

Parametrierung und Optimierung eines Fahrreglers mittels virtuellem Antriebsstrangprüfstand

M.Sc. Jan-Michael Veith, M.Sc. Jannes Schilling

Antriebsprüffeld
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
71287 Weissach
jan-michael.veith@porsche.de
jannes.schilling2@porsche.de

Abstract: Heutzutage kann ein Großteil der Fahrzeugkomponenten und -funktionen, welche nicht am Prüfstand real aufgebaut sind, durch Simulationsmodelle realitätsnah abgebildet werden. Damit können komplexe Fahrmanöver am Prüfstand dargestellt werden, um die Anzahl an Prototypenfahrzeugen reduziert zu können. Einen essenziellen Beitrag zur Qualität der Messergebnisse liefert die Simulation des Fahrers, bestehend aus Quer- und Längsregler. Grundlage für einen realitätsnahen Fahrregler bildet eine umfangreiche Parametrierung. Um diese Parametrierung vornehmen zu können, muss der Prüfstandsingenieur Wissen über die Dynamik des Gesamtsystems haben und ist damit auf einen aufgebauten Prüfling am Prüfstand angewiesen. Mit dieser Arbeit soll eine virtuelle Prüfstands Umgebung bereitgestellt werden, welche die Systemdynamik durch Antriebsstrangersatzmodelle im Vorfeld oder zu Beginn der Inbetriebnahme des Prüflautes abbildet. Die virtuelle Prüfstands Umgebung setzt sich aus den Simulationsmodellen der Realfahrtsimulation des Prüfstands und den Antriebstrangersatzmodellen zusammen. Diese werden physikalisch, datenbasiert (Maschinelles Lernen), oder hybrid modelliert. Das Training der datenbasierten Modelle beruht auf standardisierten Manövern, welche als Teil der Inbetriebnahme gefahren werden. Die virtuelle Prüfstands Umgebung ermöglicht eine Verkürzung der Inbetriebnahmezeit des Prüfstands, optimierte Parametersätze und bildet die Grundlage für die virtuelle Weiterentwicklung des Fahrreglers.

1 Einleitung

Die Automobilindustrie hat schon frühzeitig begonnen ihren Produktentstehungsprozess zu digitalisieren. Durch den Einsatz von Simulationen und virtuellen Werkzeugen können Funktionen und Produkteigenschaften bereits in einer frühen Phase der Entwicklung abgesichert werden. Zum einen bietet dies die Möglichkeit Innovationen und Produkte schneller auf den Markt zu bringen, zum anderen ermöglicht der Vorgang eine Reduktion der Prototypenfahrzeuge und damit auch der Entwicklungskosten. [SeR08]

Eine Verringerung der Prototypenfahrzeuge verlagert komplexe Fahrversuche von der Straße oder Teststrecke auf den Prüfstand. Im Fokus dieser Arbeit sind Fahrversuche der Antriebsstrangerprobung, daher werden im Folgenden Antriebsstrangprüfstände betrachtet. Um eine hohe Qualität der Messergebnisse – vergleichbar zu realen Fahrversuchen – zu erreichen werden am Antriebsstrangprüfstand Umwelt-, Fahrzeug-, Reifen- und Fahrermodelle in Echtzeit gerechnet. Die linkslastige Entwicklung erzeugt höhere Anforderungen und Komplexitätsgrade jener Modelle. Daraus folgen zwei Herausforderungen für die Umsetzung neuer Fahrmanöver am Prüfstand. Erstens ist der Aufwand zu Parametrierung der Modelle mit wachsender Komplexität gestiegen, wodurch die Dauer der Inbetriebnahme des Prüfstands steigt. Neben dem Zeitverzug erzeugt eine längere Inbetriebnahme eine erhöhte Belastung des Prüflings vor dem geplanten Versuchsprogramm. Zweitens ist eine Validierung neuer oder weiterentwickelter Modelle nur mit einem am Prüfstand aufgebauten Antriebsstrang möglich. Um beide Herausforderungen zu adressieren, soll in dieser Arbeit ein virtuelle Prüfstandsumgebung für die Antriebsstrangerprobung entworfen werden.

