

Individualität und Vielfalt

Paradigmen künftiger Mobilität

Prof. Dr. Peter Gutzmer

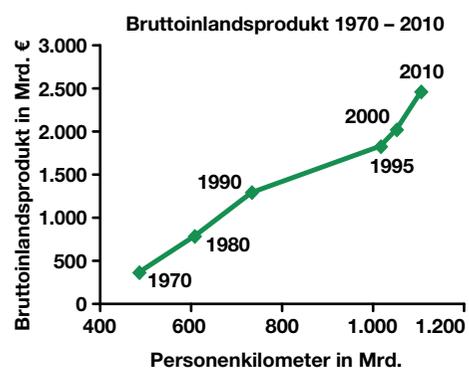


Anforderungen an die Mobilität der Zukunft

Mobilität und Klimaschutz

Mobilität ist nicht nur ein Grundbedürfnis des Menschen, sie korreliert auch streng mit wirtschaftlichem Wachstum. Dies gilt nicht nur für den Personenverkehr (Bild 1), sondern auch für den Gütertransport, insbesondere auf der Straße. Experten gehen davon aus, dass es zu einem selbstverstärkenden Effekt zwischen Verkehrs- und Wirtschaftsleistung kommt [1].

Eine Entkopplung von Verkehrs- und Wirtschaftswachstum ist, anders als beim Gesamtprimär-Energieverbrauch, bislang nicht gelungen. Trotz der erheblichen Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch, die in den letzten Jahrzehnten durch technischen Fortschritt möglich waren, steigen die Gesamtemissionen von Kohlendioxid aus dem Verkehrssektor weiter an. Die Politik reagiert darauf mit immer strengeren Grenzwerten.



Quellen: Statistisches Bundesamt und VDA

Bild 1 Entwicklung des deutschen Bruttoinlandsprodukts und der jährlich zurückgelegten Personenkilometer für verschiedene Jahre im Zeitraum 1970 bis 2010

Dabei handelt es sich um ein weltweites Phänomen, bei dem die Grenzwerte, wenn auch mit zeitlichem Versatz, konvergieren (Bild 2).

Die Europäische Union hat sich Ende 2013 auf die weltweit strengsten CO₂-Grenzwerte verpflichtet [2]. Demnach gilt ab dem Jahr 2020 ein Flottengrenzwert von 95 g/km, wobei dieser zunächst von 95 % der Flotte und ab dem 1.1.2021 von 100 % zu erfüllen ist. Fahrzeuge, die weniger als 50 g/km emittieren, können für drei Jahre (2020-2022) mehrfach angerechnet werden. Der Gesamteffekt aus der Mehrfachanrechnung („Supercredits“) ist je Flotte auf 7,5 g/km beschränkt.

Die Hauptaufgabe für die künftige technische Entwicklung des Kraftfahrzeugs ist damit bereits beschrieben: Es geht darum, den steigenden Mobilitätsbedarf mit einem geringeren Ressourceneinsatz, insbesondere niedrigeren CO₂-Emissionen, zu decken. Aus der Korrelation zwischen Wirtschaftswachstum und Mobilität ergibt sich aber auch, dass der größte Zuwachs im Fahrzeugbestand in den Wachstumsregionen außerhalb der „alten“ Industrienationen der Triade erfolgen wird. Dabei stellt sich die Frage, ob sich technische Konzepte aus Europa – der Heimatregion von Schaeffler – unverändert übertragen lassen.

Was will der Kunde? – Die Schaeffler-Mobilitätsstudie

Die Frage nach der Übertragbarkeit von Technologien von einer auf eine andere Region wird oft einseitig auf den Kostenaspekt verengt. Dabei droht die Gefahr, den Kunden mit seinen Bedürfnissen aus dem Blick zu verlieren. Aus diesem Grund hat Schaeffler einen umfassenden Ansatz gewählt, um sich die Entwicklung künftiger Marktszenarien zu erarbeiten. Eine jüngst abgeschlossene

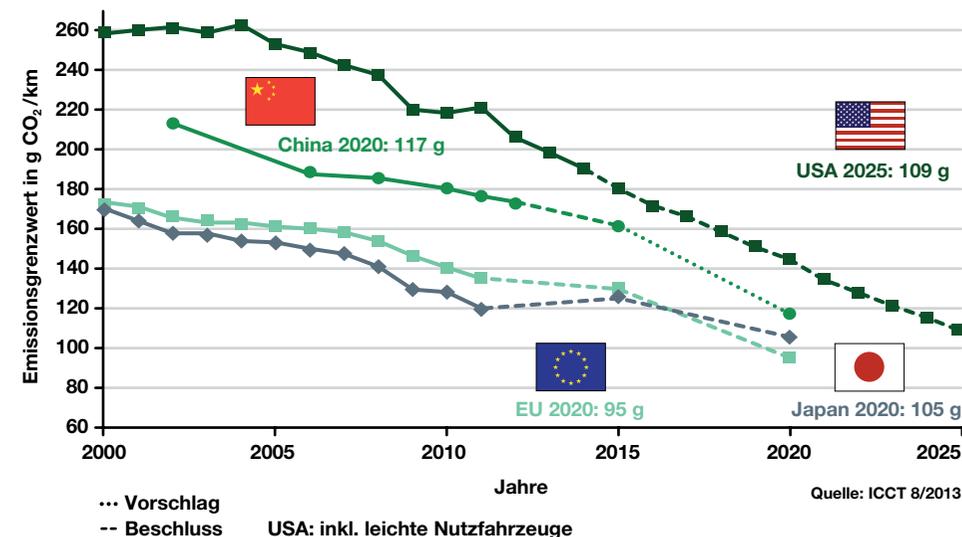


Bild 2 CO₂-Grenzwerte für wichtige Pkw-Märkte

Mobilitätsstudie basiert auf einer dreistufigen Methodik:

1. Erstellung von Mobilitätsmustern für zwölf ausgewählte Weltregionen
2. Clustern der Muster in einer Matrix
3. Ausarbeitung von vier Tiefenszenarien für die künftige Mobilität.

