



Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 1

Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration



1.0 Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppe „Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration“ untersucht elektrische und elektrifizierte Antriebssysteme, für den Einsatz in Pkw und Nutzfahrzeugen in Hinblick auf die Ziele der NPE. Die Antriebssysteme beinhalten dabei Elektromotoren, leistungselektronische Komponenten, Hoch-Volt-Verkabelungen, Getriebe sowie diverse elektrische Nebenaggregate.

Die heute vorhandene technologische Leistungsfähigkeit der deutschen Industrie im Bereich der Elektromotoren und der Leistungselektronik gründet sich auf Produkte, die in kleineren Stückzahlen und vorwiegend nicht für den mobilen Einsatz entwickelt, hergestellt und genutzt werden. Voraussetzung, um den Markteinstieg durch Kostensenkung zu sichern, sind die zügige und signifikante Erhöhung der Stückzahlen und die Etablierung automotiver Produktionstechnologien in möglichst dicht folgenden Lernzyklen.

Benchmark für die Elektrotraktion in Deutschland sind die heutigen und in naher Zukunft geplanten Produktionsvolumina in anderen Teilen der Welt. Die chinesischen Programme zur Elektromobilität, sowie die großen Hybridvolumina insbesondere japanischer Hersteller und Zulieferer sind eine ernste Gefahr bzw. echte Konkurrenz zum deutschen Anspruch.

Die Erreichung der Arbeitsziele in Hinblick auf Leitmarkt- und Leitanbieter für Elektromobilität erfordert im Bereich des elektrischen **Antriebssystems** eine abgestimmte und schwerpunktmäßige Vorgehensweise in folgende Richtung (Werte im Vergleich der Jahre 2010 und 2020):

- Die Kosten für das Gesamtsystem müssen um 2/3 gesenkt werden.
- Die Leistungsdichte (kW/l) und das Leistungsgewicht (kW/kg) sind zu verdoppeln.
- Der durchschnittliche Wirkungsgrad im Betrieb ist um mehr als 5 % Punkte zu steigern.
- Die Zuverlässigkeit und Qualität sind zu verbessern.

Dafür sind umfassende Maßnahmepakete im Bereich der Forschung, der Entwicklung und der Produktionstechnologien identifiziert worden. Die schnell erforderlichen Fortschritte hinsichtlich der Kosten lassen sich durch **Standardisierung** und **einheitliche Schnittstellen** in einer **modularen** und vorerst technologieunabhängigen **Systemarchitektur** erzielen.

Neben der Optimierung der Systemarchitektur und der schrittweise physikalischen Integration der Komponenten zu Antriebsmodulen ist die **Materialforschung** für neue hart- und weichmagnetischen Materialien, zur Oberflächenveredlung und Grundlagenforschung zu Halbleitertechnologien /-physik eine weitere zwingende Voraussetzung für langfristige Erfolge auf dem Gebiet der Elektro-Antriebe. In der Fertigung muss synchron zur Erhöhung der Stückzahlen der Automatisierungsgrad signifikant gesteigert werden. In jedem Fall sind die Kosten durch **große Stückzahlen** positiv zu beeinflussen.

Eine Bündelung, Beschleunigung und Förderung der Aktivitäten von der Forschung bis hin zu produkt- und produktionsnaher Entwicklung in Kompetenzzentren und Leuchtturmprojekten für die Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration wird empfohlen. Hierfür sollten auch vorhandene Instrumente der industriellen Gemeinschaftsforschung genutzt werden.

1.1 Selbstverständnis und Aufgabenbeschreibung

a) Gegenstand und Rahmenbedingungen

Die Arbeitsgruppe „Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration“ untersucht elektrische und elektrifizierte Antriebssysteme für den Einsatz in Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in Hinblick auf die Ziele der NPE. Der Transfer der Erkenntnisse auf schwere Nutzfahrzeuge soll berücksichtigt werden.

Diese Systeme bestehen typischerweise aus den Elementen E-Maschine, Leistungselektronik, dem Getriebe, Steuergeräten, HV Bauteilen, dem Ladegerät, dem Kühlsystem und mechanischen Bauteilen, die untereinander und mit dem Rest des Fahrzeugs durch komplexe Schnittstellen verbunden sind. (Die Batterie wird in diesem Bericht an anderer Stelle behandelt.) Handlungsbedarfe in Forschung, Voraus- und Serienentwicklung sowie bei der Fertigung für alle Systemelemente und das Gesamtsystem waren zu identifizieren.

b) Konkrete Beschreibung der Arbeitsziele in Hinblick auf Leitmarkt- und Leitanbieter

Zur Orientierung und Beschreibung eines **gemeinsamen** Aufsattpunktes für den heutigen Stand der Entwicklungen und weitere, in die Zukunft gerichtete, Arbeiten und Betrachtungen, sind **Referenzfahrzeuge** definiert worden. Hierbei handelt es sich um virtuelle Konstrukte, die es den Mitgliedern der NPE über einzelne Sachgebiete hinweg erlauben, Abstimmungen von Zielen und Inhalten vorzunehmen und Fortschritte zu referenzieren. Zum Beispiel kann aus diesen Angaben die jeweils passende Batterie oder der Elektromotor abgeleitet werden. Diese Referenz kann und soll keine vollständige Beschreibung aller im zukünftigen Portfolio enthaltenen Fahrzeuge sein und darf auch nicht als verbindlicher und ausschließlicher Anforderungskatalog gesehen werden.

In die Auswahl wurden ein typisches kleines Stadtfahrzeug, ein Familienauto und ein leichtes Nutzfahrzeug genommen, weil diese gut zu ersten Überlegungen für elektrische Fahrzeuge im urbanen Raum passen. Die zitierten Fahrzeugsegmente umfassen heute ca. 60 % der gesamten Flotte auf deutschen Straßen. Sie können auch als Orientierung für andere Fahrzeugklassen (z. B. schwere Nutzfahrzeuge) herangezogen werden.