In [BKB21] stellt BAUER eine Methode zur Abschätzung der Eignung eines Prüfstandes für die Erprobung von Komponenten mittels Lastkollektiven vor. Die Modellierung umfasst dabei die Radmaschinen, das Messsystem und die Steuerung des Prüfstandes. Die Grenzen des anhand von Prüfstandsmessdaten validierten Modells liegen in der Abbildung der Prüfstandsdynamik. SPECKERT stellt in [SDM05] ein Modell eines Achsprüfsystemkonzeptes vor, welches die Erprobung von Fahrzeugachsen mittels Lastdaten durchführt. Dieses dient zum einen zur Entwicklung des Prüfstandes, um geometrische Konfigurationen oder Regelkonzepte zu optimieren, zum anderen zur Abschätzung der Machbarkeit von Erprobungen in der Prüflaufvorbereitung. Einen Ansatz zur Modellierung eines Antriebsstrangprüfstandes auf Basis des Baukastenprinzips ist in [WPH21] dargestellt. Dabei können von einzelnen Komponenten bis zum gesamten Prüfstand alle realen Bestandteile virtuell ersetzt werden. Die in dieser Arbeit entworfene virtuelle Prüfstandsumgebung soll sich durch den Entwurf von Antriebsstrangersatzmodellen mittels künstlicher Intelligenz von den bisherigen Ansätzen unterscheiden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass zur Erstellung des Modells kein Wissen über die Systemeigenschaften des Antriebsstrangs vorhanden sein muss, da der Algorithmus diese Zusammenhänge erlernt. Weiterhin forciert die Arbeit die Parametrierung eines virtuellen Fahrers in der Simulation und die Übertragung der Parameter auf den realen Prüfstand.

2 Die virtuelle Prüfstandsgebung für die Antriebstrangerprobung

Die grundlegende Idee der virtuellen Prüfstandsgebung besteht darin, die vorhandenen Echtzeit-Simulationsmodelle des Prüfstands mit einem Modell der Radmaschinen zu kombinieren und mit einem Antriebstrangersatzmodell den am Prüfstand real vorhandenen Prüfling abzubilden. Im folgenden Kapitel wird zuerst der betrachtete Prüfstandstyp und dessen Regelungsart eingeführt. Danach wird die Verschaltung der Modelle und Regler zur virtuellen Prüfstandsgebung erläutert. Abschließend werden die betrachteten Antriebstrangersatzmodelle vorgestellt.

2.1 Antriebstrangprüfstand in der Regelungsart Steigung-Geschwindigkeit

In dieser Arbeit werden Antriebstrangprüfstände betrachtet. Diese bestehen üblicherweise aus einem Antriebstrang (wahlweise Front-, Heck- oder Allradantrieb) als Prüfling, zwei oder vier Radmaschinen (auch Prüfstandsmaschinen, Bremsen oder Dynos genannt), einem Automatisierungssystem, einem Messtechniksystem und Anlagen zur Konditionierung. Die mechanische Schnittstelle zum Prüfstand stellen die Antriebswellen dar. Die betrachtete Regelungsart, in der der Prüfling betrieben wird, ist Steigung-Geschwindigkeit [GNK00]. Hierbei wird eine Sollgeschwindigkeit vorgegeben, welche ein Fahrregler mithilfe der Steuergrößen *Fahrpedal* und *Bremsverzögerung* einregelt. Im Automatisierungssystem läuft in Echtzeit ein Fahrzeugmodell (inklusive Reifenschlupfsimulation), welches unter anderem den Istwert der Fahrzeuggeschwindigkeit errechnet und ein Umweltmodell, welches in Abhängigkeit der vorgegebenen Steigung die Fahrwiderstände bestimmt. Die Radmaschinen bilden die Drehträgheit der Räder und Bremsscheiben ab (entweder simuliert oder real aufgebaut) und schließen so den Regelkreis, wie in Abbildung 1 dargestellt.

