

Systemverhalten von Plug-in-Hybridfahrzeugen: Betriebsstrategien, Systemgrenzen und reale Fahranteile

erstellt von

INGENIEURBÜRO BERGER

Tim Berger

Ingenieur für Fahrzeugtechnik M.Eng. - ö.b.u.v. Sachverständiger für Kraftfahrzeugtechnik

Hybridfahrzeuge und Plug-in-Hybride kombinieren zwei Antriebstechnologien und erfordern eine präzise Abstimmung der elektrischen und mechanischen Systeme. Die Verfügbarkeit des rein elektrischen Fahrmodus ist ein zentrales Merkmal im Nutzungskonzept und hängt nicht nur von der Funktionstüchtigkeit der Steuergeräte und Softwarekomponenten ab, sondern auch von einer Vielzahl betriebsabhängiger Rahmenbedingungen. Ein wesentliches Merkmal von Plug-in-Hybridfahrzeugen ist die Möglichkeit, je nach gewähltem Fahrmodus rein elektrisch, kombiniert oder rein konventionell zu fahren. Für den Elektromodus ist dabei nicht nur ein ausreichender Ladezustand der Hochvoltbatterie erforderlich, sondern auch die Erfüllung bestimmter fahrzeugspezifischer Betriebsbedingungen, die vom Hersteller definiert sind. Dazu zählen unter anderem Parameter im Bereich der elektrischen Energieversorgung, der thermischen Systemgrenzen sowie der fahrdynamischen Situation.

1. Hybridantriebe im Überblick

Mit dem zunehmenden Fokus auf Emissionsreduzierung und Energieeffizienz haben Hybridfahrzeuge als technologieoffene Übergangslösung zwischen konventionellen Verbrennungsmotoren und vollelektrischen Antrieben zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie verbinden die Vorteile beider Systeme und ermöglichen eine bedarfsgerechte Nutzung beider Energiequellen.

Hybridfahrzeuge verbinden die Vorteile von Verbrennungs- und Elektromotoren, um Effizienz, Reichweite und Umweltverträglichkeit im alltäglichen Fahrbetrieb zu verbessern. Je nach Ausführung kommen unterschiedliche Systeme mit variierendem elektrischen Unterstützungsgrad zum Einsatz. Grundsätzlich lassen sich drei Haupttypen unterscheiden:

- Mild-Hybrid (MHEV): Ein Mild-Hybrid-Fahrzeug nutzt einen kleinen Elektromotor (in der Regel 48 Volt), der den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen unterstützt, Start-Stopp-Funktionen übernimmt und Bremsenergie zurückgewinnt. Der Elektromotor kann jedoch nicht allein für den Vortrieb sorgen.

- Vollhybrid (HEV): Hierbei handelt es sich um Fahrzeuge, bei denen sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor zur Fortbewegung genutzt werden können. In vielen Fahrzeugmodellen entscheidet das System automatisch über den jeweils geeigneten Antriebsmodus (elektrisch, kombiniert oder Verbrennungsmotor). Abhängig vom Fahrzeugtyp kann der Fahrer jedoch über entsprechende Bedienelemente Einfluss auf die Moduswahl nehmen. Die Batterie wird ausschließlich durch Rekuperation und den Verbrennungsmotor geladen, nicht über einen Stecker.
- Plug-in-Hybrid (PHEV): Diese Fahrzeuge verfügen über eine größere Hochvoltbatterie, die extern über das Stromnetz aufgeladen werden kann. Sie ermöglichen rein elektrisches Fahren über mittlere Distanzen (typischerweise 40–80 km) und bieten gleichzeitig die Reichweitenreserve eines Verbrennungsmotors. Der Antrieb erfolgt je nach Modus entweder elektrisch, kombiniert oder nur über den Verbrennungsmotor.

Ein typisches Plug-in-Hybrid-Fahrzeug enthält folgende zentrale Komponenten:

- Verbrennungsmotor
- Elektromotor
- Hochvoltbatterie zur Versorgung des E-Antriebs und über einen Spannungswandler auch des 12-Volt-Bordnetzes
- 12-Volt-Zubehörbatterie
- Leistungselektronik und Spannungswandler zur Spannungsanpassung

Im Fahrbetrieb stehen meist mehrere wählbare Modi zur Verfügung, wobei die tatsächliche Anzahl und Funktion der Fahrmodi hersteller- und fahrzeugspezifisch ist:

