

Entwicklung und Einsatz eines Prüfsystems zur Funktions- und Eigenschaftsprüfung eines Hybridgetriebes

Prof. Dr.-Ing. **T. Bartsch**, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

Kurzfassung

Der Artikel beschreibt das Prüfobjekt, den Serienprüfstand mit Prüfsystem, den Entstehungsprozess des Prüfsystems, ausgewählte Funktions- und Eigenschaftsprüfungen des Hybridgetriebes sowie die Flashprozesse zum Konditionieren des Getriebesteuergeräts vor und nach der Funktionsprüfung.

1. Prüfobjekt - Hybridgetriebe AHS-C

Das Prüfobjekt ist das erste Hybridgetriebe der Daimler AG. Es trägt die Bezeichnung Advanced Hybrid System - Car (AHS-C) und basiert auf einem Automatikgetriebe mit 3 Planetensätzen und 2 leistungsstarken Elektromotoren. Das Hybridgetriebe besitzt 4 feste und 2 variable Übersetzungsverhältnisse [1]. Die variablen Übersetzungsverhältnisse des Planetengetriebes werden über die unterschiedlichen Drehzahlen der beiden integrierten Elektromotoren bestimmt. Die Elektromotoren sind als permanentmagneterregte Synchronmaschinen ausgeführt. Die Elektromotoren des Hybridgetriebes gestatten das elektrische Anfahren und Rückwärtsfahren des Fahrzeugs sowie den Gangwechsel zwischen den festen Gängen. Des Weiteren wird beim Beschleunigen der Boostbetrieb unterstützt. Beim Bremsen hingegen sorgt ein regeneratives Bremssystem dafür, dass Energie in der Batterie gespeichert wird.

Der Fahrgastwunsch, die Gaspedalstellung, wird nicht an das Motorsteuergerät gesendet, sondern an das Getriebesteuergerät. Die Funktionslogik des Getriebesteuergeräts berechnet, welches Drehmoment erforderlich ist, um den Fahrgastwunsch zu erfüllen und welches Drehmoment von den Elektromotoren aufgrund des Ladezustandes der Batterie bereitgestellt werden kann. Die Drehmomentdifferenz wird als Sollwert an das Motorsteuergerät gesendet. Das Motorsteuergerät steuert den Verbrennungsmotor so, dass er das erforderliche Motordrehmoment an der Antriebswelle des Getriebes bereitstellt.

Die Leistungsdaten des Getriebes sind:

- Eingangsdrehmoment $M_E = 600 \text{ Nm}$
- Eingangsdrehzahl $n_E = 6500 \text{ min}^{-1}$

- Ausgangsdrehmoment $M_A = 2450 \text{ Nm}$
- Ausgangsdrehzahl $n_A = 7600 \text{ min}^{-1}$

Die Abb. 1 zeigt eine 3D-Ansicht des Hybridgetriebes.

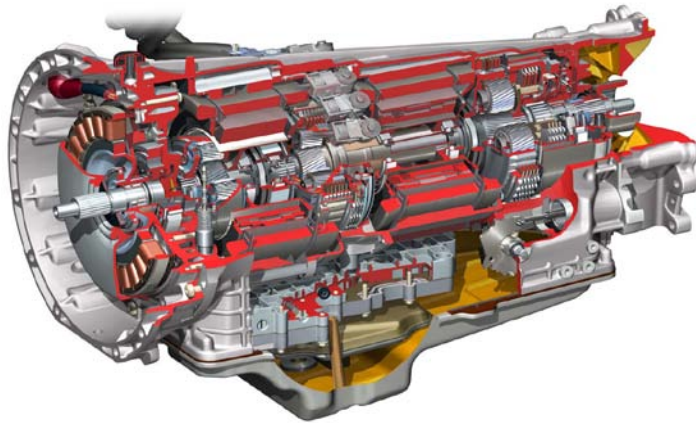


Abb. 1: 3D-Ansicht des Hybridgetriebes

Das Hybridgetriebe besitzt weitere Komponenten, die für Sicherheitsfunktionen und die Funktionen des Übertragens und Wandeln von Drehzahlen, Bewegungsrichtungen und Drehmomenten notwendig sind und bei der Funktions- und Eigenschaftsprüfung berücksichtigt werden müssen.