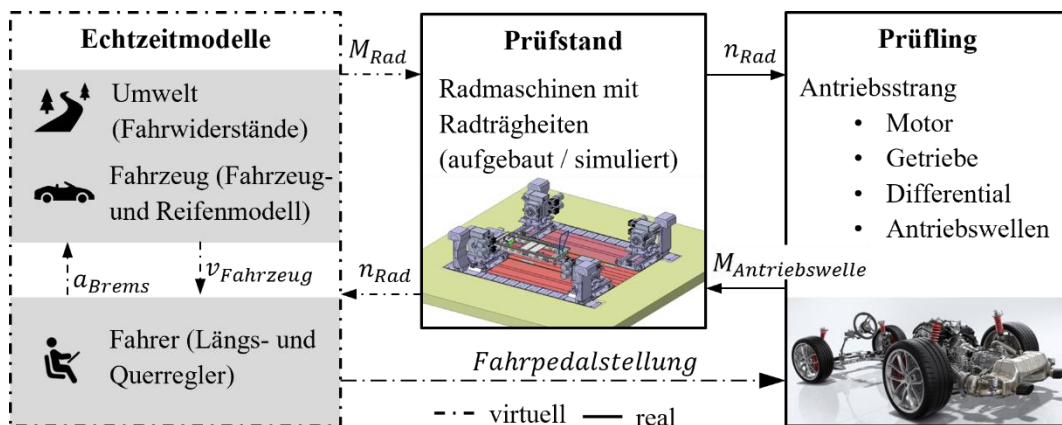


Abbildung 1: Antriebstrangprüfstand in der Regelungsart Steigung-Geschwindigkeit. Darstellung der Schnittstellengrößen für die Längsdynamik.

2.2 Aufbau der virtuellen Prüfstandsgebung

Von dem Antriebsstrangprüfstand werden die Umweltsimulation, die Fahrzeugsimulation und der Fahrer übernommen. Die Radmaschine wird durch ein idealisiertes elektrisches Modell (Ist-Drehmoment gleich Soll-Drehmoment) und deren Drehträgheit ersetzt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Der Prüfling wird durch verschiedene Antriebsstrangersatzmodelle abgebildet, diese werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

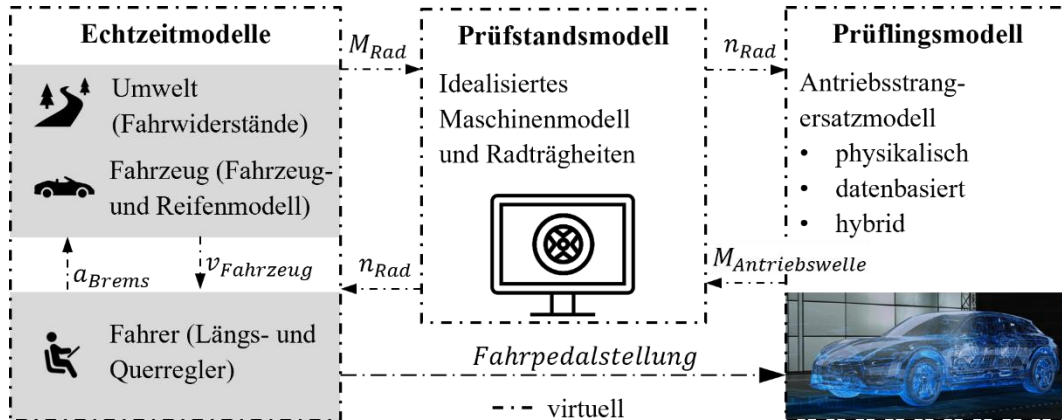


Abbildung 2: Aufbau des virtuellen Antriebsstrangprüfstandes. Darstellung der Schnittstellengrößen für die Längsdynamik.

2.3 Antriebsstrangersatzmodelle

Wie in Abbildung 2 dargestellt, sind die Eingangsgrößen des Antriebsstrangersatzmodells die Fahrpedalstellung (der Pfad der Bremsverzögerung wird in der Fahrzeugsimulation abgebildet) und die Raddrehzahlen. Ausgangsgrößen sind das Drehmoment an den Antriebswellen. In dieser Arbeit wurden vier verschiedene Ansätze untersucht:

- Datenbasiertes Modell (*datenbasiert*). Nutzung eines künstlichen neuronalen Netzes mit Long-Short-Term-Memory-Zellen [HoS97].
- Hybrides Modell, Training mit einem Manöver der Prüfstandsinnbetriebnahme (*hybrid_Man*). Kombination aus einem künstlichen neuronalen Netz analog dem datenbasierten Modell mit einem physikalisch modellierten Sperrdifferential mithilfe eines LuGre-Reibmodells [COA95].
- Hybrides Modell, Training mit einer halben Runde der Rennstreckenfahrt. (*hybrid_teil*). Analoger Aufbau zum Modelltyp *hybrid_Man*.
- Physikalisches Modell (*physikalisch*). Abbildung des Antriebsstrangs als Zweimassenschwinger.