- Hybridmodus: Beide Antriebsquellen arbeiten zusammen oder abwechselnd. Bei geringer Leistungsanforderung kann auch allein der Elektromotor aktiv sein.
- Elektromodus: Das Fahrzeug fährt rein elektrisch, abhängig vom Ladezustand der Hochvoltbatterie und bestimmten Betriebsparametern, die herstellerseitig festgelegt sind.
- Eco-Modus: Verbrauchsoptimierte Fahrweise durch reduzierte Leistungsanforderung und frühes Schalten.
- Sportmodus: Maximale Leistung beider Antriebe, oft mit angepasster Schalt- und Fahrwerksabstimmung.
- Hold-Modus: Der aktuelle Ladezustand der Hochvoltbatterie wird konstant gehalten (z. B. für spätere E-Fahrt in Umweltzonen).
- Charge-Modus: Der Verbrennungsmotor lädt aktiv die Hochvoltbatterie während der Fahrt.

2. Zielsetzung und aktuelle Marktsituation

Hybridsysteme dienen primär der Kraftstoffeinsparung, CO₂-Reduktion und der lokalen Emissionsminderung, speziell im Stadtverkehr. Plug-in-Hybride bieten zusätzlich die Möglichkeit, im Alltag teilweise rein elektrisch unterwegs zu sein und gleichzeitig die Reichweite eines Verbrennungsmotors zu nutzen. Der tatsächliche Umweltnutzen hängt jedoch stark vom Fahrverhalten ab, insbesondere davon, wie regelmäßig extern geladen wird.

Im Jahr 2024 entfielen laut Kraftfahrt-Bundesamt etwa 6,8% der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland

auf Plug-in-Hybridfahrzeuge, während Mild- und Vollhybride gemeinsam rund 26,8% erreichten. Damit lag der Gesamtanteil an Hybridfahrzeugen bei etwa 33,6%. Zum 1. Januar 2025 waren in Deutschland bereits mehr als 3,55 Millionen Hybrid-Pkw zugelassen. Damit stellen Hybridfahrzeuge einen relevanten Bestandteil des aktuellen Fahrzeugmarkts dar und bilden eine bedeutende Brückentechnologie auf dem Weg zur vollständigen Elektrifizierung des Verkehrssektors.



Abbildung 1: Energiemonitor eines Vollhybrids (HEV)

3. Konzept des Plug-in-Hybridantriebs

Plug-in-Hybridfahrzeuge kombinieren die Vorteile eines Elektroantriebs mit der Reichweite eines konventionellen Verbrennungsmotors. Sie wurden als Antwort auf gesetzliche Vorgaben zur Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen entwickelt und gelten als technologische Zwischenstufe auf dem Weg zur vollständigen Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Durch die Kopplung von Verbrennungs- und Elektromotor können einerseits verbrauchsärmere Motoren eingesetzt und andererseits Betriebsstrategien realisiert werden, bei denen der Verbrennungsmotor möglichst häufig in einem günstigen Wirkungsgradbereich arbeitet.

Sofern die technischen Voraussetzungen erfüllt sind, wird im Elektromodus ausschließlich der elektrische Antrieb genutzt. Im Hybridmodus übernimmt die Fahrzeugelektronik dagegen eine automatische Verteilung der Antriebsleistung zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor, die von den Fahrbedingungen und dem Fahrverhalten abhängt. Bei ausreichendem Ladezustand und moderater Leistungsanforderung ist dabei auch temporär rein elektrisches Fahren möglich.

Im Hybridmodus entnehmen beide Antriebsmaschinen während der Fahrt Energie aus ihren jeweiligen

Speichern, der Elektromotor aus der Hochvoltbatterie, der Verbrennungsmotor aus dem Kraftstofftank. Der Ladezustand der Batterie sinkt dabei in der Regel, kann jedoch teilweise durch Rekuperation oder Motornachladung stabilisiert werden. Bei der Rekuperation wird Bremsenergie in elektrische Energie umgewandelt und in die Batterie zurückgeführt. Zusätzlich ist je nach Modell eine begrenzte Nachladung über den Verbrennungsmotor möglich, insbesondere bei Lastpunktanhebung, bei der überschüssige Energie als Generatorleistung genutzt wird.

Die Nachladung der Hochvoltbatterie im Rahmen der Lastpunktanhebung oder durch Energierückgewinnung im Schubbetrieb, etwa bei längeren Bergabfahrten, ist energetisch durch die Leistungsgrenzen des Generators, Batteriekapazität sowie Rekuperationsstrategie limitiert und ersetzt keine externe Ladung. Zwar kann unter günstigen Bedingungen ein nennenswerter Ladezuwachs erzielt werden, die Ladeleistung bleibt jedoch deutlich hinter der einer externen Stromquelle zurück. Eine vollständige Wiederaufladung der Batterie ist daher nur über ein Ladekabel an einer geeigneten Lademöglichkeit vorgesehen.