Schritt 1: Die Mobilitätsmuster

In einem ersten Schritt wurden in Workshops zwölf detaillierte Mobilitätsmuster für ausgewählte Weltregionen erstellt. Die Muster analysieren nicht nur die Ist-Situation, sondern extrapolieren in das Jahr 2025. Der fachliche Input kam dabei von internen Experten, wobei auch Quellen außerhalb des Unternehmens verwendet wurden. Beispielhaft sind im Folgenden Auszüge aus vier der Analysen dargestellt:

Mit einem durchschnittlichen Haushaltseinkommen von 52.900 € (2011) darf der New Yorker Stadtteil **Manhattan** zweifelsohne als wohlhabend bezeichnet werden. Die hohe Verkehrsdichte führt vor

allem tagsüber zu permanent überfüllten Straßen. Die Bereitschaft der Einwohner, den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zu nutzen ist hoch, für sie hat die Minimierung der Reisezeit absolute Priorität. Allerdings stößt die Kapazität des ÖPNV ebenfalls an seine Grenzen. Gleichzeitig will die Stadt die aus dem Verkehr resultierenden Lärm- und Schadstoffemissionen reduzieren. Zu den Lösungsansätzen gehören nicht nur ein Ausbau des ÖPNV und eine vermehrte Fahrradnutzung, sondern auch die Einführung kleiner, wendiger Elektrofahrzeuge, um die Verkehrsflächennutzung zu maximieren. Im Rahmen der Nachhaltigkeitsinitiative „PlaNYC“ plant die Stadt daher, ein dichtes Netz an Ladestationen für Elektrofahrzeuge einzurichten. Städtische Fuhrparks sollen zudem um Elektrofahrzeuge erweitert werden.

Einen Kontrast dazu stellt das deutsche Bundesland **Mecklenburg-Vorpommern** dar, das mit 1,6 Millionen Menschen etwa gleich viele Einwohner wie Manhattan hat – allerdings bei 260-facher Fläche. Nicht nur die Bevölkerungsdichte, sondern auch

das durchschnittliche Einkommen ist mit 22.884 €/Person (2011) deutlich geringer. Außerhalb der Städte ist der ÖPNV aufgrund der schwachen Nachfrage nicht gut ausgebaut. Entsprechend wird ein Großteil des Personenverkehrs mit – überwiegend gebrauchten – Fahrzeugen zurückgelegt. Da gleichzeitig die Bevölkerung älter wird, ist mit einer Zunahme mobiler Dienstleistungen zu rechnen. Bereits heute wird in Mecklenburg-Vorpommern ein mobiler medizinischer Dienst erprobt.

Ganz anders sind die Verhältnisse in der 2,7-Millionen-Metropole **Medellín** in Kolumbien. Die Bevölkerungsdichte ist mehr als 7.000 Einwohnern je Quadratkilometer sehr hoch, wobei ein großer Teil der ärmeren Bevölkerung in inoffiziellen Siedlungen am Stadtrand (Favelas) lebt. Um in die Innenstadt zu kommen, ist bislang „Paratransit“ das bevorzugte Transportmittel. Dabei handelt es sich um privat betriebene Kleinbusse oder Großraumtaxis ohne festen Routenverlauf oder definierte Haltestellen. Ein Ausbau des offiziellen ÖPNV und striktere Emissionsstandards für Fahrzeuge könnten die von Smog geplagte Innenstadt entlasten. Hinzu kommt eine ungewöhnliche Idee: Medellín hat zwei Seilbahnlinien in den regulären ÖPNV integriert; sie bedienen Favelas an den Hängen der Stadt und besitzen eine Transportkapazität von 3.000 Personen pro Stunde.

Wieder einen anderen Ansatz verfolgt **Bangkok**. Die Metropolregion mit mehr als 12 Millionen Einwohnern verfügt heute über einen für Schwellenländer beachtlichen Wohlstand, das Jahreshaushaltseinkommen beträgt ca. 9.600 € (2007), mehr als doppelt so viel wie in Medellín. Das Straßennetz ist völlig überlastet, die Bereitschaft der Einwohner, mit dem ÖPNV zur Arbeit zu pendeln ist hoch. Allerdings stehen die weit verbreiteten Busse mit den Pkw im Stau. Ein Ausbau des Schienenverkehrs wäre langwierig und teuer, daher setzt Bangkok auf ein „Bus Rapid Transport“-System. Dabei han-

delt es sich um Linienbusse, die eigene, vom übrigen Verkehrsraum vollständig abgetrennte Spuren und metroartige Haltestellen nutzen. Die Transportkapazität ist mit 18.000 Personen/Tag auf der ersten, 16,5 km langen Strecke sehr hoch, die Kosten liegen um den Faktor 20 unter denen für eine Hochbahn.

Diese Mobilitätsmuster beweisen vor allem eines: Es gibt nicht die eine, allumfassende Antwort auf die Bewältigung des wachsenden Verkehrs. Es herrscht Vielfalt, die auf jeweilige lokale Voraussetzungen bis hin zur Topographie reagiert. Zudem zeigt sich, dass zumindest in den urbanen Räumen die Kommunen einen ausgesprochenen Lösungswillen zeigen und die Mobilität als Faktor im Standortwettbewerb erkannt haben.

Schritt 2: Clusterung

In einem zweiten Schritt wurde nach einer Systematik hinter den einzelnen Mustern gesucht. Dazu wurden die regionalen Mobilitätsmuster einer dreidimensionalen Matrix mit den Dimensionen Urbanisierungsgrad, Kaufkraft der Nutzer und wirtschaftlicher Entwicklungsstand der Region zugeordnet (Bild 3).

