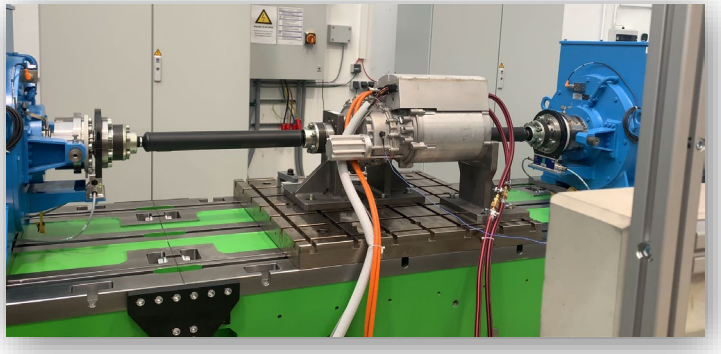
DHBW
Duale Hochschule
Baden-Württemberg
Stuttgart
Campus Horb

Validierungs- und Entwicklungsumgebung für leise Antriebseinheiten mit höchstem Wirkungsgrad und Schaltgetriebe für Elektrofahrzeuge (LeeAS)



Im Rahmen des kooperativen Forschungsprojekts zwischen der HFU Furtwangen, der DHBW Stuttgart Campus Horb und der KOEPFER Zahnrad- und Getriebetechnik GmbH aus Furtwangen wurden wirkungsgradoptimierte E-Antriebe für leichte Nutzfahrzeuge entwickelt, die sich durch eine Verringerung der Geräusche auszeichnen. Gleichzeitig wurden die dazu erforderlichen Entwicklungs- und Validierungsumgebungen geschaffen.

Mit den neu entwickelten Antrieben soll die Reichweite der Fahrzeuge vergrößert und damit die Umweltbelastungen durch einen geringeren Stromverbrauch oder kleinere Batterien vermindert werden. Die Geräuschverringerung von Antrieben reduziert zudem die gesundheitlichen Folgen der Mobilität.

Projektlaufzeit

11/2020 – 10/2025

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Joachim Grill
Tel.: 07451/521-133
j.grill@hb.dhbw-stuttgart.de

Projektförderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „FH-Kooperativ“

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

KOEPFER Group

HOCHSCHULE FURTWANGEN UNIVERSITY HFU

Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine durchgängige, modellbasierte Entwicklungs- und Validierungsumgebung für elektrische Antriebssysteme mit schaltbarem Getriebe aufgebaut und erfolgreich angewendet. Zentrales Ergebnis ist die konsistente Verknüpfung von Simulation, experimenteller Validierung und fahrzeugbezogener Bewertung über mehrere Systemebenen hinweg. Ein wesentliches wissenschaftlich-technisches Ergebnis stellt die entwickelte Modellkette dar, die eine durchgängige Beschreibung des Systemverhaltens von der Verzahnungsebene bis zur Gesamtfahrzeugebene ermöglicht. Die Kopplung von 1D-Systemsimulation mit 3D-Struktur- und Akustiksimulation erlaubt eine systematische Analyse von Anregungs-, Übertragungs- und Abstrahlmechanismen.

Ein weiterer zentraler Beitrag ist die experimentelle Validierung dieser Modelle auf Basis der im Projekt aufgebauten Prüfstandsinfrastruktur. Insbesondere der Antriebssystemprüfstand ermöglicht eine systemnahe Untersuchung elektrischer Antriebssysteme unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Ergänzend konnte durch den Verzahnungsprüfstand eine detaillierte Analyse auf Komponentenebene realisiert werden.

Ein weiterer wesentlicher Beitrag des Vorhabens ist der Aufbau einer leistungsfähigen und nachhaltig nutzbaren Forschungsinfrastruktur. Die realisierten Prüfstände bilden die zentrale Grundlage für die experimentelle Validierung sowie für zukünftige Forschungs- und Industrieprojekte.