Einige Modelle ermöglichen mittels aktivierbarer Ladefunktion eine erzwungene Nachladung über den Verbrennungsmotor während der Fahrt (Charge-Modus). Diese Funktion wurde primär dafür entwickelt, um z. B. bei Zufahrt zu Umweltzonen ausreichende Batterieladung sicherzustellen. Standardmäßig ist diese Funktion jedoch deaktiviert und muss bei Bedarf manuell aktiviert werden. Der Hersteller rät im Handbuch jedoch davon ab, diese Funktion dauerhaft zu nutzen, da sie mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch verbunden ist.

4. Elektrische Fahranteile im Alltagsbetrieb

Der tatsächliche elektrische Fahranteil von Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEV) im Alltagseinsatz unterscheidet sich oftmals deutlich von den im Prüfzyklus angenommenen Idealwerten. Während unter WLTP-Laborbedingungen EV-Anteile¹ von bis zu 70 % bis 85 % angesetzt werden, zeigen Realdaten, dass diese Werte im Alltagsbetrieb nur unter bestimmten Voraussetzungen erreicht werden. Einflussfaktoren sind dabei unter anderem das Ladeverhalten, das Fahrprofil sowie die jeweilige Nutzung (privat oder gewerblich). Insbesondere das Ladeverhalten erweist sich als zen-

traler Faktor: Nur wenn PHEV-Fahrzeuge regelmäßig geladen werden, kann ihr elektrisches Potenzial im Sinne einer emissionsarmen Fortbewegung tatsächlich ausgeschöpft werden. Studien belegen, dass privat genutzte Fahrzeuge tendenziell häufiger geladen und kürzere Strecken zurückgelegt werden, was zu einem höheren EV-Anteil führt. Demgegenüber stehen gewerblich genutzte Fahrzeuge mit längeren Tagesfahrleistungen und unregelmäßigem Ladeverhalten, was den elektrischen Fahranteil erheblich reduziert.

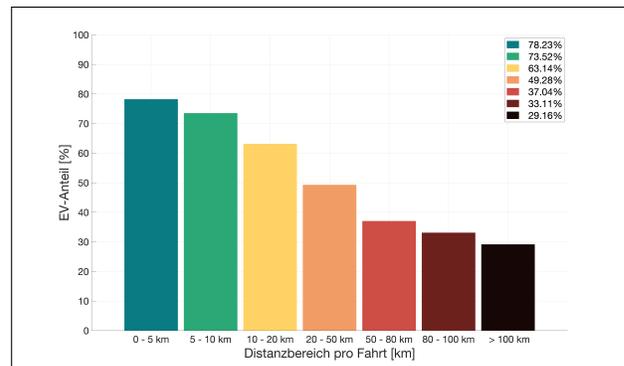


Abbildung 2: EV-Anteil in Abhängigkeit der Fahrdistanz.

Auf Basis von europäischen Realdaten aus 80.605 Fahrten wurde im Rahmen einer eigenen Untersuchung der durchschnittliche streckenbezogene EV-Anteil analysiert. Die Auswertung ergab einen elektrischen Fahranteil von 63 % über alle Fahrten hinweg. Eine differenzierte Betrachtung nach Distanzklassen zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen Fahrstreckenlänge und EV-Nutzung:

- Fahrten bis 5 km wurden zu 78,2 % elektrisch zurückgelegt.
- Fahrten mit einer Distanz zwischen 10 und 20 km - dem Bereich der durchschnittlichen Wegstrecke pro Fahrt in Deutschland - wiesen einen EV-Anteil von 63,1% auf.
- bei Strecken über 100 km reduzierte sich der EV-Anteil auf 29,2 %.

Die Auswertung legt nahe, dass Plug-in-Hybridfahrzeuge vor allem im urbanen Kurzstreckenverkehr mit niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten und häufigen Stop-and-Go-Phasen einen hohen elektrischen Fahranteil erreichen.

¹Der EV-Anteil gibt an, wie viel Prozent der Gesamtstrecke eines Fahrzeugs rein elektrisch zurückgelegt wurden.