3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden zuerst die Antriebstrangersatzmodelle (siehe Kapitel 2.3), danach das Teilsystem *Fahrzeug, Umwelt & Radmaschinen* und anschließend der Fahrregler hinsichtlich der Simulationsgüte bewertet. *Fahrzeug, Umwelt & Radmaschinen* wird als ein Teilsystem betrachtet, da die Simulationsmodelle *Fahrzeug* und *Umwelt* sowohl am Prüfstand als auch in der virtuellen Prüfumgebung verwendet werden. Zusätzlich soll der Einfluss der Simulationsgüte der Radmaschinen aufgrund deren idealisierter Modellierung nicht untersucht werden. Zur Bewertung der Teilsysteme der virtuellen Prüfstands Umgebung werden Simulationsdaten mit Messdaten, welche am Prüfstand erzeugt wurden (im folgenden *Prüfstandsmessdaten* genannt), mithilfe einer linearen Regression miteinander verglichen. Die Steigung der Ausgleichsgerade (möglichst 1) und das Bestimmtheitsmaß (möglichst 100 %) bilden hierbei die Gütekriterien. Anschließend erfolgt die Bewertung des virtuellen Prüfstands im Verbund mithilfe eines Gütekriteriums, welches ebenso Anwendung im Vergleich zwischen Prüfstands- und Fahrzeugmessungen findet.

3.1 Simulationsgüte der virtuellen Prüfstands Umgebung

Als Bewertungsgrößen der Teilsysteme der virtuellen Prüfstands Umgebung werden die Ausgangsgrößen der Teilsysteme an deren Schnittstellen gewählt (siehe Abbildung 2). Für das Antriebstrangersatzmodell sind das die Drehmomente an den Antriebswellen, wobei exemplarisch eine Fahrzeugseite betrachtet wird. Für *Fahrzeug, Umwelt & Radmaschinen* sind die Bewertungsgrößen die Fahrzeuggeschwindigkeit für den Längsdynamikteil des Fahrreglers und die Fahrzeugkrümmung für den Querdynamikteil des Fahrreglers. Da das Antriebstrangersatzmodell hauptsächlich die Längsdynamik beeinflusst, wird in der Ergebnisbewertung nur die Fahrzeuggeschwindigkeit betrachtet. Die Bewertungsgrößen des Fahrreglers für die Längsdynamik sind die Fahrpedalstellung und die Vorgabe der Bremsverzögerung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Da das datenbasierte Modell in allen Teilsystemen den anderen Modelltypen unterlegen war, sind dessen Ergebnisse nicht aufgeführt.

Gütekriterium zur Beurteilung der virtuellen Prüfstands Umgebung im Verbund ist die Abweichung der Rundenzeit von Simulationsdaten zu Prüfstandsmessdaten. Dieses Gütekriterium wird auch zum Vergleich von Prüfstandsmessdaten zu Fahrzeugmessdaten herangezogen. Als Richtwert dürfen 100 ms nicht überschritten werden. Zur Evaluierung wurden je drei Runden simuliert und mit drei Runden der Referenzmessung verglichen. Tabelle 2 zeigt neben der Abweichung der mittleren Rundenzeit bezogen auf die Referenzmessung die Standardabweichung der Rundenzeiten für die Referenzmessung und die drei betrachteten Modelltypen der Antriebstrangersatzmodelle.

Tabelle 1: Simulationsgüte der Teilsysteme der virtuellen Prüfstandsgebung. Hervorhebung des Modelltyps mit der höchsten Simulationsgüte je Teilsystem.

| Teilsystem | Bewertungsgröße | Modelltyp | Steigung lin. Regression [-] | Bestimmtheitsmaß [%] |
|------------------------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|
| Antriebstrangersatzmodell | Drehmoment Antriebswelle | hybrid_teil | 0,9793 | 94,23 |
| | | hybrid_Man | 0,9500 | 91,36 |
| | | physikalisch | 0,9422 | 91,86 |
| Fahrzeug, Umwelt und Lastmaschinen | Fahrzeuggeschwindigkeit | hybrid_teil | 0,9989 | 99,99 |
| | | hybrid_Man | 0,9921 | 99,98 |
| | | physikalisch | 0,9941 | 99,99 |
| Fahrregler | Fahrpedalstellung | hybrid_teil | 0,9999 | 100,00 |
| | | hybrid_Man | 1,0001 | 99,99 |
| | | physikalisch | 1,0000 | 99,99 |
| | Bremsverzögerung | hybrid_teil | 0,9944 | 99,66 |
| | | hybrid_Man | 0,9515 | 99,41 |
| | | physikalisch | 1,0040 | 99,41 |