	Stadtfahrzeug	Familienfahrzeug	Nutzfahrzeug
Fahrzeugsegment	A/B	C/D	<7,5 t
Reichweite elektrisch und total (NEDC) [km]	160 / -	50 / 600	20 / 500
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	130	130e / 180	60e / 90
Beschleunigung (0-50 km/h) [sec]	4	4	8
Leergewicht /Zuladung [kg]	1100 / 400	1500 / 500	4600 / 2900
T-Bereich volle Performance [°C]	-25 bis +50	-25 bis +50	-25 bis +50
Lebensdauer [Jahre/ T km]	10 a / 150	10 a / 150	10 a / 450
Schnelle Zwischenladung [Ja/Nein]	Ja	Ja	Ja

Tab. 1: Referenzfahrzeuge – wichtige funktionale Eigenschaften prognostiziert für 2020

Technologieführerschaft kann durch messbaren technischen Fortschritt im Bereich des **elektrischen Antriebssystems** in Richtung folgender Ziele ermöglicht werden (Werte im Vergleich der Jahre 2010 und 2020):

- Die Kosten für das Gesamtsystem müssen um 2/3 gesenkt werden.
- Die Leistungsdichte (kW/l) und das Leistungsgewichts (kW/kg) sind zu verdoppeln.
- Der Wirkungsgrad ist um mehr als 5 % Punkte zu steigern.
- Die Zuverlässigkeit und Qualität sind zu verbessern.

Leitanbieter zu sein setzt voraus, dass produktnahe Forschung und Entwicklung, Produktionstechnologie und Fertigung für elektrische Antriebssysteme, die Elektromotoren, die Leistungselektronik und mechanische Hauptkomponenten umfänglich in Deutschland beheimatet sind.

1.2 Allgemeine Betrachtungen

a) Was ist ein Elektroantriebssystem?

Herzstück eines Elektroantriebs sind der Elektromotor, das Getriebe, das Ladegerät, Steuergeräte, die Leistungselektronik, sowie der Energiespeicher und das Kühlsystem. (Die Batterie als Energiespeicher wird in der AG 2, Materialien für Batterien werden in AG 5 genauer untersucht und ist für die nachfolgenden Betrachtungen daher hier ausgeschlossen). Dieses Antriebssystem ist über Schnittstellen (mechanisch, elektrisch, thermisch, signaltechnisch) mit dem Fahrzeug, in das es integriert ist, verbunden.

b) Technologischer Status

Die Elektrifizierungsgrade der Antriebssysteme können sehr stark variieren. Es sind Fahrzeuge mit ausschließlich elektrischem Antrieb, aber auch Hybride aus Verbrennungskraftmaschine und Elektroantrieb oder Range-Extender-Varianten denkbar. Allen hier betrachteten Varianten ist gemein, dass sie durch Ankopplung an das externe Stromnetz aufgeladen werden können. Als Bezugssystem für die elektrifizierten Antriebssysteme wurden die oben genannten drei Referenzfahrzeuge herangezogen und die typischerweise mit diesen Referenzfällen korrespondierenden Antriebsaggregate sind funktional abgeleitet worden (Tab. 2).

	Stadtfahrzeug	Familienfahrzeug	Nutzfahrzeug
Fahrzeugsegment	A/B	C/D	<7,5 t
Leistung Maschine [kW]	50	85	100
Leistung Umrichter [kW]	55	94	110
Effizienz (Maschine + Umrichter) [%]	90	90	90

Tab. 2: Abgeleitete Schlüsselparameter für E-Antriebe je Referenzfahrzeug

Eine technologische Standortbestimmung anhand von einigen Schlüsselparametern für die elektrischen Antriebssysteme macht den Umfang des Handlungsbedarfes in den einzelnen Feldern sichtbar (Tab. 3).

Kosten Euro/kW (bezogen auf Spitzenleistung)	Kosten Euro/kW (bezogen auf Spitzenleistung)	Leistungs- gewicht kW/kg	Leistungs- gewicht kW/kg	Wirkungs- grad % (gemittelt NEFZ)	Wirkungs- grad % (gemittelt NEFZ)
2010	2020	2010	2020	21010	2020
60...100	20* (bei 100000 Eh/a)	0,8 ... 1,0	2,0	82-84	>88

Tab. 3: Ist/Soll-Vergleich einiger Schlüsselparameter für elektrische Antriebssysteme (prognostisch für hohe Stückzahlen)

1.3 Wettbewerbsanalyse

a) Kompetenz in Deutschland

Elektromotoren:

In Deutschland werden für industrielle Anwendungen über 5 Mio. Elektromotoren pro Jahr hergestellt, das entsprechende Know-how ist damit in hohem Maße vorhanden. Der für Anwendungen in der Elektromobilität relevante Leistungsbereich ab 25 kW hat jedoch einen Stückzahlanteil von deutlich unter 10 %. Motoren in diesem Leistungsbereich werden heutzutage weitestgehend in luftgekühlter Asynchrontechnik hergestellt und somit häufig in variantenreicher Kleinserienfertigung.

Basierend auf der jahrzehntelangen Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft innerhalb der Netzwerke der industriellen Gemeinschaftsforschung, gibt es auf diesem Gebiet ein umfangreiches Wissen und weitreichende Kompetenzen in Deutschland, die hinsichtlich der Industrieantriebe mit denen in Ostasien – vorzugsweise Japan – ebenbürtig sind. Hinsichtlich automotiver Fertigungstechnologien (Großserie) ist uns Japan jedoch um einige Jahre voraus.