Das sind:

- Direktschaltmodul zum Einlegen der Parksperre ins Parksperrenrad
- Flügelzellenpumpe mit Elektromotor zum Erzeugen des Arbeitsdruckes der Elektrohydraulischen Schaltplatte
- Elektrohydraulische Schaltplatte zum Wandeln der Stromsignale des Getriebesteuergeräts in Drucksignale, die an den Lamellenkupplungen wirksam werden
- Getriebesteuergerät mit Funktionslogik
- Thermistoren zum Messen der Wicklungstemperatur der Elektromotoren
- Resolver zur Winkellagemessung der Läufer der Elektromotoren

2. Serienprüfstand

Die Anforderungen an das Prüfsystem und den Serienprüfstand für das Hybridgetriebe wurden in [2] spezifiziert. Aufgrund einer auf 6 Steuergeräte verteilten komplexen Funktionslogik war es die Zielsetzung, das Hybridgetriebe in einer fahrzeugnahen Betriebsart in der Prüfstation zu betreiben und zu prüfen.

Der Serienprüfstand besteht aus 4 Stationen, die über ein Rollenband verkettet sind.

Die 4 Stationen sind:

- Beladestation,
- Vorstation,
- Prüfstation,
- Entladestation.

Die Abb. 2 zeigt eine 3D-Ansicht des Serienprüfstandes.