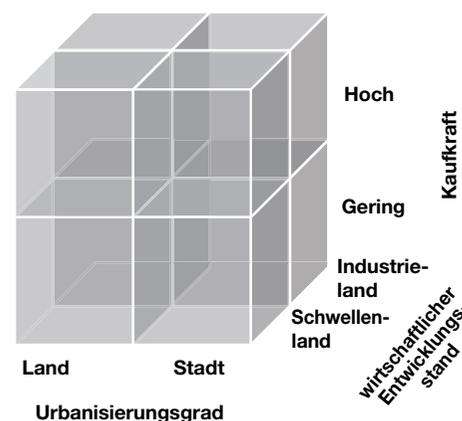


Bild 3 Matrix zur Einordnung von Mobilitätsmustern

Es zeigt sich, dass alle untersuchten Muster eindeutig einem der Kuben in der Matrix zugeordnet werden können: So erfüllt Manhattan die Kriterien „Stadt – Industrieland – hohe Kaufkraft“, während Mecklenburg-Vorpommern bei „Land – Industrieland – geringe Kaufkraft“ eingeordnet werden kann. Die Clusterung ist für die Übertragbarkeit von Lösungen von einer auf die andere Region von entscheidender Bedeutung.

Schritt 3: Tiefenszenarien

In einem dritten und abschließenden Schritt wurden vier Tiefenszenarien ausgearbeitet, die nach Ansicht von Schaeffler die Mobilität der Zukunft bestimmen werden. Diese sind:

Betrachtung der kompletten Energiekette

Künftige Mobilitätslösungen werden nicht mehr nur noch aus isolierten Einzelmaßnahmen bestehen, sondern die CO₂-Bilanz der gesamten Energiekette einbeziehen. Dabei ist insbesondere die Erzeugung von Strom für Elektroautos beziehungsweise von Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge zu betrachten. Hinzu kommt, dass in einer primär auf volatile erneuerbare Energien bestehende Energieversorgung die Frage der Speicherung eine wesentliche Rolle spielt. Egal ob Methanisierung von Wasserstoff oder Elektroautos als Teil eines Smart grid – immer häufiger wird Mobilität als Teil des Energiesystems verstanden werden.

Neue Mobilitätskonzepte für die Stadt

Intermodaler Verkehr mit reibungslosem Wechsel zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln wird in der Stadt der Zukunft eine Selbstverständlichkeit darstellen. Für die Weiterentwicklung des Kraftfahrzeugs bedeutet dies: Es muss sich nahtlos in den vernetzten urbanen Verkehr einfügen

können. Zudem wird in vielen rasch wachsenden Städten außerhalb der klassischen Industrieländer die Mehrheit der Bevölkerung eine pragmatische Haltung zur eigenen Mobilität entwickeln und den jeweils zeit- und kosteneffizientesten Weg wählen.

Ressourceneffiziente interurbane Mobilität

Für einen wachsenden Anteil der Weltbevölkerung wird es wichtig, sich zeiteffizient zwischen den urbanen Wirtschaftszentren zu bewegen. Die Ressourceneffizienz wird bei allen Verkehrsträgern, ob Flugzeug, Hochgeschwindigkeitszug oder Automobil, zunehmend zum entscheidenden Merkmal. Gleichzeitig schreitet die Automatisierung des interurbanen Verkehrs fort; dies gilt auch für das Automobil (autonomes, automatisiertes oder pilotiertes Fahren).

Umweltverträgliche Antriebe

Über die Energieeffizienz und damit die Umweltverträglichkeit von Mobilität entscheidet zu einem großen Teil der Fahrzeugantrieb. Daher wird die Entwicklung energieeffizienter Antriebe auch künftig erste Priorität genießen. Dazu gehört sowohl die Optimierung existierender Antriebe als auch die Einführung ganz neuer Konzepte. Der Anspruch, weniger oder eines Tages gar kein CO₂ mehr zu emittieren, erstreckt sich nicht nur auf die Nutzung eines Fahrzeugs, sondern auf dessen kompletten Lebenszyklus, vor allem die Produktion.

Energieeffizienz als Treiber der Antriebsentwicklung

Es ist weitgehend unumstritten, dass sogenannte „konventionelle“ Fahrzeugantriebe – bestehend aus Verbrennungsmotor und Getriebe mit hoher Spreizung – in näherer Zukunft den weitaus größten Teil des weltweiten Individualverkehrs dominieren. Wie viel Prozent des Marktanteils in den nächsten Jahren von elektrischen Antrieben übernommen wird, variiert je nach Region und politischen Vorgaben. Bild 4 zeigt die Prognose des renommierten Marktforschungsunternehmens IHS.

Aus den Marktdaten wird ersichtlich, dass eine wirkungsvolle Strategie zur Minderung der CO₂-Emissionen aus dem Individualverkehr die Effizienzsteigerung

klassischer verbrennungsmotorischer Antriebe priorisieren muss. Da der Dieselmotor als Effizienz Antrieb nur in einigen Weltregionen wie Europa, Indien und Südkorea hohe Marktanteile erzielen wird, ist die Optimierung des Ottomotors nach wie vor die wichtigste Aufgabe der Motorenentwicklung.

Muda – Minimierung der Verlustleistung

Erster Ansatzpunkt für die Optimierung jedes Prozesses ist die Betrachtung der anfallenden Verluste, also die Steigerung des Wirkungsgrades. In der Produktionswelt ist diese Herangehensweise als Muda-Prinzip bekannt. Es geht auf den Ingenieur Taiichi Ōno zurück, der als Erfinder des Toyota-Produktionssystems gilt. „Muda“ bedeutet nichts anderes als „vermeide Verschwendung“.