Mechanische Bauteile/Getriebe:

Die Führungsrolle Deutschland bei der Fertigung mechanischer Bauteile und Getriebe ist unbestritten. Die Produktion zeichnet sich durch eine hohe Effizienz in der Großserie aus. Allerdings werden die Anforderung durch die Elektromobilität vor allem eine verstärkte mechatronische Integration und eine drastische Verschärfung der Leichtbauanforderungen mit sich bringen. Ursache ist die Notwendigkeit der Erhöhung der Leistungsdichte. Für hochintegrierte, mechatronische Komplettsysteme stehen großserienfähige Technologien heute nur im Ansatz zur Verfügung. Gleiches gilt für den Einsatz von Verbundwerkstoffen. Weiterhin stellen die Kostenstrukturen einer hoch automatisierten Großserienfertigung für die anfänglich deutlich geringen Stückzahlen der E-Mobilität eine Herausforderung bei der Umstellung der Produktion dar.

Leistungselektronik:

Deutschland ist Technologieführer auf dem Gebiet der Leistungselektronik für industrielle Anwendungen mit einer ausgeprägten Engineering-Kompetenz zur Entwicklung von Halbleitertechnologien und Architekturen unter Verwendung passiver Bauelemente, Schaltungsträger und geeigneter Verbindungstechnik, Gehäusen und Steckern.

Laut ZVEI wurden in Deutschland im Jahr 2009 1,473 Mio. Stück sogenannter Wechselrichter für Elektromotoren gebaut. Hiervon entfallen knapp 446 Tausend Einheiten auf die Leistungsklasse größer 7,5 kVA (ca. 12 % der weltweiten Produktion).

Anwendungen der Leistungselektronik für Antriebe im Bereich der für die Elektromobilität relevanten Leistungsklasse ab 25 kW Dauerleistung liegen heute im industriellen Bereich (Antriebe von Fertigungsanlagen, Bahnen und Förderfahrzeugen) und sind nach automobilen Qualitätsanspruch nicht für den Einbau in PKW und leichten Nutzfahrzeugen geeignet. Geprägt ist dieses Segment von einer hohen Variantenvielfalt bei gleichzeitig geringem Volumen pro Variante.

b) Benchmarking vergleichbarer Volkswirtschaften

Der Vergleich der deutschen mit anderen Volkswirtschaften ist vor allem eine Frage der heutigen und in naher Zukunft geplanten Produktionsvolumina und weniger des Standes der eingesetzten Technologien.

Heute werden in Deutschland ca. 5 Mio. **Elektro-Motoren** produziert, insgesamt in Europa 10–12 Mio., 7–8 Mio. in Amerika (hier sind Brasilien und Mexiko recht stark), 15–18 Millionen in Asien. Schwerpunkt liegt hier in China und Japan. Für China wird das Produktionsvolumen auf 7–9 Mio. Stück geschätzt.

Im Hinblick auf den internationalen Wettbewerb bei der Fertigung der **Leistungselektronik** lässt sich sagen, dass Japan den Konvertierungsprozess Industrie zu Auto aufgrund der früher gestarteten Serienanwendung von Elektronantrieben im Auto bereits begonnen hat. Dieser zeitliche Vorteil Japans kann und muss aufgeholt werden.

In China wird massiv in den Aufbau eigener Fertigungskapazitäten für **Antriebssysteme** investiert. So werden in China in einer ersten Welle 13 Städte und ca. 33.500 Elektrofahrzeugen und in einer zweiten Welle weitere 7 Städte mit einer offenen Anzahl Fahrzeugen ausgestattet, die in China produziert werden. Es ist die Absicht 2020 15 Millionen Elektroautos auf dem chinesischen Markt zu haben. Dafür gibt es eine sehr gute Erfolgchance, da bereits heute 140 Millionen elektrisch betriebene Zweirädern in China vorhanden sind. Neben dem positiven Stückzahleffekt ist die Beschleunigung der technologischen Lernkurven erheblich. Dabei ist es für China unerheblich, dass die funktionalen Spezifikationen unterhalb unserer Zielvorgaben bleiben – die Elemente der positiven Skaleneffekte und die damit zwangsläufig forcierte Standardisierung liefern eine breite Grundlage für zukünftige Entwicklungen. In Europa gibt es ein ähnliches Vorgehen in Frankreich. Hier stellt das Programm zum Kauf von 10.000 Elektrofahrzeugen durch die Post bis 2012 und von weiteren 90.000 Elektrofahrzeugen bis 2015 durch Regierungsorganisationen einen erheblichen Marktimpuls mit den bereits erläuterten positiven Effekten dar.

c) SWOT zur Position der deutschen Industrie im globalen Markt

Die SWOT Analyse wurde zu folgender Fragestellung durchgeführt: Wie entwickeln wir Deutschland zum Leitmarkt und Leitanbieter für Elektrotraktion bis 2020?

Stärken

- Technologieführerschaft in Automobilbau und -entwicklung
- Spitzentechnologie in Teilbereichen verfügbar, z. B. E-Motoren
- Omnipräsenter Benchmark Verbrennungskraftmaschine
- Exzellentes Systemverständnis
- Exzellentes Know-how für Komponentenentwicklung und -fertigung
- Mechatronik- und Regelungstechnikkompetenz
- Entwicklungs- und Fertigungsnetzwerke (industrielle Gemeinschaftsforschung)
- Kultur der Zusammenarbeit OEM – Zulieferer

Schwächen:

- Keine Technologieführerschaft E-Antrieb für Fahrzeuge
- Defensivposition (Aufholjagd im globalen Kontext)
- Neigung zum Over-Engineering (mehr als der Kunde fordert)
- Fehlende Übung in produktnaher Zusammenarbeit im Wettbewerb
- Hohe Fertigungskosten am Standort
- Mangelnde Standardisierung
- Umgang großer und kleiner Unternehmen miteinander ist verbesserungswürdig
- Simulations- und Modellierungstools werden nicht in Deutschland entwickelt

Chancen:

- Technologieführerschaft in neuen Gebieten ist offen
- Festlegung geeigneter Systemarchitekturen und abgestimmter Schnittstellen
- Standardisierung und Automatisierung für die Großserie
- Rohstoffrecycling
- Kompetenzzentren für vorwettbewerbliche Entwicklung und Benchmark
- Nutzung bestehender Instrumente zur Förderung und Zusammenarbeit
- Mind Shift: „Low Cost is High Tech“

