Aggregat als Elektromotor das Drehmoment des Verbrennungsmotors verstärken.



5. Das Fahrzeug kann mit einem wirkungsvollen Start-Stopp-System versehen werden: Beim Anhalten wird der Verbrennungsmotor abgestellt. Zum Wiederauffahren reicht die Betätigung des Gaspedals. Der Startergenerator bringt den Verbrennungsmotor blitzschnell auf Leerlaufdrehzahl. Dann erst wird die Zündung eingeschaltet und Kraftstoff eingespritzt. Der Motor startet schnell und komfortabel.



**Riemenstartergeneratoren (RSG):** Bei einem anderen Prinzip des Startergenerators (siehe Foto und Zeichnung) wird das Aggregat nicht in das Motorschwungrad integriert, sondern man treibt ihn mit einem entsprechend kräftigen Riemen wie eine herkömmliche Lichtmaschine an. Der Anbau seitlich am Motor und die lediglich vergrößerte äußere Form ähneln daher auch sehr einer "normalen" Lichtmaschine. Diese Riemenstartergeneratoren (RSG) mit 48 Volt Betriebsspannung werden seit 2016 in der Serienproduktion von Fahrzeugen eingesetzt. In Kombination mit Lithium-Ionen-Batterien können diese Systeme durch die höhere Spannung, Leistungen bis zu 10 oder 15 kW sowie durch Rekuperation den Kraftstoffverbrauch um ca. 10 bis 20 % reduzieren.

**Integrierte Startergeneratoren (ISG):** Bei leistungsstärkeren Hybridfahrzeugen verwendet man integrierte Startergeneratoren (ISG) oder Kurbelwellen-Startergeneratoren (KSG). Diese Generatoren werden zwischen Motor und Getriebe coaxial an der Kurbelwelle montiert. Integrierte Startergeneratoren können höhere elektrische Leistungen rekuperieren als Riemenstartergeneratoren. Außerdem ist auch rein elektrisches Fahren möglich.

**Beispiele:** Mercedes Benz setzt integrierte Startergeneratoren seit 2016 in der S-Klasse ein. Im Jahr 2019 kam der Mercedes-Benz M 176 GLS 580 4MATIC mit 48 Volt ISG auf den Markt.

Während einige Automobilhersteller noch auf Hybridtechnologie setzen, gibt es alternativ zum Mercedes-Benz M 176 (2019) das Tesla Model X bereits seit 2015 als reines Elektrofahrzeug mit einer Reichweite lt. Hersteller bis zu 500 km. Im November 2019 startete Volkswagen im Werk Zwickau die Serienproduktion des Elektroautos „ID.3“.