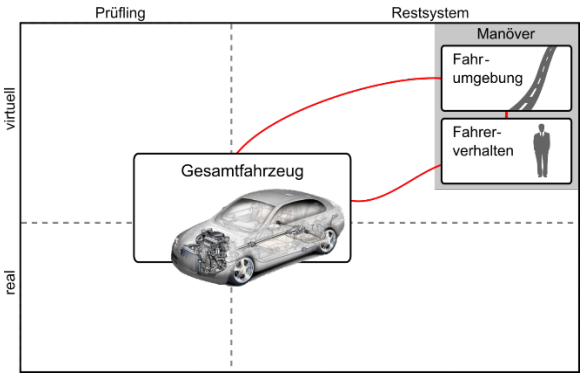


Abb. 1: Vehicle-in-the-Loop

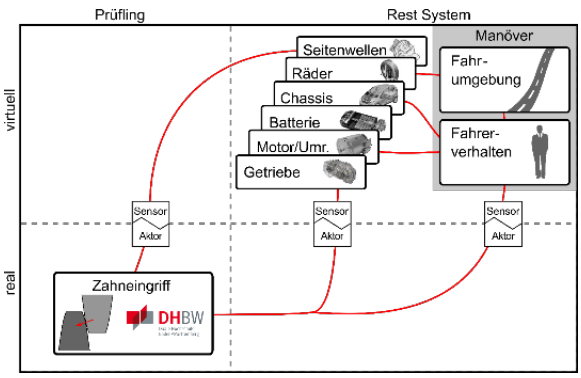


Abb. 1: Zahneigriff-in-the-Loop

Die Entwicklungsumgebung basiert auf einem Validierungskonzept mit mehreren Ebenen nach dem XiL-Ansatz (X-in-the-Loop). Dieses Konzept ermöglicht die Bewertung von Produkteigenschaften über verschiedene Entwicklungsstadien hinweg, ohne dass ein vollständiger Systemprototyp erforderlich ist. Die Validierungsebenen wurden systematisch aufgebaut und durch klar definierte Schnittstellen miteinander verknüpft. Die Validierung erfolgt auf vier definierten Ebenen

1. Gesamtfahrzeug
2. Motor-Getriebe-Einheit
3. Getriebe-Testumgebung
4. Zahneingriffsmodell

Die Validierungsarchitektur wurde ausgehend von der obersten Systemebene in einer Top-Down-Vorgehensweise entwickelt und in eine Umgebung mit vier Ebenen überführt. Der Schwerpunkt der Arbeiten an der DHBW Stuttgart Campus Horb betrafen hierbei die vierte

Validierungsebene. Die methodische Umsetzung der entwickelten Validierungsarchitektur erfolgte dann bottom-up. Die einzelnen Teilmodelle wurden schrittweise miteinander implementiert, miteinander verknüpft und sukzessive erweitert.

Für die experimentelle Validierung der Entwicklungsumgebung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes eine Prüfstandinfrastruktur aufgebaut, bestehend aus einem Antriebssystem- und einem Verzahnungsprüfstand. Auf dem Verzahnungsprüfstand können auf der Modellebene der Verzahnungen die zentralen Einflussgrößen auf Wirkungsgrad und akustisches Verhalten untersucht werden. Der Antriebssystemprüfstand ist die zentrale Plattform für die Untersuchung elektrischer Antriebssysteme. Die beiden Prüfstände wurden an der HFU aufgebaut und in Betrieb genommen. Für die beiden Prüfstände wurden im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene Verzahnungen gefertigt und damit die Validierung der Prüfstände durchgeführt. Die Auslegung der Verzahnungen und die Fertigung sowie Messung der Versuchszahnräder erfolgte an der DHBW.

Die Fertigung der Versuchszahnräder für die Prüfstände an der HFU erfolgte am Campus Horb der DHBW auf dem vorhandenen Fünfachsbearbeitungszentrum (Hermle C 22 U) und die Messung auf den vorhandenen Koordinatenmessgeräten (Mitutoyo). Die Versuchszahnräder wurden nicht durch eine CAD-CAM Schnittstelle durch Abzeilen sondern mit einem selbst entwickelten Bearbeitungsverfahren auf Basis des bekannten Teilwälzfräsen gefertigt. Bei einer Fünfachsbearbeitung werden in der Regel die CAD-Dateien der Zahnräder verwendet, um dann mit einem vergleichsweise kleinen Fräser die Flanken abzufahren. Dadurch resultieren zum einen lange Fertigungszeiten und zum anderen kann dies praktisch auch nur an relativ großen Modulen, d.h. großen Zahnrädern erfolgen bzw. im Falle der benötigten Versuchszahnräder mit extrem kleinen Fräserdurchmesser. Für die experimentelle Validierung wurde daher im Rahmen des Forschungsprojektes auch das Fertigungsverfahren für die Versuchszahnräder mitentwickelt. Dies betrifft im Forschungsprojekt die Stirnräder und die Kegelräder im Differential.

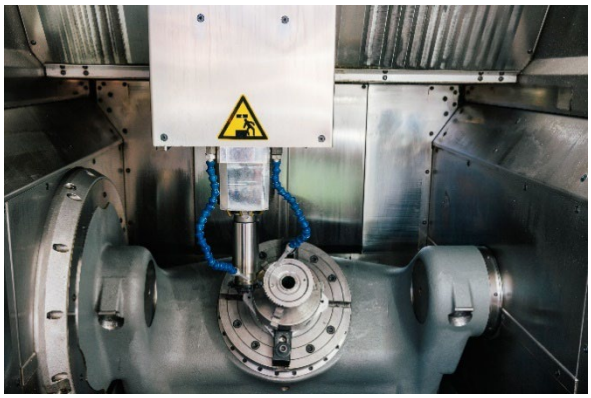


Abb. 3: Fünfachsbearbeitung bei einer Hermle C 22 U (C- und A-Achse)