Gefahren:

- Fakten zum konkreten Markteintritt der Wettbewerber
- Langsamkeit durch Variantenvielfalt
- Verzettelung der Ressourcen
- Geringe Stückzahlen in der Markteinführungsphase
- Kannibalisierung der Verbrennungsmotorprodukte und Entwicklungsressourcen
- Rohstoffverfügbarkeit und –preisstabilität
- Fremdgesteuerter Ansatz (Reaktion auf China)

d) Ableitung von Handlungszielen

Das Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken unserer Automobilindustrie passen

Das Festlegen gemeinsamer technischer und ökonomischer Ziele (funktional und technologieoffen) erlaubt es, die Innovationskraft auf breiter gesellschaftlicher Basis zu heben. Wenn es darüber hinaus gelingt, eine intelligente, zukunftsfähige **Architektur** des Elektroantriebs zu definieren, die eine Vielzahl technischer Lösungen erlaubt, die modular und skalierbar aufgebaut ist, und die die maximale Anzahl von standardisierten Bauteilen enthält, kann das das deutsche Erfolgsrezept sein. Die Vorteile liegen in der Konzentration der Entwicklung auf einige Varianten und im positiven Effekt bei den zu produzierenden Stückzahlen. Diese Architektur sollte die vorteilhafte Basis der Zusammenarbeit aller Protagonisten entlang der gesamten Wertschöpfungskette sein. Modularität und Skalierbarkeit, sowie die Integration des Antriebs ins Fahrzeug sorgen für die notwendige Differenzierung.

Durch **Systemintegration** lassen sich signifikant die Kosten reduzieren, die Performance verbessern und die Effizienz steigern. Unser Wettbewerbsvorteil in den komplexen Lösungen zur Elektromobilität ist umso größer, je besser wir die Systemintegration beherrschen. Hieraus kann sich echte Technologieführerschaft entwickeln, die sich auch ausreichend von einfachen technischen Lösungen der Konkurrenz differenziert. Intelligente Systemlösungen und eine ganzheitliche Systemarchitektur können zu drastischen Vereinfachungen führen, die Variantenvielfalt sinnvoll beschränken und massive Veränderungen im Wertschöpfungsbereich mit sich bringen. Solche Lösungen zeichnen sich durch eine optimale Balance zwischen Anzahl der Komponenten, Zuverlässigkeit, Gesamtgewicht, Gesamtwirkungsgrad und Kosten aus. Z. B. Durch den Einsatz von mehrstufigem Getriebe können die Hauptkomponenten im Wirkungsgrad Optimum betrieben werden. Es ist eine Anpassung der heutigen Getriebe auf Elektrofahrzeuge nötig. Die Optimierung von Motor und Leistungselektronik durch die Verbindung mit variablen Getrieben wird zusätzlich die Sicherheit und Lebensdauer erhöhen. Auch eine Überdimensionierung von Motor und Leistungselektronik für das Anfahren kann wegfallen.

Wie können wir Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen

Die vorwettbewerbliche und vor allem produktnahe Zusammenarbeit muss gestärkt werden. Basis hierzu kann die Organisation der **industriellen Gemeinschaftsforschung** sein und, ergänzt durch Verbundprojekte in Leuchttürmen und/oder Kompetenzzentren, bedeutend verbessert werden.

Es ist zu prüfen, ob und wie die **bestehende Wissenschaft/Wirtschafts-Kooperation Deutschland-China** auf die Entwicklungsarbeiten zur Elektromobilität fokussiert werden und dadurch eine win-win-Situation erreicht werden kann. Aus der in China erwarteten hohen Marktdynamik zur Elektromobilität in Verbindung mit dem zu erzielenden Kostenniveau für Entwicklung und Produktion lassen Schlussfolgerungen ableiten, die auf Deutschland übertragen werden können und nachhaltig zum Aufbau einer internationalen Spitzenposition der Deutschen Automobilindustrie in der Elektromobilität beitragen.

Welche Stärken können wir nutzen, um Bedrohungen abzuwenden

Die Nationale Plattform E-Mobilität und alle Industrieverbände sollten einen Gesinnungswechsel im Industriekodex mittragen und propagieren: „**Low-Cost ist High Tech**“. Damit lenken wir den Fokus der ungebrochenen deutschen Innovationskraft auf unsere vordringlichste Entwicklungsaufgabe: Senkung der Kosten für exzellente technische Ideen in der elektrischen Antriebstechnologie. Das, in Kombination mit **neuen Recyclingstrategien** für nachhaltige, versorgungssichere und kosteneffiziente Lösungen kann unseren Erfolg sichern (siehe auch AG 5 Recycling).

Investitionen in hochautomatisierte **Fertigungsstrecken** sind ein geeignetes Mittel, um ein Abwandern des produzierenden Gewerbes in Billiglohnländer zu verhindern und unterstützen es langfristig den Know-how- und Technologievorsprung als Marktanbieter zu garantieren.

Durch die NPE müssen Initiativen ermöglicht werden, die unsere Anstrengungen und Ressourcen in Entwicklung und Fertigung bündeln und nicht verzetteln. Die Unterstützung von Entwicklungs- und Fertigungskonsortien wird angeregt. Der Ausbau unserer traditionellen Stärken (z. B. hohe Materialkompetenz für Leichtbau), welche in Elektrofahrzeugen noch an Bedeutung gewinnen, ermöglichen eine stärkere technische Differenzierung (siehe auch AG).

Welche Verteidigungsstrategien können wir entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen?