Tabelle 2: Simulationsgüte der virtuellen Prüfstandsgebung. Hervorhebung des Modelltyps welcher das Gütekriterium *Rundenzeitabweichung* einhält.

| Modelltyp | Standardabweichung Rundenzeit [ms] | Abweichung der mittleren Rundenzeit [ms] |
|------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Referenzmessung</i> | 30,1 | - |
| hybrid_teil | 10,7 | 53,0 |
| hybrid_man | 21,7 | 872,7 |
| physikalisch | 4,6 | 589,0 |

3.2 Bewertung und Anwendbarkeit der Antriebstrangersatzmodelle

Insgesamt erzielt der Modelltyp *hybrid_teil* die beste Simulationsgüte in den Teilsystemen der virtuellen Prüfstandsgebung und das geforderte Gütekriterium *Rundenzeitabweichung* wird eingehalten. Für das Training des neuronalen Netzes müssen Prüfstandsmessdaten der Rennstreckenfahrt vorliegen, dies schränkt die Anwendbarkeit des Modelltyps ein. Der Modelltyp *hybrid_Man* nutzt ein Manöver zum Anlernen der neuronalen Netze des Modells, welches typischerweise bei der Prüfstands-inbetriebnahme gefahren wird. Dadurch kann der Modelltyp früher verwendet werden als

der Modelltyp *hybrid_teil*, erzielt aber schlechtere Ergebnisse. Die sehr große Abweichung bezüglich des Gütekriteriums *Rundenzeitabweichung* ist teilweise auch der Verfügbarkeit der Prüfstandsmessdaten geschuldet. Randbedingungen, welche die Leistung des Motors beeinflussen, waren während des Manövers und der Referenzrunde unterschiedlich. Das physikalische Modell erzielt ebenfalls eine gute Simulationsgüte in den Teilsystemen der virtuellen Prüfstandsumgebung, zeigt aber eine große Abweichung bei dem Gütekriterium *Rundenzeitabweichung*. Das liegt unter anderem daran, dass das Modell nicht mithilfe von Optimierungsverfahren mit den Prüfstandsmessdaten abgeglichen wurde. Da die mittlere Abweichung der Rundenzeit bezogen auf die Referenzmessung hoch ist, die Standardabweichung der simulierten Rundenzeiten aber sehr gering, ist dadurch eine Verbesserung Rundenzeitabweichung zu erwarten. Der Abgleich mit Prüfstandsmessdaten ist erst mit dem Vorhandensein von Prüfstandsmessdaten möglich, was die Anwendbarkeit des Modells einschränken würde. Insgesamt hängt die Auswahl des Modelltyps hauptsächlich von dem Zeitpunkt der Anwendung und dem Zweck der Untersuchung ab. Soll vor Inbetriebnahme des Prüflings am Prüfstand beispielsweise der Fahrregler parametrisiert werden, so kann nur das physikalische Modell verwendet werden. Ist die Zielstellung der Untersuchung eine schnelle Nachbildung der Ist-Situation am Prüfstand, so bieten sich datenbasierte oder hybride Modelle an.

3.3 Bewertung und Anwendung der virtuellen Prüfstandsumgebung

Mit dem Antriebstrangersatzmodelltyp *hybrid_teil* konnte das Gütekriterium *Rundenzeitabweichung* für die virtuelle Prüfstandsumgebung unterschritten werden. Dadurch lässt sich zeigen, dass die virtuelle Prüfstandsumgebung dafür genutzt werden kann, Messläufe des Prüfstands in einer Simulation nachzubilden. Die Ergebnisse des Antriebstrangersatzmodelltyps *physikalisch* zeigen erwartungsgemäß, dass die Simulationsgüte der virtuellen Prüfstandsumgebung ohne einen Abgleich mit den Prüfstandsmessdaten von der Qualität der Simulationsparameter abhängt. Insgesamt kann der Ansatz für die Weiterentwicklung (oder Fehlersuche) der Echtzeitmodelle oder des Fahrreglers genutzt werden.