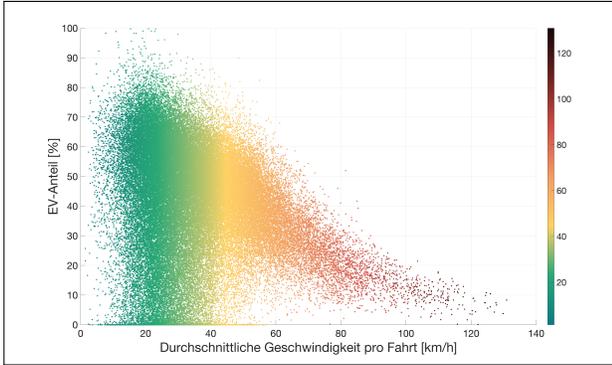


Abbildung 3: EV-Anteil in Abhängigkeit der durchschnittlichen Geschwindigkeit pro Fahrt.

Auch die Auswertung nach durchschnittlicher Fahr­geschwindigkeit bestätigt diesen Zusammenhang: Fahrten mit mittleren Geschwindigkeiten zwischen 10 und 50 km/h decken die gesamte Bandbreite möglicher EV-Anteile ab. Ab diesem Bereich sinkt der elektrische Fahranteil mit steigender Geschwindigkeit kontinuierlich ab, ein Indikator für die physikalisch und systemseitig begrenzte Leistungsfähigkeit im reinen Elektrobetrieb bei höherer Last oder Geschwindigkeit. Eine grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen EV-Anteil und Fahrgeschwindigkeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

5. Rekuperation und Bremsstrategien im Schubbetrieb

Im Schubbetrieb, insbesondere bei längeren Gefällestrecken, nutzen Hybridfahrzeuge die Möglichkeit der elektrischen Rekuperation, um kinetische Energie in elektrische Energie umzuwandeln und in der Hochvolt­batterie zwischenzuspeichern. Dabei fungiert die Elektromaschine als Generator und wandelt die Fahrzeugbewegung in elektrische Leistung um. Diese wird dem Hochvoltenergiespeicher zugeführt, wodurch mechanische Bremsvorgänge reduziert und die Effizienz des Gesamtsystems erhöht werden können.

Die Rekuperationsleistung unterliegt jedoch systemseitigen Begrenzungen. Dazu zählen unter anderem die maximale Ladeleistung der Batterie, deren aktueller Ladezustand (State of Charge, SOC) sowie die thermischen und elektrischen Grenzen der Komponenten. Wird die Batterie beispielsweise in einer längeren Bergabfahrt vollständig geladen, ist keine weitere Energieaufnahme mehr möglich. In diesem Fall wird die elektrische Rekuperation deaktiviert oder stark reduziert. Bei klassischen Hybridfahrzeu-

gen (HEVs) tritt diese Begrenzung häufiger auf, da sie im Vergleich zu Plug-in-Hybriden über eine kleinere Hochvolt­batterie verfügen. Diese ist konstruktiv auf kurzfristige Lade- und Entladevorgänge ausgelegt, wodurch der nutzbare Energiespeicher begrenzt ist und die Rekuperation schneller eingeschränkt wird. Plug-in-Hybridfahrzeuge profitieren hierbei grundsätzlich von einer höheren Rekuperationskapazität durch ihre größere Hochvolt­batterie, die auch bei längeren Gefällestrecken mehr Energie aufnehmen kann, bevor eine Leistungsbegrenzung erfolgt.

Um dennoch eine gleichbleibende Verzögerungswirkung bereitzustellen, leiten viele Vollhybridsysteme in solchen Situationen eine sogenannte motorbasierte Bremsstrategie ein. Hierbei wird der Verbrennungsmotor über die elektrische Maschine kontrolliert in eine höhere Drehzahl versetzt. Der entstehende mechanische Widerstand wirkt dabei bremsend auf das Fahrzeug. Dieses Verhalten äußert sich in einem scheinbaren Leerlauf mit erhöhter Motordrehzahl, obwohl keine Leistungsanforderung besteht. Die dabei erzeugte Energie wird nicht zur Fortbewegung genutzt, sondern systemintern in Wärme oder elektrische Verluste umgewandelt, um eine kontinuierliche Verzögerung sicherzustellen. Dieses Verhalten ist integraler Bestandteil der hybriden Bremsstrategie und dient der Fahrstabilität sowie der Schonung mechanischer Bremssysteme, stellt jedoch keinen Fehlerzustand dar. Die Rekuperation und deren Regelung bilden vielmehr eine zentrale Komponente der Energiebilanz und des Fahrkomforts moderner Hybridfahrzeuge.