Dies ist durch einen Paradigmenwechsel im „German Engineering“ zu erreichen, indem die aktuellste Methodik und Technologie auf einfache und robuste Fahrzeugkonzepte sowie die zugehörige Produktionstechnologie projiziert werden. Produktkliniken Untersuchungen in China können dies aktiv unterstützen. Die entsprechenden Studiengänge und berufsbildende Lehrgänge sind zu fokussieren, um im Bewusstsein die Balance zwischen Funktionalität und Kosteneffizienz in den Köpfen der nächsten Ingenieur- und Technikergeneration zu verankern (siehe auch AG 6). Von dieser Systematik wird Deutschland profitieren, da diese Denkweise in Entwicklung und Produktion der nächsten Generation von Elektrofahrzeugen maßgeblich zur Wettbewerbsfähigkeit und zur Standortsicherung beitragen wird.

Lehre und Forschung sowie Berufsausbildung sollten verstärkt dem Kompetenzaufbau für E-Mobilität beinhalten. Es wird angeregt, die Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft in allen relevanten Wissens- und Technologiefeldern zu intensivieren und **Kompetenzzentren** entlang der Handlungsbedarfe der NPE zu etablieren.

1.4 Roadmap

a. Milestone-Planung

Die für 2020 formulierten Ziele der Nationalen Plattform müssen durch intensive Anstrengungen in der Forschung, Produktentwicklung und Fertigung erarbeitet werden. Im Zeitraum bis 2020 werden wir im Wesentlichen drei Produktgenerationen finden. Fahrzeuge, die mit heutiger Technik aufgebaut werden. Fahrzeuge, die ca. 2017 am Markt sein werden und solche, die bis 2020 in den Markt eingeführt werden.

b. Milestone Beschreibung

Heute

Leistungselektronik basiert auf elektronischen Bauelementen, Leistungsmodulen, Steckern, Gehäusen und Kabeln, die bereits im industriellen Umfeld eingesetzt werden. Bei elektrischen Maschinen werden Magnetkreise aus Eisen und Permanentmagnetwerkstoffen mit Wicklungen aus Kupfer oder Aluminium verknüpft. Die Fertigungsverfahren und die Qualitätssicherungsverfahren sind den jetzt üblichen Stückzahlen bei Industrieantrieben angepasst und haben sich in der Praxis über Jahrzehnte hinweg bewährt.

2017

Die Vereinheitlichung von Steckern, Gehäusen und Kabeln ermöglicht eine Kostendegression. Die elektronischen Bauelemente werden geringere Verlustleistung und verbesserte Kühlkonzepte aufweisen, sodass der Aufwand zur Kühlung reduziert werden kann. Durch die beginnende Zusammenführung von Motor und Leistungselektronik können bei entsprechenden Stückzahlen Systemkostenvorteile erzielt werden. Es muss frühzeitig damit begonnen werden, die Produktionsverfahren von E-Maschinen an die Erfordernisse automotiver Stückzahlen > 100 000 p.a. anzupassen. Hier muss die deutsche Industrie den Vorsprung der japanischen Industrie aufholen. Es besteht jedoch die Chance, durch Nutzung der Stärken der deutschen Industrie beim kreativen Engineering hier Wettbewerbsvorteile zu erarbeiten.

Die Fertigungstechnologien für elektrische Maschinen stehen in direkter Wechselwirkung mit dem Magnetkreiskonzept und den Performancedaten des Motors, so dass dieser Problemkreis von beiden Seiten gleichzeitig angegangen werden muss.

Bis 2017 muss beispielsweise die Entwicklung folgender Produktionstechnologien mit den entsprechenden Motorenkonzepten abgeschlossen sein:

- Entwicklung großserienfähiger Wickeltechnologien und automatisierte Umsetzung
- Entwicklung Schneid-/Pakettiertechnologien und Umsetzung in Großserie
- Automatisierte Montage und Prüftechnik mechatronischer Komplettsysteme
- Großserienfähige Kontaktierungsverfahren

2020

Diese Generation wird über verbesserte, verlustärmere Elektronik und eine weiter verstärkte Integration (Leistungselektronik und Motor) Kostenverbesserungen erzielen. Hierzu werden insbesondere neue Aufbau- und Verbindungstechnologien benötigt, um robuste und für die Massenfertigung geeignete Bauelemente zu ermöglichen.

Neue Materialien und Werkstoffe (siehe auch AG 5) werden im Antriebssystem verarbeitet sein: z. B. für die Reibleistungsminimierung (Werkstoffe, Beschichtung, Struktur) und die Reduzierung des Bauteilgewichts (Leichtbauwerkstoffe). Ebenso sind Verbesserungen bei den ferromagnetischen Werkstoffen für die Magnetkreise der Motoren und bei den Permanentmagnetwerkstoffen möglich. Elektrobleche könnten höhere Isotropiegrade und geringere Verlustwerte bei linearer und drehender Ummagnetisierung aufweisen, so dass Speisefrequenzen – auch in Verbindung mit den Fortschritten bei den Leistungshalbleitern – gesteigert und sowohl leichtere als auch effizientere Maschinen möglich sind.

Der steigende Grad der Funktionsintegration lässt die Komplexität der Bauteile und Komponenten wachsen und die Qualitätsanforderungen bei den serienfähigen, robusten, skalierbaren Produktionstechnologien:

- Automatisierte Montage mechatronischer Komplettsysteme
- Großserienfähige Kontaktierungsverfahren (siehe auch AG 5)
- Fertigungsgerechte, automatisierbare Prüftechnologien
- Produktionsprozesse für neue Fahrzeug-Strukturen

Im Schritt danach werden durch neue Halbleitermaterialien weitere Reduktionen in der Verlustleistung erfahren, die eine Steigerung der Leistungsdichte und damit auch neue Integrations- und Kühlkonzepte zulassen.

1.5 Aktivitätenplanung zum Erreichen der Milestones (Handlungsfelder)

a. Produktionstechnologien

Für Elektroantriebe gibt es einen aktuellen Handlungsbedarf für Produktionstechnologien und im Bereich der Fertigung selber. Die heutigen Produktionstechniken sind im Wesentlichen auf industrielle Produkte ausgerichtet und entsprechen nicht den Anforderungen im Automobilbau hinsichtlich Kapazität, Automatisierung und Test- und Prüfverfahren. Ein sehr prominentes Beispiel ist die Entwicklung von automatisierten Wickelverfahren für Elektromotoren und deren Umsetzung in die Produktion, um höhere Taktzeiten, stabilere Qualitäten und insgesamt ein kostengünstigeres Produkt zu erreichen.