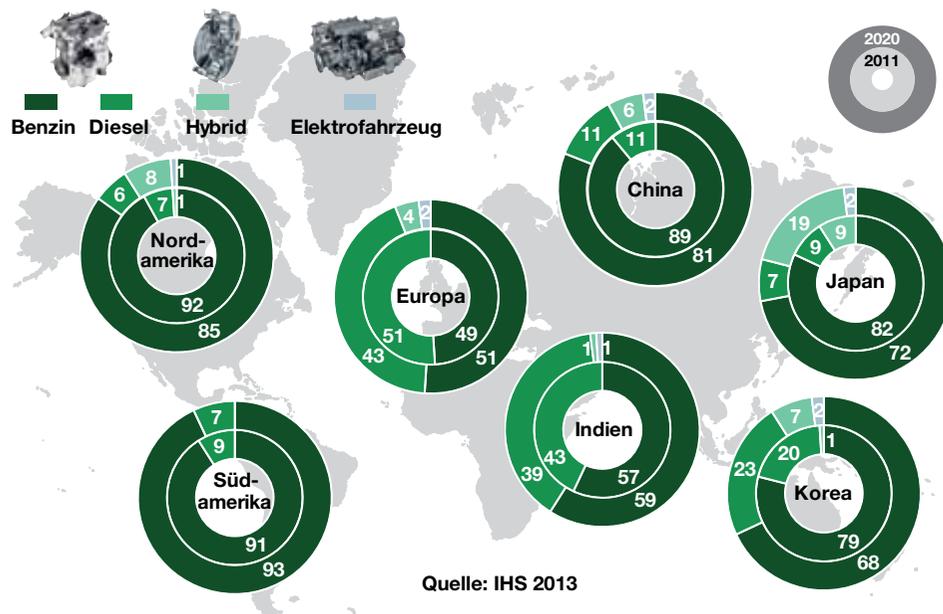


Bild 4 Produktionsanteile verschiedener Antriebskonzepte in den Weltregionen für die Jahre 2011 und 2020 in Prozent

Übertragen auf den Fahrzeugantrieb gilt es, die Verlustleistungen, die den realen Motor vom thermodynamisch optimalen Prozess unterscheiden, konsequent zu analysieren und dann technische Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Verminderung von Reibleistung im Antriebsstrang, die nach [3] den Kraftstoffverbrauch eines Mittelklassefahrzeugs mit Ottomotor um mindestens 3 % vermindern kann.

Ein Beispiel für angewandte Reibleistungsminimierung sind wälzgelagerte Leichtbau-Ausgleichswellen. Im Zuge der Reduzierung von Hubraum und Zylinderanzahl kommen vermehrt Ausgleichswellen zum Einsatz, die für die vom Kunden verlangte Laufruhe kleiner Motoren mit hoher spezifischer Leistung sorgen. Das Problem: Ausgleichswellen „verzehren“ einen Teil der eingesparten Energie wieder, und zwar sowohl durch die notwendige Beschleunigung ihrer Masse als auch durch die Reibleistung in ihrer Lagerung. Schaeffler hat mit einer neuen wälzgelagerten Ausgleichswelle eine Lösung geschaffen. Zum einen sind die Ausgleichswellen geometrisch so optimiert, dass bei einem Vierzylindermotor eine Massenreduktion von bis zu 1 kg möglich ist. Gleichzeitig wurde durch die Wälzlagerung der Welle(n) eine Reibungsreduzierung bis zu 50 % realisiert (Bild 5).

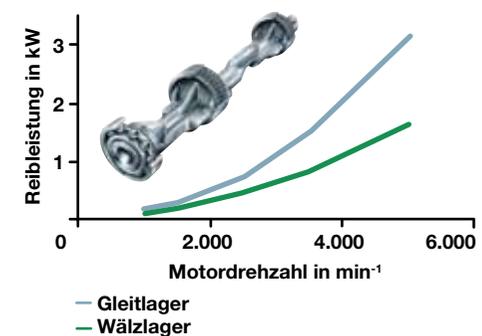


Bild 5 Reibleistungsminimierung durch wälzgelagerte Ausgleichswellen



Bild 6 Axialnadellagerung von Planetenrädern

Auch im Getriebe, das durch zahlreiche sich drehende, lastübertragende Teile gekennzeichnet ist, kann der ohnehin hohe Wirkungsgrad weiter gesteigert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Substitution der Gleitlagerung für Planetenräder durch Axialnadellager (Bild 6). Im dritten Gang ergibt sich beispielsweise eine Reduktion der maximalen Reibleistung von 470 W auf nur noch 50 W. Dies bedeutet für ein Gesamtgetriebe mit vier Planetensätzen im dritten Gang eine um 420 W geringere Reibleistung und mithin eine Reduzierung um 90 %. Auf Basis der Simulation ist mittels Substitution der Gleitscheiben durch Axialnadellager im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) eine Verbrauchsreduzierung von rund 0,5 % zu erwarten.

Es ist dringend anzuraten, die Analyse von Verlustleistungen nicht auf die Motor-Getriebe-Einheit zu beschränken, sondern den kompletten Antriebsstrang bis hin zum Rad zu betrachten. Dann werden weitere Verlustquellen in den Blickpunkt geraten, etwa das Achsgetriebe oder das Radlager. Hier wurden in den vergangenen Jahren, etwa durch den Ersatz von Kegelrollenlagern durch Tandem-Schräggugellager im Hinterachsdifferential, signifikante Fortschritte erzielt.

Mehrwert durch mehr Variabilität

So wichtig die Minderung von mechanischen Übertragungsverlusten im Antriebsstrang auch ist. Sie allein wird nicht zu einem thermodynamischen Optimum führen. Denn die in einem Motor entstehenden Verluste sind darüber hinaus wesentlich von den betriebspunktabhängigen Drosselverlusten geprägt. Dies gilt für moderne Verbrennungsmotoren umso mehr, da die Ventilöffnungszeiten nicht allein nach dem Kriterium maximaler Leistungsausbeute gesteuert werden können, sondern die vom Brennverlauf abhängigen Schadstoffemissionen wichtiges Auslegungskriterium geworden sind. Ideal wäre aus thermodynamischer Sicht daher eine, von der auf den jeweiligen Betriebspunkt angepasste, völlig freie Steuerung des Gasaustausches. Dieses Ideal wäre nur durch elektromechanische, von der Pleuellwelle völlig entkoppelte Ventile zu erreichen. Gegen die Realisierung sprechen allerdings derzeit viele Argumente, zum Beispiel könnte ein Software-Fehler zur sofortigen Motorzerstörung führen.