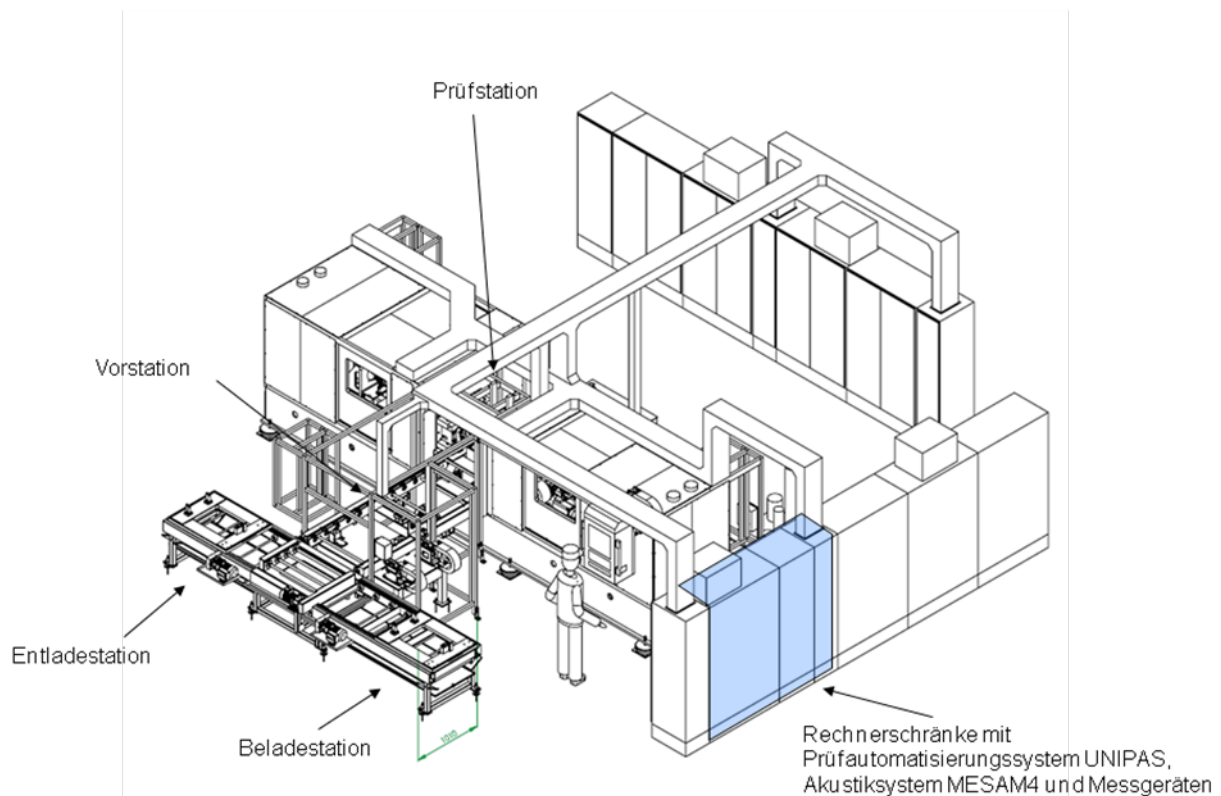


Abb. 2: 3D-Ansicht des Serienprüfstandes

Alle Transportvorgänge innerhalb des Serienprüfstandes sowie die Auf- und Abrüstvorgänge der Vor- und Prüfstation werden von einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vollautomatisch gesteuert. Hingegen sind die Tätigkeitsfolgen an der Belade- und Entladestation teilautomatisiert. Auf- und Abrüstvorgänge am Getriebe werden vom Bediener manuell ausgeführt.

Zur Ablaufsteuerung

- des Kalibrierprozesses des Direktschaltmoduls,
- des Flashprozesses des Getriebesteuergerätes vor und nach der Funktionsprüfung sowie
- der Funktions- und Eigenschaftsprüfungen des Getriebes und seiner Komponenten

werden 2 Industrie-PCs, ein Geräuschanalysesystem und mehrere Messgeräte eingesetzt. Die Funktions- und Eigenschaftsprüfungen sowie die Beurteilungen der Prüfungen erfolgen vollautomatisch. Es entsteht ein objektives Prüfergebnis.

2.1. Beladestation

Die Abb. 3 zeigt das Hybridgetriebe in der Beladestation. Ein Bediener rüstet das Getriebe manuell auf einem Werkstückträger auf. Er schließt die werkstückträgerseitigen Anschlusskabel der Elektromotoren, den Sensorstecker und die Steuergerätestecker für das Getriebesteuergerät und das Direktschaltmodul am Getriebe an. Danach scannt er mit einem Lesegerät den Barcode des Getriebe ein, um das Getriebe an der Beladestation anzumelden und Informationen vom übergeordneten Produktionssteuerungssystem zu bekommen, welche Softwarestände zu flashen sind. Im Anschluss startet er den Kalibrier- und Flashvorgang per Taster, um das Direktschaltmodul zu kalibrieren und das Getriebesteuergerät mit dem Bootloader und der Funktionssoftware für die Prüfumfänge in der Prüfstation auszustatten. Das Startsignal geht über den Profibus zum Kalibrier- und Flash-PC. Dieser kommuniziert über CAN-Bus mit dem Direktschaltmodul und dem Getriebesteuergerät. Der Kalibrier- und Flashvorgang laufen vollautomatisch ab. Die Ergebnisse des Kalibrier- und Flashvorganges werden mit den Identdaten des Getriebe über die SPS an die nachfolgende Station weitergeleitet. Das Getriebe wird aus der Beladestation ausgeschleust und über das Rollenband zur Vorstation transportiert.

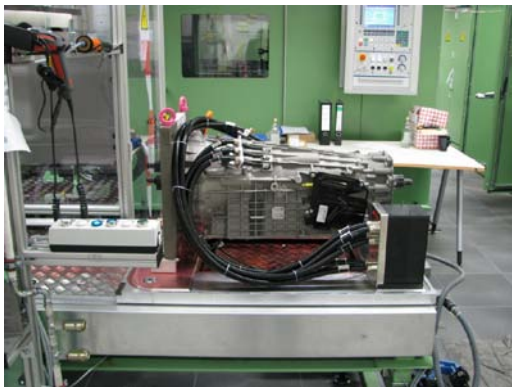


Abb. 3: Hybridgetriebe auf einem Werkstückträger in der Beladestation

2.2. Vorstation

In der Vorstation werden die elektrischen Eigenschaften der drei im Getriebe integrierten Elektromotoren geprüft. Das sind: Elektromotor A und B sowie der Motor P für die Flügelzellenpumpe. Diese Vorprüfung ist notwendig, da nur bei Gewährleistung der elektrischen

Eigenschaften der Elektromotoren eine erfolgreiche Funktionsprüfung des Hybridgetriebes in der Prüfstation in Aussicht steht.