6. Aktivierungsbedingungen für den Elektromodus

Der Elektromodus eines Plug-in-Hybridfahrzeugs ermöglicht lokal emissionsfreies Fahren und ist ein zentrales Element der elektrifizierten Antriebsstrategie. Seine Aktivierung hängt jedoch von einer Vielzahl technischer, thermischer und fahrdynamischer Parameter ab, die im Fahrzeug durch Steuergeräte kontinuierlich überwacht und bewertet werden. Nur wenn alle relevanten Voraussetzungen erfüllt sind, wird der rein elektrische Fahrbetrieb freigegeben. Diese Freigabe basiert auf herstellereigenen Strategien zur Sicherstellung der Systemfunktion, des Energiehaushalts und der Fahrzeugsicherheit. Der Elektrobetrieb ist beispielsweise in folgenden Situationen eingeschränkt:

- Die Hybrid-Batterie verfügt über keine ausreichende Ladung.
- Die für den Elektromodus vorgesehene, maximale Fahrgeschwindigkeit wird überschritten.
- Die fahrzeugführende Person fordert eine Antriebsleistung, welche nicht allein über den Elektromotor bereitgestellt werden kann (z. B. bei Kick-Down bzw. Vollgasanforderung).
- Die Außentemperatur liegt außerhalb eines definierten Bereichs.
- Die Anforderung an die Innenraumklimatisierung macht den Betrieb des Verbrennungsmotors erforderlich.
- Wenn Komponenten geschützt werden müssen oder Gefahr von erhöhtem Verschleiß besteht.
- Wenn Ölverdünnung vorliegt.²

Diese Bedingungen verdeutlichen, dass der Elektrobetrieb keine permanente Verfügbarkeit garantiert, sondern in Abhängigkeit vom Systemzustand dynamisch aktiviert oder deaktiviert wird. Die Freigabelogik dient dabei sowohl dem Schutz der Fahrzeugkomponenten als auch der Funktionssicherheit im Fahrbetrieb.



Abbildung 4: Automatische Deaktivierung des Elektromodus

7. Zusammenfassung

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse lässt sich für Plug-in-Hybride im Wesentlichen festhalten:

- Plug-in-Hybridfahrzeuge sind keine reinen Elektrofahrzeuge, sondern kombinieren den Elektro-

und Verbrennungsmotor; die Hauptlast trägt dabei das Verbrennungsaggregat.

- Das Plug-in-Hybrid-Konzept sieht keine permanente Batterieaufladung durch den Verbrennungsmotor vor.
- Ein Teil der Batteriekapazität wird stets für eine verbrauchsoptimierte Fahrstrategie vorgehalten.
- Rekuperation und Lastpunktanhebung ermöglichen begrenzte Nachladung, ersetzen aber keine Netzladung.
- Die Hochvoltbatterie erlaubt elektrisches Fahren auf Kurzstrecken, setzt aber regelmäßiges externes Laden voraus.
- Die Aktivierung des Elektromodus kann bei ungünstigen äußeren Bedingungen (z. B. Temperatur, Ladezustand) temporär deaktiviert sein.

Plug-in-Hybride sind aus energetischer Sicht so ausgelegt, dass sie idealerweise nach jeder Fahrt extern aufgeladen werden. Erfolgt dies nicht, bleibt der Ladezustand dauerhaft niedrig, was zur Folge hat, dass elektrische Fahranteile nicht zur Verfügung stehen. Die noch vorhandene Energie wird dann ausschließlich zur Effizienzsteigerung des Verbrennungsmotors verwendet - ein elektrischer Fahrbetrieb ist in diesem Fall nicht möglich. Von einem technischen Mangel kann dann ausgegangen werden, wenn der Elektromodus nicht verfügbar ist, obwohl die vom Hersteller definierten Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel *Aktivierungsbedingungen für den Elektromodus*) erfüllt sind. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Einflussgrößen, die durch den Fahrer direkt beeinflussbar sind und solchen, die ausschließlich durch die Fahrzeugelektronik bewertet werden. Letztere sind für den Fahrer oft nicht erkennbar und können beispielsweise durch Abweichungen einzelner Sensorsignale im Toleranzbereich ausgelöst werden. In solchen Fällen erscheint in der Regel keine Warn- oder Kontrollleuchte, sondern lediglich ein Hinweis im Display des Kombiinstrumentes.

Trier, im April 2025

²Bei mehrfachem Starten des Verbrennungsmotors ohne ausreichenden Temperaturanstieg kann unverbrannter Kraftstoff in das Motoröl gelangen. Dadurch wird die Schmierwirkung gemindert und der Verschleiß erhöht. Um dem entgegenzuwirken, erzwingt die Motorelektronik den Start des Verbrennungsmotors, um eine Erhöhung der Motortemperatur und damit die des Motoröls zu erreichen. Mit steigender Öltemperatur verdampft der Kraftstoff im Motoröl, wodurch das Öl seine ursprüngliche Viskosität und damit seine Schmierfähigkeit wiedererlangt.