Eine erste Annäherung an das Ideal bieten Systeme zur Pleuellwellen-Phasenverstellung. Sie ermöglichen das „Schieben“ der Ventilerhebungskurve, also früheres

oder späteres Öffnen oder Schließen der Ventile. Der Hubverlauf als solcher bleibt dabei unverändert. Ein wesentliches Qualitätskriterium der Phasenverstellung ist die Verstellgeschwindigkeit, die in der Regel in Grad Pleuellwinkel pro Sekunde ($^{\circ}\text{KW/s}$) ausgedrückt wird. Die höchsten Verstellgeschwindigkeiten, aber auch völlige Freiheit der Ventilöffnungszeitenpunkte bei einem Motorstart bieten elektromechanische Phasenversteller. Ein solches System wird Schaeffler 2015 erstmals auf den Markt bringen. Da mit einer elektromechanischen Lösung jedoch auch hoher Aufwand verbunden ist, entwickelt Schaeffler parallel dazu hydraulische Versteller weiter.

Mit verschiedenen technischen Lösungen wie zum Beispiel schaltbaren Tassenstößeln kann der Ventilhub – meist zwischen zwei fest definierten Punkten – variiert werden. Damit ist eine wichtige Voraussetzung geschaffen, um in Bereichen niedriger Last die Drosselverluste zu begrenzen.

Nahezu vollständige Variabilität schafft erst das elektrohydraulische Ventiltriebssystem UniAir, das Schaeffler vor rund vier Jahren in Serie gebracht und seither für ca. 400.000 Motoren produziert hat. Es ermöglicht die beliebige Formung des Hubverlaufs innerhalb einer gegebenen Maximalerhebungskurve (Bild 7).

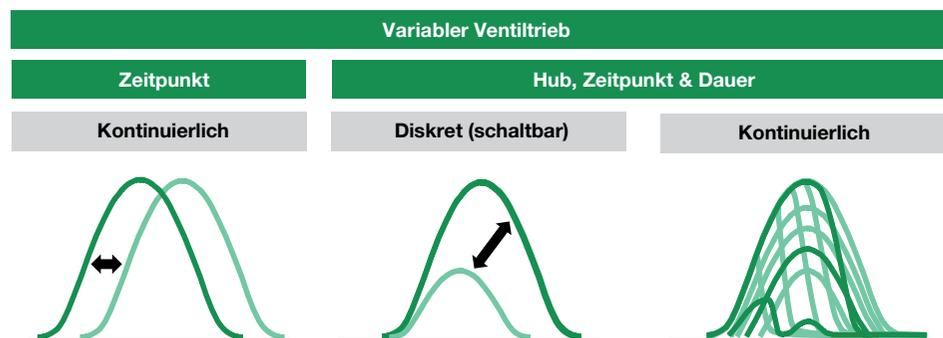


Bild 7 Variable Hubverläufe durch Pleuellwellen-Phasensteller (links), schaltbare Ventilbetätigung (Mitte) und das elektrohydraulische Ventiltriebssystem UniAir (rechts)

Die bislang vorhandenen Applikationen von UniAir beschränken sich auf die Einlassseite. Dabei werden die beiden Einlassventile über eine hydraulische Brücke gleichzeitig angesteuert. Schon diese Lösung ermöglicht eine Verbrauchsminderung um bis zu 15 %, verglichen mit einem Saugmotor als Ausgangsbasis. Auf dem Schaeffler-Kolloquium 2014 wird eine Vielzahl neuer Funktionen gezeigt, die mit einem weiterentwickelten UniAir zu realisieren sind. Dazu gehört beispielsweise eine Ventilüberschneidung, die über einen zweistufigen Antriebsnocken realisiert wird. Werden solche Funktionen konsequent genutzt, sind weitere CO_2 -Potenziale zu erschließen – übrigens nicht nur beim Ottomotor, sondern auch bei Dieselmotoren bis hin zu Schiffsantrieben.

Mehr Variabilität für geringeren CO_2 -Ausstoß, das ist nicht nur ein Thema für den Motor, sondern auch für Getriebe und Fahrwerk. Dazu einige Beispiele:

- Bei Getrieben ist ein klarer Trend zu höheren Spreizungen und damit zu einer höheren Gangzahl zu erkennen. Mit solchen Getrieben ist es möglich, den Motor möglichst oft in Betriebspunkten mit niedrigem spezifischen Verbrauch zu betreiben. Diese Entwicklung hat Konsequenzen für klassische Schaeffler-Produkte wie Kupplungen, da mit der Anzahl der Gänge auch die Anzahl der Schaltungen zunimmt.
- Mehr Variabilität kann also auch zu weniger Reibung führen: Neu ist ein schaltbares Radlager für Fahrzeuge mit hoher Rad-/Achslast. Es handelt sich um ein vierreihiges Schrägkugellager. Bei Geradeausfahrt werden nur die mittleren Kugeln belastet, die äußeren sind unbelastet. Bei Kurvenfahrt kommen die äußeren Kugeln zum Eingriff. Sie unterstützen das Fahrverhalten in der Kurve mit der geforderten hohen Steifigkeit. Erste Versuchsergebnisse zeigen eine weitere Reibungsreduzierung von mehr als 25 %.

Intelligente Elektrifizierung

Je strenger die CO_2 -Vorgaben werden (und je weniger Marktanteil der Dieselmotor hat), desto eher ist für die Automobilhersteller ein Punkt erreicht, an dem eine Elektrifizierung des Antriebs sinnvoll wird. Der CO_2 -mindernde Effekt hängt stark vom Grad der Elektrifizierung ab, die im wesentlichen durch die Leistung der elektrischen Maschine und den Energiegehalt des Akkus beschrieben werden kann. Denn diese Parameter bestimmen die Funktionen, mit denen der Verbrauch kohlenstoffhaltigen Kraftstoffs vermieden werden kann:

- Abstellen des Motors beim Anhalten (Start-Stopp) oder im Schubbetrieb bei höherer Geschwindigkeit (Segeln)
- Verschieben des Motorlastpunktes in Bereiche mit gutem spezifischem Verbrauch („Boosten“)
- Rekuperation ansonsten als Wärme verlorener Bremsenergie
- elektrisches Fahren in Niedriglastbereichen, in denen ein Verbrennungsmotor mit sehr ungünstigem Wirkungsgrad betrieben wird
- Nutzung regenerativ gewonnener Energie für den Antrieb, sofern die Batterie extern geladen werden kann.