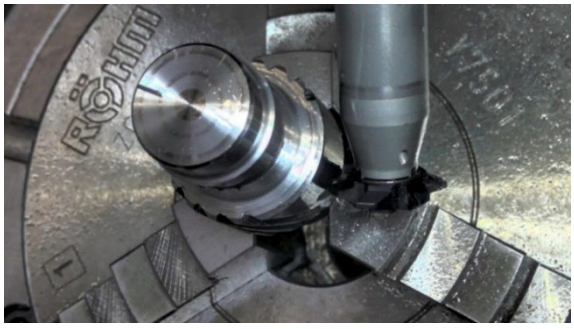


Abb. 2: Teilwälzfräsen mit einem Sonderfräser, Spannen mit Dreibackenfutter

Eine weitere Besonderheit bei der Zahnradfertigung am Campus Horb betrifft die Aufspannung der Werkstücke. Normalerweise werden hier für die einzelnen Werkstücke spezielle hochgenaue Aufspannungen verwendet, da die geforderten Genauigkeiten in der Zahnradfertigung sich im µm-Bereich bewegen, d.h. die Zahnräder speziell für Fahrzeuggetriebe stellen höchste Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit.
Am Campus Horb wurde dazu unter Anwendung von Industrie 4.0 Methoden Algorithmen und Software entwickelt. Statt in teure Hardware zu investieren, wird durch intelligente Messstra-

tegien im Bearbeitungszentrum und entsprechender spezieller Software die Kinematik des Bearbeitungszentrums so berechnet und korrigiert, dass die Abweichungen durch ungenaues Spannen der Werkstücke kompensiert werden. Dadurch können Aufspannmittel verwendet werden, z.B. ein übliches Dreibackenfutter für grobe Dreharbeiten, welche sonst niemals für eine vernünftige Zahnradfertigung in den geforderten Genauigkeiten verwendet werden könnten.

Am Campus Horb wurden Koordinatenmeßmaschinen (KMG) der Firma Mitutoyo verwendet. In der Regel werden spezielle Verzahnungsmeßmaschinen verwendet oder es wird spezielle Software zur Verzahnungsmessung auf KMG angeboten. Die am Markt vorhanden Meßsoftware erlaubt aber oftmals nur Messungen von Normverzahnungen, Sonderverzahnungen oder auch Sonderwerkzeuge für die Zahnradfertigung können damit nur schwer oder gar nicht gemessen werden. Aus diesem Grunde erfolgte auch die Messung der Zahnräder mit speziellen am Campus Horb entwickelten Methoden. Mit der selbst entwickelten Software wurden dazu Messdateien erzeugt. Diese konnten mit eigens entwickelten Programmen auf der Messmaschine eingelesen werden und damit konnte die Messung der Zahnräder erfolgen. Die Messergebnisse wurden wieder in einer Datei gespeichert und die Auswertung nach den üblichen Methoden in der Verzahnungsmessung erfolgte wieder in der selbst entwickelten Software. Damit konnten auch die entwickelten Sonderverzahnungen und die Sonderwerkzeuge vermessen werden. Die üblichen Messmethoden für Standardverzahnungen wurden dann auf die Sonderverzahnungen entsprechend erweitert.

Im Vorhaben wurde gezeigt, dass die Wechselwirkung von Geräusch und Wirkungsgrad für das Gesamtsystem im Wesentlichen durch den Verzahnungseingriff dominiert wird und diese Wechselwirkungen bei der Verzahnungsauslegung berücksichtigt werden können. Die entwickelten Modellierungs- und Simulationsmethodik wurde erfolgreich durch eine Kombination aus experimentellen Untersuchungen auf Komponenten- und Systemebene abgesichert werden. Die im Vorhaben gewonnen Erkenntnisse liefern konkrete Ansatzpunkte für die Auslegung elektrischer Antriebssysteme mit schaltbarem Getriebe. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag hierbei auf der Analyse und Bewertung von Verzahnungen sowie deren Einfluss auf Wirkungsgrad, Schwingungsverhalten und akustischen Eigenschaften. Insbesondere wurde deutlich, dass Maßnahmen auf Verzahnungsebene direkte Auswirkungen auf das Systemverhalten haben und daher nicht isoliert betrachtet werden können.

Während der Dauer des Forschungsvorhabens zeigte sich, dass die Entwicklung im Bereich der E-Mobilität zunehmend in die Richtung einer integrierten, modellbasierten Systemauslegung verschiebt. Insbesondere die Kombination aus simulationsgestützter Entwicklung, experimenteller Validierung und der frühzeitigen Berücksichtigung akustischer Eigenschaften gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ein Treiber für diese Entwicklung ist sicherlich auch die zunehmende Verkürzung der Entwicklungszeiten, auch bei europäischen Fahrzeugherstellern, die getrieben wird von den kürzeren Entwicklungszeiten z.B. von chinesischen Fahrzeugherstellern.
Aufgrund der steigenden Drehzahlen der E-Antriebe treten die Schwingungs- und Geräuschprobleme (NVH) noch verstärkter in den Vordergrund. Eine Optimierung kann bei Fahrzeugen bereits heute und künftig noch weniger ausschließlich auf der Teileebene erfolgen, sondern muss auf Grund der komplexen Zusammenhänge immer mehr durch systemübergreifende Ansätze erfolgen.

Insgesamt bestätigen die beobachteten externen Entwicklungen die Bedeutung und Relevanz der im Forschungsprojekt untersuchten Fragestellungen.