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit wurde die Parametrierung des Fahrreglers bezüglich der Längsdynamik mithilfe der virtuellen Prüfstandsumgebung durchgeführt, die erzielten Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Prüfstandsmessdaten. In einem nächsten Schritt wurde der Bremspfad des Modellverbunds optimiert. Durch eine reifenschlupfabhängige Deckelung der Sollverzögerung a_{Brems} (siehe Abbildung 2) konnte ein parametrierbarer, maximal zulässiger Reifenschlupf während des Bremsvorgangs umgesetzt werden. Dieser Ansatz verhindert das Blockieren des Rads bei einem Bremsvorgang an der Rutschgrenze der simulierten Reifen. Die beiden Anwendungen zeigen, dass die virtuelle Prüfstandsumgebung für die Parametrierung und Optimierung des Fahrreglers genutzt werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene Antriebstrangersatzmodelle genutzt, um – zusammen mit denen im Prüfstand genutzten Simulationsmodellen des Fahrzeugs und der Umwelt, dem eingesetzten Fahrregler und einem idealisierten Modell der Radmaschinen – eine virtuelle Prüfstandsumgebung zu modellieren. Anhand des Vergleichs von Simulationsdaten mit Prüfstandsmessdaten wurde die Ergebnisqualität des virtuellen Prüfstands ermittelt. Betrachtet wurde hierbei das Fahren auf einer Rennstrecke mit einem Motorsportfahrzeug. Hierbei erzielte ein hybrides Antriebstrangmodell (datenbasiert und physikalisch) die besten Ergebnisse und konnte das geforderte Gütekriterium (maximal zulässige Abweichung der Rundenzeit zwischen Simulation und Prüfstand $< 100\text{ ms}$) unterschreiten. Mit der virtuellen Prüfstandsumgebung wurde der Fahrregler exemplarisch parametrisiert und weiterentwickelt. Zukünftige Untersuchungen sollten andere Testszenarien untersuchen. Hierbei ist der gemäßigte Betrieb eines Straßenfahrzeugs von Interesse, da dort eine andere Drehmomentcharakteristik des Antriebs zu erwarten ist als bei der Betrachtung eines Motorsportfahrzeugs auf der Rennstrecke. Des Weiteren wurden Teile der (Regel-) Strecke des Prüfstands (beispielsweise die Signalverarbeitung, aber auch die Radmaschinen und deren Umrichter) idealisiert modelliert. Im Betrieb besitzt dieser Regelkreis eine Stabilitätsgrenze, welche in dem virtuellen Prüfstand ebenfalls sichtbar werden muss.

5 Literaturverzeichnis

- [BKB21] BAUER, Lukas; KLEY, Markus; BAUER, Manuel: Modellbasierte Validierung der Prüfstandsdynamik zur Erprobung von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge mithilfe eines digitalen Zwillings. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021
- [COA95] CANUDAS DE WIT, C.; OLSSON, H.; ASTROM, K. J.; LISCHINSKY, P.: A new model for control of systems with friction. In: IEEE Transactions on Automatic Control 40 (1995), Nr. 3, S. 419–425
- [GNK00] GERMANN, Stefan; NONN, Harald; KOPECKY, Wolfgang; ABLER, Georg; WITTE, Lothar; XUAN, Hai Train; PFEIFFER, Michael; BRODBECK, Peter: Verfahren zum Simulieren des Verhaltens eines Fahrzeugs auf einer Fahrbahn
- [HoS97] HOCHREITER, S.; SCHMIDHUBER, J.: Long short-term memory. In: Neural computation 9 (1997), Nr. 8, S. 1735–1780
- [SeR08] SEIFFERT, Ulrich; RAINER, Gotthard: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008
- [SDM05] SPECKERT, C.; DREßLER, K.; MAUCH, H.; LION, A.; WIERDA, G. J.: Simulation eines neuartigen Prüfsystems für Achserprobungen durch MKS-Modellierung einschließlich Regelung. 2005 (Berichte des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM Report) 76)
- [WPH21] WIPFLER, Martin; PRESSL, Bernd; HAIDINGER, Thomas: Virtueller Prüfling zur effizienten Antriebsentwicklung und Funktionsabsicherung. In: MTZextra 26 (2021), S1, S. 30–35