Die Fertigungsschritte für die Leistungselektronik (Bereitstellung, Montage, Anbindung an Stecker und Gehäuse, Prüfung, Systemintegration) sind für die automotiv Produktion zu ertüchtigen. Es sind Konzepte für automatisierte Produktionslinien zu entwickeln, um eine schnellere Kostenreduzierung elektrischer Antriebe zu erreichen und diese Konzepte sind zügig in Fertigungsstraßen umzusetzen. Die dafür notwendigen Aufwendungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

	Je Sachgebiet Mio. Euro	Total Mio. Euro Projektbedarf/Förderbedarfe; Zahlen ohne Investitionen
Fertigungsverfahren	150/300	500 / 250
Verbindungstechnik	25/50	
Automatisierte Prüfung und Montage	75/150	

Tab. 4: Die Entwicklungsbedarfe für Produktionstechnologie für elektrische Antriebssysteme (2011–2015)

b. Infrastrukturbedarf

Nicht zutreffend

c. F&E Bedarf inklusive Investitionen

Im Bereich der Forschung und Entwicklung gibt es Vorhaben die mit der höchsten Priorität ausgeführt werden sollten, weil die Ergebnisse maßgeblich zur Reduktion der Kosten beitragen. In einem ersten Schritt wurden die die **Standardisierungsthemen** identifiziert. In einem zweiten Schritt müssen entsprechende Standards bezüglich der Definition wichtiger Kenndaten, der HV-Systemtechnik, der Diagnosetechnologien und des Spannungsniveaus für das Gesamtsystem etabliert werden. Die Entwicklung von modularen, standardisierten Gehäuse-, Kabel- und Steckerkonzepten für die Leistungselektronik ordnet sich ebenfalls in standardisierungsrelevanten Handlungsfelder ein.

Die Erarbeitung der Grundlagen für kostenoptimale, **hochintegrierte Systemlösungen** muss sehr früh gemeinsam zwischen Industrie und Akademia erfolgen. Eine solche Systemarchitektur für die elektrischen Antriebssysteme muss mit belastbaren Integrationsschnittstellen und skalierbaren Bausteinen ausgestattet werden und technologieoffene Lösungen erlauben. Hierbei spielen neue integrative Ansätze (z. B. Motor + Leistungselektronik, Getriebe + Motor, elektrische Bremse + Reibungsbremse), neue Kühl-, NVH- und Architekturkonzepte und intelligente Aufbau- und Verbindungstechniken eine herausragende Rolle. Ein effizientes Engineering zur Systemintegration setzt den Einsatz validierter, prädiktiver Modellierungs- und Simulationstools für das Energie- und Thermomanagement, Festigkeits-, Belastungs- und Crashsimulationen als auch eine Optimierung der Fahrdynamik voraus. Kommen neue Materialien zum Einsatz ist hierfür zum Teil Grundlagenarbeit (Ableitung und Validierung der Materialgesetze) notwendig.

Materialforschung für neue

- Magnetmaterialien,
- Leichtbauwerkstoffe,
- Oberflächenveredlung,
- Grundlagenforschung zu Halbleitertechnologien sowie
- Aufbau und Verbindungstechniken

ist eine zwingende Voraussetzung für langfristige Erfolge auf dem Gebiet der E-Antriebe (siehe auch AG 5). Darauf aufbauend sind die passende Motor- und Komponentenkonzepte und Recyclingstrategien zu erarbeiten und die Grundlagen für neue **hochautomatisierten Fertigungs- und Wickelverfahren** für E-Motoren zu schaffen.

Die genauere Aufschlüsselung der Investitionsbedarfe, kann erst mit Klärung der industriepolitischen Aufstellung erfolgen.

	Je Sachgebiet Mio Euro	Total Mio Euro
	Projektbedarf/Förderbedarf	Projektbedarf/Förderbedarf
E-Maschine	500 /250	2000 / 1000
Leistungs- elektronik	700/ 350	
System	800 / 400	

Tab. 5: Die Bedarfe für gezielte F&E Projekte, Investitionen und Strukturhilfen für elektrische Antriebssysteme (2011–2015)

**d. Projektbedarf/Projektvorschläge
(Modellversuche, Demonstratoren, Anwendungsversuche, etc.)**

Die einzelnen Projektvorschläge sind im Anhang aufgeführt. Exemplarisch sind hier einige Projekte mit großem Kostenreduktionspotenzial angeführt:

E-Motor

- Maßnahmen zur Reduktion des Magnetmaterials
- Alternative Motorkonzepte
- Neue, automatisierungsfähige Wickelverfahren
- Alternative Gehäuse- und Lagerschildmaterialien
- Optimierte Lagerkonzepte
- Optimierung der E-Maschinenkonzepte
- Neue weichmagnetische Materialien

Leistungselektronik

- Modulare Gehäuse und Steckerkonzept (standardisiert)
- Leistungshalbleiter und passive Bauelemente für höchste Leistungsdichten
- Neue Kontaktierverfahren und Aufbau- und Verbindungstechniken
- Stecker und Gehäuse
- Hochintegrierte Schaltungsträger für Leistungselektronik und höchste Leistungsdichten
- In Motor integrierte Elektronik (Mechatronik)
- Hochintegrierte Elektronik mit gesamtheitlicher Regelung

Systemintegration

- Startergenerator
- Optimierung des Getriebe-E-Motor-Verbund (Baukastensystem)
- Hochintegrierte Antriebssysteme
- Entwicklung von Range Extender Lösungen
- Ganzheitliches Energie- und Thermomanagement
- Ganzheitliche Betrachtung der Systemarchitektur
- On-Board-Ladetechnologie im Fahrzeug