Die Eigenschaftsprüfungen werden mit 2 Präzisionsmessgeräten durchgeführt. Sie werden über eine serielle und eine digitale Schnittstelle vom Prüfstandsrechner, auf dem das Prüfstandsautomatisierungssystem UNIPAS läuft, gesteuert.

Es werden folgende Prüfungen nach [3] bis [7] durchgeführt:

- Hochspannungsprüfung der Elektromotoren
- Isolationsprüfung der Elektromotoren
- Widerstandsprüfung der Wicklungen der Resolver der Elektromotoren
- Widerstandsprüfung der Temperatursensoren mit nichtlinearer Kennlinie

Die Prüfsequenz startet automatisch, sobald das Getriebe über den Werkstückträger mit den Messgeräten kontaktiert ist.

Die Prüfergebnisse der Messgeräte werden als Zahlenwerte und binäre Statuswerte - in Ordnung (IO), nicht in Ordnung (NIO) - über einen eigens entwickelten Messbus zum Prüfstandsautomatisierungssystem übertragen. Das Ergebnis der Eigenschaftsprüfungen wird am Bildschirm angezeigt. Im Fehlerfall werden detaillierte Einzelergebnisse visualisiert. Die Beurteilung mit entsprechender Zielvorgabe, wohin das Getriebe transportiert wird, erfolgt je nach Verkettungszustand manuell oder vollautomatisch durch den Prüfstandsrechner.

Bei „IO“-Beurteilung wird das Getriebe in die Prüfstation transportiert und dort vollautomatisch aufgerüstet. Bei „NIO“-Beurteilung und/oder Zielvorgabe „Nacharbeit“ wird das Getriebe zur Entladestation transportiert.

2.3. Prüfstation

In der Prüfstation erfolgen die Funktionsprüfung und die akustische Prüfung der hydraulischen, mechanischen und elektrischen Funktionseinheiten des Hybridgetriebes mit Hilfe des Prüfstandsautomatisierungssystems UNIPAS und des Geräuschanalysesystems MESAM4. Die Prüfstation ist der zentrale Teil des Serienprüfstandes.

Die Funktionsprüfung des Hybridgetriebes erfolgt nach vollständiger Montage des Getriebes ohne Ölwanne. Das vorgewärmte Getriebeöl wird dem Getriebe bei der Funktionsprüfung über eine externe Ölversorgung zugeführt. Alle Funktionsprüfungen werden im Teillastbetrieb durchgeführt.

Die Funktionsprüfung des Hybridgetriebes kann nur durchgeführt werden, wenn die integrierten Elektromotoren des Getriebes betrieben werden. Ohne das Betreiben der integrierten Elektromotoren kann weder das elektrische Anfahren noch können die Gangwechsel überprüft werden. Des Weiteren verwendet das Hybridgetriebe eine komplexe Funktions-

logik, die den Verbrennungsmotor zum Befehlsempfänger des Getriebes macht. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, dass das Hybridgetriebe fahrzeugnah in der Prüfstation betrieben wird. D.h. dem Hybridgetriebe wird ein Umfeld simuliert, sodass seine Steuerung alle Signale erhält, als ob das Hybridgetriebe im Fahrzeug eingebaut ist und dort betrieben wird. Das hat zur Folge, dass die Prüfstation mit ihrem elektrischen An- und Abtriebsmotor und das Prüfstandsautomatisierungssystem, um zahlreiche Komponenten erweitert werden müssen.

Als An- und Abtriebsmotor kommen zwei leistungsstarke Asynchronmotoren zum Einsatz. Dabei simulieren der Antriebsmotor der Prüfstation den Verbrennungsmotor des Fahrzeugs und der Abtriebsmotor der Prüfstation die Straße. Dementsprechend werden der Antriebsmotor der Prüfstation drehmomentregelt und der Abtriebsmotor drehzahlregelt.