Unglücklicherweise steigt mit zunehmender elektrischer Leistung auch der technische und finanzielle Aufwand. Dies gilt insbesondere, aber nicht nur für die Batterie. Um Mobilität bezahlbar zu halten, ist daher eine abgestufte Vorgehensweise bei der Elektrifizierung sinnvoll (Bild 8). Schaeffler entwickelt Lösungen für alle Stufen der Elektrifizierung, seit 2012 gebündelt im Systemhaus eMobilität.

	12 V	48 V	HV	Mikro-Hybrid	Mild-Hybrid	Voll-Hybrid	Plug-in-Hybrid	Elektroauto
Funktionalität				Start-Stop	Boosten, Rekuperation	E-Creeping, Stop-and-Go, E-Sailing	Elektrisches Fahren	Elektrisches Fahren in allen Bereichen
Laden am Netz							ja	ja
Leistung E-Maschine		0,5 ... 8 kW		8 ... 20 kW	10 ... 50 kW	30 ... 125 kW	30 ... 125 kW	30 ... 125 kW
Spannungslage		12 ... 48 V		48 ... 280 V	48 ... 400 V	200 ... 400 V	200 ... 400 V	200 ... 400 V
Elektr. Reichweite						0,1 ... 5 km	10 ... 50 km	> 75 km
CO₂-Einsparung		4 ... 6 %		12 ... 16 %	15 ... 25 %	> 50 %	> 50 %	bis 100 %
E-Wheel Drive								
E-Achse								
Hybridmodul								
Start-Stop								

Bild 8 Stufen der Elektrifizierung

Bezahlbar und effizient: Das 48-V-Bordnetz als Chance

Bis vor kurzem bedeutete die Hybridisierung eines Fahrzeugs, das klassische 12-V-Bordnetz um eine Hochspannungsebene zu ergänzen. In heutigen Serien-Hybridfahrzeugen werden Spannungen bis 400 V erzeugt, in Prototypen wurden sogar Spannungen von bis zu 700 V realisiert, um eine möglichst kompakte Bauweise der elektrischen Aggregate zu ermöglichen.

Getrieben von aktiven Fahrwerken mit ihren typischerweise kurzzeitig auftretenden Leistungsspitzen führen erste Automobilhersteller in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts ein 48-V-Teilbordnetz ein. Für den Antrieb ist dies eine große Chance, da sich auf dieser Spannungsebene elektrische Traktionsmotoren mit einer Leistung von bis zu 15 kW bei moderaten Systemkosten sinnvoll realisieren lassen. Die niedrigeren Kosten sind zum Teil auf die deutlich geringeren Sicherheitsanforderungen zurückzuführen. So

muss bei Komponenten eines 48-V-Bordnetzes kein eigener Berührungsschutz ausgeführt werden. Im Verbund mit einem kleinen Lithium-Ionen-Akku (ca. 125 Wh) sind dennoch kurze elektrische Fahrstrecken mit niedriger Geschwindigkeit zu realisieren, etwa beim Einparken oder im Stop-and-Go-Verkehr. Funktionen wie Boosten oder Rekuperation mit einer deutlich verbesserten Energieaufnahme sind ebenfalls möglich.

Für die technische Realisierung des 48-V-Hybridantriebs arbeitet Schaeffler an zwei Lösungen, die auf dem Kolloquium 2014 detailliert vorgestellt werden: einer 48-V-Variante des getriebeintegrierten Hybridmoduls und einer elektrischen Achse.

Die elektrische Maschine anstelle des Wandlers in ein Automatikgetriebe zu integrieren, hat sich in bisherigen Hybridfahrzeugen bewährt, da auf diesem Weg kein zusätzlicher Bauraum vorgehalten werden muss. Dieser Weg ist natürlich auch mit einem 48-V-Hybridmodul gangbar. Eine zusätzliche Herausforderung ergibt sich allerdings dadurch, dass der Getriebe-Auto-

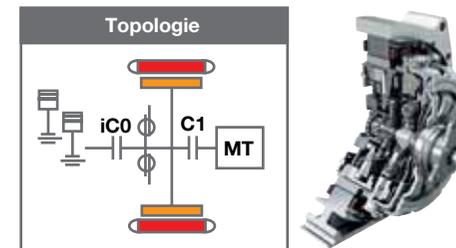


Bild 9 Impulskupplung mit integrierter elektrischer Maschine für die Kombination mit einem Handschaltgetriebe

matisierungsgrad zumindest in Europa genau in jenen Fahrzeugklassen gering ist, für die die Hybridisierung mit einem relativ kostengünstigen 48-V-Ansatz attraktiv ist. Daher hat Schaeffler verschiedene Lösungen für die Kombination des Hybridmoduls mit einem Handschaltgetriebe entwickelt, die auf dem Kolloquium 2014 vorgestellt werden. Besonders attraktiv scheint der Einsatz einer Impulskupplung (Bild 9).

Dabei entfällt der Starter, der Verbrennungsmotor wird ausschließlich durch Schließen der Kupplung auf Drehzahl gebracht oder von der E-Maschine des Hybrid-

moduls direkt gestartet. Es handelt sich um eine sehr schnell schaltende Kupplung, die hohe Wechsellmomente von bis zu 1.500 Nm übertragen können muss. Verbaut wird das komplette Hybridmodul in diesem Fall einschließlich der elektrischen Maschine kurbelwellenseitig.

Alternativ ist die Verwendung einer elektrischen Achse auf 48-V-Basis für Automobilhersteller eine attraktive Lösung, da in diesem Fall der klassische Teil des Antriebsstrangs mit Ausnahme der Motorsteuerung völlig „unangetastet“ bleiben kann. Die Integration einer 48-V-Achse in den Antriebsstrang kann in verschiedenen Konfigurationen erfolgen (Bild 10). Möglich sind sowohl die Unterstützung der angetriebenen Achse in front- als auch in heckgetriebenen Fahrzeugen. Zudem lässt sich ein elektrischer Antrieb der Hinterachse bei einem frontgetriebenen Fahrzeug realisieren – eine Konfiguration, die gelegentlich als „elektrischer Allradantrieb“ beschrieben wird. Schließlich könnte die elektrische Antriebskraft auch auf Vorder- und Hinterachse verteilt werden, was allerdings eine doppelte Ausführung der E-Maschinen und der Leistungselektronik bedeuten würde.

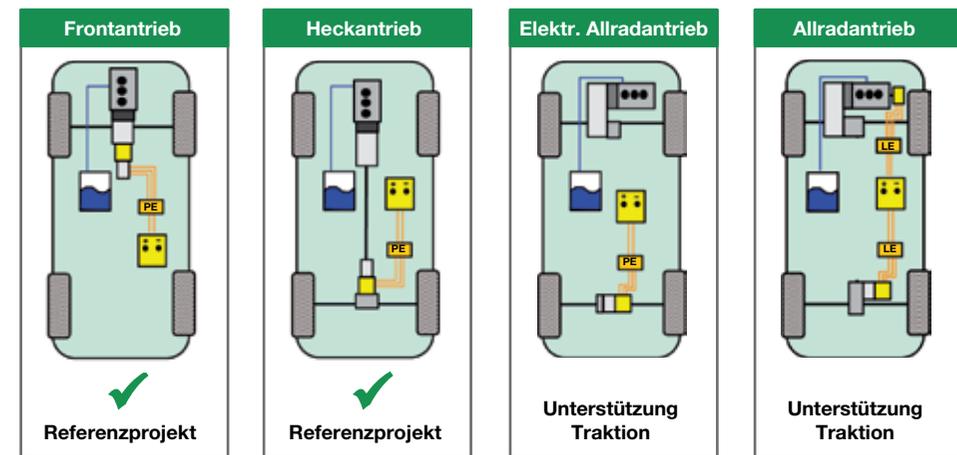


Bild 10 Fahrzeugtopografien mit elektrischem Achsantrieb

Der 48-V-Hybrid mit elektrischer Achse wird im Rahmen des Kolloquiums 2014 ausführlich dargestellt.

Sportlich und dynamisch: Hochvolt-Hybridtechnologie

Künftig werden große sowie sportliche Fahrzeuge vermehrt als Plug-in-Hybride ausgeführt, um besonders günstige Normverbräuche ausweisen zu können. Durch den Trend zu Plug-in-Fahrzeugen ist eine deutliche Steigerung des elektrischen Leistungsbedarfs zu beobachten. Hybridfahrzeuge sollen künftig den kompletten Testzyklus elektrisch durchfahren können. Wesentliches Entwicklungsziel für die nächste Generation des Schaeffler-Hybridmoduls war daher eine Steigerung der Leistungs- und Momentendichte in Verbindung mit verringertem Bauraumbedarf. Gleichzeitig steigen die Drehmomente der in Hybridfahrzeugen verwendeten Verbrennungsmotoren an. Die zweite Generation des Schaeffler-Hybridmoduls trägt diesem Markttrend Rechnung. Die Übertragung extrem hoher Drehmomente bis zu 800 Nm wird durch eine patentierte Verzweigung des Kraftflusses ermöglicht. Das Moment des Verbrennungsmotors wird sowohl über die geschlossene Trennkupplung als auch parallel über einen Freilauf in Richtung Getriebe geleitet.

Auch die Hochvoltvariante der elektrische Achse ist in den vergangenen vier Jahren in wesentlichen Punkten weiterentwickelt worden. Die derzeit erprobte dritte Generation ist an die Topologie eines Plug-in-Hybridfahrzeugs mit Frontmotor und Frontantrieb angepasst. Die Antriebseinheit ist weiterhin für den koaxialen Einbau in die Hinterachse ausgelegt. Es kommen wassergekühlte Elektromotoren in Hybridbauweise (permanenterregte Synchronmotoren mit hohem Reluktanzanteil) zum Einsatz. Diese entsprechen Automobil-spezifischen

Anforderungen im Gegensatz zu den in der ersten Generation verwendeten Industrielmotoren.

Das Getriebe ist weiterhin in Planetenbauweise ausgeführt, besitzt nun aber zwei Übersetzungsstufen. Der Aufbau ist bei gesteigerter Leistungsdichte modular ausgeführt, so dass Traktion und aktive Momentenverteilung (Torque Vectoring) auch als separate Funktionen angeboten werden können.

Urban und flexibel: Antriebe für Elektrofahrzeuge

Wie im ersten Abschnitt dargestellt, werden in Metropolen mit hoher Bevölkerungsdichte und hohem Wohlstand zunehmend Elektrofahrzeuge als Teil des intermodal geprägten Verkehrsmix auftreten. Die meisten dieser Fahrzeuge sind zunächst Modellvarianten von Baureihen, in denen konventionelle Antriebsstränge dominieren. Daher sind die meisten elektrischen Fahrzeuge derzeit mit Zentralantrieb ausgestattet.

Mit zunehmender Marktdurchdringung werden aber auch batterieelektrische Fahrzeuge angeboten werden, die spezifisch auf die Anforderungen des urbanen Verkehrs hin entwickelt werden. Für solche Fahrzeuge hält Schaeffler den Radnabenantrieb für die beste Lösung. Da ein „Motorraum“ völlig entfällt, sind neue Karosseriebauformen möglich, die eine sehr gute Raumausnutzung bieten – eine gute Voraussetzung für den Verkehr in ohnehin überfüllten Innenstädten. Zudem entfallen Antriebswellen, dadurch kann der Radeinschlagswinkel erhöht werden. Damit ergibt sich aus Kundensicht eine deutlich bessere Manövrierbarkeit.

Für den Kunden erhöhen sich Fahrvergnügen und Sicherheit, da die Regelgüte des Antriebs durch die direkte Übertragung – ohne Getriebe und Seitenwellen –

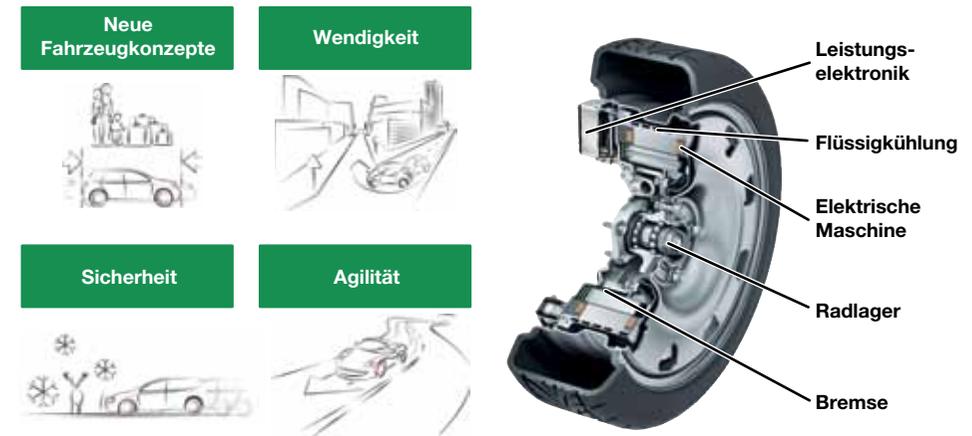


Bild 11 Radnabenantrieb mit integrierter Elektronik – aktueller Entwicklungsstand

über der von Zentralantrieben liegt. Für die Kundenakzeptanz kleiner Stadtmobile werden diese klassischen Zielwerte der Automobilentwicklung entscheidend sein. Nur aus Vernunftgründen – wenig Verkehrsfläche und gute CO₂-Bilanz – werden Elektrofahrzeuge nicht marktfähig sein.

Aus dieser Motivation heraus entwickelt Schaeffler seit 2007 Radnabenantriebe. Der aktuelle Entwicklungsstand (Bild 11), wurde in Kooperation mit dem Ford-Forschungszentrum Aachen in einen Ford Fiesta eingebaut, der als Erprobungsfahrzeug dient. Dabei stieg das Gesamtfahrzeuggewicht gegenüber einem baugleichen Fahrzeug mit Dieselmotor nicht (1.290 kg leer). Darin enthalten ist ein Lithium-Ionen-Akku mit einer Nennkapazität von 16,2 kWh.

Mit dem Erprobungsfahrzeug Fiesta eWheelDrive wurden auf einem Testgelände verschiedene Fahrdynamikerprobungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass der Prototyp einem zum Vergleich gefahrenen Serienfahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von 130 km/h zumindest ebenbürtig war. Bei Manövern, die das Potenzial des Torque Vectoring nutzten, wurden teilweise

sogar deutliche Leistungssteigerungen sichtbar. So konnte bei einem standardisierten Wedeltest mit einem Pylonenabstand von 18 m die Durchfahrtsgeschwindigkeit um rund 10 km/h gesteigert werden.

Im Forschungsprojekt MEHREN (Multi-motor-Elektrofahrzeug mit höchster Raum- und Energieeffizienz und kompromissloser Fahrsicherheit) arbeitet Schaeffler mit Ford und Continental sowie der RWTH Aachen und der Hochschule für angewandte Wissenschaften Regensburg bereits an der nächsten Generation von Radnabenantrieben. Der Schwerpunkt des Vorhabens liegt auf der Umsetzung einer neuen, auf die Spezifika von Radnabenantrieben ausgerichteten Software-Architektur. Mit dem MEHREN-Projekt soll zudem erstmals gezeigt werden, welche Potenziale für neue Fahrzeug-Architekturen bestehen, wenn der Radnabenantrieb von vornherein als Standardantrieb genutzt wird. Dazu entsteht bis 2015 ein virtueller Prototyp.

Zusammenfassung und Ausblick

Mobilitätslösungen der Zukunft sind mehr denn je auf die individuelle Anwendung zugeschnitten. Dem folgt die Entwicklung des Fahrzeugantriebs als entscheidender Faktor für die Energieeffizienz in jeder Mobilitätskette. Weiterentwickelte, hocheffiziente Verbrennungsmotoren und Getriebe arbeiten Hand in Hand mit elektrischen Antrieben, die auf die jeweilige Fahrzeugkonfiguration abgestimmt werden, sich aber dennoch der Kernkomponenten eines Baukastensystems bedienen.

Um in der Vielfalt möglicher Lösungen die richtigen zu identifizieren, beschäftigt sich Schaeffler nicht nur mit technischen Potenzialen, sondern den grundlegenden Veränderungen von Märkten und Kundenbedürfnissen. In einem strukturierten Prozess werden diese Anforderungen in Lösungs-ideen und anschließend in technische Innovationen überführt. Getreu dem Motto von Thomas Edison, der mit seinem Labor „Menlo Park“ die erste Innovationsfabrik gegründet hatte: „Ich finde heraus, was die Welt benötigt, dann erfinde ich es“.

Literatur

- [1] Eichhorn, U.: Zukunft der Mobilität – grün, sauber und vernetzt. cti Getriebesymposium, 2013
- [2] Council of the European Union (Hrsg.): Informal agreement on car CO₂ emissions reduction. Pressemitteilung, 29. November 2013
- [3] Ernst, C.; Eckstein, L.; Olchewski, I.: CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020. Studie, 2013