Produktionstechnik

- Net-Shape-Technologien für Spulenpakete
- Technologien für Leichtbauelemente aus Hybridwerkstoffen
- Technologien zur Funktionsintegration (Thermomanagement, Sensoren)
- Produktionsintegrierte Prüftechnologien
- Skalierbare Automation

Eine möglichst umfassende Bündelung verschiedener Einzelvorhaben in wenigen **Leuchtturmprojekten** wird angestrebt. Ein Leuchtturm bündelt einzelne Entwicklungsvorhaben der Roadmaps der NPE zu einem (technischen) Projektvorhaben (über die Grenzen der Arbeitsgruppen hinweg) und macht Elektromobilität in verschiedenen Aspekten für den Endkunden erlebbar. Leuchttürme haben den Charakter von Großprojekten und sind erkennbar an Erreichung von Meilensteinen und Zielvorgaben in einem festen Zeitrahmen mit einem definierten Budget gebunden. Die Realisierung der Leuchtturmprojekte kann über Beauftragung der Kompetenzzentren erfolgen. Um Technologieoffenheit und Wettbewerb zu fördern sind kompetitive Konsortien unter dem Dach eines Leuchtturms explizit gewünscht.

Für Leuchtturmprojekte eignen sich insbesondere die Themen:

- Entwicklung, Demonstration und Erprobung der Alltagstauglichkeit von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Elektrifizierungsgraden, der Antriebssysteme und -Komponenten (inklusive Leichtbauweise)
- Entwicklung einer modularen Architektur und deren Erprobung durch Demonstration verschiedener technologischer Lösungsvarianten
- Standardisierung und Optimierung von Komponenten und der externen und internen Schnittstellen des Elektro-Antriebssystems
- Ganzheitliches Energie- und Thermomanagement auf Gesamtfahrzeugebene
- Stückzahlskalierbare Produktion in virtueller Modellfabrik

Die Definition der Konzepte für diese Leuchttürme muss auf der Basis der Ergebnisse aller Arbeitsgruppen der NPE bis zum Frühjahr 2011 geleistet werden.

e. Neue Kooperationen

Es wird angeregt, **Kompetenzzentren** für elektrische Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration inklusive der dazugehörigen Materialwissenschaften und Fertigungstechnologien und Produktion wettbewerblich auszuschreiben, die die Vorhaben der NPE mit bearbeiten und die die zukünftigen Generationen von erfahrenen Fachkräften und Spezialisten heranbilden.

Diese sollen vorwettbewerbliche Themen, aber auch gemeinsame Fragen der produktnahen Entwicklung adressieren und möglichst heute vorhandenen Kompetenzzentren auf diese Aktivitäten fokussieren.

Es ist zu prüfen, ob ein Kompetenzzentrum „Produktklinik für aktives Benchmarking“ mit chinesischem Standort unsere nationalen Interessen verstärken kann. Eine genauere Definition und die Ausarbeitung tragfähiger Konzepte für diese Zentren müssen bis zum Frühjahr 2011 geleistet werden.

Die heute schon aktiven industriellen Forschungs- und Entwicklungsnetzwerke sollten auch zukünftig aktiv genutzt werden (z. B. FAT, FVA, FVV).

1.6 Empfehlungen an die Bundesregierung

Institutionalisierung der Planung, Bewertung, Lenkung und Ausführung von E-Mobilitätsprojekten

- Implementieren unkomplizierter F&E Förderung (einheitliche Formalitäten)
- Schaffen einer Koordinierungsstelle der deutschen Industrie für die Betreuung der E-Mobilitäts-Aktivitäten
- Schaffen einer Stelle, die alle geförderten E-Mobilitätsprogramme verwaltet (ähnlich NOW)
- Stetiger Abgleich und Gestaltung der europäischen Programme
- Stabile und kontinuierliche (auch ideelle) Unterstützung der E-Mobilität

Aktive Unterstützung in der Markthochlaufphase

- Programme zur Steigerung der Marktnachfrage (Flotten), Elektrifizierung des Fuhrparks von Fahrzeugen des öffentlichen Dienstes
- Förderung von produktnaher Entwicklung (Förderbedingungen)
- Investitionsförderung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglichen

Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für die E-Antriebsprodukte im Markt

- Klärung der Zulassungsbedingungen für E-Fahrzeuge
- Implementierung der öffentlichen Infrastruktur
- Programme zur Kompensation der anfänglichen Lücke in den Total Cost of Ownership
- Zügige Definition der gesetzlichen Rahmenbedingungen /Normen
- Besteuerung klären
- Standards/Normen/Gesetze jetzt definieren

Einrichtung von Kompetenzzentren für Elektro-Antriebssysteme

- Bis zu drei Zentren von Uni bis zur Industrie in Deutschland (analog der Elektrochemie Kompetenzverbunde Nord und Süd).
- Ein Deutsches Zentrum „Low Cost ist High Tech“.

Das Aufsetzen von Leuchtturmprojekten zur Bündelung der E-Mobilitäts-Anstrengungen und der vorgeschlagenen Einzelprojekte unter Mitnutzung der Instrumente der industriellen Gemeinschaftsforschung.