Zusätzliche Komponenten sind:

- Power Electronic Box (PEB)
- rückspeisefähige Spannungsquelle zur Energieversorgung der Elektromotoren
- echtzeitfähige Restbussimulation
- eigenentwickelte USB-CAN-Bus-Controller
- Leistungsmessgerät

Die Power Electronic Box beinhaltet die Leistungselektronik der Elektromotoren des Hybridgetriebes sowie ein koordinierendes Steuergerät und die Steuergeräte für die Elektromotoren A, B und P. Diese Funktionseinheit des Fahrzeugs ist ortsfest an der Prüfstation installiert.

Falls es, aufgrund neuer Softwarestände, erforderlich ist, die Steuergeräte der Elektromotoren neu zu flashen, kann der CAN-Bus umgeschaltet werden. Der Flash-PC der Belaststation greift dann auf die Steuergeräte zu und versorgt diese mit dem neuen Softwarestand.

Das koordinierende Steuergerät stellt den Datenaustausch zwischen den Steuergeräten, die an 2 CAN-Bussen betrieben werden, sicher.

Die Power Electronic Box ist primärseitig mit der rückspeisefähigen Spannungsquelle und sekundärseitig mit den Elektromotoren A und B des Hybridgetriebes über den Werkstückträger verbunden. Mit Hilfe von Stromzangen lassen sich die Strangströme der Elektromotoren A und B messen. Diese werden dem Leistungsmessgerät zugeführt, um die Leistungsaufnahme und -abgabe der Elektromotoren während der Funktionsprüfung zu bestimmen.

Die rückspeisefähige Spannungsquelle simuliert die Fahrzeugbatterie in der Prüfstation und stellt die Energieversorgung der Elektromotoren sicher.

Die im Fahrzeug vom Batteriesteuergerät abrufbaren Informationen, wie z.B. Ladezustand, Kapazität, Temperatur, werden von der Restbussimulation bereitgestellt. Die rückspeisefähige Spannungsquelle wird über ein ansteuerbares Schütz im Primärkreis zugeschaltet.

Die echtzeitfähige Restbussimulation bildet die nicht vorhandenen Sensor-, Aktuator- und Steuergerätesignale der beiden CAN-Busse nach. Sie läuft während der Funktionsprüfung im Hintergrund auf dem Prüfstandsrechner.

Mit Hilfe eigenentwickelter USB-CAN-Bus-Controller erfolgt die Kopplung zwischen dem Prüfstandsrechner und den Steuergeräten der beiden CAN-Busse.

Die Funktions- und Eigenschaftsprüfung des Hybridgetriebes beinhaltet:

- Überprüfen des Arbeitsdrucks der Flügelzellenpumpe
- Kupplungstest mit Entlüftung
- Einlegen der Parksperre und Test der Parksperre unter Belastung
- Elektrisches Anfahren und Rückwärtsfahren
- Funktionstest aller Gänge mit Zug-Hoch- und Schub-Rückschaltungen
- Geräuschprüfungen in allen festen Gängen

Die binäre Beurteilung erfolgt vollautomatisch und objektiv durch den Prüfstandsrechner oder manuell und subjektiv durch den Bediener.

Das binäre Prüfurteil wird in Verbindung mit den Qualitätsmessdaten zur Rückverfolgbarkeit des Hybridgetriebes über den Lebenszyklus des Produktes in einer Datenbank auf einem Server abgelegt und zur Steuerung nachfolgender Produktionsschritte weiterverwendet. Bei „IO“-Beurteilung wird das Getriebe für den Versand vorbereitet. Bei einer „NIO“-Beurteilung wird das Getriebe in die Nacharbeit geschickt. In beiden Fällen wird das Getriebe auf dem Werkstückträger zur Entladestation transportiert.

2.4. Entladestation

In der Entladestation wird das Getriebesteuergerät geflasht sowie das Getriebe manuell abgerüstet und entladen.

Ein Getriebe, das mit einer „IO“-Beurteilung aus der Prüfstation kommt, wird jetzt geflasht. Dazu wird die Kennung abgefragt, für wen das Getriebe hergestellt wird. Abhängig von der Kennung wird das Getriebesteuergerät mit der aktuellen Daimler-Fahrzeugsoftware oder mit dem BMW-Bootloader ausgestattet. Im Anschluss werden Sach- und Teilenummern aus dem Getriebesteuergerät ausgelesen.

Die Ident-Daten des Getriebes werden mit dem Flash- und Prüfergebnis zum übergeordneten Produktionssteuerungssystem übertragen. Zum Gewährleisten der Rückverfolgbarkeit

jedes einzelnen Getriebes werden Informationen vom Produktionssteuerungssystem zur Produktlebenslaufakte übertragen und archiviert.

Das Getriebe wird nach dem Flashen des Getriebesteuergeräts manuell abgerüstet und entladen.

3. Entstehungsprozess des Prüfsystems

Nachfolgend wird der Entstehungsprozess des Prüfsystems mit seinen Etappen und Meilensteinen skizziert, um eine Vorstellung über die Zeitdauer der Grob- und Detailplanung, der Montage und Inbetriebnahme zu vermitteln. Die Abb. 4 gibt einen Überblick über die Projektetappen und Meilensteine.

Im Zeitraum von September bis November 2006 wurde das Lastenheft erstellt [2]. Es war die Planungsgrundlage für das Prüfsystem und die Grundlage für die Ausschreibung des Getriebeprüfstandes durch die Produktionsplanung. Zwischen Januar 2007 bis Februar 2008 erfolgte die Entwicklung des Prüfsystems. Diese Etappe war durch einen intensiven Austausch zwischen allen Projektbeteiligten gekennzeichnet, da die Grob- und Detailplanung des Prüfsystems und des Prüfstandes parallel zur Weiterentwicklung eines frühen Baumusters des Hybridgetriebes erfolgte.

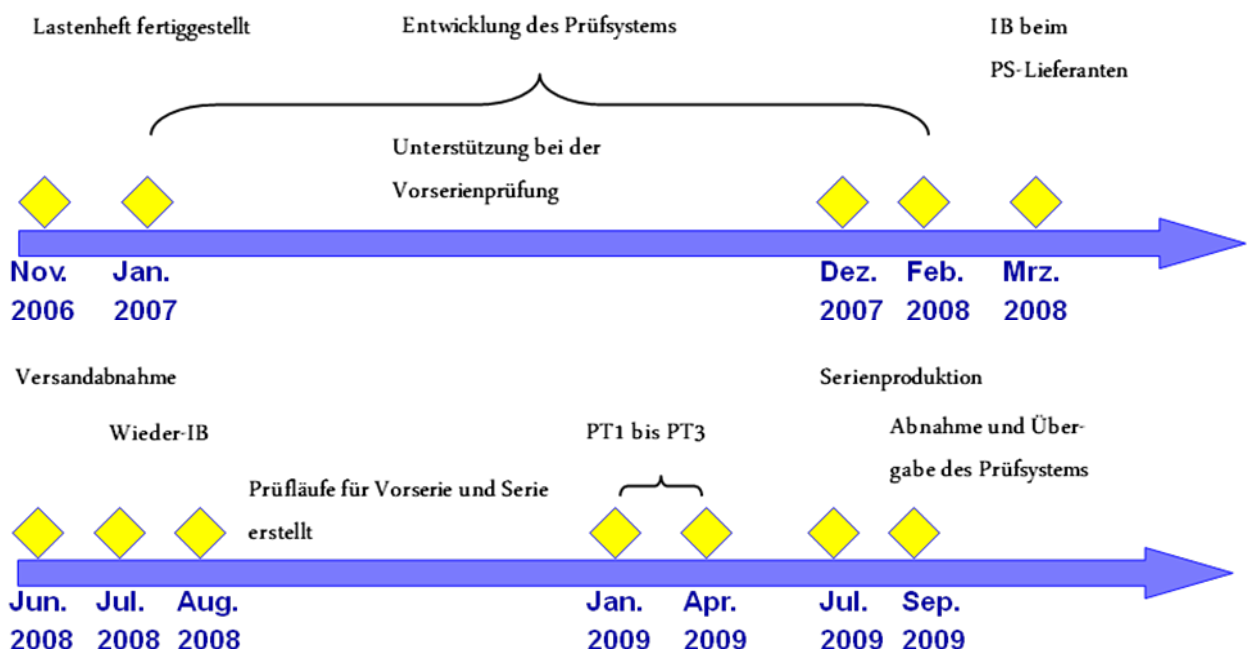


Abb. 4: Zeitstrahl des Projekts mit Meilensteinen

Es wurden Messverfahren entwickelt, die zur Vorserienprüfung in der Anlauffabrik und auf dem Entwicklungsprüfstand eingesetzt wurden. Sie lieferten Aussagen über den Reifegrad der Vorseriengetriebe und gaben der Getriebeentwicklung Informationen zur Verbesserung der Aggregate. Durch akustische Untersuchungen wurden geeignete Messorte für die Position der Körperschallsensoren am Getriebe ermittelt. Sie wurden für die Serienprüfung wiederverwendet.

Für die Anlauffabrik wurde ein Verfahren zur Isolations- und Widerstandsprüfung der 3 Elektromotoren und Resolver während der Getriebemontage entwickelt und in einer Prüfeinrichtung umgesetzt.

Zur Prüfung des Direktschaltmoduls, welches zum Einlegen der Parksperre verwendet wird, wurden ein Kalibrier- und Prüfverfahren sowie eine Prüfeinrichtung realisiert.

Im Zeitraum März bis Juni 2008 erfolgte die Inbetriebsnahme (IB) des Prüfsystems beim Prüfstandslieferanten, die mit einer Versandabnahme des Prüfstandes abgeschlossen wurde. In den Monaten Juli bis August 2008 fand die Wiederinbetriebnahme des Prüfsystems und des Prüfstandes am Einsatzort statt. Der Zeitraum August 2008 bis Januar 2009 wurde genutzt, um aktuelle Informationen über Änderungen am Getriebe zeitnah in die Prüfstandsautomatisierung umzusetzen. Es wurden Prüfläufe für 2 Vorserienstände und für den Serienstand des Getriebes erstellt. Im Zeitraum Januar bis April 2009 wurden die Produktionstests 1 bis 3 (PT) mit zunehmender Anzahl an zu montierenden und zu prüfenden Getrieben durchgeführt, um eine Aussage über die Prozesssicherheit der installierten Montage- und Prüfprozesse zu gewinnen. Im Juli 2009 startete die Serienproduktion des Hybridgetriebes AHS-C. Die Abnahme und Übergabe des Prüfsystems an den Produktionsbereich erfolgte im September 2009.

4. Zusammenfassung

Das Prüfsystem zur Funktions- und Eigenschaftprüfung des AHS-C-Hybridgetriebes während der Serienproduktion ist eine Erstrealisierung der Daimler AG. Das Prüfsystem und der Prüfstand wurden im Zeitraum 2007 bis 2009 entwickelt, errichtet und in Betrieb genommen. Das Projekt lieferte grundlegende technologische Erkenntnisse über den Umgang von Hybridgetrieben und ihren Komponenten unter Produktionsbedingungen sowie notwendige funktionale Erweiterungen des Prüfsystems für die Prüfstandsautomatisierung zukünftiger Hybridgetriebe.

[1] Bartsch, T.: Datenblatt des AHS-Getriebes, Arbeitspapier, Daimler AG, Stuttgart 2007

- [2] Bartsch, T., Eyssele, G., Fink, D., Diesenbacher, R., Krohn, N., Bühner, J. : Lastenheft zur Funktionsprüfung des AHS-Getriebes und zum Flashen der Steuergeräte-Software. Version 8, Daimler AG, Stuttgart 2006
- [3] DIN EN 60204-1: Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Sicherheit von Maschinen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen, November 1998
- [4] DIN 65092: Prüfung des Isolationswiderstandes und der Spannungsfestigkeit von elektrischen Geräten, November 1990
- [5] DIN EN 60060-3: Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 3: Begriffe und Anforderungen für Vor-Ort-Prüfung, August 2006
- [6] ISO 6469-3: Elektrische Straßenfahrzeuge - Sicherheitsspezifikation - Teil 3: Schutz von Personen gegen Gefahren, November 2001
- [7] DIN IEC 61557-1: Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, April 2005