ANHANG: Übersicht aller Einzelprojekte

Systemintegration

- Startergenerator
- Optimierung des Getriebe-E-Motor-Verbunds (Baukastensystem)
- Hochintegrierte Antriebssysteme
- Entwicklung von Range-Extender (kostengünstige Vergrößerung der Reichweite)
- Ganzheitliches Thermomanagement
- On-Board-Ladetechnologie im Fahrzeug
- Standardisierung und Schnittstellendefinition
- Abdichtungskonzepte
- Ganzheitliches Energiemanagement
- Entwicklung und Optimierung von Systemmodellierungswerkzeugen
- Rekuperationsstrategien und -verfahren
- Neue Konzepte für das Bremssystem
- Energieoptimierte Fahrdynamikregelung
- NVH im Elektrofahrzeug
- Induktives Laden
- Energetisch optimierter Gesamtantrieb

E-Maschine

- Spezifikation der Aktivmaterialien und Erarbeitung von Testprozeduren
- Maßnahmen zur Reduktion des Magnetmaterials
- Forschung zum Ersatz Seltener Erden (SE)
- Alternative Motorkonzepte
- Entwicklung der Recyclingstrategien und -methoden für SE
- Neue, automatisierungsfähige Wickelverfahren
- Geberlose Rotorpositionsbestimmung
- Kenndaten Motorendiagnose inklusive Sensorik
- Wirkungsgradoptimale Steuerverfahren
- Neue Feldschwächverfahren
- Alternative Gehäuse- und Lagerschildmaterialien
- Optimierte Lagerkonzepte
- Komponentenintegration
- Geberintegration in das Kugellager
- Entwicklung neuer Bandagekonzepte
- Optimierung der E-Maschinenkonzepte
- Magnetkreistopologien
- Analyse/Synthese neuer Isolierkomponenten
- Neue weichmagnetische Materialien
- Entwicklung alternativer Maschinenkonzepte (inklusive Getriebe)
- Erarbeitung von Simulationstools und Modellen (für die Abbildung der Verluste, Schwingungen, FE, Streuung, ...)
- Kopplung zwischen elektromagnetischen und thermischen Simulationen
- Automobilgerechte Kühltechnologien für hochausgenutzte Maschinen

Leistungselektronik

- IGBT HT/SiC –Diode
- Low Loss IGBT
- Dünnwafer
- Neue Leistungsschalter (SiC, GaN)
- Leistungshalbleiter für höchste Leistungsdichten
- IGBT 1200/650V
- Gate-Treiber mit Isolation
- Single Core μ Controller mit extern. Watchdog
- Gate Treiber mit Diagnose
- Multi-Core Controller
- Multi-Core Topologien für Controller
- Passive Bauelemente für höchste Leistungsdichten
- Bauelemente für Standardtemperaturen
- Bauelemente mit Standard-Energiedichte
- Kondensatoren und Induktivitäten mit höherer Energiedichten und Temperaturstabilität
- Steckkontakte auf Cu Basis
- Gewichtsoptimierte Cu/Al Mischtechnologien
- Robuste Steckkontakte für höchste Leistungsdichten
- Modulare Gehäuse und Steckerkonzept (standardisiert)
- Werkstoffmodifikationen für reduzierte Relaxation
- Kleinste Übergangswiderstände
- Steckkontakte für Hochtemperaturen
- EMV gerechte Auslegung
- Kombinierte Schaltungsträger für hochintegrierte Leistungselektronik und höchste Leistungsdichten
- Robuste keramische Schaltungsträger mit hoher Zyklierfestigkeit
- In Leiterplatten integrierte Stromschienen
- Hochtemperaturstabile und kostengünstige Leiterplattensysteme
- Schaltungsträger DBC und AMB
- Dickkupfer Leiterplatten
- Leiterplatten für Standardtemperaturen
- Leistungsmodule mit erhöhter Temperaturfestigkeit
- Höchstintegrierte Leistungselektronik
- Diffusionslötten, Sintern, Cu-Bonden auf Leistungshalbleitern mit Cu-Oberflächen
- Lötten, Sintern, Bonden auf Standard-Halbleiteroberflächen
- Alternative Kontaktierverfahren (z. B. für die Anbindung peripherer Schnittstellen)
- Integration von aktiven, passiven Bauelementen und Leiterplatten
- Passive Bauelemente im Leistungsmodul
- Sensorik und Gate-Treiber im Modul
- Stressarmes Wärmemanagement für höchste Leistungsdichten
- Modul- und Bauelementkonzepte mit reduziertem thermischen Widerstand
- Materialien zur Reduktion des thermo-mechanischen Stresses
- Intelligent integrierte Kühlkonzepte
- Auf Kühlkörper gelötete und geklebte Module; Steuerelektronik im gekühlten Gehäuse
- In Motor integrierte Elektronik (Mechatronik)
- Inhärent störungsarme Leistungselektronik ohne Kompromisse bei Wirkungsgrad und Leistungsdichte
- Leistungsmodul am Motor
- Leistungsmodul als Teil der Elektronikbox

- Aufwand für EMV (Schirmung, Filter)
- Neue Regelverfahren: Kombination Antrieb / Getriebe / Bremse / Charger
- On board Diagnostics
- Hochintegrierte Elektronik mit gesamtheitlicher Regelung
- Sensorreduzierte Regelung und optimierte Pulsmusterverfahren / Softwarenahe Elektronik
- Systemsimulation: Fahrzeug / Motor / Elektronik / IC / Thermik / AVT
- Simulation der Einzelemente
- Verbesserte EMV_Simulation
- Modelle Lebenddauerprediktion

Produktionstechnik

- Hochautomatisierte Wickeltechnologien
- Net-Shape-Technologien für Spulenpakete
- Leichtbauübertragungselemente
- Net-Shape-Technologien für Hybridwerkstoffe
- Schneid- und Pakettiertechnologien für E-Bleche
- Technologien zur Sensor-Aktor-Integration
- Technologien zur Funktionsintegration (Thermomanagement)
- Skalierbare Automatisierung
- Produktionsintegrierte Prüftechnologien
- Stückzahlflexible Fertigungstechnologien

Verfasser:

Arbeitsgruppe 1 „Antriebstechnologie
und Fahrzeugintegration“
der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)

Redakteurin:

Dr. Josefin Meusinger
Koordinierungsstelle der Industrie für die
Nationale Plattform Elektromobilität
Referent und Koordinator Elektromobilität
Behrenstrasse 35
10117 Berlin

Herausgeber:

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität
der Bundesregierung (GGEMO)
Scharnhorststraße 34–37
10115 Berlin

Grafik/Design:

Theim Kommunikation GmbH
Carl-Thiersch-Str. 3
91052 Erlangen

Druck:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie